



HAL
open science

Climatologie hivernale des versants alpins (Savoie) : types de temps, températures et vents. Analyse des données météorologiques des domaines skiables.

Christophe Chaix

► To cite this version:

Christophe Chaix. Climatologie hivernale des versants alpins (Savoie) : types de temps, températures et vents. Analyse des données météorologiques des domaines skiables.. Climatologie. Université de Savoie, 2007. Français. NNT: . tel-00193112

HAL Id: tel-00193112

<https://theses.hal.science/tel-00193112>

Submitted on 30 Nov 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de doctorat de Géographie

CLIMATOLOGIE HIVERNALE DES VERSANTS ALPINS (SAVOIE) :

TYPES DE TEMPS, TEMPÉRATURES ET VENTS

Analyse des données météorologiques des domaines skiables

Christophe CHAIX



Thèse soutenue le 09 novembre 2007

Composition du jury :

Pr. Alain MARNEZY	Université de Savoie	Directeur de thèse
Pr. Jocelyne GERARD	Université Saint-Joseph (Beyrouth)	Co-directrice
Pr. Jean-Pierre VIGNEAU	Université de Nanterre (Paris X)	Président du jury
Pr. Claude KERGOMARD	Ecole Normale Supérieure (Paris)	Examineur
Pr. Pierre CARREGA	Université de Nice	Rapporteur
Pr. Sylvain BIGOT	Université Joseph Fourier (Grenoble I)	Rapporteur
Philippe YVRANDE	Météo-France Savoie (Voglans)	Membre invité

RÉSUMÉ

En zone montagneuse, la variabilité des paramètres climatiques, notamment à l'échelle fine, reste mal connue. En effet, les conditions climatiques difficiles rencontrées dans la montagne hivernale ont toujours empêché une instrumentation systématique de la mesure des températures, de l'humidité relative ou encore du vent. Mais depuis l'avènement de la production de neige de culture dans les stations de sport d'hiver, on peut se servir des données météorologiques utilisées dans la gestion des canons à neige pour suivre le comportement de ces paramètres climatiques, grâce à un réseau très dense de sondes et d'anémomètres.

Cette thèse vise à exploiter les données obtenues grâce aux potentialités de ce nouveau réseau de mesure au travers des sites d'étude choisis, dans les Alpes françaises en Savoie (Les Menuires, Val Thorens, Aussois et Valloire).

Une analyse exploratoire et statistique des données permet de répondre en partie aux problématiques récurrentes de la climatologie hivernale de montagne, concernant notamment l'influence des échelles climatiques supérieures et du relief sur la variabilité spatio-temporelle des températures et du vent à échelle fine.

Fondée au préalable sur une classification des types de temps en Savoie, l'étude porte principalement sur le comportement moyen ou horaire des températures et leurs inversions, les gradients thermiques et le rôle des facteurs topographiques et des échelles climatiques sur la variation des paramètres locaux.

Un nouveau modèle de l'évolution des brises thermiques hivernales est proposé, avec la découverte de mécanismes encore non identifiés sur les brises catabatiques diurnes. Enfin, nous proposerons des applications concrètes pour la gestion des domaines skiables et de la neige de culture.

***Mots-clés** : température, vent, brise thermique, variation spatiale, échelle fine, type de temps, montagne, versant, hiver, Savoie, neige de culture.*

ABSTRACT

In mountainous area, the variability of the climatic parameters are still not well known at small scale. Indeed, the systematic measurements of temperature, humidity and wind's parameters are often restricted because of difficult climatic conditions, specially in winter. But since the production of artificial snow in the winters sports resorts began, it became possible to use the information of the very dense meteorological network of anemometers and probes installed for this purpose.

This Phd thesis aims at exploiting the data of French Alpine selected sites in the Savoie area (Les Menuires, Val Thorens, Aussois, Valloire).

A statistical and exploratory data analysis permit to answer the recurrent problematic of the mountain winter climatology, mainly the influence of the meteorological large scale and the mountain topography on the small scale spatial and temporal variability of temperature and wind.

This research deals with the hourly and winter means temperature behavior, their inversions, the thermal gradients according to the weather type classification of the Savoie area.

A new model of the evolution of the winter thermal breezes is proposed, after having identified diurnal katabatic breezes' mechanisms which were still unknown. Lastly, we propose real applications for the management of skiing areas and artificial snow.

Keywords: *temperature, wind, thermal breeze, spatial variability, small scale, weather type, mountain, slope, Savoie, artificial snow.*

ZUSAMMENFASSUNG

Im Berggebiet sind die Schwankungen der Klimaparameter besonders im kleinen Maßstab noch relativ unerforscht. Die schwierigen klimatischen Bedingungen, denen wir im Gebirge im Winter begegnen, haben tatsächlich seit jeher eine systematische Messeinrichtung für Temperaturmessungen, relative Feuchtigkeit oder für Wind verhindert. Aber seit dem Beginn der Herstellung von künstlichem Schnee in den Wintersportstationen können wir die meteorologischen Daten, die für den Betrieb der Schneeherstellung genutzt werden, um anhand eines sehr dichten Netzes von Sonden und Windmesser das Verhalten der oben genannten Klimaparameter zu verfolgen, zu Nutzen ziehen.

Diese Doktorarbeit will in erster Linie das Potential von jenem Netz von Sonden und zusammengeführten Datenbanken dank der gewählten Forschungsgebiete in den französischen Alpen der Savoie (Les Menuires, Val Thorens, Aussois et Valloire) erörtern.

Anschließend ermöglicht eine informatorisch statistische Analyse eine partielle Lösung der immer wieder auftretenden Problematik der Gebirgsklimatologie im Winter, und im Besonderen des Einflusses der oberen klimatischen Maßstäbe und des Reliefs der räumlich-zeitlichen Witterungs- und Windeschwankungen im kleinen Maßstab.

Nach einer zu Hilfe kommenden Klassifizierung der verschiedenen Wittertypen in der Savoie, bezieht sich die Studie hauptsächlich auf das durchschnittliche und zeitenabhängige Verhalten der Temperaturen und deren Inversion, die thermischen Druckgefälle und zu guter letzt auf den Einfluss der topographischen Faktoren und der Klimamaßstäbe auf die Veränderung der lokalen Parameter.

Ein neues Model der Entwicklung der thermischen Winterbrisen wird hier vorgebracht mit der Entdeckung von Mechanismen der katabatischen Tagesbrisen, die noch nicht genau identifiziert sind. Zuletzt schlagen wir konkrete Anwendungen für die Bewirtung der Skigebiete und der Schneeherstellung vor.

Schlüsselwörter: *Temperatur, Wind, thermische Brise, räumliche Veränderung, kleiner Maßstab, Zeittyp, Berghang, Winter, künstlicher Schnee.*

REMERCIEMENTS

Ce travail est tout d'abord une exploration fascinante de la complexité du monde qui nous entoure, et je tiens tout particulièrement à remercier les deux personnes qui m'ont permis d'effectuer cette étude : mon professeur **Alain Marnezy**, maire d'Aussois, qui s'est dit un jour « Tant de données qui ne servent à rien ! ». Il m'a fait confiance pour mener ce projet à son terme malgré les contraintes, un grand merci pour son aide, ses relectures, ses corrections. Je remercie aussi **Jean-Jacques Delannoy**, directeur du laboratoire EDYTEM, qui m'a poussé dans le monde de la recherche par l'entremise de ses cours de DEA, et qui m'a aussi beaucoup aidé pour trouver des financements. A un niveau plus conceptuel, je remercie fortement **Jocelyne Gérard**, qui partage avec moi la passion des courants d'air, et qui n'a pas compté ses heures pour relire et corriger mon travail. Sa gentillesse et ses compétences sont sans limite. Merci aussi à Jean-Michel Fallot pour ces conseils, Mickaël Berthelot pour son aide en statistique, et à Philippe Yvrande, directeur de Météo-France Savoie, pour son aide sur la classification.

D'un point de vue plus technique, je remercie grandement Michel Galvin et Nicolas Chiron de YORKNEIGE, pour la mise à disposition des données météorologiques et des informations sur le matériel, les directeurs des stations de ski pour l'accessibilité aux domaines skiables, les nivoculteurs des Menuires... Sans eux, pas de données ni de travail de terrain, donc pas de thèse... Au laboratoire EDYTEM, un grand merci à tous les doctorants avec qui j'ai passé d'excellents moments de complicité et de travail, dont en particulier Sylvain pour ses nombreuses aides, Anne, Anne-Sophie, François, Mélanie, Pierre et Rémy. Merci à Vincent pour l'informatique, à Renée pour sa complicité, et enfin merci à mon ordinateur portable qui n'a jamais flanché malgré le traitement impitoyable que je lui ai fait subir.

Je remercie aussi tous les organismes et les personnes qui m'ont permis en parallèle de trouver de l'argent pour financer ma thèse : la région Rhône-Alpes pour sa bourse «technique» très utile dans l'achat de matériel et élément fondateur de ma prise en charge par le laboratoire EDYTEM ; Alain Marnezy et le CISM pour les vacances et la place de demi-ATER en 2005-2006 ; le collège de St-Genis-sur-Giers et sa directrice ; la bibliothèque du Bourget de Lac et son directeur ; et enfin Jean-Jacques Delannoy pour son implication dans ma participation au projet du Plan Climat de la Savoie. Ces emplois ont eu parfois des rapports directs avec la thèse, et étant sûrement l'un des derniers spécimens d'une espèce en voie de disparition (un thésard sans financement), je suis aujourd'hui très heureux d'avoir pu travailler sur ce projet que j'ai mis en place dès la maîtrise. A posteriori, je trouve qu'il aurait été dommage de l'abandonner à cause d'un problème financier, et je dois même avouer que ces travaux «alimentaires» m'ont autant nourri l'estomac que l'esprit, cela constituant une belle expérience en soi.

Enfin merci Maria pour ta confiance et ton soutien sans faille, t'es un amour. Je pense aussi fort à mes parents, mes grands-parents, mes beaux-parents et tous mes ami(e)s.

« Les limites de la survie sont définies par le climat, dont la lente tendance au changement peut passer inaperçue d'une génération à l'autre. Et ce sont les extrêmes d'un climat qui définissent la Structure. Des humains isolés peuvent observer des provinces climatiques, des fluctuations du temps sur une année et, occasionnellement remarquer : « c'est l'année la plus froide que j'ai connue ». Ces choses sont perceptibles. Mais les humains sont rarement sensibles à la variation de la moyenne sur un grand nombre d'années. Et c'est précisément en développant cette sensibilité que les humains apprennent à survivre sur une planète. Ils doivent apprendre le climat ».

Franck Herbert,
Les enfants de Dune
1976

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	7
CHAPITRE I CONCEPTS ET MÉTHODOLOGIE	23
CHAPITRE II..... ESPACE D'ÉTUDES, ENNEIGEMENT ARTIFICIEL ET RÉSEAUX DE MESURES	41
CHAPITRE III..... CLASSIFICATION BI-SCALAIRE DES TYPES DE TEMPS HIVERNAUX SUR LA SAVOIE	77
CHAPITRE IV..... COMPORTEMENTS ET SPATIALISATION DES TEMPÉRATURES MOYENNES ET DU VENT	103
CHAPITRE V..... CLIMATOLOGIE HIVERNALE À ÉCHELLE FINE DES VERSANTS ET DES HAUTES VALLÉES ALPINES	163
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	251
BIBLIOGRAPHIE.....	263
ANNEXES.....	277
TABLE DES MATIÈRES.....	301

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1 - La climatologie hivernale de montagne

- Une science assez peu développée.

Les recherches climatologiques sur le milieu montagnard ont connu depuis un demi-siècle un essor important. De la Nouvelle-Zélande au Japon, des Alpes aux Rocheuses (USA), les études sur ce milieu complexe se sont multipliées mais restent assez marginales par rapport à d'autres domaines de la climatologie. L'approche aux échelles fines est encore plus rare, car la montagne est un milieu contraignant. Tout le défi réside bien sûr dans l'acquisition des données, ce qui est loin d'être évident à cause des conditions climatiques en montagne qui limitent toute étude exhaustive, surtout en hiver. On remarque en effet que la quasi-totalité des recherches n'ont pas été effectuées lors de cette saison.

La climatologie de montagne est une science «jeune», les ouvrages les plus récents sont les plus complets et actualisés. Citons par exemple l'oeuvre majeure de R. BARRY (1981) «Mountain weather and climate» rééditée en 1992, qui fait un point complet de ces problématiques. Les brises thermiques ont été étudiées dès 1840, mais seulement théoriquement (WHITEMAN C.D., 2003, 2). Il faut attendre les observations et les mesures possibles grâce aux nouvelles techniques pour avoir des modèles satisfaisants (DEFANT F., 1949). En France, «Les climats de montagne» de Jean LOUP (1979) édité à l'Institut de Géographie Alpine à Grenoble, est suivi par «La météo de montagne» de J.J. THILLET (1997), des livres accessibles au grand public. Auparavant, M. JAIL (1966) s'intéresse aux variations thermiques sur les versants, relayé par A. DOUGUEDROIT et M.F. de SAINTIGNON (1970) sur les gradients thermiques. Enfin E. CHOISNEL dans les années 1980, en relation avec l'agronomie, pose les bases pour les méthodes d'étude en milieu de montagne. Aujourd'hui, le travail de C.D. WHITEMAN autant dans l'approche générale que locale est une référence, ainsi que les travaux de P. MONTI *et al* (2002) ou encore G. RAMPANELLI *et al* (2004) sur les brises. Quant aux impacts du changement climatique en montagne, les références de M. BENISTON (1997 et 2000) sont à consulter. Il existe enfin de nombreux autres ouvrages que nous présenterons lors de cette étude.

De grands projets de recherche ont aussi été développés ces dernières décennies dans les grandes vallées aux Etats-Unis (ALPEX, ASCOT) pour l'étude des systèmes atmosphériques, mais aussi pour la pollution des vallées alpines françaises (POVA) ou encore dans le Fossé Rhénan avec l'expérience REKLIP. Signalons aussi l'expérience MAP (Mesoscale Alpine Programme) dont le but était de collecter une grande quantité de données au-dessus des Alpes, mais la majorité des résultats de ces recherches ne concerne pas les échelles fines des versants de montagne.

Météo-France a aussi contribué à l'étude de la météorologie montagnarde en France. Le travail des prévisionnistes (Voglans, Bourg-Saint-Maurice, Chamonix) permet de combler les carences des modèles qui s'adaptent mal aux zones de relief. Notons par exemple le recueil de fiches de P. SOUHAITE (1993) pour l'aide à la prévision du temps en hiver. Mais les problématiques des études de Météo-France ne concernent pas la climatologie aux échelles fines, et des stations de mesures de haute-montagne sont fermées pour cause de maintenance coûteuse.

Ces recherches restent donc lacunaires, compliquées techniquement, et la climatologie hivernale aux échelles fines semble largement délaissée.

- Les raisons de ces lacunes :

La climatologie est une science censée étudier l'ensemble des conditions caractérisant l'*état moyen* de l'atmosphère et sa variabilité dans un espace défini. La montagne (le relief) induit une anisotropie et une dimensionnalité de l'espace (volume, dénivelé, pente...), ce qui a pour effet principal de multiplier les phénomènes locaux, créés sur place ou nés de la transformation d'un phénomène de plus grande échelle. Les différents massifs, vallées, versants, augmentent la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques. Ainsi, il ne peut exister théoriquement qu'une climatologie montagnarde des échelles spatiales, de quelques kilomètres au maximum (topo-échelle) à l'échelle fine (micro-échelle), sans limite précise entre les deux. Dans les échelles supérieures, les variations sont trop importantes. **On peut donc dire qu'en montagne chaque climat est local.**

La compréhension précise des caractéristiques climatiques des régions montagneuses est donc limitée par le manque d'observations correctement réparties dans le temps et dans l'espace, mais aussi par l'insuffisance des études théoriques concernant l'interaction complexe des échelles spatiales des phénomènes météorologiques et climatologiques d'altitude. Jusqu'ici, on a eu tendance à axer la recherche météorologique sur les influences en amont et en aval des obstacles à l'écoulement et sur les effets orographiques des systèmes météorologiques plutôt que sur les microclimats de montagne. Pour qu'une projection climatique s'applique à des régions de montagne - comme d'ailleurs à toute zone d'échelle inférieure à celle d'un continent - soit significative, il faut considérer des processus agissant sur toute une gamme d'échelles allant de l'échelle locale à l'échelle planétaire. C'est la nécessité de coupler les échelles qui rend difficile la projection de l'évolution du climat en montagne. Il existe des techniques qui permettent de modéliser cette transition, mais **l'absence de données à l'échelle fine empêche une précision adéquate.**

Les phénomènes propres à la montagne et leur rapport avec l'orographie ne peuvent être suffisamment analysés et interprétés à cause de l'absence de mailles serrées des réseaux de mesures, les sondes étant souvent très espacées. Le faible nombre de postes de mesures existant en zone d'altitude - l'instrumentation restant difficile et onéreuse - ne permet donc pas d'approcher cette réalité fort diverse. **De plus, en hiver, les sites d'études sont souvent difficiles d'accès et les stations de mesures résistent mal aux conditions climatiques extrêmes.**

Pourtant, cette recherche est primordiale car les processus météorologiques des versants de montagne et la climatologie de ces espaces sont les activateurs de bon nombre de sous-systèmes, tous aussi importants dans la compréhension de la géographie des milieux de montagne (systèmes biologiques, géomorphologiques, humains...). D'un point de vue économique, avec l'importance des ressources offertes par le tourisme hivernal dans les domaines skiables en relation avec le manteau neigeux, une approche beaucoup plus ciblée des phénomènes devient indispensable, intégrant des problématiques à échelle locale. Les inversions de températures et les gradients thermiques, les variations des températures dans une vallée ou sur un versant, les

brises thermiques, le foehn, les effets de l'orographie et d'autres facteurs (forêt, bâti, neige, sol...) : autant de phénomènes propres à la montagne qui restent finalement assez obscurs mais dont la compréhension est capitale.

Les données offertes par le réseau de Météo-France ne permettent pas une approche locale suffisante pour vérifier comment varient les paramètres comme les températures, l'humidité ou le vent à échelle fine. La majorité des stations de mesures sont situées dans les fonds de vallées des grandes vallées alpines ou en plaine, et très peu sur les versants. Cela ne peut être représentatif de la complexité des climats de montagne.

- L'étude des climats hivernaux de montagne connaît donc deux grandes contraintes :
- La complexité du système climatique, du relief et de leur relation.
 - Les difficultés techniques de l'instrumentation liées aux caractéristiques du milieu.
- Une approche globale pour des questionnements locaux.

Dans le cas où un problème local fait intervenir plusieurs systèmes complexes - ici le climat, la montagne et les sociétés humaines – il est indispensable de pouvoir le considérer comme le résultat de multiples interactions qui se développent dans le temps et dans l'espace. D'où la nécessité de mettre en relation les différents facteurs que l'on a pu distinguer comme constituant du problème. L'approche globale est donc nécessaire dans la compréhension de l'évolution d'un fait local : celui-ci reste principalement déterminé par ce qui le précède, c'est-à-dire par des phénomènes dont le développement s'effectue à des échelles supérieures. Il existe bien des rétroactions entre la micro-échelle et la macro-échelle, mais celles-ci sont encore mal connues, et n'interviennent que dans des cas de déplacements chaotiques. En montagne, le rôle du relief est très important car il modifie la relation entre les échelles du climat, en apportant des mouvements différenciés dans l'atmosphère, mais sans pourtant détruire ses lois physiques. Ensuite, chaque lieu en montagne est unique, et ne peut être comparé à un autre. Ainsi, lorsque l'on doit essayer de caractériser un topoclimat ou un microclimat, on doit avoir conscience de deux principes : son existence, fruit d'une multitude d'interactions entre les éléments du climat, le relief, l'écologie, l'hydrographie, les activités humaines, et leur construction à différentes échelles spatio-temporelle, est unique ; ces interactions, enchevêtrées dans un système complexe, n'agissent pas qu'au niveau local, mais correspondent généralement à des conséquences de l'évolution macroscopique de ces mêmes systèmes.

Toute la problématique réside donc dans cette approche multi-scalaire : pour caractériser les comportements climatiques en milieu de montagne à échelle fine, en rapport direct avec le contexte socio-économico-écologique, il nous faut combler une carence dans les mesures des paramètres atmosphériques dans les vallées alpines, sur les versants, en haute montagne, et particulièrement en hiver.

Or, avec le développement des domaines skiables, il est apparu depuis plus d'une vingtaine d'années des mesures qui sont justement situées à ces échelles. Jamais exploitées par les chercheurs du fait de leur «confidentialité», elles constituent une banque de données originale et massive : ce sont les mesures des sondes des installations d'enneigement artificiel

*des stations de sports d'hiver.***2 - Les données météorologiques des installations d'enneigement artificiel**

- De la neige de culture aux données météorologiques.

Une activité de montagne prime sur toutes les autres : le tourisme. Cette forme de commerce s'est massivement développée depuis les années 1960 grâce à la conjonction de multiples facteurs (augmentation des temps de loisirs, de la pratique du sport, et du niveau de vie des consommateurs des pays industrialisés) et à la capacité de construire des infrastructures en montagne qui répondent aux attentes. Le ski est alors devenu un sport et un loisir incontournable, générant une économie florissante. Mais en hiver, cette activité dépend d'un paramètre primordial, l'enneigement. Avec la sensibilité des populations face à la variabilité de l'enneigement et à sa diminution manifeste à certaines tranches d'altitude, les gestionnaires des stations de ski se sont mis progressivement à la fabrication de cette matière première indispensable, la neige.

Depuis le début des années quatre-vingt, on dispose d'une technologie qui permet de la fabriquer à l'aide de canons à neige. On parle alors de neige artificielle, ou plutôt *neige de culture*. Au début de son utilisation, cette neige fabriquée pouvait être considérée comme un luxe, mais aujourd'hui l'enneigement artificiel devient une nécessité pour l'industrie du tourisme. La production en neige de culture est passée de 3,3 millions de m³ en 1996 à 13 millions en 2006. **Et c'est grâce au développement de cette technique, finalement, que cette étude a été possible, car les données météorologiques utilisées proviennent du système de fabrication de neige de culture.** Il existe une composante d'automatisme dans l'installation, qui permet aux canons à neige de se déclencher seuls lorsque les conditions de *températures et d'humidité relative* sont réunies pour fabriquer de la neige. Le domaine skiable se retrouve ainsi parsemé de sondes qui mesurent les paramètres atmosphériques utiles à cette fabrication. Outre les sondes de températures et d'humidité relative, on trouve des anémomètres qui mesurent *la vitesse et la direction du vent*, afin d'arrêter le système d'enneigement lorsque les conditions sont défavorables (photo 1). Ces données sont enregistrées par un ordinateur et conservées, et permettent en tant qu'archives d'obtenir des statistiques de toutes sortes sur le fonctionnement

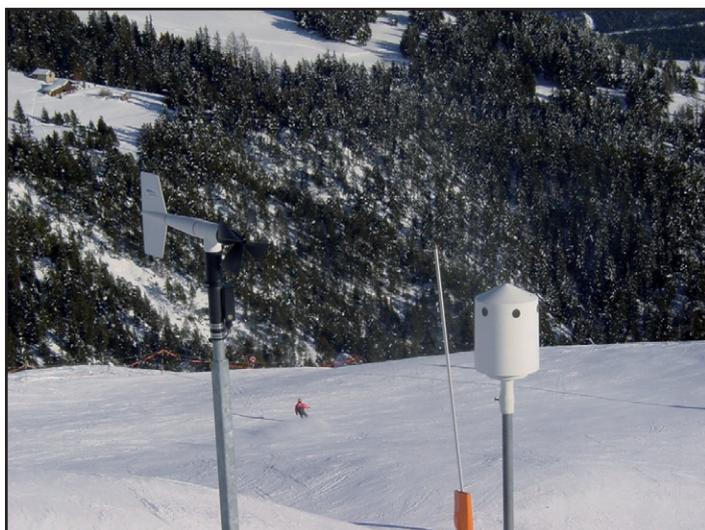


Photo 1 : Sonde de températures et d'humidité relative (à droite) et anémomètre (à gauche) sur une piste à Aussois.

de l'installation pour le nivoculteur. Mais dans le processus de fabrication de la neige de culture, ces données ne sont que très peu utilisées. Nous pouvons donc remercier les ingénieurs d'avoir intégré un système de sauvegarde, fait généralement rare.

L'atout primordial de ce réseau de mesures est sa densité. Il faut en effet placer des sondes le long ou à côté des pistes en nombre suffisant afin que les canons qui se retrouveraient déclenchés par des mesures ad hoc le soient par des sondes situées à proximité, pour échapper à la variabilité spatiale importante des paramètres climatiques en montagne. Ainsi, environ tous les cinquante à deux cents mètres de dénivelée, on trouvera des sondes de température et d'humidité si l'on suit le réseau d'enneigement. Le nombre final de sondes par station de ski dépend bien sûr de la taille des équipements de celles-ci. De quelques sondes pour les petites (Les Aillons en Savoie) à plus d'une centaine pour les plus grandes (Les Menuires et Val Thorens, Savoie). Les anémomètres se retrouvent en plus petit nombre, la douzaine environ pour les plus grandes stations.

Par comparaison, le réseau de stations météorologiques de Météo-France ne propose qu'une seule station de mesure en haute montagne (La Masse à 2800m) qui contient d'ailleurs beaucoup de lacunes, et cinq stations de moyenne montagne (Méribel, Tignes, Val d'Isère, Les Saisies). Ces stations automatiques ne reflètent évidemment pas la disparité des situations que l'on peut trouver en montagne (fig.1). En Savoie, 50 % des altitudes sont inférieures à 1600 mètres, alors que 76 % des stations Météo-France se trouvent sous cette même altitude. Le réseau de mesures de l'enneigement artificiel constitue donc une alternative unique car les milieux instrumentés sont différents. L'étude systématique des gradients ou le fonctionnement des brises est enfin possible.

- Caractéristiques des données enregistrées.

Les pas de mesures des sondes météorologiques sont pour la température et l'humidité relative une mesure toutes les heures jusqu'en 2002 et toutes les vingt minutes depuis (pour être au plus proche des changements de temps). Pour le vent, une mesure tous les quarts d'heure. Et cela d'octobre à avril, même si la durée des saisons d'enregistrement n'est pas homogène avec les années.

Il est dommage que les enregistrements ne concernent pas l'année entière, mais le phénomène de foudre, un problème majeur en été, empêche les gestionnaires de prendre le risque de laisser le matériel en place. Les coûts de la maintenance sont alors trop importants. Nous verrons ces modalités d'enregistrement dans le chapitre 2, il est pourtant important de le rappeler pour avoir une vision d'ensemble quant aux outils utilisés pour cette étude. En généralisant à l'ensemble des stations de ski dans le monde qui disposent d'un système d'enneigement artificiel, ou rien qu'en France (environ 4000 sondes), on se rend vraiment compte de l'importance de cette banque de données encore inusitée. Ceci constitue bien sûr une révolution dans le domaine de la climatologie montagnarde hivernale, qui ne disposait auparavant que d'un système lacunaire.

Comment récupérer les données ? Il existe plusieurs fabricants de canons à neige, activité bien développée et très concurrentielle. Dans le cadre de notre étude, l'entreprise s'appelle

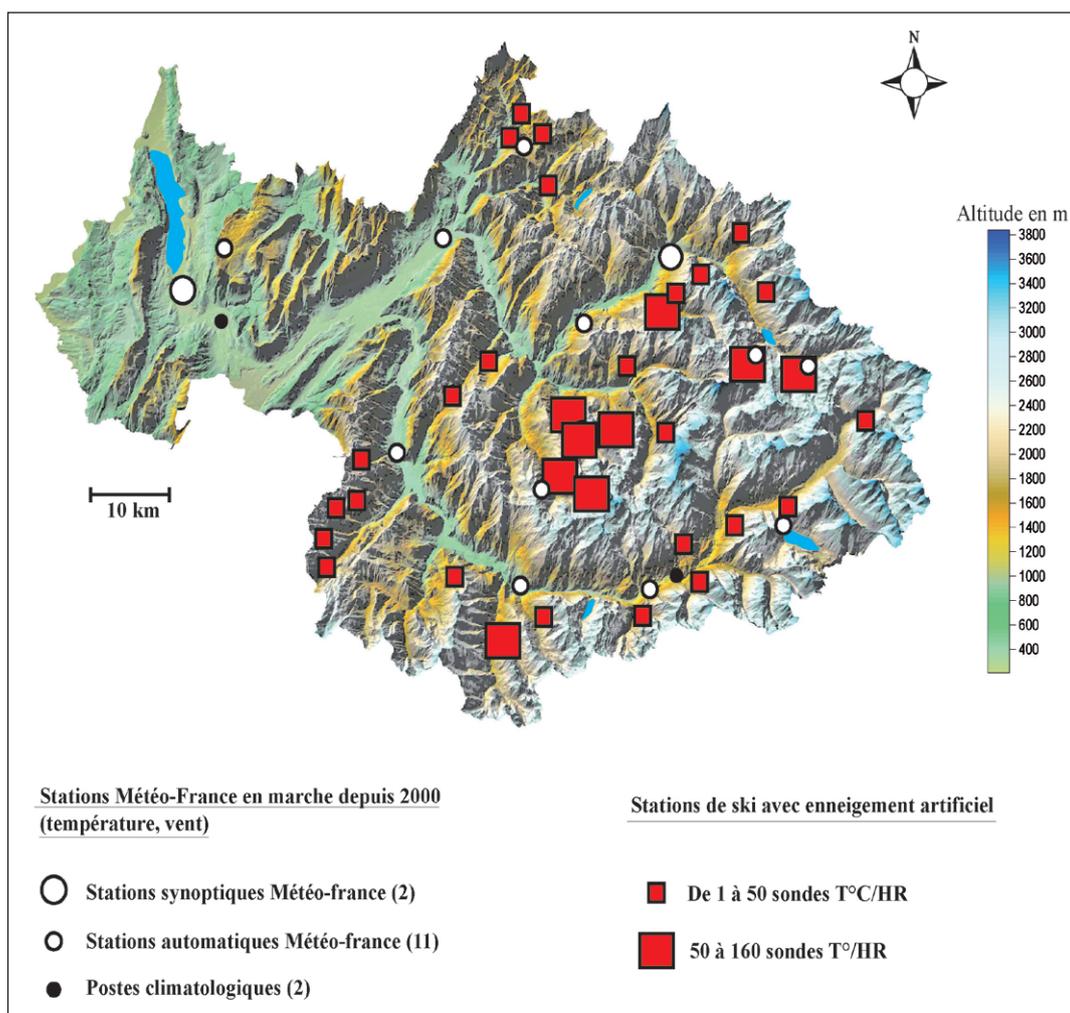


Fig. 1 : Les stations de ski en Savoie et leurs réseaux de mesures comparées aux stations météorologiques de Météo-France.

Le choix des stations Météo-France est fait par rapport à deux critères (fonctionnement continu depuis 2000 et la mesure des paramètres températures et vent) afin d'effectuer la comparaison avec les installations d'enneigement artificiel.

Le département de la Savoie compte plus de 1100 sondes T°C/HR et anémomètres issus de l'enneigement artificiel (saison 2005-2006). Le domaine des Trois Vallées (Les Menuires, Val Thorens, Courchevel et Méribel) en compte à lui seul plus de 450.

Carte : MNT IGN BDAIli.

YORKNEIGE SA. Il était beaucoup plus simple de travailler avec un seul groupe pour des raisons d'homogénéité des processus techniques, et ce groupe étant leader dans ce domaine, nos sites d'étude s'avéraient déjà instrumentés par eux. D'autres entreprises occupent cet espace économique, comme TECHNINEIGE, TECHNOALPIN, SNOWSTAR, etc., qui disposent eux aussi de systèmes d'enregistrement. Les stations de ski étant leurs clients, les données appartiennent donc à la fois à l'entreprise et aux stations de ski. Il suffit de s'adresser à l'un ou à l'autre, toutefois ces données peuvent être considérées comme confidentielles dans le cadre d'une économie où la concurrence est forte. Mais les fabricants de canons à neige investissent surtout dans le perfectionnement des conditions « internes », c'est-à-dire la physique de ce qui se passe dans le canon et à la sortie, mais pas dans les conditions « externes », liées à la nature de l'air environnant. Nous voyons comment la recherche climatologique sur les données peut déjà s'inscrire dans un contexte d'application socio-économique.

Le nombre de mesures enregistrées est conséquent : un comptage rapide du nombre de sondes par station, nombre de saisons, nombre de paramètres (4) nous donne environ 10.000.000 mesures aux Menuires de 1989 à 2005, ou encore 2.000.000 mesures à Aussois de 1997 à 2005. Cette quantité implique un tri indispensable et donc un travail important d'analyse des données, qui passe aussi par la critique métrologique des mesures et surtout des instruments.

3 - Méthodes et objectifs

Pour étudier la climatologie d'un espace encore mal connu, nous allons nous servir d'une banque de données préexistante, sans pouvoir intervenir sur la mise en place du réseau d'étude. Une assertion de A. HUFTY (HUFTY A., 2001) nous aiguille : «L'étude des systèmes climatiques se fait suivant des méthodes choisies en fonction des données disponibles et des buts poursuivis». Nous connaissons nos lacunes sur la climatologie de montagne et d'autant plus en hiver et aux échelles fines, et leur comblement reste l'un des objectifs majeurs. Un gros travail exploratoire des données a donc été nécessaire au préalable pour déterminer les potentialités climatiques de notre nouveau réseau. C'est à partir de là que l'on s'est rendu compte que les sondes posées sur les domaines skiables pouvaient mesurer les paramètres atmosphériques dans de nombreuses conditions, avec des biais différents (constructions, forêt, etc.), ou sous certaines contraintes (mesures en surface le long des versants par exemple). Mais cela n'est pas rédhibitoire, car nous avons alors la chance de pouvoir analyser des mesures effectuées dans des milieux originaux. **L'aspect localisé du climat montagnard est alors bien mis en valeur dans la densité du réseau de sondes.** Il est alors temps de déterminer les pistes de recherche afin de trouver des méthodes de travail adéquates.

Ces données nous permettent de mesurer comme jamais auparavant la température, l'humidité relative, la direction et la vitesse du vent sur les versants de la montagne hivernale aux échelles fines. Les comportements de ces paramètres seront analysés dans le but de mieux comprendre leur variabilité spatio-temporelle et les effets du relief dans cette variabilité. Nous pouvons aussi observer les relations entre les échelles du climat, comment les mécanismes de macro-échelles déterminent ceux des petites échelles, et les effets principaux du relief dans cette régression (fig.2). Naturellement, ces relations nous amènent à envisager un système de prévision du temps en montagne, puisque connaissant les phénomènes de grandes échelles (grâce à Météo-France), et les phénomènes en montagne induits, nous pouvons établir des correspondances. **L'objectif final étant bien sûr de mieux «cerner» la climatologie des versants de montagne en hiver.**

Quatre questionnements ressortent alors de notre réflexion préalable :

- *Quelle est l'influence des échelles supérieures sur le comportement des paramètres météorologiques locaux ?*
- *Quelle est l'influence de la topographie et des facteurs externes locaux (principalement la forêt et les constructions humaines) sur leur variation spatio-temporelle ?*
- *Quelles sont les relations privilégiées entre ces différents paramètres ?*
- *Quelles sont les applications possibles dans la gestion des domaines skiables, par la compréhension de leur environnement climatique et pour l'enneigement artificiel ?*

Les méthodes utilisées pour cette étude seront principalement statistiques et observatoires. Nous nous concentrerons sur l'étude des moyennes de températures et leurs variations dans l'espace, et l'étude du comportement du vent et donc des brises thermiques. Le système de brises thermiques hivernales reste un phénomène mal connu et nous essayerons de développer un modèle qui simule leur mécanisme. Puis nous étudierons les variations au pas de temps court de ces paramètres en fonction des conditions météorologiques qui influencent leurs réactions. Enfin nous essayerons de déterminer quels facteurs externes au climat viennent modifier ces comportements, en nous axant principalement sur le rôle du relief à topoéchelle et à microéchelle. Ces différentes études spatio-temporellement différenciées permettront d'établir des relations entre les types de circulations atmosphériques, les types de temps, et les paramètres de surface sur les versants enneigés de la montagne alpine.

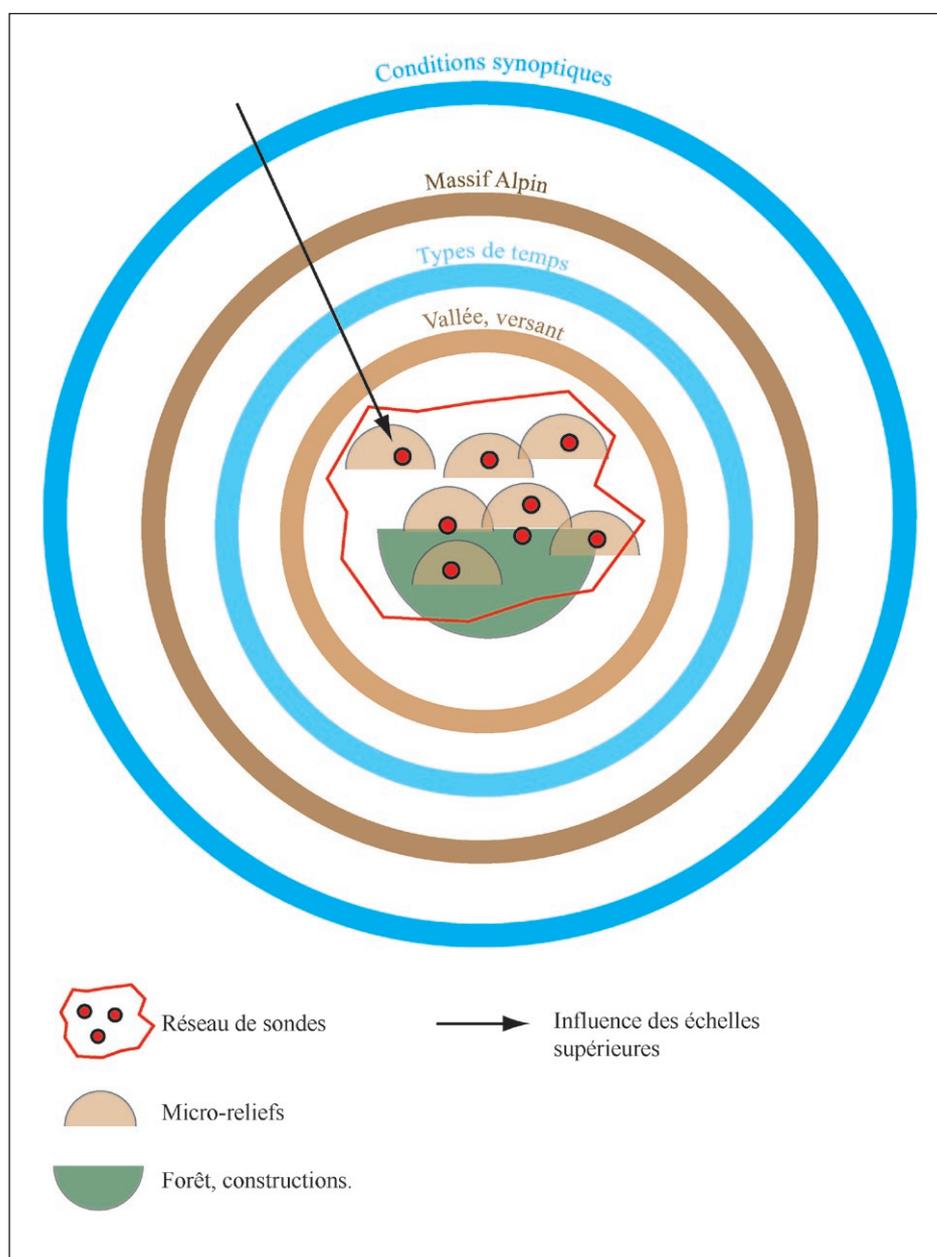


Fig. 2 : Influences des conditions météorologiques et topographiques à différentes échelles (du global ou local) sur les températures mesurées par un réseau de sondes en montagne et en hiver.

4 - Pour une climatologie appliquée...

- Dans la gestion des domaines skiables.

L'étude climatologique peut non seulement combler de nombreuses lacunes, mais au-delà de la recherche, elle peut aussi s'insérer dans des domaines d'applications socio-économiques où le climat est un élément déterminant dans les activités de montagne. Même s'il n'est pas facile de faire des projections avant même d'englober les problèmes et les résultats obtenus, nous connaissons les demandes formulées par les acteurs de la montagne hivernale et surtout des stations de ski : avec une connaissance des comportements des températures et du vent le long des pistes, **il est possible d'améliorer la gestion des domaines skiables** :

- Optimisation de la production de neige de culture par une meilleure gestion des conditions météorologiques «externes». Il est par exemple primordial de ne pas manquer certaines périodes de froid car c'est alors que les conditions optimales pour enneiger sont réunies. Cela permet de réduire la consommation en eau et en énergie. On peut aussi mieux positionner les sondes en fonction des connaissances climatiques locales.

- Conception d'un système statistique de prévision météorologique adapté à chaque domaine skiable, en rapport direct avec Météo-France.

- Prévention des conséquences locales du changement climatique.

En bref la connaissance du climat local peut déboucher sur de multiples applications qui restent à déterminer en fonction des besoins des utilisateurs. N'oublions pas que le «temps» est l'une des préoccupations principales en hiver pour les activités de montagne.

- Dans l'anticipation des conséquences locales du changement climatique en montagne.

Le changement climatique affecte considérablement les milieux montagnards. **Le réchauffement a été trois fois plus important dans les Alpes que pour la moyenne mondiale** (fig.3). Suivant différentes études, on prévoit dans les Alpes pour 2050 une augmentation de 1°C à 3°C des températures moyennes et de 5% à 25% des précipitations en hiver, contre une augmentation de 1°C à 5°C des températures en été et au contraire une diminution de 5% à 40% des précipitations (GIEC, 2007 ; BENISTON M., 2005 ; AGRAWARA S., 2007).

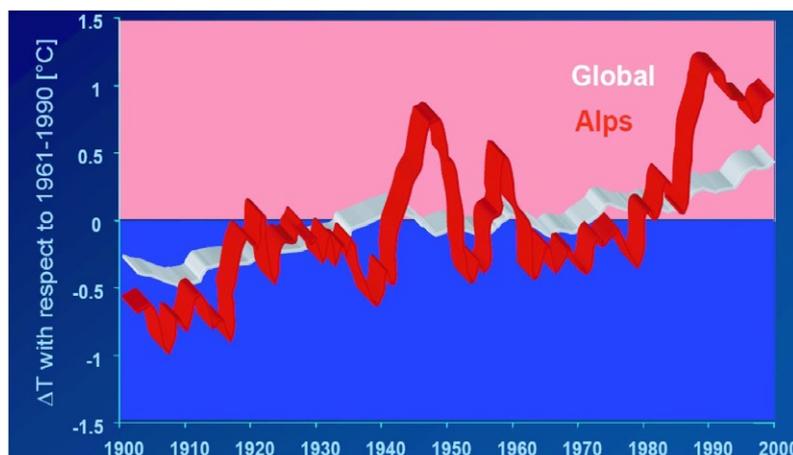


Fig. 3 : Variation de la température par rapport à la normale 1961-1990 entre les moyennes globales et les moyennes alpines de 1900 à 2000.

Les températures moyennes enregistrées après 2000 n'ont fait qu'aggraver le réchauffement.

Source : BENISTON M., 2005.

Quant à l'enneigement, on pourrait observer une forte diminution de la couverture neigeuse à faible et moyenne altitude : une réduction de 50 % du manteau neigeux, un mois ou plus de jours d'enneigement en moins, soit une diminution de 40cm à 1500m dans les Alpes du Nord, voire parfois sa disparition (ETCHEVERS P. *et al*, 2002). Ces changements, dont les impacts se ressentiront à la fois sur l'augmentation des risques naturels (fonte et recul des glaciers, fusion du pergélisol, phénomènes extrêmes...), sur l'hydrologie des rivières, la biodiversité, mais aussi sur le tissu économique alpin. **La vulnérabilité du tourisme hivernal va augmenter car les stations de ski situées au-dessous de 1500m auraient de gros problèmes d'enneigement.** On estime que pour un réchauffement de 4°C, 63% des stations de ski françaises auront disparu, et 35% pour 2°C. Ces résultats sont obtenus par l'étude de la limite de fiabilité de l'enneigement (AGRAWARA S., 2007). De plus, le changement climatique influence les enchaînements des situations météorologiques hivernales. On constate une diminution des périodes de froid, une intensification des courants d'ouest sur les Alpes, une augmentation de la limite pluie-neige et plus de périodes de foehn. Tous ces facteurs accélèrent la fonte neigeuse (voir chapitre III.1.3).

Les données météorologiques des stations de sports d'hiver deviennent alors un outil de suivi local du changement climatique et de repérage des zones «à risque» pour les gestionnaires des stations de ski.

5 - Choix des sites de l'étude

Au coeur des Alpes, la Savoie est un département montagneux qui bénéficie d'un relief et d'un climat variés. On y distingue plusieurs massifs, délimités par deux grandes vallées, celles de la Maurienne et de la Tarentaise. Au niveau climatique, l'altitude joue bien sûr un rôle majeur sur les températures et les précipitations, avec des effets d'abri intra-montagnard dans les vallées, surtout au sud du département. Afin de se situer à l'interface entre la Savoie du nord et du sud, avec des sites exposés aux fronts pluvieux et d'autres plus protégés, ou exposés au foehn, nous avons choisi de nous concentrer sur l'espace entre le massif de la Vanoise et les massifs bordiers du sud de la vallée de la Maurienne. D'autres facteurs ont influencé ce choix : des situations topographiques locales variées (exposition, altitude, fond de vallée...), des sites bien instrumentés d'accès facile, des opportunités de travailler plus facilement avec les gestionnaires, et le même fabricant d'installations d'enneigement. Finalement, nous avons décidé au début de cette thèse de choisir quatre stations de ski : Les Menuires, Val Thorens (dans la même vallée), Aussois et Valloire (fig.4).

- **Les Menuires** : le domaine s'étend sur le versant ouest et est de la haute vallée alpine des Bellevilles, ainsi qu'en fond de vallée, de 1675m à 2815m. Cette vallée est orientée sud-nord.

- **Val Thorens** : situé dans un amphithéâtre naturel au fond de la vallée des Bellevilles, le domaine étudié comprend des versants sud, ouest et nord, entre 2200m et 2900m.

- **Aussois** : sur le versant sud de la vallée de la Maurienne, le domaine équipé se situe entre 1500 et 2250m. Il ne s'étend pas du fond de la vallée aux sommets, étant plutôt positionné au milieu de ce grand versant. Un massif forestier coupe le domaine en deux.

- **Valloire** : le domaine occupe l'espace sur deux ensembles montagneux, un versant nord (avec des expositions à l'est et à l'ouest) et un versant ouest, de 1400m à 2400m, dans la «vallée d'Or», une vallée perchée qui relie la Maurienne au col du Galibier.

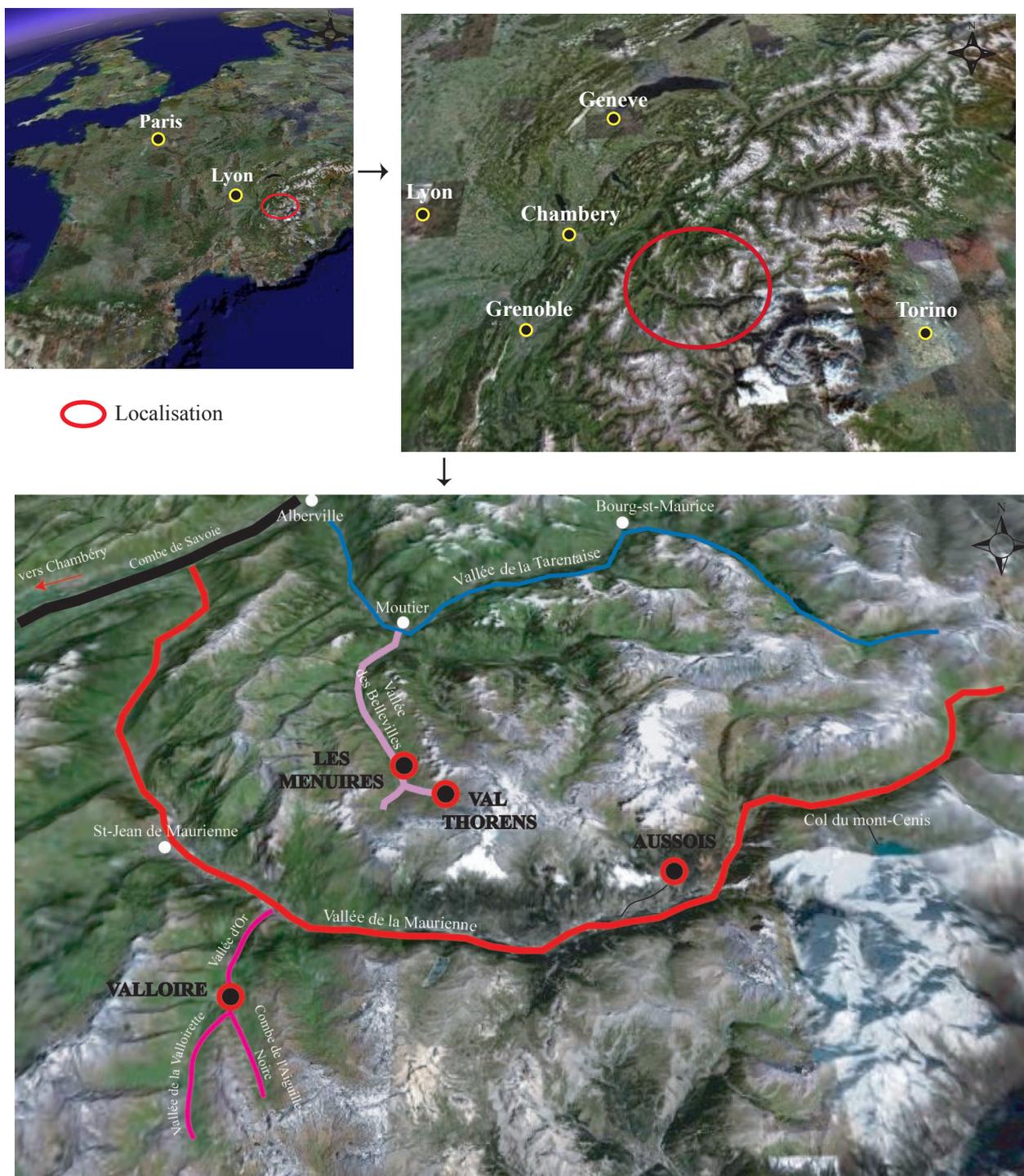


Fig. 4 : Localisation générale du domaine d'étude.

Les stations de ski étudiées sont Les Menuires, Val Thorens (vallée des Bellevilles), Aussois (vallée de la Haute Maurienne) et Valloire. Nous sommes dans le département de la Savoie, et les domaines d'étude se situent entre 1400m et 3000m environ. Ils encadrent cette grande vallée de la Maurienne et fournissent ainsi une fenêtre de lecture représentative, tout en conservant une diversité topographique locale.

Image 3D : Google Earth.

Ces domaines d'étude comprennent un grand nombre de sondes et il est important de caractériser leur environnement et de les situer parfaitement. Pour cela, le travail de terrain était indispensable. Les positions des sondes ont été mesurées au GPS, avec prise photographique du site. Les résultats ont été intégrés dans des SIG avec MNT et photo aérienne. Plusieurs campagnes de repérage ont été organisées. Puis chaque série de mesure a été analysée pour repérer les erreurs. Ce travail a commencé durant ma Maîtrise et mon DEA (CHAIX C., 2001 et 2002), sur le site des Menuires, ce qui m'a permis d'avoir une vision globale du réseau de mesures, de la banque de données, des particularités et des correspondances. C'était un travail préparatoire indispensable pour s'assurer de la validité et de la potentialité de ce réseau de mesures avant d'entamer une analyse plus poussée en relation avec les phénomènes météorologiques de la montagne.

6 - Organisation de l'étude

Elle se compose de cinq chapitres qui s'enchaînent dans le but de passer d'une approche globale à une approche locale, au niveau spatial et temporel, tout en tissant les réseaux de relations qui ont pu s'établir entre les paramètres et les phénomènes étudiés et les différentes échelles de leur expression.

§ Nous allons dans un premier temps définir les aspects climatologiques et météorologiques utilisés dans cette étude, comme les notions d'échelles, les facteurs de la variation spatiale du climat en montagne, ou encore le rôle de la neige. Ces rappels sont indispensables pour comprendre dans quel domaine de la climatologie nous nous situons. Puis nous développerons les notions de systèmes dynamiques complexes qui vont délimiter les frontières de l'étude, en nous permettant de choisir les bonnes méthodes d'approche dans l'analyse des données et la compréhension des résultats.

§ Nous nous concentrerons ensuite sur la description des domaines d'étude, de leur réseau de sondes issus de l'enneigement artificiel, en remplaçant la technique de production de neige de culture dans un contexte de recherche appliquée.

§ Dans un troisième temps, nous allons concevoir un outil qui permettra de nous référer à des situations météorologiques de plus grandes échelles lors de l'étude de nos paramètres locaux : une classification bi-scalaire combinant la classification des types de circulation et une classification des types de temps développée pour la Savoie.

§ L'étude des paramètres météorologiques sera alors développée : tout d'abord les moyennes de températures sur chaque site, où l'on essayera déjà de comprendre quelles influences jouent sur leur variabilité spatiale ; puis l'étude du vent moyen, et en particulier celui des brises thermiques, dont les mécanismes hivernaux, quasiment inconnus à ce niveau, seront appréhendés.

§ Nous étudierons enfin les réactions des paramètres mesurés dans des temps courts en fonction des situations synoptiques et établirons des relations entre les types de temps et les températures dans ce dernier chapitre. Cette démarche vise aussi l'étude de phénomènes météorologiques particuliers : inversions de température, rôle du relief et de l'exposition, comportement des brises, des vents synoptiques et du foehn. Les températures pour chaque situation seront spatialisées. Et après avoir rappelé les influences de certains facteurs locaux externes sur

la variabilité des températures et de la ventilation locale, nous proposerons un modèle empirique de l'évolution journalière des brises thermiques dans la vallée des Bellevilles. Ce modèle montrera comment évolue la complexité de la variabilité des types de brises durant la saison hivernale.

CHAPITRE I

CONCEPTS ET MÉTHODOLOGIE

Introduction

Une multitude de phénomènes météorologiques à différentes échelles agissent en montagne et s'emboîtent pour constituer les éléments du climat. Avant de s'engager dans l'étude des paramètres mesurés sur les domaines skiables, nous présentons un rappel sur certains processus et sur le cadre théorique général de la thèse. En effet, nos mesures sont représentatives d'un certain milieu qui s'intègre dans un système beaucoup plus vaste qu'est le climat.

Dans cette optique, nous allons d'abord rappeler les définitions de la climatologie et du rôle de la montagne sur le climat, ainsi que les particularités de la période hivernale. Les relations entre les échelles du climat seront explicitées, ainsi que les méthodes de recherche en climatologie. De ces concepts nous pourrions déjà mieux comprendre quelles approches nous allons devoir utiliser pour étudier nos mesures si particulières.

Puis nous allons décrire certains mécanismes atmosphériques en rapport avec les températures et la stabilité de l'atmosphère. Ces rappels sont utiles car dans le déroulement de la thèse ils seront souvent repris et considérés comme acquis. Nous compléterons ces aspects par les facteurs de la variation spatiale du climat en hiver et en montagne, comme la neige, dont l'identification préalable est indispensable avant l'analyse des données météorologiques.

Cette étude concerne certains paramètres d'un système dynamique complexe, le climat, influencé par le relief. Les notions de la systémique sont alors importantes à éclaircir pour déterminer quelles seront les frontières de l'étude en fonction des outils et des méthodes qui existent. Par exemple, la notion de turbulence est essentielle dans la compréhension des phénomènes climatiques mais ne constitue pas un domaine d'étude propice pour nos données météorologiques et nos espaces d'étude. Enfin, de ces réflexions nous aboutirons au choix de méthodes conceptuelles et statistiques adaptées à nos objectifs.

La compréhension de la nature de notre objet d'étude est indispensable avant de pouvoir l'étudier plus précisément.

I.1 CLIMATOLOGIE ET ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES

I.1.1 Climat et champs thermiques

La climatologie est l'étude des échanges énergétiques et hydriques entre la surface de la Terre et l'atmosphère (climatologie physique ou climatonomie) combinée avec la fréquence et la succession d'événements météorologiques (climatologie statistique et climatologie dynamique), dont l'action influence directement ou indirectement l'existence des êtres qui y sont soumis (climatologie appliquée, surtout bioclimatologie) (HUFTY A., 2001). Ainsi, temps et climat représentent des combinaisons réalisées dans l'atmosphère. Mais le temps n'est qu'une combinaison passagère, accidentelle, tandis que le climat est un ensemble de tendances stables qui résultent de conditions permanentes pendant de longues périodes (PEDELABORDE P., 1982). Les paramètres mesurés du climat sont généralement la température, les précipitations, l'ensoleillement (ou nébulosité), l'humidité de l'air, la vitesse et la direction du vent, la pression barométrique. Les problèmes du climat sont d'une grande difficulté en ce qu'ils mêlent l'espace (aspects locaux et globaux), le temps (court et long terme), et l'homme et sa perception (rationnelle et irrationnelle) (CHEDIN A., 1994).

Mais qu'entend-on par climat ? Abordons cette notion par le climat moyen, c'est-à-dire l'ensemble des conditions caractérisant l'état moyen de l'atmosphère en un lieu ou une région donnée et la variabilité autour de cet état moyen. La moyenne des données dans le temps permet de passer du domaine de la météorologie au jour le jour à une analyse dans le temps et l'espace de ces données, c'est là le but de la climatologie. La notion de climat moyen ne doit pas masquer le fait que le climat résulte en fait de la succession de « types de temps ». Les mouvements atmosphériques à l'échelle de l'hémisphère nord obéissent à des lois reliant notamment la structure du champ de vent à la structure du champ de pression, et cette organisation à grande échelle des mouvements s'appelle la circulation générale. Chaque type de temps correspond à une configuration particulière de cette circulation générale. Quelquefois, des phénomènes rares se produisent et sont issus de la conjonction de plusieurs phénomènes météorologiques appartenant à des échelles spatio-temporelles différentes (CHOISNEL E. *et al*, 1988).

En hiver, une certaine stabilité thermique peut s'installer. Elle est principalement le résultat de la superposition des effets de deux champs : **la radiation et les mouvements des masses d'air** (dans l'atmosphère, on peut négliger l'influence de la conduction, car le gaz est un mauvais conducteur).

- Un premier champ thermique stable est déterminé par la radiation. Le soleil est à l'origine de tous les mouvements radiatifs, de façon régulière. Lors de hautes pressions, ce champ stable importe plus que les mouvements des masses d'air (on obtient des phénomènes comme l'inversion thermique ou encore la brise).

- Mais si l'atmosphère est troublée par l'irruption de masses d'air étrangères, la température et les autres éléments du climat résultent des déplacements de ces masses. Par les transferts de chaleur qu'elles déterminent, elles engendrent un deuxième champ thermique mouvant qui se superpose au premier. Ainsi, la température réelle, en un lieu, résulte de la combinaison des deux champs (GELEYN J.F. *et al*, 1988).

I.1.2 Du macroclimat au microclimat

La hiérarchisation des facteurs du climat conduit à raisonner suivant un système d'échelles d'espace imbriquées (et aussi d'échelles temporelles) : climat régional, topoclimat et microclimat (ordre de grandeur : 100 km, 10 km, 100 m respectivement). **Dans la description du climat d'un lieu, on cherche d'abord les caractéristiques du climat régional puis celles du topoclimat et en dernier lieu les caractères particuliers de son microclimat.** L'analyse passe donc du macroscopique au microscopique. On peut donc dire que le microclimat est déterminé par le climat régional, avec une marge d'erreur assez faible (conditionnée notamment par les phénomènes locaux).

En montagne, on peut alors se demander comment la présence de relief influence et transforme ce déterminisme. Des phénomènes émergent en effet de ce contact entre l'atmosphère et le relief, en provoquant des réactions locales non prévisibles par la seule connaissance des échelles supérieures. Il devient donc important de déterminer les types de temps en fonction des conditions météorologique de grandes échelles (pour le vocabulaire des échelles, voir fig.I.1.1), et de constater les conséquences sur le local par des observations in situ.

Par conséquent, les régions montagneuses constituent un sujet d'étude privilégié en climatologie du fait que la notion de climat régional y perd toute signification. Il faut opérer en quelque sorte une régression d'échelle. Ainsi, au niveau de l'atmosphère, deux «états» peuvent être distingués : instabilité et stabilité (en rapport avec les champs thermiques). Ces deux états ont des conséquences tout à fait différentes en zone de relief :

- Un phénomène existant à l'échelle régionale, comme une dépression humide, influence directement le temps qu'il fait en montagne. Le climat est effectivement différencié par la présence de relief, mais lorsque l'atmosphère est *instable* à grande échelle, l'instabilité se propage inexorablement à petite échelle et les caractères de l'un sont transmis à l'autre, en incluant les facteurs locaux.

- Par contre, dans des cas de *stabilité*, des phénomènes propres à la montagne se mettent alors en place, dans un premier temps à l'échelle du topoclimat. **Les topoclimats correspondent à des facteurs d'influence du second ordre engendrés par la topographie environnant le site, d'où l'étymologie de ce terme** (CHOISNEL E. *et al*, 1988). Ces facteurs d'influence agissent sur le climat par la répétition de phénomènes météorologiques systématiques tels que les brises de pente et de vallée en zone montagneuse, ou l'effet de foehn en aval d'une ligne de crête suivant la direction générale du vent. Le topoclimat est également relié à la notion d'exposition, et en hiver le rôle de la neige est important à cause de son fort albédo.

Ces notions de régression d'échelle en fonction de l'état de l'atmosphère et de l'influence du relief dans la création de phénomènes locaux sont primordiales pour comprendre la climatologie des régions montagneuses.

La montagne induit aussi une forte variabilité spatiale des paramètres climatiques. La notion de micro-climat prend ici toute sa valeur. A l'échelle d'un massif, la variabilité est très importante. Mais en un point, le relief contraint ces paramètres, il est donc relativement plus facile d'y établir des prévisions qu'en plaine par exemple. Le vent synoptique sera canalisé et soufflera toujours dans la même direction pour un grand nombre de types de circulations. Les brises seront définies par les échelles de relief (vallée, versant...). Les températures, elles aussi,

seront fortement influencées par les micro-reliefs. *Ainsi, malgré la variabilité accrue sur de grandes échelles par le relief, les contraintes induites sur les petites échelles permettent de simplifier les prévisions.* Sans cet aspect, il serait illusoire de vouloir caractériser les tendances des paramètres atmosphériques en montagne.

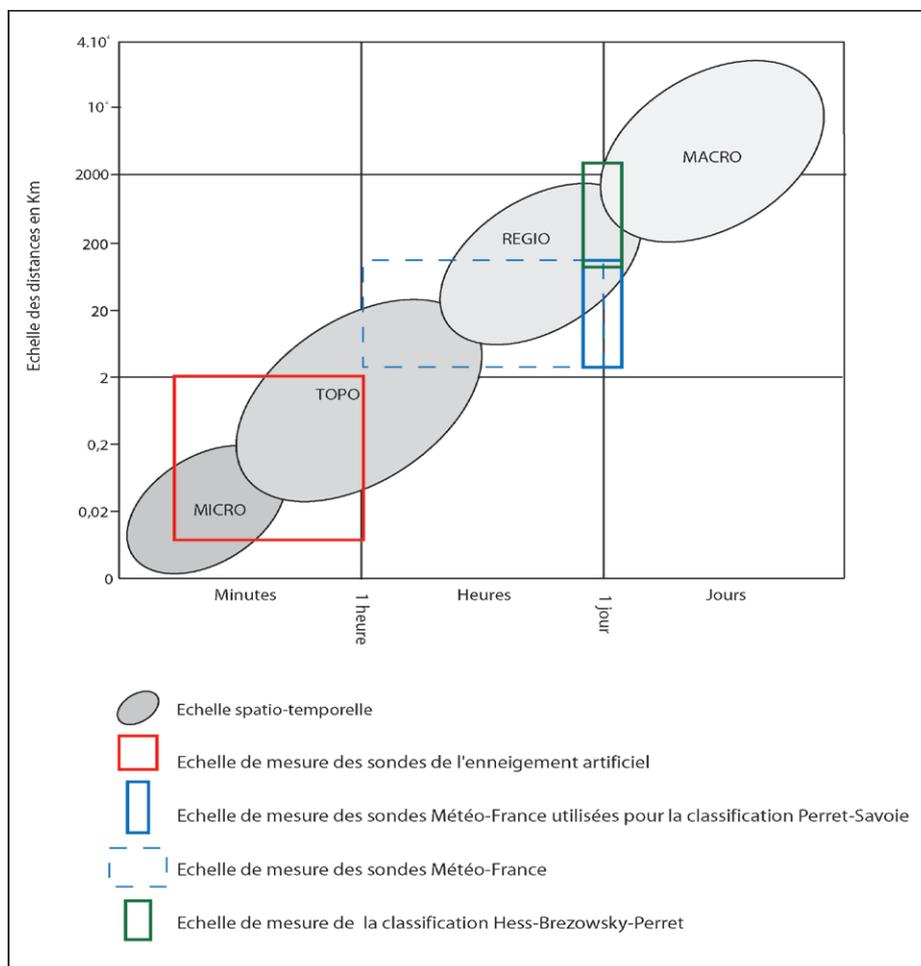


Fig. I.1.1 : Les échelles spatio-temporelles utilisées en climatologie.

On peut observer, grâce aux cadres, les domaines d'extension fournis par les sondes et les différentes classifications utilisées pour cette étude.

D'après CARREGA P., 2003 et ORLANSKI I., 1975.

NB : Afin d'éviter toute ambiguïté avec la conception des géographes sur les petites et grandes échelles, nous utiliserons les termes macro, topo et micro, en qualifiant les petites échelles de micro ou échelles fines, et les grandes de macro.

I.1.3 Les méthodes de recherche en climatologie et en météorologie

Il existe en fait deux familles d'approche :

- Inductive-empirique-statistique : on se base sur les données connues et on cherche des lois pour couvrir un espace à partir de points.
- Déductive-physique : on se fonde sur les mécanismes et processus physiques.

Les caractères de l'atmosphère, intégrés par la climatologie et l'étude des types de temps, s'abordent de deux façons qui découlent de la météorologie : la première, **la météorologie descriptive traditionnelle, ou analytique, étudie séparément les éléments du temps et de l'atmosphère** (approche inductive-empirique-statistique). Utilisée avec des statistiques, elle apporte des informations intéressantes, mais *ses inconvénients sont de disloquer le temps en éléments qui perdent toute signification concrète dès qu'ils sont isolés, de ne pas restituer le dynamisme des phénomènes et la succession véritable des états*. Dans le cadre de l'étude par exemple des gradients ou des variations de l'isotherme, cette méthode permet des résultats rapides par l'utilisation des statistiques. La seconde méthode, **la météorologie dynamique, ou synoptique, considère en bloc les états du milieu atmosphérique** : le temps et la masse d'air (approche déductive-physique). Ici l'étude des fréquences des temps doit être complétée par leurs causes, qui relèvent de la dynamique de l'atmosphère.

L'étude synoptique se rapproche fortement de la systémique, mais celle-ci a tout de même besoin au préalable d'une étude séparative. Nous avons vu que l'effet du climat était global et dépendait rarement d'un seul élément, et que l'explication de l'apparition ou de la répartition d'un élément n'avait généralement pas une cause unique. Que l'on s'intéresse aux formes ou aux processus, la démarche est systémique. Pour commencer, il faut diviser et classer les systèmes, isoler leurs éléments (méthode séparative) ou leurs combinaisons (méthode synthétique). Le classement des systèmes reposera sur une analyse statistique, approfondie jusqu'aux probabilités conditionnelles et sur l'analyse multivariée afin de mettre en évidence les composantes climatiques les plus pertinentes, c'est-à-dire celles qui sont les plus indépendantes les unes des autres et dont la variance individuelle contribue le plus à la variance totale du système. Le choix des variables peut d'ailleurs être orienté pour correspondre à un modèle physique préalable ou pour servir à une utilisation pratique. Ensuite, il faut étudier la genèse et le fonctionnement des systèmes (HUFTY A., 2001).

Les méthodes exposées ici nous serviront de base pour notre étude. Sans passer par une analyse des processus physiques des paramètres mesurés, nous établirons notre démarche par rapport **aux méthodes inductives, empiriques et statistiques** qui nous permettront de mettre en évidence les facteurs qui agissent sur le système.

I.2 TEMPÉRATURE ET HUMIDITÉ : LES FACTEURS DE LEUR VARIATION EN HIVER

L'objectif n'est pas ici de faire un résumé exhaustif des mécanismes climatiques à grande échelle. Se reporter alors aux références : PEDELABORDE P. (1982) ; TRIPLET J.P. *et al* (1986) ; GUYOT G. (1999) ; TABEAU M. (2000) ; HUFTY A. (2001) ; HALLOT H. *et al* (2003) ; MALARDEL S. (2005)... La circulation générale terrestre ne sera pas abordée, ni les processus physiques de l'atmosphère et la structure verticale de l'atmosphère. Nous allons en revanche rappeler quelques principes de base sur la température, l'humidité relative, les facteurs de variation spatiale du climat et le rôle de la neige en hiver. Ces notions générales en amont de notre problématique seront complétées par la description des phénomènes propres à la montagne hivernale de manière plus complète, avant leur étude dans le déroulement de la thèse.

I.2.1 Température et humidité relative

I.2.1.a. La température

- Définitions : la température exprime le degré de chaleur ou de froid de l'atmosphère en un lieu. Elle se mesure par un thermomètre (généralement à 1,5 m du sol), à l'abri du rayonnement solaire direct et s'exprime en degré Celsius.

- Le gradient thermique vertical (ou gradient vertical de température) : *il désigne le taux de décroissance de la température en fonction de la distance, selon la verticale ascendante.* On considère un taux moyen sur une distance, par exemple de 100m. Le gradient adiabatique de l'air sec est d'environ $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Cependant, quand l'air est saturé, le gradient est moins fort, car le refroidissement adiabatique détermine la condensation de l'eau et par conséquent la libération de la chaleur de condensation, ce qui retarde le refroidissement. La décroissance est alors de $0,5^{\circ}$ tous les 100m. C'est l'adiabatique saturée. Mais le phénomène n'est pas réversible, car quand la particule qui descend se dessèche, elle reprend l'adiabatique. Enfin, le voisinage du sol apporte une perturbation qui détruit la régularité du gradient, et l'état d'agitation engendre aussi des turbulences très importantes. Un sol surchauffé engendrera un gradient suradiabatique. Au contraire, un sol glacé engendrera une inversion thermique.

- La température potentielle : *pour faciliter les comparaisons entre températures mesurées à différentes altitudes, on utilise fréquemment la température potentielle, qui correspond à la température que prendrait une petite particule d'air si elle était ramenée adiabatiquement (sans perte ou gain de chaleur), et sans être saturée, à une pression de 1000 hPa. Une formule de conversion valable dans les 4000 premiers mètres permet de retrouver la température potentielle à partir de la température réelle : il suffit de multiplier par 0,01 la différence entre l'altitude de la température réelle et l'altitude de la température potentielle recherchée et ensuite d'ajouter le résultat à la température réelle. On obtient ainsi la température potentielle (FALLOT J.M., 1992). Par exemple :*

- Il fait 20°C à 1500m. Donc la température potentielle à 1000m est de : $((1500-1000)*0,01)+ 20 = 25^{\circ}\text{C}$ potentielle ;

- Il fait 17°C à 2000m, ce qui correspond à une température potentielle de 27°C à 1000m. On a donc un réchauffement avec l'altitude entre ces deux sites de mesures, ce qui pourrait dénoter d'un effet topo ou microclimatique à 2000m ou d'une inversion de température.

- Stabilité et instabilité verticales de l'atmosphère :

- La stabilité : un état d'équilibre est stable s'il se rétablit de lui-même chaque fois qu'une intervention extérieure le détruit temporairement. L'atmosphère présente une structure stable quand une couche d'air froid est dominée par une couche plus chaude. L'air froid dense reste alors naturellement sous la couche chaude plus légère. Cette situation est typique de l'automne et de l'hiver (THILLET J.J., 1997).

- L'instabilité : un état d'équilibre est dit instable si la moindre perturbation de la situation initiale s'amplifie de manière irréversible. Dans ce cas, l'instabilité devient grande quand l'air

des basses couches, réchauffé par le sol, s'allège et monte rapidement à travers les couches supérieures (fig.I.2.2).

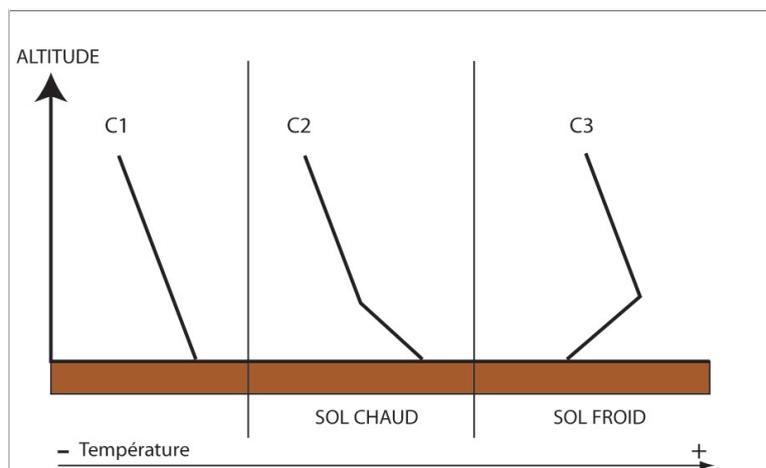


Fig. I.2.2 : Perturbation du gradient par l'état thermique du sol.

C1 : gradient normal
C2 : gradient suradiabatique
C3 : Inversion thermique

Il existe un troisième cas, l'instabilité sélective, très courante dans les régions de montagne. Stabilité et instabilité se déterminent alors avec deux facteurs :

- l'air est d'autant plus instable qu'il est humide ;
- si l'humidité relative est moyenne (vers 50, 60%), alors il faut considérer l'impulsion des particules suivant les conditions externes. Si des mouvements ascendants sont provoqués, il y aura instabilité. Au contraire, sans ascendance, il y aura stabilité (PEDELABORDE P., 1982). Souvent une couche d'air chaud arrive en altitude et provoque des inversions de températures. Ce phénomène sera étudié en détail dans la vallée des Bellevilles.

I.2.1.b. L'humidité

- L'humidité absolue : elle correspond au nombre de grammes de vapeur d'eau contenus dans un mètre cube d'air.
- L'humidité relative : elle exprime, en pourcentage, la quantité de vapeur d'eau contenue dans un certain volume d'air par rapport à la quantité maximale qu'il pourrait accepter à la même température.

Plus l'air est chaud, plus il peut contenir de la vapeur d'eau. A l'inverse, l'air froid en contient peu. C'est pourquoi le point de saturation est atteint plus rapidement, c'est-à-dire qu'à quantité égale de vapeur d'eau, celle-ci se condense en eau liquide. C'est ainsi que se forment les nuages, les brouillards... (THILLET J.J., 1997).

I.2.2 Les facteurs de la variation spatiale du climat

Les phénomènes énergétiques et dynamiques importants dans la variabilité climatique en montagne sont l'interception du rayonnement solaire par les pentes, les modifications du bilan énergétique de surface et certains écoulements de l'air (interactions entre la topographie et les flux atmosphériques). Deux classes de paramètres ont été suggérées par les chercheurs pour expliquer la variation du climat sur une petite surface :

- **Les éléments météorologiques** : la radiation solaire et le vent sont les principaux éléments de cette classe.

- **Les éléments physico-géographiques** : la topographie, la couverture végétale et son type, la surface du sol, les constructions humaines, l'eau libre. Ils forment des obstacles aux éléments météorologiques, et agissent sur l'individualisation des microclimats à plusieurs niveaux (JOLY D., 1994 ; DOUGEDROIT A., 1977).

En montagne et en hiver, la neige et la topographie ont des rôles particuliers :

- La neige : en hiver, elle recouvre en partie les sols. Le bilan d'énergie de surface est alors modifié. La phase de fusion réduit la fluctuation possible de la température de la surface de la neige qui reste très proche de 0°C malgré l'apport énergétique positif (CHOISNEL E., 1987). Le fort albédo (rapport entre le flux de rayonnement solaire réfléchi et incident) a deux conséquences : il participe à la création d'une couche isolante et il reflète une grande partie du rayonnement solaire vers l'espace, ce qui réduit le rayonnement net, ainsi que le flux de chaleur sensible. Les contrastes de température qui se développent habituellement au niveau du sol pendant le jour sont supprimés, et les brises diurnes au-dessus de la couverture neigeuse sont faibles. **On assiste en fait à une stabilisation des processus.** La nuit, la grande émissivité de la neige augmente les pertes de rayonnement de grandes longueurs d'ondes, et la couverture neigeuse isole la surface de la neige et la couche d'air immédiatement au-dessus d'elle, de la chaleur stockée dans la terre. En conséquence, le refroidissement en surface est augmenté, et les contrastes de températures et les brises nocturnes sont renforcées (WHITEMAN C.D., 2000).

- Evolution du manteau neigeux : la neige fond au printemps et de nouveaux processus se mettent en place, le rôle du sol devient alors beaucoup plus important. Nous verrons même que des flux thermiques peuvent se créer entre un sol déneigé et un sol enneigé, les brises thermiques ascendantes pouvant alors enfin se développer vers l'amont. Mais l'évolution de la qualité de la neige dans le temps a aussi son importance : une neige évoluée (qui est restée longtemps en place) a généralement des grains de grandes dimensions, elle réfléchit moins qu'une neige récente et absorbe par conséquent plus d'énergie solaire. La pollution altère aussi fortement l'albédo dans le domaine du visible. La neige est moins réfléchissante. Au printemps, les vieilles neiges polluées s'échauffent donc plus vite et atteignent plus rapidement le stade de fonte. L'albédo des neiges récentes est de l'ordre de 0.90 alors que celui des vieilles neiges de printemps est de l'ordre de 0.50 (SERGENT C., 1993).

D'autres facteurs peuvent intervenir dans la fonte de la neige. Sauf sur certaines pentes bien exposées, la neige récente résiste fort bien à l'ensoleillement hivernal car elle réfléchit les rayonnements. Mais à partir du mois de mars, par contre, toutes les conditions atmosphériques et cosmiques peuvent s'additionner en rétroaction positive pour faire fondre la neige. En situation de beau temps sec et calme, l'apport d'énergie restant faible, la neige fond peu («redoux blancs»). Sauf bien sûr si les conditions thermiques sont «estivales». Par contre, les «redoux noirs» sont associés au temps perturbé, humide et venteux, avec des températures plus froides parfois que les redoux blancs. Ici tout est associé pour que la fonte soit redoutable surtout en basse et moyenne altitude (THILLET J.J, 1997).

• **La situation topographique** : elle intervient notamment grâce à la pente et à l'exposition du site qui affectent le flux de rayonnement incident. La pente modifie l'intensité de l'absorption de radiation à cause de l'effet « cosinus » : les surfaces inclinées - sauf au nord - sont plus chauffées que les surfaces horizontales voisines. Le rayonnement solaire direct intercepté reste proche du maximum tant que l'angle d'incidence est supérieur à 60° , soit un angle inférieur à 30° entre le rayon incident et la normale de la pente. De plus l'énergie solaire directe reçue varie aussi en fonction de la latitude du lieu, de la date de l'année, et de l'heure dans la journée (CHOISNEL E., 1987). Quant à la loi de « Woeickoff », elle montre le rôle de la configuration du terrain. *Moins il est ouvert aux influences du climat régional, plus le confinement du microclimat est renforcé.* Le fond d'une vallée et les hauts de versant ont alors des influences différentes (JOLY D., 1994).

Ainsi, les facteurs physico-géographiques interviennent à deux niveaux : tout d'abord dès l'entrée de l'énergie dans le système en fonction de l'albédo qui favorise ou non l'absorption énergétique. Ensuite, l'énergie absorbée n'est pas utilisée partout ni tout le temps de la même manière. **Mais avec une bonne couverture de neige, le bilan reste plus ou moins simplifié.**

I.3 SYSTÈME CLIMATIQUE ET SYSTÉMIQUE

Les paramètres et les phénomènes atmosphériques sont souvent décrits de manière séparée. Pourtant, ils interagissent constamment. Pour comprendre les aspects climatiques et leurs relations avec les activités humaines, il est nécessaire d'introduire dans son raisonnement et son approche les notions issues de la science des systèmes. Nous allons revenir sur ces théories et établir des correspondances avec les enjeux de notre étude. Même si elles restent très conceptuelles, ces notions doivent nous amener à nous éloigner du raisonnement analytique pour considérer chaque phénomène naturel et leur dynamique comme complexe. **Cette réflexion nous amène naturellement à définir les frontières de cette étude et notre méthode de raisonnement.**

I.3.1 Les systèmes dynamiques complexes

D'après la Revue Internationale de Systémique, « la systémique regroupe les démarches théoriques, pratiques et méthodologiques relatives à l'étude de ce qui est reconnu trop complexe pour être abordé de façon réductionniste, et qui pose des problèmes de frontières, de relations internes et externes, de structure, de lois ou de propriétés émergentes caractérisant le système comme tel ou des problèmes de mode d'observation, de représentation, de modélisation ou de simulation d'une totalité complexe » (LIU M., 1997).

Systémique et complexité sont ainsi complètement liées. Tout phénomène naturel, parce qu'il est ouvert vers les autres, est complexe. De ce point de vue, la méthode analytique semble être littéralement rejetée, et ceci pose des interrogations puisque notre logique étant généralement cartésienne, «il est difficile de penser différemment, ce qui est loin d'être évident pour nos esprits formatés dès l'école primaire au réductionnisme et donc à la spécialisation» (LE

MOIGNE J.L., 1999). L'analyse pousse à considérer la totalité du système comme la somme de ses différents éléments. Démarche inverse de la systémique qui identifie l'objet d'étude par les interactions entre ses composants. **En fait, l'approche analytique et l'approche systémique sont plus complémentaires qu'opposées** (DE ROSNAY J., 1975).

L'approche systémique s'efforce de considérer les systèmes dans leur globalité. «Un système est un projet, une action dans un environnement» (LE MOIGNE J.L., 1999) ce qui introduit donc la notion de finalité, de téléologie. Cet auteur rajoute aussi qu'« en essayant d'appliquer au complexe la simplification du compliqué, on aggrave la complexité par mutilation sans pour autant résoudre le problème considéré ». Cette différence entre système complexe et compliqué est primordiale pour bien caractériser notre objet d'étude. Le but est de travailler sur des systèmes qui semblent désordonnés, imprévisibles, mystérieux. La nature fournit les exemples les plus représentatifs, comme le climat ou l'écosystème, qu'on aimerait bien pouvoir comprendre dans leur globalité, puisque l'analyse des processus physiques qui les gouvernent ne permet pas d'établir de vrais modèles et donc de vrais intérêts ! Ces systèmes ne sont plus déterminés, ils deviennent stochastiques, et leur compréhension passe alors non pas par l'étude des trajectoires individuelles des particules, mais par l'étude statistique et probabiliste d'ensembles de particules (PRIGOGINE I., 1996). **Le caractère aléatoire des systèmes complexes se manifeste dans leur instabilité et dans leur relation avec leur environnement.**

Les théories de l'auto-organisation « traitent de phénomènes irréversibles, de systèmes dont la trajectoire temporelle est unique et qui, n'étant pas fermés mais au contraire maintenus sous apport d'énergie (systèmes loin de l'équilibre), sont susceptibles de se structurer spatialement en fonction des corrélations à longue portée qui s'établissent, sous certaines conditions, entre les particules qui les composent » (PUMAIN D., 1998). **Le climat peut donc être qualifié de système dynamique complexe auto-organisé.**

La compréhension des relations entre les différents paramètres du système climatique, l'influence des échelles spatio-temporelles les unes par rapport aux autres, le rôle du relief dans la modification de ces relations, et enfin le rôle de l'homme dans son adaptation ou/et son intégration face à ce système nécessitent une démarche aussi bien systémique qu'analytique. Il faut prendre conscience que chaque système peut être déconstruit pour identifier ses composants (explication), puis reconstruit dans une logique systémique qui intègre l'objectif de l'étude (compréhension).

I.3.2 L'irréversibilité climatique

Développant une approche nouvelle des systèmes complexes basée sur la thermodynamique, ILYA PRIGOGINE a remis en cause toute la conception temporelle de la science, d'ARISTOTE à EINSTEIN, en passant par NEWTON. Ceux-ci ont toujours considéré que la distinction entre passé, présent et futur est irréelle, que le temps n'existe pas – EINSTEIN a tout de même commencé à en douter vers la fin de sa vie -. Mais PRIGOGINE, en observant l'évolution d'expériences de chimie sur des phénomènes non-linéaires, c'est-à-dire régis par

des équations différentielles qui n'acceptent pas de solutions analytiques, et en simulant l'évolution d'un ensemble de variables aux relations complexes, se rend compte de l'importance de l'irréversibilité du temps. Il y a bien des lois déterministes et réversibles, celles de la mécanique classique. Mais elles ne constituent plus qu'un cas particulier d'une nature bien plus diversifiée qu'on ne le croyait. Hors de ces lois particulières, et qui recouvrent des phénomènes simples et simplifiés, nous avons affaire à des phénomènes dont de telles lois ne peuvent pas rendre compte. *Ces phénomènes s'avèrent irréversibles, le temps s'y affirme comme une « flèche » orientée.* Si ce qui arrive peut découler de ce qui précède, ce qui précède ne contenait ce qui arrive que comme un possible parmi d'autres, un possible non déterminé mécaniquement, donc porteur de nouveauté. On obtient des systèmes stochastiques et probabilistes, ou plutôt « possibilistes » (PRIGOGINE I. 1996). Au niveau du climat, cela se manifeste principalement dans l'impossibilité de la prédiction parfaite. En effet ce système accepte un tel nombre de degrés de liberté qu'on ne sait jamais comment il va évoluer. **Chaque jour qui passe voit une nouvelle configuration unique du climat se mettre en place.** D'ailleurs, il existe ce qu'on appelle un horizon de prédictibilité, c'est-à-dire une limite de temps au-delà de laquelle toute prévision est impossible. Pour le climat, on l'estime entre 15 et 20 jours environ.

Le climat est aussi un système très instable, que l'on qualifie d'ouvert, et qui échange beaucoup d'énergie, surtout lorsque l'on considère une sous-structure à échelle fine. Et la théorie de PRIGOGINE nous apporte là encore beaucoup de nouveauté : loin de l'équilibre, la matière manifeste des potentialités de construction qu'on n'observe pas dans les situations d'équilibres. On assiste à une émergence de structures spatiales dépendantes des unes des autres, d'organisation dans des conditions de déséquilibre. On y voit apparaître des structures dissipatives – grâce à l'échange d'énergie avec l'extérieur – et une idée d'entropie constructiviste loin de l'équilibre commence à se former. L'entropie est particulièrement adaptée à ce genre de problèmes puisqu'elle mesure la capacité d'un système à s'adapter et à réorganiser sa structure, donc à tendre vers l'équilibre. C'est ainsi une mesure du désordre. On peut alors introduire des notions issues de la théorie du chaos : l'entropie correspond aussi à l'oubli des conditions initiales, qui se fait en revenant vers le point d'équilibre que l'on appelle attracteur.

Le non-équilibre est à la fois destructeur et créateur. Il y a donc une histoire dans le monde, ce qui nie toute conception déterministe de la nature : si tout est déterminé, les effets sont dans les causes, à l'infini, et le temps ne fait donc que déployer dans l'espace un univers écrit de toute éternité. **A l'inverse, si le temps est créateur, constructeur, irréversible, et s'il est porteur de possibles, il y a de l'aléatoire, du hasard, lesquels ne sont pas une ignorance des causes réelles, mais un aléatoire essentiel** (SPIRE A., 1999).

Mais comment étudier cette irréversibilité et la replacer dans un contexte d'étude climatologique ? C'est surtout **d'un point de vue conceptuel** que ces notions peuvent nous aider. Elles nous permettent de mieux appréhender les processus qui pourraient exister et se créer dans le système étudié, et ainsi de nous familiariser avec son caractère probabiliste et chaotique. Comment cela se traduit-il en termes plus physiques ?

« Le monde est différenciation, et le temps est son unification. S'il y a des objets qui sont organisés et d'autres pas, c'est l'effet du temps » (PRIGOGINE I., 1996). De l'ordre se crée

donc dans le non-équilibre, et organise le tout pour tendre vers un état stationnaire, c'est-à-dire encore sensible aux conditions externes, contrairement à l'état d'équilibre. Loin de l'équilibre, la matière acquiert de nouvelles propriétés où les fluctuations et les instabilités jouent un rôle essentiel dans le sens où la matière devient plus active. C'est pourquoi elle est porteuse de l'entropie de l'univers. Elle se distingue ainsi de l'espace-temps qui reste un support évolutif de son organisation (IDEM). Quant aux fluctuations, elles vont amener le système à « choisir » une trajectoire dans son évolution, ce choix étant bien sûr pour nous probabiliste, que l'on appellera bifurcation. Au-delà du premier point de bifurcation (bifurcation en fourche) un ensemble de phénomènes nouveaux se produit, de nouvelles organisations spatio-temporelles apparaissent. Ce sont les structures dissipatives, qui correspondent généralement à une augmentation de la production d'entropie. Après plusieurs bifurcations (bifurcations successives), on peut dire que l'évolution du système comprend donc des éléments historiques, il est irréversible et s'auto-organise. Mais comment représenter cette dynamique ? Pour les mouvements dynamiques déterministes, l'évolution d'une particule dans le temps peut être représentée par une trajectoire. Mais dans le cas de systèmes aléatoires, on ne connaît pas les conditions initiales. **C'est pourquoi on fait alors appel aux statistiques et aux probabilités, qui admettent de nouvelles solutions différentes de celles obtenues par les trajectoires individuelles.**

En somme, considérer le système climatique en terme de thermodynamique donne surtout au géographe une approche non-déterministe dans son raisonnement et peut permettre a priori d'observer beaucoup plus vite les ruptures et les évolutions du système, en sachant que tout phénomène dit chaotique est irréversible, et que des structures organisées peuvent apparaître surtout dans les systèmes en déséquilibre. Le temps est alors repensé dans un cadre plus modélisateur, et le futur devient une construction.

I.3.3 De la turbulence au chaos : une aide à la compréhension du climat

Le mot turbulence fait songer à agitation, désordre, chaos. L'évolution spatiale ou temporelle de nombreux phénomènes est caractérisée par l'absence apparente d'ordre, la coexistence d'échelles très différentes, l'impossibilité d'une reproduction et d'une prévision détaillées. Un tel comportement est qualifié de turbulent (BAILLY C. *et al*, 2003 ; LESIEUR M., 1994). Les écoulements fluides en offrent les illustrations les plus courantes, rafales de vent ou tourbillons par exemple, et ce sont des hydrauliciens, en particulier J. BOUSSINESQ et O. REYNOLDS, qui ont identifié vers la fin du XIXe siècle deux régimes d'écoulement, l'un régulier ou laminaire, l'autre irrégulier ou turbulent, jouissant de propriétés très différentes, notamment pour la diffusion des grandeurs attachées au fluide. On possède aujourd'hui une assez bonne description phénoménologique de la turbulence des fluides, une compréhension générale de sa dynamique, et des méthodes approchées de prévision de ses effets. Un écoulement turbulent combine en effet des structures tourbillonnaires dont les échelles couvrent une gamme large et continue, et qui sont toutes en forte interaction par suite de la non-linéarité des équations de Navier-Stokes. L'effet des petites structures limite donc la prédictibilité des grosses, dont l'influence compromet l'universalité du comportement statistique des petites.

Malgré toutes les études faites sur les systèmes, la notion de turbulence n'a jamais été dé-

finie. On peut toutefois tenter de dégager un certain nombre de caractéristiques : un ou plusieurs paramètres, dits de contrôle, gouvernent leur évolution ; ces systèmes présentent généralement divers états ordonnés de complexité croissante avant que la turbulence n'apparaisse ; ils passent d'un état à un autre d'une façon soudaine, appelée bifurcation, et parfois ils présentent un phénomène d'hystérésis ; généralement, un petit nombre de bifurcations (trois ou quatre) amène le système du repos à l'état chaotique ; enfin, lorsque celui-ci est atteint, des systèmes se trouvant dans des états initiaux très voisins évolueront d'une façon totalement différente : *on dit qu'ils présentent une sensibilité aux conditions initiales* (LESIEUR M., 1994).

Les notions de turbulence et de chaos, dont nous avons donné ici un rapide aperçu, nous apportent une vision dynamique de l'évolution d'un système complexe comme le climat. En météorologie, on considère les mouvements atmosphériques en deux dimensions à grande échelle, et à trois dimensions à petite échelle. Cette approche est essentielle pour nous permettre de situer notre domaine d'étude.

I.3.4 Application en météorologie

Les écoulements atmosphériques sont turbulents : l'importance de ce phénomène pour les applications météorologiques a fait de l'atmosphère un milieu privilégié pour son étude. C'est la faible viscosité de l'air, eu égard aux dimensions du milieu, qui donne naissance à des nombres de Reynolds très élevés (de 106 à 109). L'écoulement recèle donc de nombreuses échelles de mouvement en interaction, et il n'existe aucun moyen, théorique ou numérique, de traiter simultanément l'ensemble du spectre (degré de liberté). L'approche pratique, pour représenter un écoulement atmosphérique, consiste à utiliser un modèle numérique pour résoudre sur une grille spatiale fixe les équations de la mécanique de l'atmosphère. *Une partie importante de la variabilité atmosphérique échappe à la représentation explicite sur les mailles de ce réseau (les mailles sont trop grandes), et doit être prise en compte de manière statistique : on dit qu'on «paramètre les effets des échelles inférieures à la maille».* Les lois de paramétrisation ainsi définies sont l'une des principales inconnues de la météorologie. L'apport de données à échelles fines (comme celles issues de l'enneigement artificiel) permettrait une paramétrisation plus aisée du modèle.

Ces mouvements sont alors répartis en trois classes, et nous allons voir quelles approches vont nous permettre de mieux comprendre deux d'entre elles, la grande et la petite échelle.

- **Mouvements de grande échelle** : aux échelles horizontales supérieures à 100 km, l'épaisseur réduite de l'atmosphère (10 km) et sa stabilité (résistance aux mouvements verticaux) font que le mouvement horizontal est comparable à celui d'une lame fluide bidimensionnelle. La théorie de la turbulence dans un espace à deux dimensions permet alors de comprendre de nombreux aspects de ces mouvements. A grande échelle les effets statistiques produisent des structures qui sont calculables, stables et prévisibles. Ces gros tourbillons sont peu sensibles aux conditions initiales. Une expérience de Raoul Robert (ROBERT R., 2003) montre qu'un système constitué d'un grand nombre d'éléments engendre des structures ordonnées et stables. Le système échappe à « l'effet papillon », c'est-à-dire au chaos à son échelle. Ainsi, il est plus

aisé de prévoir les écoulements atmosphériques de grande échelle qu'à petite échelle, car dans le premier cas les processus sont comparables à la dynamique bidimensionnelle, qui est moins complexe que celle tridimensionnelle du second cas. Pourtant, l'addition d'une perturbation aléatoire, si petite soit-elle, contamine progressivement des échelles de plus en plus grandes, et affecte l'ensemble de l'écoulement après environ quinze jours. C'est la limite de prévisibilité déterministe de l'atmosphère. La météorologie des versants de montagne se passe dans des petites échelles de l'atmosphère, et il arrive que le temps y soit stable, en tout cas à notre échelle humaine des types de temps. Pourtant, on ne peut la comprendre que par son intégration dans un espace à trois dimensions, **car le contact avec le sol devient primordial.**

- Mouvements de petite échelle : la turbulence tridimensionnelle, d'échelle inférieure ou égale à 1 km environ (micrométéorologie), est présente en de nombreux endroits de l'atmosphère, surtout au voisinage de la surface terrestre. La couche limite atmosphérique est une zone d'épaisseur variable, de quelques mètres à 3 km, où l'écoulement est en permanence turbulent sous l'influence des perturbations thermiques et dynamiques de la surface. Plus généralement, la présence d'une zone turbulente au voisinage du sol se manifeste par des effets systématiques qui affectent l'ensemble de l'atmosphère. Les caractéristiques de la turbulence dans la limite atmosphérique interviennent donc à tous les niveaux du cycle énergétique, un obstacle de la surface provoquant un transport vertical de la quantité de mouvement qui contribue à répartir la décélération en altitude. On conçoit alors la réalité des relations entre le microscopique et le macroscopique, ce qui montre l'importance des interactions entre les échelles du climat, et le rôle de la montagne, dans un point de vue global.

Cependant, à l'échelle de notre étude (sur la surface d'un versant par exemple) les rétroactions provoquées par le relief sur l'atmosphère ne peuvent pas être pris en compte car on a changé d'échelle. Le comportement des paramètres atmosphériques *en surface* est surtout conditionné par les échelles supérieures, et par l'influence du relief sur la variabilité spatiale de ces paramètres (et des facteurs microclimatiques). Le transport de chaleur dans l'air est quant à lui assez rapide. Son mouvement vertical est déterminé par les faibles composantes verticales du mouvement turbulent, **ce qui montre que le caractère horizontal de la turbulence n'est pas primordial dans la fonction de répartition des températures à petite échelle** (JOLY D., 1994).

Les mouvements provoqués par le relief sont très chaotiques, probabilistes, et la modélisation des écoulements devient improbable. Par contre, si on s'intéresse à une petite zone de relief, on peut changer de perspective : *l'utilisation des probabilités devient un moyen d'identifier le comportement des paramètres, encore faut-il avoir une assez grande quantité de données antérieures...*

I.3.5 Statistiques et climatologie

Les modèles numériques consistent à représenter l'évolution de l'atmosphère via un ensemble de lois physiques de base, codées sous forme de plusieurs milliers de lignes de programme informatique. On calcule ainsi l'évolution de l'atmosphère à partir d'un état initial supposé connu parfaitement (malgré sa complexité). C'est une méthode déterministe idéale

pour les prévisions à court terme, mais pas au-delà car, comme nous l'avons vu, les problèmes d'irréversibilité du temps et d'hystérésis empêchent une bonne prévision, avec un horizon de prédictibilité situé entre 15 et 20 jours. Au-delà de cette limite, on ne peut plus envisager que des prévisions probabilistes, c'est-à-dire qu'il faut chercher des quantités statistiques (moyenne, probabilité...). **Il devient alors tout à fait rationnel de se référer à l'expérience passée et de considérer que la probabilité d'occurrence d'un événement est celle fournie par les observations climatiques des années précédentes** (GELEYN J.F. *et al*, 1988).

Prévision à long terme ou dans un milieu complexe ne peuvent finalement s'effectuer de manière systématique qu'avec l'utilisation des statistiques et des probabilités. C'est le domaine de la climatologie...

Finalement, le rappel de ces quelques notions développées nous ont permis de faire un rapide tour d'horizon de la complexité des systèmes climatiques. Nous pouvons ainsi mieux définir le cadre dans lequel sera effectué cette étude afin de coller au mieux à la réalité des moyens de mesures et des compétences acquises. Faut-il intégrer la turbulence dans nos calculs ? Est-ce seulement utile par rapport à nos objectifs ? Ces deux questions résument la réflexion menée dans ce chapitre : avant de se lancer dans la recherche, il faut connaître les limites théoriques du cadre de l'étude et en déduire les réflexions et les instruments qui nous permettront de répondre aux objectifs prédéfinis :

- Dans un milieu encore peu instrumenté, l'*analyse* complète des données est indispensable pour expliquer leur comportement et identifier leurs relations via les différentes échelles d'étude.
- L'approche systémique vient alors se greffer sur ces analyses pour considérer les phénomènes étudiés comme *des systèmes dynamiques complexes*.

Les statistiques et des probabilités dans l'étude des données semblent donc être des outils bien adaptés à notre problématique et à nos objectifs.

Conclusion

Ce chapitre introductif nous a permis d'éclaircir le contexte dans lequel cette étude sera menée. Il paraissait impossible d'effectuer une synthèse exhaustive de l'état de l'art et des connaissances indispensables car les échelles d'étude en milieu complexe demanderaient une «régression» des connaissances du climat à grande échelle jusqu'aux échelles les plus fines en passant par les effets du relief. C'est-à-dire une somme importante d'informations que l'on peut de toute façon retrouver dans les références proposées. C'est pourquoi les phénomènes atmosphériques qui seront étudiés grâce à la banque de données seront décrits dans leur ensemble dans les chapitres qui leur sont consacrés.

Les approches systémiques et le contexte de changement climatique s'intègrent dans les

objectifs de la thèse. Elles nous ont, dans un premier temps, permis de faire un rappel théorique sur la climatologie et la météorologie actuelle en faisant prendre conscience de la complexité des relations et de la dynamique qui existent entre les paramètres climatiques. Les relations entre échelles sont très importantes. C'est pourquoi nous pouvons réfléchir sur les mesures météorologiques de l'enneigement artificiel et les replacer dans leur contexte spatio-temporel, à l'échelle d'un versant de montagne. Quels sont les facteurs qui conditionnent le fonctionnement des paramètres mesurés ? **Deux axes de recherche s'ouvrent à nous après avoir délimité le cadre théorique de l'étude : les conditions synoptiques et les types de temps qui provoquent les variations des paramètres locaux ; les facteurs physico-géographiques qui s'ajoutent à cette variabilité.**

L'étude des données se fera par l'entremise de l'outil statistique, mieux adapté aux contraintes de la complexité, de la nature de la base de données, et des aspects géographiques.

Nous allons maintenant décrire avec précision les zones de l'étude et les réseaux de mesures de l'enneigement artificiel, qui constituent la base des informations utilisées pour cette étude.

CHAPITRE II

ESPACE D'ÉTUDE, NEIGE DE CULTURE ET RÉSEAUX DE MESURES

Introduction

La localisation et la visualisation du terrain sont indispensables dans toute étude climatologique en milieu de montagne, compte-tenu de la complexité du relief. De plus, **le nombre important de sondes disposées sur les domaines skiables choisis (environ 230 sondes de température et d'humidité et 25 anémomètres en 2006) ne facilite pas la vue d'ensemble du réseau !** Pour bien cerner ces espaces, des images en 3D, des photos montages et des cartes seront utilisés pour représenter le mieux possible les relations entre les positions des sondes et le relief. Nous présenterons donc dans un premier temps les zones d'études que constituent les domaines skiables.

Ensuite, nous expliquerons les principes et les enjeux de la neige de culture dont sont issues les mesures propres à cette étude. L'enneigement artificiel est en effet passé en quelques années de système de prestige à un système de survie économique. Une combinaison de raisons climatiques et commerciales explique cette évolution. La production de neige de culture sert surtout, entre autre, à éviter ou limiter l'impact des fluctuations de l'enneigement naturel sur les dates d'ouverture et de fermeture des stations, à assurer la bonne skiabilité des secteurs mal exposés ou des passages stratégiques (retour à la station), ou encore à produire une première couche de neige de culture garantissant une meilleure tenue de l'enneigement naturel ultérieur.

Pour notre étude, **ces installations sont évidemment primordiales puisqu'elles sont à l'origine de nos données météorologiques en montagne.** Nous avons vu dans l'introduction que ces données proviennent des sondes météorologiques posées autour des pistes afin d'automatiser la mise en route des canons à neige lorsque les conditions de température et d'humidité sont adéquates. Des anémomètres sont aussi posés pour des raisons de sécurité mais aussi de gestion de la production. Les données enregistrées sont alors stockées dans les ordinateurs. Mais encore faut-il que cette instrumentation puisse durer dans le temps afin de pérenniser les mesures. Nous verrons ainsi à travers des exemples les potentialités futures des installations d'enneigement artificiel.

Chaque site de mesure sera donc décortiqué pour classer les sondes suivant leur environnement, comme l'orientation des versants, la morphologie du relief, la présence de forêt ou de bâti. Les numéros de sondes qui servent pour leur identification (en conservant pour des raisons pratiques les numéros donnés par les installations) seront inscrits sur des cartes qui serviront de référence durant cette étude. Il paraît en effet peu judicieux d'insérer dans le texte les cartes des réseaux à chaque fois que l'on y fait référence, car le nombre de cas étudiés est très important. L'altitude et les coordonnées en Lambert II de toutes les sondes des stations de ski sont indiquées dans l'annexe 1.

II.1 PRÉSENTATION GÉOGRAPHIQUE

II.1.1 Localisation générale

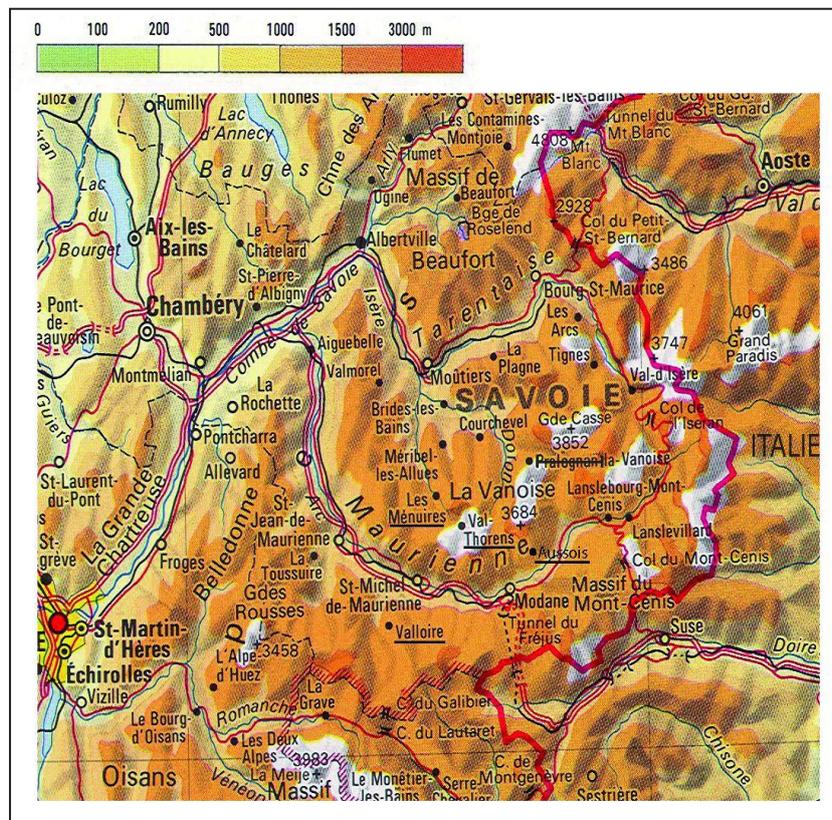


Fig. II.1.1 : La Savoie et son relief.

Les stations de l'étude sont soulignées.



10 km

• La vallée de la Maurienne : longue de 120 km, elle a une forme d'arc de cercle sur sa majeure partie, d'est en ouest, dans le sud de la Savoie (photo II.1). Son entrée est ouverte vers le Nord et sa sortie est orientée vers le Nord-Est. Son talweg passe de 300m à 1800m. Cette vallée est encadrée au nord par le massif de la Vanoise, au sud-ouest par le massif des Grandes Rousses et au sud-est par le massif frontalier du Mont-Cenis (fig.II.1.1). Dans la partie centrale de la vallée, les versants situés sur la rive droite de l'Arc sont exposés au sud et sur la rive gauche au nord (photo II.2).



Photo II.1 : La vallée de la Maurienne depuis St-Jean de Maurienne (vue vers l'est).

Photo : P. Garnier, fév. 2004.

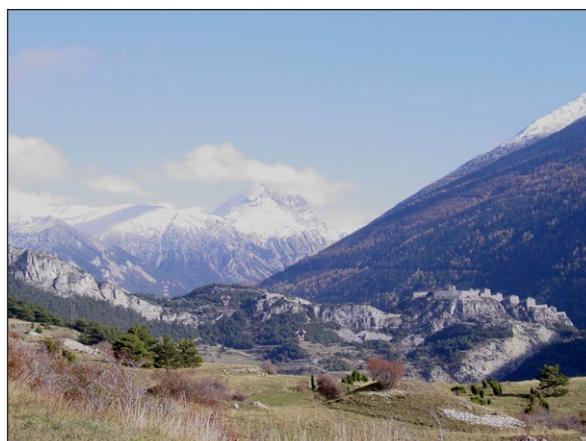


Photo II.2 : La haute-Maurienne vue depuis Aussois (vue vers l'est).

Photo : C. Chaix, nov. 2004.

D'un point de vue climatologique, cette vallée marque la transition entre les Alpes du nord et les Alpes du sud. Moins arrosée que l'ouest ou le nord des deux départements savoyards, elle connaît une position d'abri (position intra-alpine) qui lui confère dans sa partie orientale un climat sec. Aussois, situé sur un petit plateau accolé au versant sud après Modane, est la station la plus représentative de cette particularité climatique.

Le choix des autres sites d'étude s'est ensuite porté sur des vallées transversales, que l'on qualifiera de hautes vallées alpines (1500m - 3000m).

- La vallée des Bellevilles, qui abrite entre autres les stations des Menuires et de Val Thorens, est orientée sud-nord (amont - aval, photo II.3), et a une forme de Y. L'un des amphithéâtres abrite la station de Val-Thorens, l'autre le lac du Lou. Leurs rivières respectives se rejoignent pour former le Doron de Belleville, qui s'écoule dans le fond de vallée et se jette dans l'Isère dans la vallée de la Tarentaise. Cette haute vallée alpine, dont les sommets englacés culminent à plus de 3500m au-dessus de Val Thorens, a la particularité d'être située entre Tarentaise et Maurienne (on peut accéder à la station de Val Thorens directement depuis la vallée de la Maurienne). Plus arrosée et plus exposée aux fronts pluvieux et aux vents d'ouest, cette vallée est à la fois topographiquement et climatiquement une zone de transition entre la Maurienne et la Tarentaise.



Photo II.3 : La vallée des Bellevilles depuis Val Thorens (vue vers le nord). Au fond, la vallée de la Tarentaise. Au premier plan à gauche, la station des Menuires.
Photo : C.Chaix, mars 2005.

- La «vallée d'Or» est une vallée perchée orientée sud-nord, rejoignant le col du Galibier au col du Télégraphe (photo II.4). Elle se sépare aussi en deux au niveau de Valloire, continuant vers le sud-ouest en direction du col du Galibier (vallée de la Valloirette) et vers le sud-est par une combe appelée Combe de l'Aiguille Noire. D'orientation et de forme quelque peu similaires à la vallée des Bellevilles, sa position offre une alternative climatique plus au sud mais aussi plus à l'ouest qu'Aussois. Le



Photo II.4 : Le col du Télégraphe vu depuis le Mont de la Sétaz (vue vers le Nord). Au fond, la vallée de la Maurienne, et au centre, la station de Valloire.
Photo : C.Chaix, mars 04.

«triangle» formée par la position de nos sites d'étude englobe donc assez bien les particularités climatiques du sud de la Savoie, arrosés à l'ouest et au nord, plus sec au sud.

II.1.2 Aussois

Cette station village (1500m) est située sur les flancs sud et sud-ouest de la Dent Parrachée, un sommet qui domine la haute-Maurienne. Les pistes de la station atteignent 2800m (fig.II.1.2 et 3). A l'aval du village, les gorges formées par l'Arc montrent bien la position dominante de ce plateau sur la vallée. A l'amont, on distingue un premier versant (1, voir photo II.5) assez plat dans sa partie basse (prairies de fauche) mais raide dans sa partie haute et occupé par la forêt (pins à crochets, pins cembro, mélèzes). Puis, il se scinde en deux et présente une face orientée vers l'est (2) et une crête vers le sud (3) occupées aussi par des prairies de fauche. Enfin, le prolongement rejoint un autre versant (4) appartenant directement à la Dent Parrachée, et qui commence au niveau des deux lacs de barrages du



Fig. II.1.2 : La vallée de la Maurienne et la station d'Aussois. Le trait blanc délimite approximativement le domaine skiable, et le trait noir la station.
Image 3D : Google Earth.

Plan d'Aval et du Plan d'amont, aussi appelé le Fond d'Aussois. Il se prolonge en altitude vers les crêtes du versant ouest de la montagne (pelouse alpine). De chaque côté de la station, on trouve deux torrents qui délimitent nettement cet ensemble que constitue la station d'Aussois, son plateau et son versant, bien exposé au sud. D'ailleurs, le climat est particulièrement sec, en relation avec l'effet d'abri intra-montagnard de la haute-maurienne. En début et en fin de



Photo II.5 : Le versant sud d'Aussois.

Les chiffres représentent les quatre zones morphologiques du domaine skiable.

Source : Office du tourisme d'Aussois.

saison, ainsi que lors d'épisodes doux de plein hiver, la neige fond vite, et les températures maximales sont souvent extrêmes.



Fig II.1.3 : Plan des pistes d'Aussois.
Source : Office de Tourisme d'Aussois.

II.1.3 Les Menuires - Val Thorens

Ces deux stations contiguës englobent la quasi-totalité du fond de la vallée des Belle-villes, seul le cirque du Lou (au sud-ouest) étant exclu du domaine (fig.II.1.4).

- Les Menuires : cette station de sport d'hiver a été construite à 1850 mètres d'altitude. Elle se situe sur la commune de Saint-Martin-de-Belleville, accessible depuis Moûtiers, et appartient comme Val Thorens aux réseaux de pistes des « Trois vallées ». Le Mont de la Chambre culmine à 2800m d'altitude sur le versant ouest (photo II.6 et fig.II.1.5), dont le relief reste assez uniforme.



Fig. II.1.4 : Vue d'ensemble sur la vallée des Bellevilles avec les stations des Menuires et de Val Thorens.

Le trait blanc délimite le domaine skiable des deux stations, et les traits noirs les stations.
Image 3D : Google Earth.

La station s'étend sur les versants ouest et est, et le fond de vallée. On y distingue plusieurs quartiers d'habitation assez indépendants, qui commencent au fond de vallée vers 1700m et finissent vers 2000m. Le versant ouest a un relief assez homogène, où alternent vallons et crêtes, ainsi que quelques petites falaises (photo II.6). Le fond de vallée est peu encaissé après la confluence des deux petites vallées puis se creuse au niveau des Menuires. Le versant est est quant à lui divisé en deux parties, mais la partie basse qui nous intéresse est à peu près semblable au versant ouest dans sa morphologie. A cette altitude, on ne trouve pas de forêt, le



Photo II.6 : Le versant ouest des Menuires (vue vers l'est).

Au centre, le quartier de Reberthy.

Photo montage, C.CHAIX, mars 2005.

site est recouvert par de la pelouse alpine, sur calcaire jusqu'à la moitié du versant et sur silice au dessus. On trouve des fourrés d'aulnes verts le long du Doron de Belleville (la rivière), des bosquets de sapin et une lande sur le versant est et au fond de vallée.

- Val Thorens : située à 2300 mètres d'altitude, c'est la station la plus haute d'Europe. Le relief en forme de cirque a permis à la station de s'installer en son centre et il est possible de prendre des remontées mécaniques dans chaque direction vers le haut, sauf vers le nord-ouest qui est le débouché naturel du cirque (photo II.7). La station est posée juste en bas du versant sud, assez raide, alors que la pente est assez douce avant d'atteindre le versant nord. Des combes (de Thorens, du Borgne ou de Caron) amènent les skieurs au pied des versants raides et surmontés de glaciers qui recouvrent les hauteurs. Le versant ouest appartient à l'Aiguille de Pécelet (3560m) et l'érosion glaciaire a fortement découpé le versant en vallons profonds et crêtes élevées. Ainsi, les pistes prennent souvent les axes des talwegs entre les vallums morainiques (fig.II.1.6). Un nouveau domaine skiable a été créé de l'autre côté de la vallée, sur un versant de la vallée de la Maurienne au-dessus d'Orelle (versant sud). Comme on peut le constater, Val Thorens dispose d'un domaine skiable hors-norme et nous verrons comment les moyens mis en oeuvre pour développer l'enneigement artificiel en a fait le domaine d'étude le plus intéressant des quatre stations. En effet, depuis les saisons 2005 et 2006, les réseaux de sondes se sont étendus du bas des versants jusqu'en haut des crêtes.

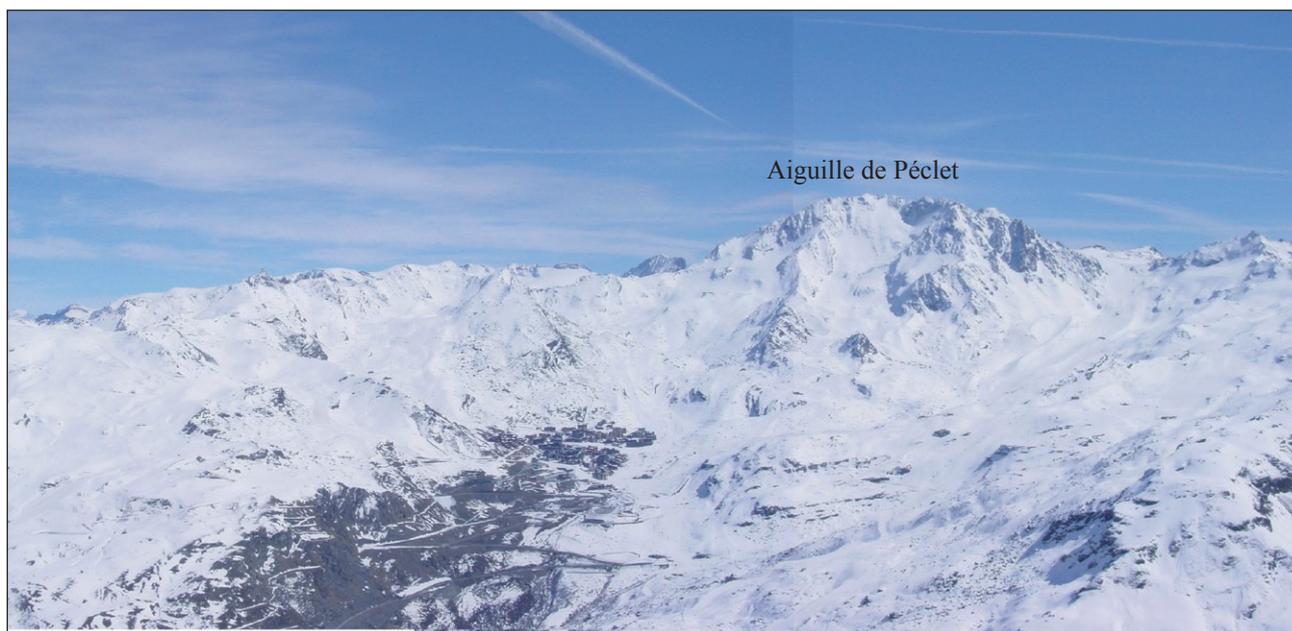


Photo II.7 : Le cirque de Val Thorens (vue vers l'est).

On distingue au centre l'Aiguille de Pécelet.

Photo montage, C.CHAIX, mars 2005.

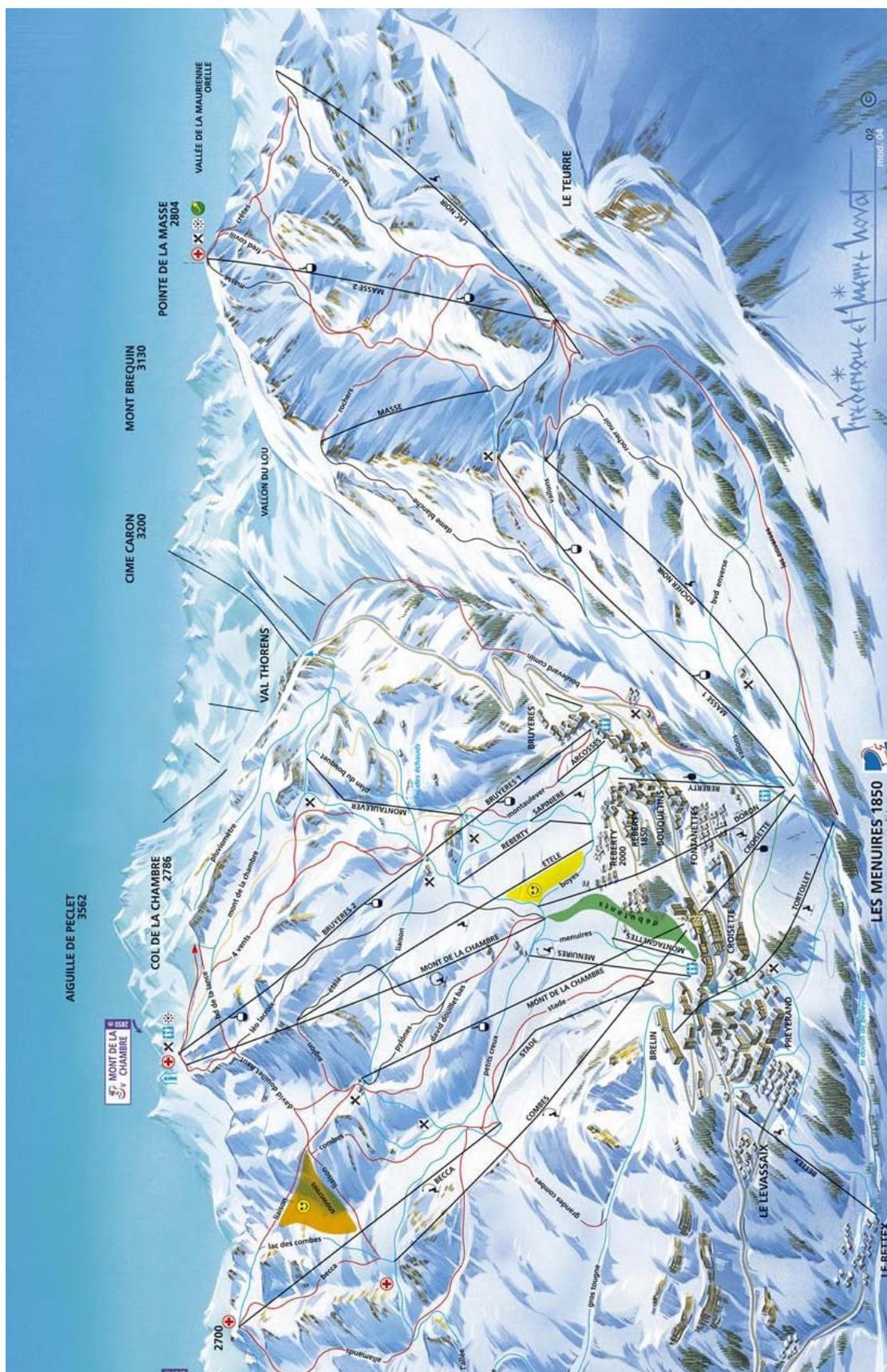


Fig. II.1.5 : Plan des pistes des Menueires.
Source : Office de Tourisme des Menueires.



Fig. II.1.6 : Plan des pistes de Val Thorens.
Source : Office de tourisme de Val Thorens.

II.1.4 Valloire

Au pied du célèbre col du Galibier, Valloire est un village composé de 17 hameaux étagés entre 1400 m et 1800 m. Le chef-lieu est situé à 1450m d'altitude au pied du Mont de la Setaz (face nord) qui est le premier versant directement accessible pour le ski. La vallée se sépare en deux à ce niveau, l'une vers la Combe de l'Aiguille Noire (fig.II.1.7, vallée de gauche, et photo II.9), l'autre vers le col du Galibier. Le crêt du Quart culmine à 2530m et constitue le sommet de la station ainsi que celui des équipements d'enneigement artificiel. La forêt est beaucoup plus présente que dans les autres stations avec une série principale de l'épicéa (et fourrés d'aulnes verts) se situant au-dessous des pelouses alpines. On trouve aussi quelques mélèzes et pins cembro. Le domaine skiable s'étend sur des versants nord, ouest et est, et dans deux fonds de vallée. Le versant nord (photo II.8) est composé d'une partie inférieure en forêt, et d'une crête supérieure bien exposée aux flux. On peut d'ailleurs redescendre sur les vallées transversales par les versants est ou ouest. Le grand versant ouest (photo II.8) n'est vraiment skiable que dans sa partie supérieure ou vers le fond de la Combe de l'Aiguille Noire, et présente des pentes assez uniformes. Enfin, dans la vallée de la Valloirette, nous avons plutôt un ski de fond de vallée destiné aux débutants. Nous verrons comment cette configuration permet d'étudier les interactions entre les différentes brises, car Valloire se situe au débouché de deux vallées et son versant nord est ainsi exposé à de multiples flux locaux.

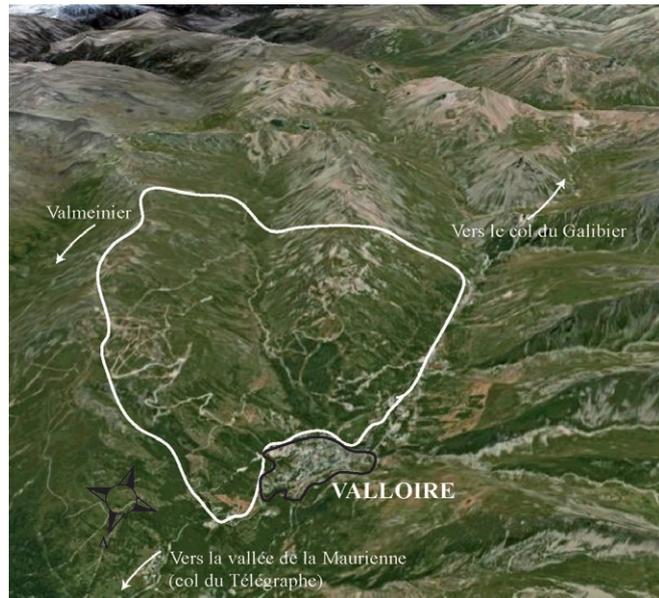


Fig. II.1.7 : Le domaine skiable de Valloire.

En trait blanc, les limites approximatives du domaine skiable.
Image 3D: Google Earth.



Photo II.8 : La station de Valloire, le versant nord du Mont Setaz (à droite), et le versant ouest du Crey du Quart (à gauche).

Photo : Office du tourisme de Valloire.



Photo II.9 : La Combe de l'Aiguille Noire.

Photo : C.Chaix, mars 2004.



Fig. II.1.8 : Plan des pistes de Valloire.
Source : Office de Tourisme de Valloire.

II.2 L'ENNEIGEMENT ARTIFICIEL

II.2.1 Potentialités et impacts des installations d'enneigement artificiel

L'enneigement artificiel a vu le jour aux États-Unis il y a une cinquantaine d'années. Les canons à neige se développent vraiment dix ans plus tard en Amérique du Nord, et une autre décennie s'écoule avant que les installations d'enneigement artificiel ne gagnent l'Europe. Dans les Alpes, l'enneigement artificiel a connu une brusque accélération suite aux hivers à faible enneigement de la fin des années 80, et dès le début des années 90, l'avenir de cette technique est assuré. Mais elle stigmatise un conflit entre les acteurs économiques de la montagne et les écologistes. Il existe en effet des effets plus ou moins défavorables sur les écosystèmes, mais les bénéfices qu'apporte cette méthode de production sont évidemment indispensables au maintien des activités de sports d'hiver. Rappelons ici brièvement les deux catégories d'arguments (MARNEZY A., RAMPNOUX J.P., (2006) ; SEATM, (1996) ; site internet de l'Association Nationale des Producteurs de Neige de Culture) :

- Les intérêts économiques de la neige de culture :

- Limiter les aléas d'enneigement lors de saisons déficitaires, améliorer l'enneigement de début de saison afin de démarrer la saison à date fixe programmable et de fonctionner jusqu'à fin mars - début avril, limiter le handicap d'enneigement des stations de moyenne montagne,
- Améliorer la qualité de l'enneigement du domaine skiable,
- Maintenir une couverture neigeuse dans les secteurs défavorables (exposition, topographie, usure par surfréquentation...),
- Assurer le retour «skis aux pieds» à la station,
- Garantir l'organisation des manifestations sportives,
- Allonger la saison au-delà des limites imposées par l'enneigement naturel et dans le respect du calendrier hivernal habituel, en permettant à la fois un abaissement relatif des charges fixes, et un démarrage et un arrêt progressifs de l'ensemble du domaine skiable.

Encore faut-il que la station réponde déjà à certains impératifs : la nécessité de conditions climatiques favorables (froid) et la présence d'une ressource en eau disponible en quantité suffisante. En montagne et au-dessus de 1500m dans nos régions, il est pourtant assez facile de réunir ces conditions.

En ce qui concerne les avis défavorables, ils sont principalement liés aux impacts négatifs de l'installation sur l'environnement.

- Les contraintes environnementales :

- L'eau : c'est une ressource rare et l'installation d'enneigement en est une grosse consommatrice. Il est couramment admis que 2m³ de neige sont produits à partir de 1m³ d'eau. Or, pour la saison 1999-2000, une étude a montré que pour 119 stations équipées en France, la consommation d'eau observée a été évalué à 10 millions de m³, soit 19% du volume annuel prélevé en eau potable. A l'hectare enneigé, la consommation s'élève à un ratio de 4000 m³

(DUGLEUX E., 2002). Le prélèvement d'eau en milieu naturel est soumis au respect d'un débit minimal. Dans ce cadre, les installations d'enneigement artificiel se trouvent en concurrence avec les autres usages de la ressource en eau que sont en particulier l'alimentation en eau potable et la production hydroélectrique. La conjonction de facteurs de risques (sécheresse, manque de neige) peut amener à une crise de l'eau. Les autres risques associés aux quantités d'eau utilisées pour l'enneigement artificiel sont liés à la présence parfois d'une retenue (glissements de terrain, infiltrations, rupture de digue,...), ou encore aux problèmes d'érosion sur certaines pistes sensibles ou mal préparées. Tout l'enjeu réside donc dans la capacité de l'installation à fabriquer de la neige artificielle sans pour autant être une grosse consommatrice d'eau (REYNARD E., 2000).

- La végétation : en règle générale, il y a peu d'effets au niveau de la couverture herbacée sauf sur les milieux spécifiques tels que les zones humides ou les espèces rares. On a pu constater parfois une légère modification des caractéristiques de la végétation par l'apport d'eau de qualité différente de celle du sol, plus acide par exemple. On notera aussi un décalage dans le temps de la croissance de la couverture herbacée du fait de la fonte plus tardive de la neige sur les pistes enneigées artificiellement.

- Le bruit : il existe une importante pollution sonore faite par les enneigeurs (les canons à neige), nuisible pour les habitants ou la faune.

- La faune : les impacts de ce type d'aménagement sur la faune sont d'autant plus limités que celle-ci est en général déjà sélectionnée par la présence de la station elle-même.

- Le paysage : l'approche paysagère est assez subjective, la question se pose en général pour le bâtiment de l'usine à neige, pour les retenues collinaires, ou encore, quand les pistes enneigées par les canons apparaissent en blanc sur le fond vert des pelouses ou de la forêt.

- L'écologie : l'utilisation d'un adjuvant, le snowmax, à base de protéine, a alimenté le débat le plus intense. Son impact sur l'environnement n'a pour l'instant jamais été réellement démontré.

L'enneigement artificiel va probablement continuer à se développer car les préoccupations sur le manque de neige semblent plus importantes à contenir que les impacts sur l'environnement, du moins politiquement et économiquement. La plupart des stations de ski cherchent à s'équiper d'installations d'enneigement artificiel, ce qui nous amène à penser que la pérennité des réseaux de mesures (sondes météorologiques) est assurée tant que le contexte climatique reste bien sûr assez stable.

II.2.2 Principes de fabrication de la neige de culture

II.2.2.a. Les conditions physiques de fabrication

- Les conditions internes (propres à la technique de fabrication) :

Le schéma de la fabrication de la neige de culture est simple : il consiste à pulvériser des gouttelettes d'eau dans un air ambiant froid de manière à obtenir dans un laps de temps très court une congélation parfaite de ces particules d'eau, avant qu'elles n'atteignent le sol. Ce résultat est assez facile à obtenir pour des températures de l'ordre de -10°C par exemple, mais

beaucoup plus délicat pour des températures plus proches de 0°C. La température de l'eau intervient également dans le rendement de l'installation, ainsi que le taux d'hygrométrie de l'air.

Pour que la production de neige soit possible et en conditions optimum, il faut impérativement que trois conditions soit réunies : le bilan thermique doit être équilibré, c'est à dire que le stock de frigories doit être supérieur ou égal au stock de calories. Il faut qu'il y ait nucléation pour ne pas laisser d'eau à l'état de surfusion et enfin, que la rapidité de congélation soit suffisante. Pour cela l'enneigeur doit obligatoirement livrer des gouttelettes dont le diamètre est compris, toute technologie confondue, entre 0,2 et 0,8 mm.

• Les conditions atmosphériques (externes) :

La fabrication de la neige de culture dépend étroitement des conditions de l'air ambiant que l'on détermine par les paramètres physiques suivants, qui déterminent les conditions limites de la fabrication de la neige :

- La température humide : c'est une grandeur qui met en relation la température sèche de l'air et le pourcentage d'humidité relative contenue dans l'air. Cette grandeur peut être mesurée avec un psychromètre (thermomètre humide) ou calculée. On peut évaluer la température humide en utilisant un abaque (fig.II.2.1).

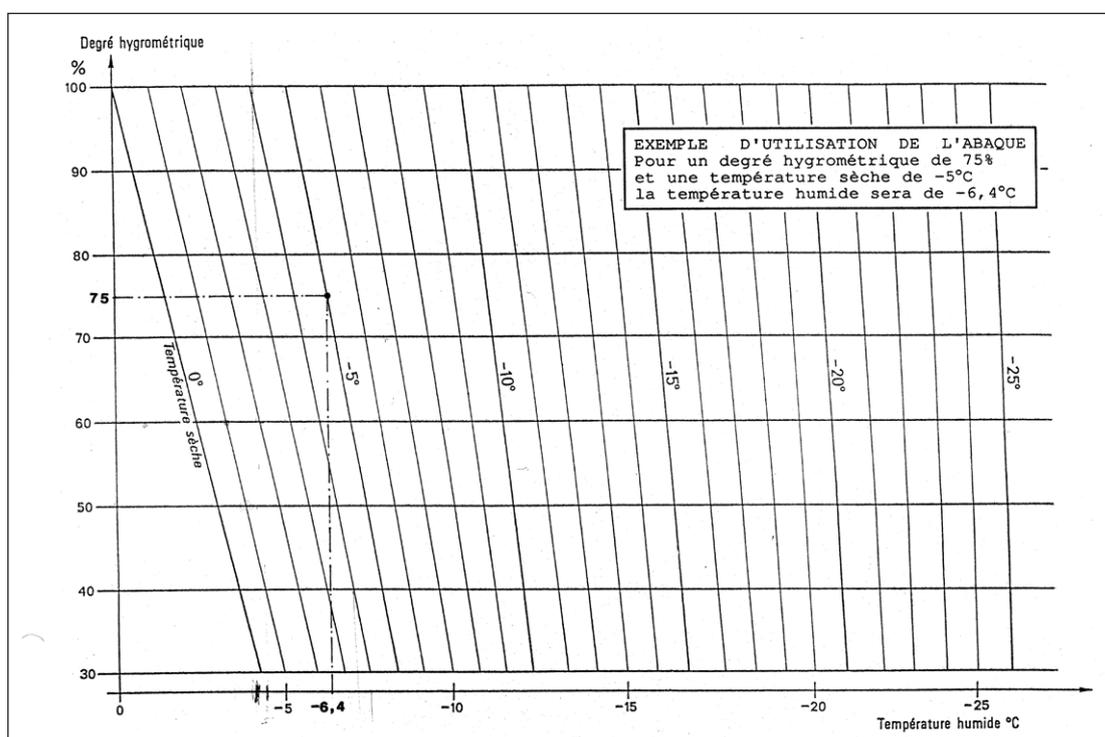


Fig. II.2.1 : Abaque de la température sèche en température humide à partir de l'hygrométrie.

Les valeurs des deux types de température sont proches pour une humidité relative de 100%, mais elles s'écartent d'autant plus que l'humidité relative est faible, la température sèche restant toujours supérieure. Source : SEATM, 1996.

Les canons à neige entrent généralement en fonction quand la température humide est de -4°C (soit -2°C de température sèche et 60% d'humidité ; -3°C et 80% d'humidité ; -4°C et 100% d'humidité).

- La température (température sèche) : en considérant un air ambiant saturé de vapeur, on peut dire que le principe de refroidissement se réalise par une convection directe de la gouttelette d'eau dans l'air ambiant froid. Ce transfert de chaleur entraîne l'élévation de la température de l'air ambiant jusqu'à un maximum de 0°C : on peut ainsi déterminer la quantité d'air nécessaire. Les températures très froides sont donc nécessaires pour une meilleure production.

- L'humidité relative : plus l'humidité relative est faible, plus l'eau s'évaporerait pour atteindre une saturation de l'air ambiant, facilitant ainsi l'échange d'énergie.

- La pression atmosphérique : le pouvoir de refroidissement de l'air diminue lorsque la pression atmosphérique s'abaisse, à l'inverse son pouvoir d'évaporation augmente. Les deux influences s'équilibrent et ainsi la capacité de refroidissement de l'air dépend essentiellement de l'évaporation et de la convection.

- Le vent (direction, force) : il affecte le processus de refroidissement de deux façons : en accroissant la quantité de l'air ambiant considéré, et en augmentant la vitesse des transferts d'énergie.

II.2.2.b. Propriétés de la neige de culture

Contrairement à la neige naturelle, la formation du cristal de neige de culture ne provient pas d'un phénomène de condensation solide de la vapeur d'eau (passage direct de l'état gazeux à l'état solide), mais simplement de la solidification des gouttelettes d'eau (passage de l'état liquide à l'état solide) : c'est pourquoi les cristaux de neige de culture ne peuvent avoir l'apparence que de granules de forme sphérique. Plus stable sur les plans thermodynamiques et mécaniques, la neige de culture ne se tasse que très peu. Les sondages effectués dans le manteau neigeux montrent que la neige de culture présente une excellente résistance à l'enfoncement de la sonde par battage. Ils corroborent les résultats des mesures de résistance au cisaillement et confirment ainsi l'aptitude de la neige de culture à résister au phénomène d'érosion dû au passage des skieurs.

II.2.2.c. Les systèmes de production

- Les enneigeurs (canons à neige). Il en existe deux sortes, les bi-fluides (installations « haute pression ») et les mono-fluides (installations « basse pression »). Les bi-fluides sont les plus courants (photo II.10 et 11).

- Des tuyauteries pour acheminer l'eau et éventuellement l'air comprimé jusqu'aux canons.

- Une machinerie (pompes, compresseur...).



Photo. II.10 : Enneigreur bi-fluide.

Utilisation d'air comprimé et d'eau sous pression, à mélange interne ou externe.

Photo : Association Nationale des Producteurs de neige de culture.



Photo. II.11 : Enneigreur mono-fluide.

Utilisation d'eau sous pression et d'un ventilateur.

Photo : Association Nationale des Producteurs de Neige de Culture.

II.2.2.c. L'automatisation du système

Pour optimiser la production de neige de culture, les fabricants ont dû intégrer au système **une composante d'automatisme, grâce à des sondes de mesures des paramètres internes et externes**. En effet, les conditions climatologiques très fluctuantes et la relative complexité d'exploitation de l'installation ne permettent pas une utilisation optimale du système et donc une bonne production. Il faut alors mettre en place un réseau de mesures sur l'ensemble du secteur à enneiger, et les données fournies sont utilisées par l'organe de commande pour gérer le fonctionnement du parc des enneigeurs. L'analyse de ces données va permettre de régler les conditions « intérieures » de production, par la mesure de la pression de l'eau et de l'air sur chaque vanne, et aussi les conditions « extérieures », par la mesure de la température de l'air et de son taux d'hygrométrie. Les sondes météorologiques sont disposées le long des pistes.

Dans un cas d'automatisme intégral, l'exploitant peut piloter son installation depuis la salle des machines (SDM) ou à distance. Ainsi, il lui fixe des priorités de fonctionnement et celle-ci gère automatiquement le démarrage des pompes et des compresseurs et adapte les débits d'air et d'eau aux besoins théoriques des canons en fonctionnement. Dans ce cas, il y a parfaite adéquation d'une part entre la capacité de production de l'installation pour des conditions climatiques particulières et d'autre part la demande de l'utilisateur (SEATM, 1996).

II.2.5 Description des sondes et données météorologiques enregistrées

II.2.5.a. Constitution des sondes

- Capteurs de températures et d'humidité relative ; anémomètres,
- Une embase métallique à sceller dans le sol,

- Une perche métallique de 2.5 à 3m de hauteur,
- Un capot spécial de protection de l'élément de mesure en polyester ou PVC (pour la mesure de température).

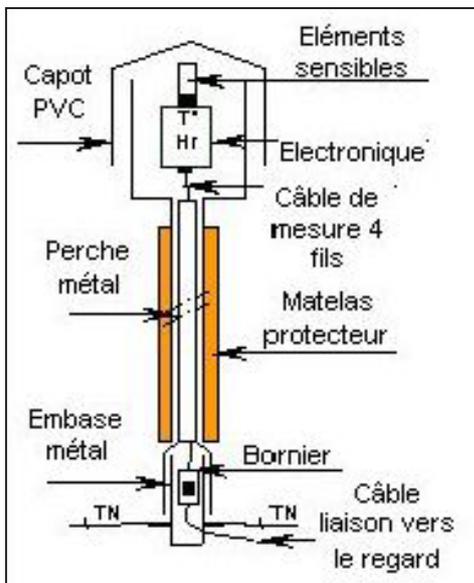


Fig. II.2.2. : Schéma d'une sonde de température et d'humidité relative.

Source : Association Nationale des Producteurs de neige de culture.

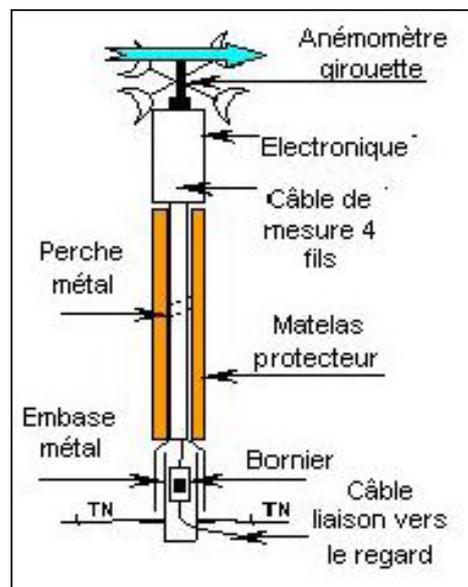


Fig. II.2.3. : Schéma d'un anémomètre.

Source : Association Nationale des Producteurs de neige de culture.

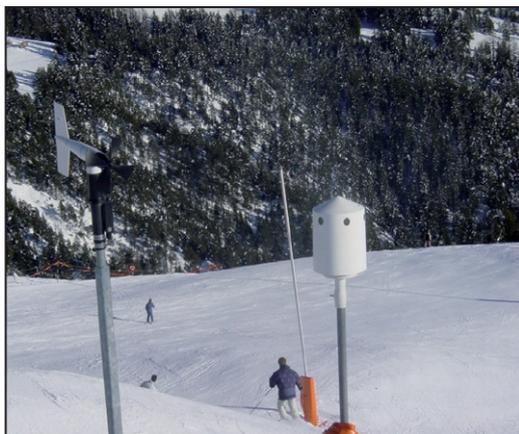


Photo. II.12 : Anémomètre (à gauche) et sonde de température et d'humidité (à droite) sur une piste à Aussois.

Photo : C.Chaix, fév. 2005.



Photo. II.13 : L'abri anti-radiation et la sonde T220 de York.

Photo : C.Chaix, avril 2006.

Généralement les éléments sensibles et les électroniques sont regroupés dans un boîtier unique afin d'homogénéiser les mesures, la connexion des capteurs vers le boîtier de mesure ou l'afficheur est alors effectuée avec un câble 4 fils blindés raccordé au regard le plus proche (fig.II.2.2. et 3). Les capteurs sont répartis le long de la piste à enneiger, soit à équidistance (100 à 300 m pour les mesures de température), soit en des points spécifiques (anémomètre). Leurs positions doivent être déterminées avec soin afin de refléter avec précision les conditions météorologiques locales, même si cette pose n'est pas effectuée par un expert. Enfin, les échelles de mesure courantes pour la température sont de 50 °C (- 30 à + 20 °C).

Les capteurs utilisés par York S.A. (fabricant des installations d'enneigement artificiel

de nos domaines d'étude) sont des Transmicor série T220 pour la température (sonde Pt100) et l'humidité, et des Young model 04101L pour le vent. Ces appareils de mesures sont de grande qualité et leur précision est très bonne (photo II.12 et 13). Lorsque que l'on a ajouté toutes les erreurs de mesures possibles liées aux transferts de données, de stockage, on obtient au final environ $\pm 0.5^\circ$ pour la température, $\pm 3\%$ pour l'humidité relative, $\pm 1\text{m/s}$ pour la vitesse du vent et $\pm 10^\circ$ pour la direction (annexe 3).

II.2.5.b. Pas de temps de mesures

- Horaires :

- environ toutes les 60 minutes pour la température et l'humidité, et toutes les 20 minutes depuis les années 2000-2003 (spécifique à chaque station, voir partie II.3).
- environ toutes les 15 min pour les anémomètres.

Le pas de temps n'est pas constant, il peut varier d'une minute environ. Ainsi on peut avoir 23 ou 25 mesures horaires dans une journée.

L'heure inscrite au moment de la mesure est l'heure de la première mesure dans le réseau de sonde. En effet, le système commence par interroger la première sonde et récupère la donnée, puis continue avec les autres sondes. Ainsi, dans les grands réseaux (comme aux Menuires par exemple), il peut se passer quelques minutes entre l'enregistrement de la première mesure et la dernière. Ce décalage reste quand même acceptable pour nos échelles d'étude.

- Annuels : de mi-novembre à mi-avril. Mais les dates de mise en route et de fermeture de l'installation dépendent des conditions naturelles de températures et d'enneigement, qui peuvent varier sur 15 jours, voire un mois suivant les saisons et les stations de ski.

II.2.5.c. Acquisition des données

- Le logiciel d'exploitation : l'enregistrement des données est effectué par l'ordinateur présent dans la salle des machines. Un logiciel de gestion, développé spécialement, permet aux nivoculteurs de consulter les données sous forme de graphiques via l'interface (courbes de température, histogrammes, fig.II.2.4). Il est possible de connaître les moyennes pour une sonde ou pour plusieurs sondes, et aussi le nombre d'heures pendant lesquelles les mesures sont inférieures ou supérieures à des seuils donnés. Ces statistiques permettent de connaître les potentialités thermiques des zones mesurées et sont utiles aux nivoculteurs. On trouve aussi des données en dehors des paramètres atmosphériques sur les consommations en eau (par sonde, par piste, par température...), les durée de fonctionnement, l'énergie consommée par la salle des machines ou encore les débits et cumuls des canons à neige. Ces informations seront très utiles dans l'optimisation de la production.

- Extraction des données à des fins climatologiques : la méthode d'extraction est assez rigide mais il existe une fonction d'exportation des données en format texte. Malheureusement, le logiciel scinde les périodes en saison et il n'est pas possible de prendre plus de six sondes à la fois. Le travail d'extraction est très fastidieux car limité à six sondes pour une seule saison

à la fois (pour l'ensemble des sites de l'étude, cela correspond à plus de 2000 extractions de données !). D'ici peu d'ailleurs, les informaticiens de York vont pallier cette contrainte en permettant une extraction totale sous format texte.

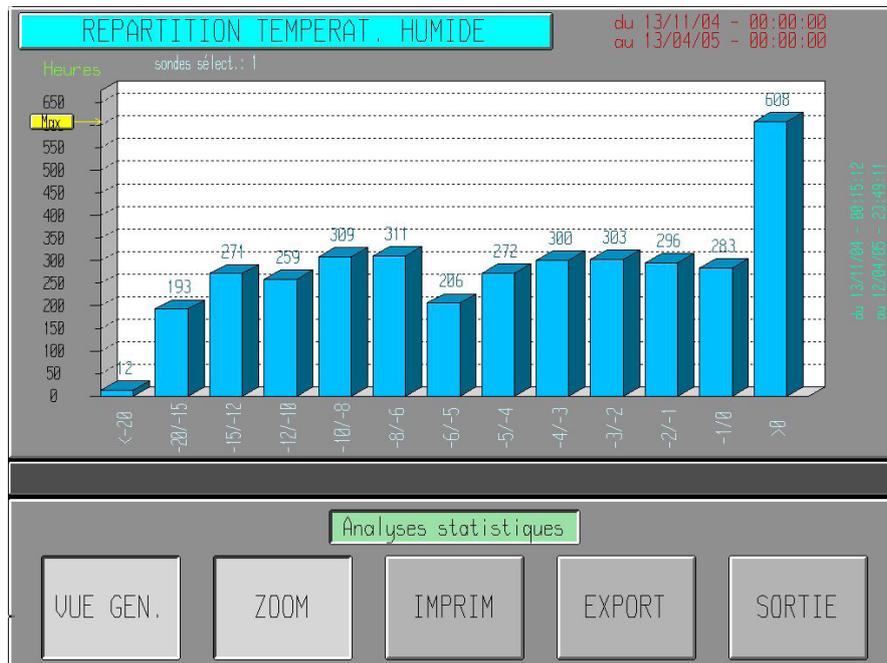


Fig. II.2.4. : Interface du logiciel de gestion de l'installation de neige de culture.

Statistiques sur la répartition des températures humides de la sonde 1 aux Menuires (2004-2005).

Source : YORK S.A

Les capacités des installations d'enneigement artificiel en matière d'étude climatologique sont donc importantes, mais il faut toujours s'assurer que des biais ne sont pas venus s'ajouter dans les mesures.

II.2.5.d. Méthodologie critique

Il existe plusieurs contraintes dans les enregistrements, car le système n'a pas été pensé pour être utilisé à des fins climatologiques :

- Des lacunes sont présentes dans les séries, à cause soit d'un dysfonctionnement général ou de panne de sondes. Parfois les mesures sont altérées ou présentent des chiffres faussés. Le nettoyage des séries est donc obligatoire, mais en général on a une bonne continuité. Il est aussi dommageable que certaines variables soient inexploitable, comme la pression barométrique enregistrée au niveau des départs mais dont les mesures sont trop parsemées.

- Les sondes ne sont pas forcément posées de manière adéquate par rapport aux contraintes du milieu. Une connaissance parfaite de leur position est donc indispensable pour comprendre si des biais physico-géographiques ont pu influencer les mesures : parfois, des sondes sont installées au-dessus ou à côté d'un petit chalet de service (création de chaleur). Dans d'autres cas, elles sont posées en lisière de forêt, près des immeubles, à l'ombre d'un pylône, etc. Les mesures obtenues peuvent tout de même nous renseigner par comparaison sur l'influence de ces paramètres externes. Tout dépend des objectifs de l'étude...

- Notre principal souci dans cette étude reste l'influence du dispositif anti-radiation (la cloche) sur la mesure des températures. En effet, en plein soleil, la mesure de la température est

fortement influencée par la chaleur qui s'accumule dans l'abri. En fait, le rayonnement direct et indirect doit être à tout prix arrêté sur le capteur. Des ouvertures dans la cloche permettent au vent de brasser l'air à l'intérieur, mais cela dépend de sa vitesse (plus de 3m/s) pour que l'influence de la radiation reste faible. Le fait d'installer un ventilateur est sûrement le meilleur moyen d'échapper à ce biais, mais la mise en place de ce système est compliquée et coûteuse (de plus, le ventilateur minimise les températures maximales et induisent une rupture dans les séries). Les abris Météo-France ne sont quant à eux pas forcément mieux adaptés à la haute-montagne. Les études qui existent (LEROY M., 1993 et 2002) montrent que les abris à coupelles comme ceux utilisés pour les stations HOB0 ou CAMPBELL du laboratoire Edytem sont parfaits quant la ventilation est bonne. Ils sont d'ailleurs aussi utilisés par Météo-France dans certains cas. Nous devons donc comparer les mesures effectuées par les sondes YORK et celles d'une station standard (voir chapitre IV). Ce problème semble d'ailleurs primordial dans la conception d'une installation d'enneigement artificiel : certaines périodes de froid ont pu être «oubliées» par le système puisque la température sous abri était supérieure à celle de l'air...

II.3 LES RÉSEAUX DE MESURES DES DOMAINES SKIABLES ÉTUDIÉS

La particularité des réseaux de mesures (c'est-à-dire des sondes posées sur le terrain) est qu'elle est évolutive dans le temps. En effet, chaque année depuis le début de l'installation (1988 pour les Menuires par exemple), des sondes sont rajoutées en même temps que les canons à neige. Heureusement, les sondes mises en place ne sont pas déplacées ! Dans cette partie, nous verrons quels sont les réseaux de sondes existants entre 2004 et 2006, même si ceux-ci seront amenés à grossir. La position de chaque sonde, dans la mesure du possible, a été mesurée au GPS, et les altitudes ont été croisées avec les cartes de l'IGN et les MNT de la BD ALTI. Mais quand on se retrouve devant un réseau de 75 sondes, la connaissance du terrain est indispensable... Enfin, toutes les sondes sont numérotées et nous garderons les désignations données par les installations d'enneigement artificiel.

Afin de pouvoir visualiser la position des sondes sur le terrain, nous allons utiliser des cartes de l'IGN (cartoexplorer©) et des photos aériennes (photoexplorer©) drapées sur un MNT (modèle numérique de terrain de la BDalti© de l'IGN) grâce au logiciel Surfer 8©, en fonction des contraintes géographiques de chaque site (étendue du terrain, dénivelé, etc.). L'avantage de Surfer est sa simplicité d'utilisation et ses multiples fonctions parallèles d'étude du terrain (calcul des pentes, expositions, etc.). Les altitudes, les coordonnées (en Lambert II) des principales sondes sont fournies dans l'annexe 1. Enfin, les cartes et les figures qui suivent serviront de référence pour toutes les descriptions à venir des réseaux et des noms de lieu.

II.3.1 Le réseau d'Aussois

Créée lors de la saison 1997-1998, l'installation d'enneigement artificiel d'Aussois comptait 11 sondes et aucun anémomètre. En 2005, on est passé à 17 sondes et 5 anémomètres, et une nouvelle piste sera équipée en altitude l'année prochaine (fig. II.3.1). Comme on peut le voir, le

bas des pistes est toujours instrumenté en premier, puis le réseau se développe vers le haut. Le pas de temps de mesures est passé de 60 à 20 min en 2003-2004.

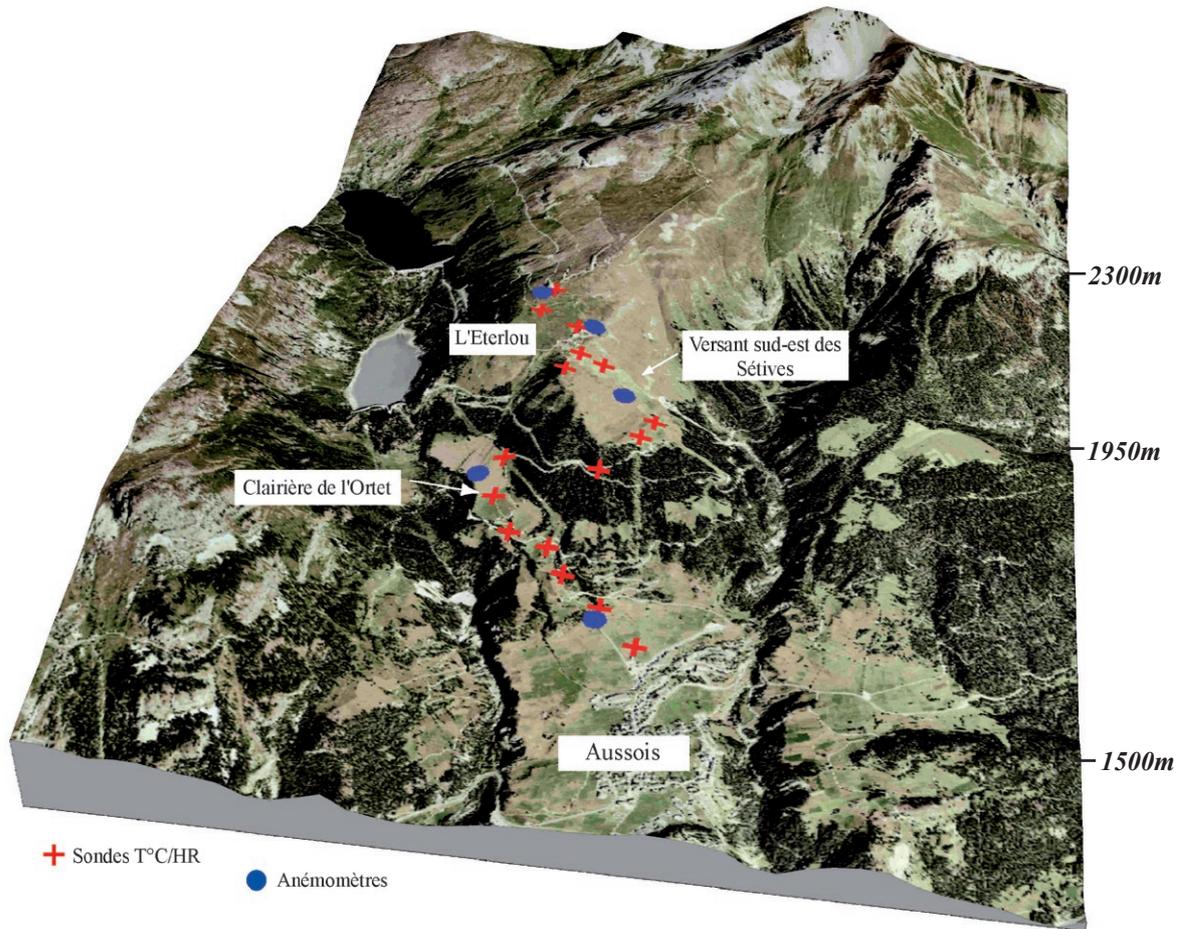


Fig. II.3.1 : Position des sondes et noms des principaux lieux sur le versant sud d'Aussois.
Photo : IGN photoexplorer ; MNT : IGN BD Alti.

II.3.1.a. Sondes de température et d'humidité

On peut couper le domaine enneigé artificiellement d'Aussois en deux, à l'altitude de 1950m environ, au-dessus de la forêt (fig.II.3.2).

- Dans la partie basse, une seule sonde se situe entre les arbres (S1, 1900m) mais un espace ouvert au sud ne la protège pas du soleil en pleine journée. Les sondes 2 (1855m) et 7 (1600m) se trouvent en lisière aval de la forêt, et les sondes 4, 5, 6 (de 1740 à 1665m) sur la piste de l'Ortet entre espace clair et forestier. Seules les sondes 3 (1795m) et 8 (1545m) sont bien dégagées. Pour l'exposition, nous sommes en plein sud, mais les sondes 2, 3, 4 en sud-sud-est et 1, 5 et 6 en lisière ouest de la forêt sont protégées du soleil matinal. Cette partie basse nous offre un panel de situations à la fois proches et différentes, entre terrain dégagé, clairière et forêt (photo II.14)

- Dans la partie haute du versant, on distingue une première zone orientée plutôt vers l'est (les Sétives), avec les sondes 9 (1950m) et 10 (1970m) en bas, au-dessus de la forêt et dans un

relief vallonné moins pentu, et les sondes 11 (2035m) et 12 (2110m) en haut, dans une pente assez forte. La deuxième zone (l'Eterlou) est un replat de crête orienté plein sud, constituant le coeur de la station avec restaurants et pistes de compétition, qui relie le versant sud au versant ouest du haut de la station (contre la Dent Parachée). Cette zone contient la sonde 13 (2130m), sur l'avancée de la crête mais proche d'arbres jeunes plantés récemment. Au-dessus, les sondes 14 (2150m), 15 (2195m), 16 (2215m) et 17 (2260m) sont bien distribuées le long de la faible pente dans un terrain bien dégagé. La sonde 17 est par contre posée au-dessus d'un chalet d'arrivée de télésiège occupé par les employés.

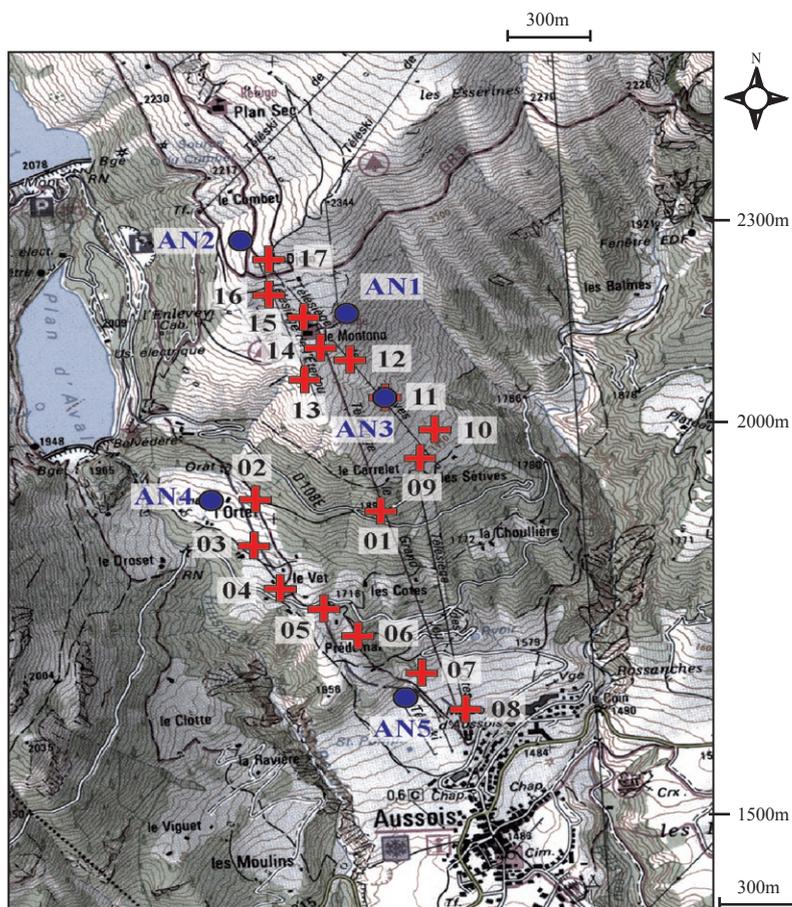


Fig. II.3.2 : Positions et numéros des sondes à Aussois.
 Croix rouges : sondes T°C et HR ; points bleus : anémomètres.
 Fond vert : forêt ; fond blanc : prairie ou champs.
 Carte : IGN cartoexplorer recolorisée.

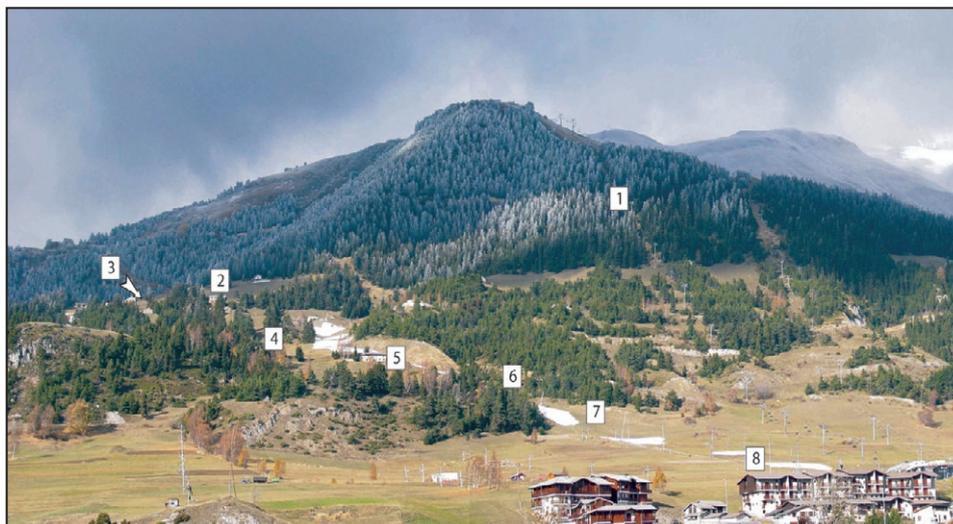


Photo. II.14. : Le versant sud d'Aussois au bas des pistes, positions et numéros des sondes.
 Photo montage : C.Chaix, nov.2004.

II.3.1.b. Anémomètres

Le domaine dispose de cinq anémomètres qui permettent, grâce à leur site de mesure, d'observer le déplacement de l'air en des lieux et des échelles différentes. L'anémomètre 5 (1580m) est basé en bas des pistes au-dessous de la forêt. Il fait face à la vallée et la piste de

l'Ortet débouche légèrement au-dessus de lui. Le 4 (1820m) est en plein milieu de la clairière de l'Ortet, mais un petit arbre (le seul) est situé juste à l'amont. Le fait d'avoir positionné l'instrument ici vient des contraintes de sécurité, mais il peut modifier légèrement la direction des flux. L'anémomètre 3 (2035m) est à côté de la sonde 11, en plein milieu de la pente est (photo II.15). Cette pente, plutôt concave ici, a une topographie favorable aux brises catabatiques. L'anémomètre 2 (2195m) est posé sur une convexité ou butte au-dessus de cette pente des Sétives mais orienté plutôt au sud. Cette position privilégiée lui permet de capter aussi les brises qui descendent ou montent le long du versant sud (photo II.16). Enfin le n°1 (2245m) est légèrement situé sur le versant ouest et exposé au vent venant du Fond d'Aussois, en amont des barrages.



Photo. II.15. : La pente sud-est des Sétives.
Photo : C.Chaix, fev. 2005.



Photo. II.16. : La pente sud de l'Eterlou.
Photo : C.Chaix, fev. 2005.

II.3.2 Le réseau des Menuires et de Val Thorens

Avec les stations des Menuires et de Val Thorens, nous changeons d'échelle par rapport à Aussois, à la fois dans l'espace et dans la densité du réseau (fig.II.3.3). On trouve, en 2004-2005, 75 sondes T/H et 5 anémomètres aux Menuires (de 1675m à 2813m) et 61 sondes T/H et 4 anémomètres à Val Thorens (de 2100m à 2900m). Le pas de temps est passé de 60 à 20 min en 2000-2001.

Dans ces deux stations, le réseau a connu une forte croissance ces deux dernières saisons sur les hauts de versants et sur les crêtes, mais les données ne sont pas encore disponibles. Il aura donc fallu 18 ans pour que le domaine soit bien instrumenté dans l'espace, des sondes étant rajoutées chaque année (début des enregistrements aux Menuires en 1988, 1992 pour Val Thorens avec peu de sondes au début), mais à partir d'aujourd'hui la couverture est vraiment totale dans la verticale. Le site est donc exceptionnel par la richesse de la topographie. De plus, une station Météo-France est située sur la pointe de la Masse sur le versant est de la vallée, complétant ainsi le réseau par des mesures à 10m au-dessus d'une crête bien exposée aux flux synoptiques d'ouest (quoiqu'avec beaucoup de lacunes dans les données).

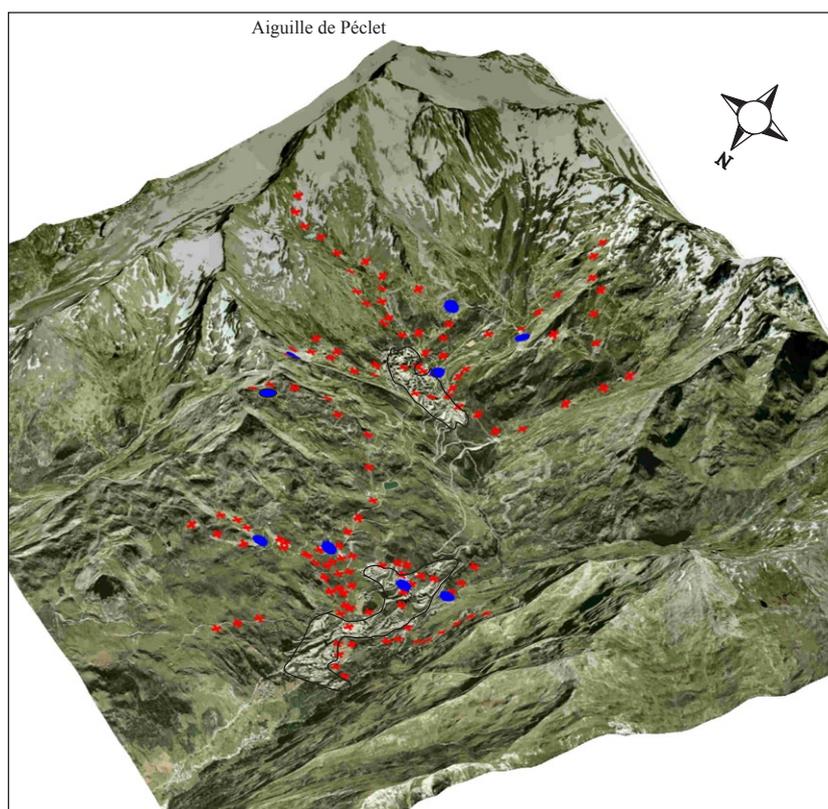


Fig. II.3.3 : Visualisation d'ensemble des sondes et des anémomètres aux Menuires et à Val Thorens en 2006 dans la vallée des Bellevilles.

164 sondes T/H et 12 anémomètres en 2006.

Croix rouges : sondes T°C et HR ; Points bleus : anémomètres.

Photo : IGN photoexplorer ; MNT : IGN BD Alt.

II.3.2.a. Sondes de température et d'humidité aux Menuires

La forme en V et l'étalement du réseau dans la vallée permettent de distinguer trois unités topographiques dans lesquelles les sondes ont été installées, qui elles-mêmes ont été divisées pour les besoins de l'étude en zones identifiées par des noms de lieux (fig.II.3.4 et 5) :

- **Fond de vallée** : il est encaissé en aval de la sonde 34 et s'évase vers l'amont. La sonde 48 est la plus basse en altitude des deux stations et se trouve près du talweg et de la rivière (1673m). C'est une sonde de référence dans cette étude car elle mesure très bien les inversions de température en fond de vallée. La sonde 34 (1734m) est aussi très proche du talweg, elle est surmontée par la sonde 43 (1768m) située au niveau de la route. Enfin, les sondes 49, 50, 51 (1784 à 1852m) suivent la piste qui relie Val Thorens aux Menuires, le long du Doron (photo II.17). La dénivelée finale entre la sonde 48 et 51, de 200m environ, permet une observation unique du comportement thermique d'un fond de vallée en montagne.



Photo. II.17 : Le fond de vallée en amont des Menuires.

Photo : C.Chaix, mars 2005.

- **Le versant ouest** : instrumenté de haut en bas, ce versant bénéficie d'un réseau de mesure exceptionnel. On distingue le versant ouest «nord» et «sud», car le réseau est scindé en deux

(photo II.19).

- Le versant ouest «nord» : il débute au-dessus de la Croisette, point central de la station, sur la piste des Menuires et du Stade qui regroupe une quinzaine de sondes (numéro 11 à 26, et 53). Cette zone est plutôt concave dans sa partie inférieure (sonde 15, 1850m) et convexe vers le haut (sonde 16, 2055m), et elle reste bien dégagée topographiquement. Ensuite, le réseau s'étend au nord et en altitude vers les vallons de la Becca (sondes 1 à 10, orientées plutôt sud-ouest sauf la 8, ouest), les Allamands (sondes 63 à 65, orientées plutôt nord-ouest) et une piste de liaison horizontale (Gros Tougne, sondes 54 à 56). La sonde 8 (2423m) sera souvent utilisée comme sonde de référence en altitude. Ses enregistrements ont débuté en 1988 et sa localisation, son environnement et l'absence de lacunes en font une sonde privilégiée.

- Le versant ouest «sud» : en bas du versant, il est proche du quartier du Reberly. Les sondes 27 à 37 et 58 se concentrent au sud des habitations, avec deux jonctions qui s'étendent en-dessus (sonde 26 et 27) et au-dessous (sondes 31 à 33). Cette zone est plutôt orientée ouest-sud-ouest à sud-ouest, elle est donc la mieux exposée au soleil de la station. En haut, le réseau, après s'être détaché du versant ouest «nord» par une piste de liaison (sondes 52 et 59), monte vers le Mont de la Chambre par la piste du même nom (sondes 61 à 63 et 71 à 75) plein ouest. La sonde 75 culmine à 2813m dans un milieu bien dégagé.

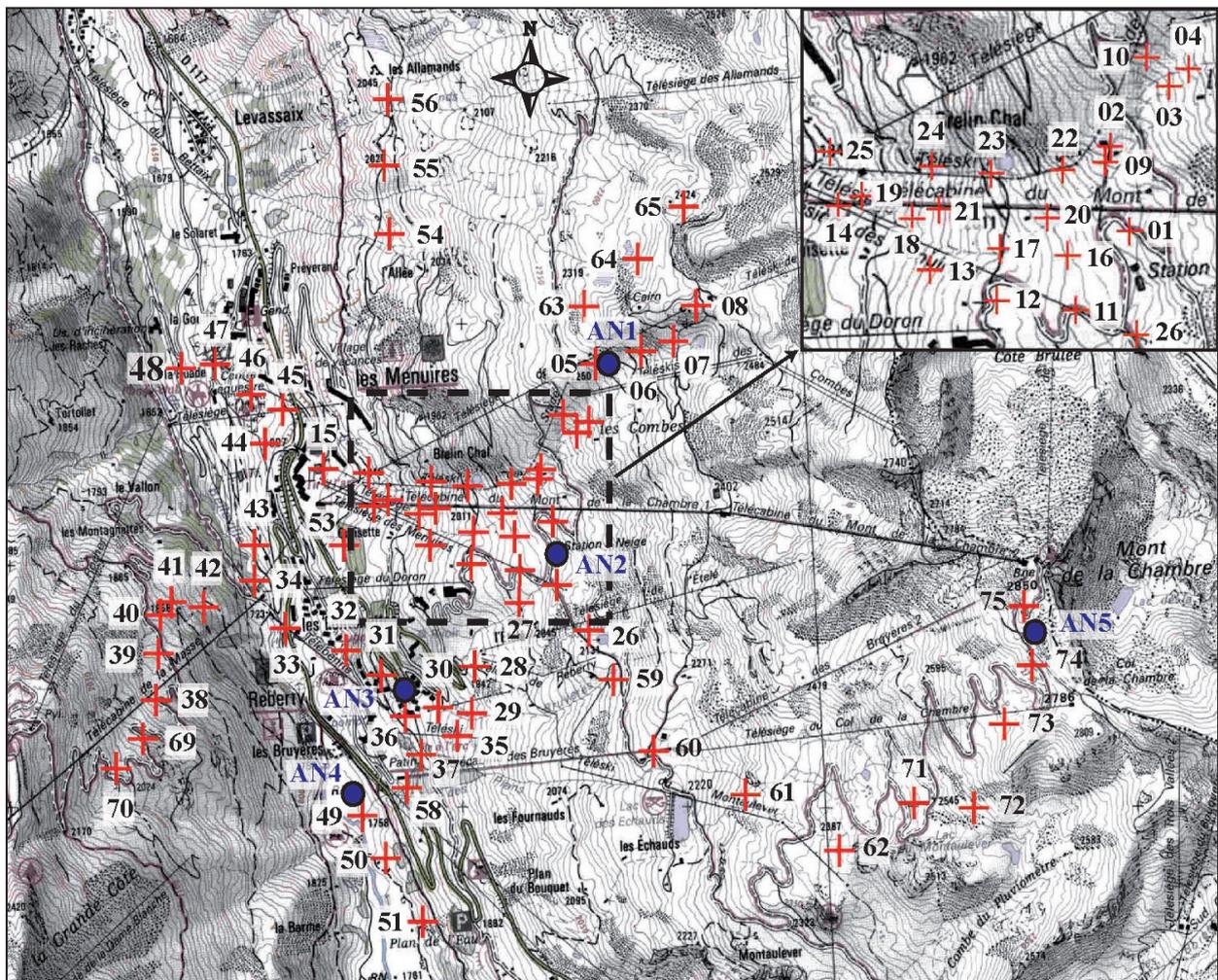


Fig. II.3.4 : Positions et numéros des sondes aux Menuires en 2004-2005.

Croix rouges : sondes T°C et HR ; points bleus : anémomètres.

Fond vert : forêt.

Carte : IGN cartoexplorer recolorisée.

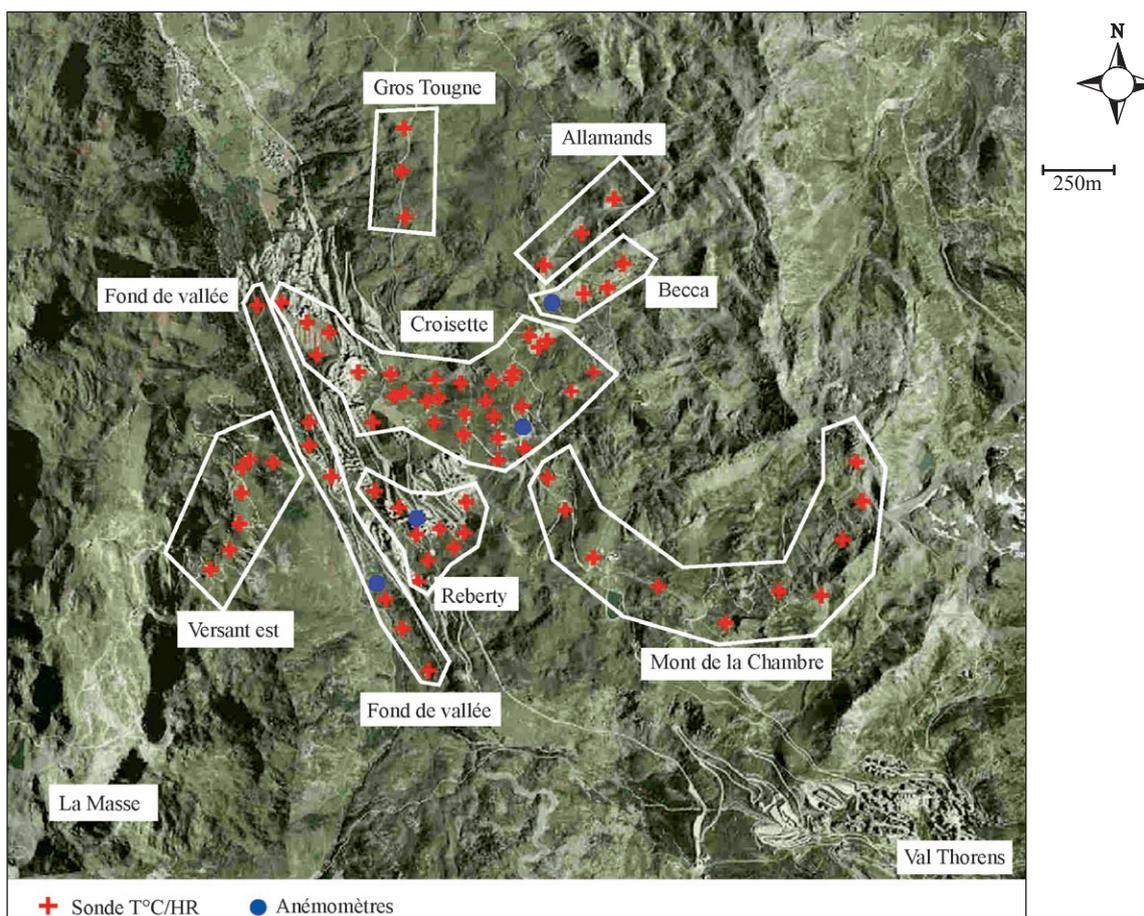


Fig. II.3.5 : Positions des sondes et unités climato-topographiques aux Menuires (désignation et localisation des lieux).

Photo : IGN Photoexplorer

- Le versant est : le réseau commence au début de la piste des Vallons au départ du télécabine pour la Masse. Nous avons 7 sondes (de 38 à 42 et 69, 70), la 70 culminant à 2100m. Le versant est plus abrupt que son vis-à-vis, surtout dans sa partie basse. Plus haut, la piste tend vers le sud et la pente devient plus douce (photo II.18). Ces sondes vont donc nous permettre de faire des comparaisons avec le versant ouest même s'il est beaucoup moins fourni en sondes.

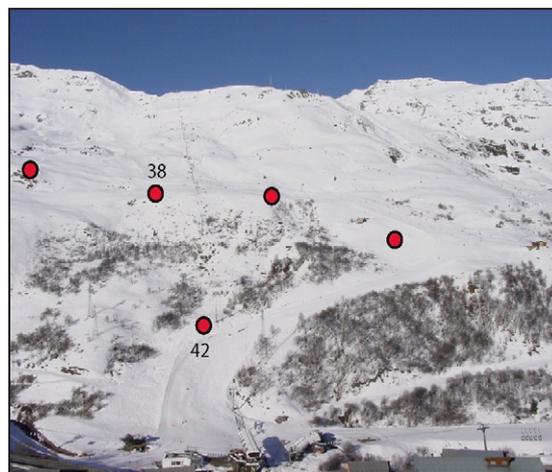


Photo. II.18 : Le versant est des Menuires.

Points rouges : sondes T°/HR.

Photo C.Chaix, mars 2005.

- Quelques particularités du site :

- La végétation : des bosquets de sapins sont présents dans la station des Menuires, avec les sondes 58, 53 et 29 posées juste en lisière.

- Les habitations : les sondes 30, 31, 32, 36, 45, 46 et 47 sont assez proches des immeubles, en aval, ce qui leur confère une position d'abri par rapport aux vents catabatiques descendants du versant. Situées à quelques dizaines de mètres des murs, nous verrons s'il existe une influence thermique remarquable.

- Autres particularités : la sonde 1 se trouve dans une cuvette au niveau de la salle des machines (station à neige). La sonde 15 est encerclée par les immeubles de la Croisette qui jouent le rôle d'entonnoir pour les brises descendantes.

II.3.2.b. Les anémomètres aux Menuires

Ils ont une disposition assez particulière puisqu'ils forment un transect du fond de vallée à la crête, avec un léger décalage. L'anémomètre 1 se situe dans le Vallon de la Becca à côté de la sonde T/H n°5 (2278m). Sur une pente orientée ouest-sud-ouest, il est dominé par le vallon et une petite falaise, alors qu'en aval l'espace est ouvert sur la vallée. Nous verrons que cette situation entraîne des rythmes de brises de pente descendantes assez originaux. Son fonctionnement a débuté en novembre 1994. L'anémomètre 2 est situé sur le toit de la salle des machines (à 7m de hauteur environ), dans une zone en cuvette, avec une falaise en amont et un débouché en aval sur la piste des Menuires. Installé en décembre 1998, il capte bien les brises thermiques grâce à sa hauteur qui lui permet d'échapper à la fonction protectrice de la cuvette. L'anémomètre 3 est quant à lui situé près des habitations de Reberthy, présentes sur son côté nord, avec un débouché entre les immeubles qui permet aux vents de passer. Il est à 1885m et marche depuis novembre 1999. L'anémomètre 4 est quant à lui situé dans le fond de vallée au-dessous des Menuires. Il permet de capter les brises de montagne et de vallée ainsi que les vents synoptiques (1780m et novembre 1999). Il est donc très complémentaire des anémomètres situés le long du versant. Enfin, l'anémomètre 5, situé à 2800m et en marche depuis novembre 2002, est à quelques mètres du sommet mais dans un environnement peu pentu. Nous verrons quels sont les vents locaux qui se développent à ce niveau, et les vents synoptiques mesurés à cette altitude.



Photo. II.19 : Le versant ouest des Menuires avec les positions des sondes.

Points rouges : sondes T°/HR. ; étoiles jaunes : anémomètres.

Photo-montage et image colorisée : C.Chaix, mars 2005.

Le positionnement de ces anémomètres, malgré les influences possibles de l'environnement sur les mesures, est très intéressant parce qu'ils sont placés du fond de vallée au sommet du versant de manière presque régulière. On peut alors espérer mesurer les différentes brises thermiques qui soufflent dans les vallées : brises de vallée et de montagne, brises de pente ascendantes ou descendantes, et les interactions entre elles ou avec des vents synoptiques.

II.3.2.c. Sondes de température et d'humidité à Val Thorens

La morphologie du site est un amphithéâtre (cirque) ouvert sur la vallée, offrant une différence importante avec le site des Menuires. Nous sommes aussi au-dessus de la limite supérieure de la forêt. Les versants peuvent être séparés en trois orientations principales avec des nuances internes, et les pistes suivent souvent les talwegs entre les vallums morainiques (souvent appelés Combes) en remontant les versants vers les cols et les glaciers. Nous allons donc prendre les noms des combes comme sous-unités topographiques, ainsi que le fond de cirque qui abrite Val Thorens (fig.II.3.6 et7)

- Le versant nord (Combe de Thorens, versant nord, Combe de Caron) : c'est un versant très diversifié. En partant des chalets de Thorens dans la combe du même nom, le réseau monte vers le versant nord (on passe de 2350m à 2730m, sondes 45, 47, 50 à 54, photo II.20), ou contourne un escarpement par la sonde 49 (orientée plutôt nord-ouest) et rejoint les sondes 55, 56, 57. Plus à l'ouest, on trouve la grande Combe de Caron et sa célèbre pointe accessible en téléphérique, avec les sondes 38, 39, 40, 60 et 59. La jonction avec la zone de Val Thorens se fait sur un replat (sondes 35 à 37). Sur la photo II.22, nous observons bien le versant nord à droite de l'image ainsi que les effets de l'exposition (photo prise l'après-midi) et ses jeux d'ombre. La Combe de Caron est déjà à l'ombre alors que Val Thorens est encore bien ensoleillé.

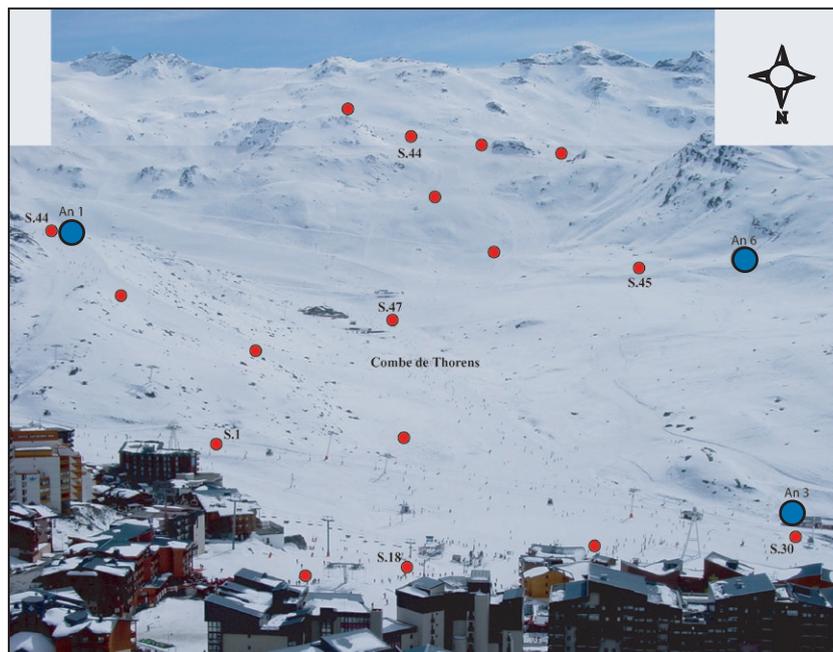


Photo II.20 : Le versant Nord et positions des sondes et anémomètres.

Points rouges : sondes T°/HR. ; points bleus : anémomètres.

On distingue la Combe de Thorens et le versant nord au centre. A gauche s'étend le réseau des Cascades et l'anémomètre 1. Les sondes 18 et 19 sont au centre de Val Thorens et l'anémomètre 5 sur la salle des machines à droite. Photo montage, C.Chaix, avril 2006.

- Le versant ouest (Combe de Pécelet, Les Cascades) : au-dessus de la Combe de Thorens se trouvent les sondes 46, 44 à 41, orientées ouest à sud-sud-ouest sur le lieu-dit des Cascades, toujours dans un terrain bien dégagé. La sonde 44 bénéficie d'une position aérée sur un ma-

melon accoté au versant. Puis, depuis Val Thorens, le réseau remonte la moraine du glacier de Pécelet jusqu'à la sonde 12. Dès le départ le réseau se sépare en deux, l'un suivant la piste de compétition (sondes 17 à 14, à droite sur la photo II.21) et l'autre celle qui rejoint le glacier de Pécelet (sondes 1 à 12) entre deux vallums morainiques. Le talweg est assez encaissé, les sondes se retrouvent d'un côté ou de l'autre de la piste, donc avec une orientation légèrement différente, ou sur une pente forte ou douce. Ces différentes situations font de cette moraine un milieu bien instrumenté, de 2300m à 2900m, sous le glacier de Pécelet.



Photo. II.21 : La combe de Pécelet et position des sondes 1 à 12.

Points rouges : sondes T°/HR ; Trait noir plein : piste de ski. En pointillé : piste cachée par le relief.

- Le versant sud : en partant de Val Thorens, le réseau aborde une pente moyenne en direction d'un replat du relief (sondes 19 à 26, orientées sud-sud-ouest) puis grimpe sur la face sud jusqu'à 2750m sur une pente raide (sondes 26 à 28). Le terrain là encore est bien dégagé autour des sondes.

- Le fond de cirque (Val Thorens et alentour) : nous retrouvons des sondes à l'intérieur de la station (18 et surtout 19) orientées sud-sud-ouest, mais assez éloignées des premiers murs d'habitation. D'autres se trouvent autour de la station (sondes 29, 30, 34 et 61) et orientées à l'ouest. La sonde 30 est bien située dans le vallon de Thorens qui longe la station et constitue son centre d'activité. Enfin le snowpark (sondes 31 à 33) est orienté nord-nord-ouest.



Photo. II.22 : Le domaine de Val Thorens et la position des sondes.

Points rouges : sondes T°/HR. ; étoiles noires : anémomètres.

Photo : Office du tourisme de Val Thorens.

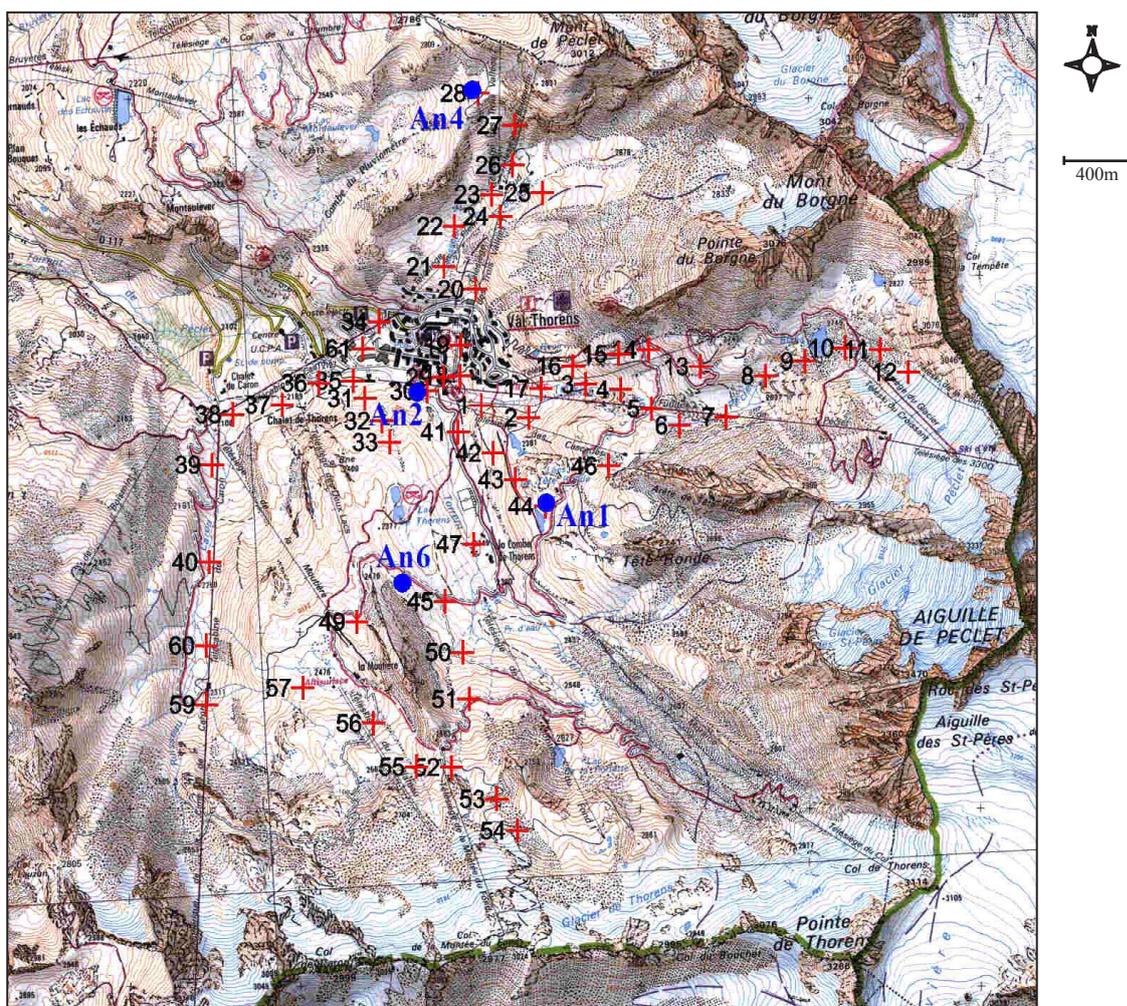


Fig. II.3.6 : Positions et numéro des sondes à Val Thorens en 2004-2005.

Croix rouges : sondes T°C et HR ; points bleus : anémomètres.

Carte : IGN cartoexplorer.

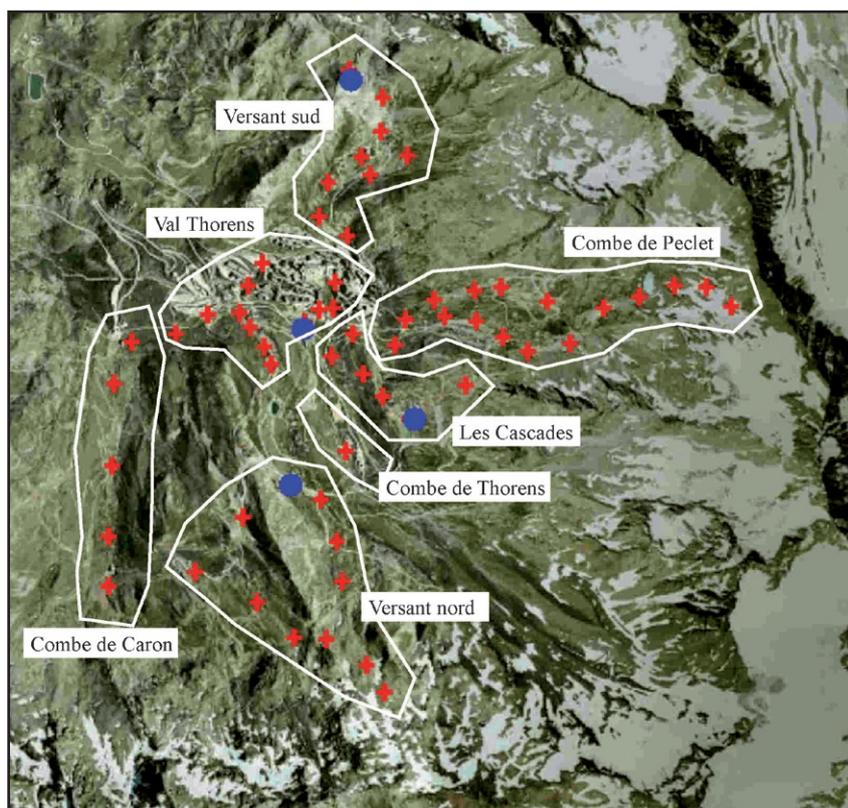


Fig. II.3.7 : Positions des sondes et unités climato-topographiques à Val Thorens (désignation et localisation des lieux).

Photo : IGN Photoexplorer.

II.3.2.d. Les anémomètres à Val Thorens

L'installation d'enneigement artificiel de Val Thorens a connu plusieurs problèmes de maintenance sur différents anémomètres, nous en avons retenu quatre pour l'étude. L'anémomètre 1 est situé à côté de la sonde 44 dans une position avancée et dominante sur la Combe de Thorens tout en restant sur son versant ouest. C'est l'anémomètre qui dispose de la plus longue série de mesures, qui a débuté en 1996. Son altitude est de 2450m. L'anémomètre 3 est posé sur une perche au-dessus de la salle des machines, dans le vallon qui longe Val Thorens (2280m, octobre 1996). Le relief étant bidirectionnel (ouest-est), il mesure bien les vents montants ou descendants et permet de voir quand les brises montantes s'arrêtent au niveau de Val Thorens. L'anémomètre 4 est situé sur la face sud (2750m, octobre 1998), perché au-dessus d'une crête qui se détache. Cette position semble inconfortable, car soumise à tous les vents, ce qui peut rendre difficile la compréhension des mesures. Enfin, l'anémomètre 6 est situé sur le bas du versant nord (2480m, octobre 1999). La pente moyenne assez régulière contraste avec la position de l'anémomètre 4.

La topographie du site de Val Thorens étant assez complexe de premier abord, la position des anémomètres ne nous permettra pas de bien dégager la structure globale des écoulements, mais plutôt d'observer des comportements locaux à des échelles différentes. C'est en cela que la mise en relation de ces mesures avec celles des Menuires peut nous amener à une analyse globale de la ventilation de la haute vallée intra-alpine.

II.3.3 Le réseau de Valloire

C'est un réseau ancien installé en 1989/1990, ce qui est exceptionnel pour une station d'envergure moyenne, mais les données ont quelques lacunes importantes. Il n'empêche que le site est des plus intéressants, avec deux vallées parallèles qui se rejoignent au niveau de Valloire. Le réseau s'étend de 1428m à 2350m, avec 48 sondes T°/HR et 7 anémomètres en 2005. Le nombre de sondes était inférieur à 23 jusqu'en 2000 puis s'est étendu en 2003/2004 jusqu'à 48 sondes (fig.II.3.8). Les anémomètres 1 et 2 ont commencé leurs mesures en 1995.

Valloire dispose donc d'un potentiel fort dans son instrumentation climatique mais dans le cadre de cette étude nous allons surtout nous intéresser aux vents et à quelques sondes bien placées. Voyons le site de Valloire plus en détail.

II.3.3.a. Sondes de température et d'humidité à Valloire

- Versant de la Sétaz : nombre de sondes sont situées en forêt, d'autres en lisière et d'autres enfin en terrain dégagé. Les sondes 9, 19 à 21 et 25 se trouvent entre des arbres (des mélèzes) et généralement assez près de la piste. Les autres sondes sur ce versant sont, par souci de sécurité, souvent disposées en lisière de forêt, le long des pistes. Par exemple les sondes de 1 à 8, de 10 à 12, 17, 22, 30 et 32 (fig.II.3.9). En haut du versant, un replat qui se rétrécit vers l'amont, plein nord, recueille les sondes 13 à 16. Les sondes 13, 14 et 15 sont placées près de petits chalets, les mesures peuvent en être affectées. Seule la sonde 16 (1980m), près d'un pylône, reste en terrain dégagé. La face orientée nord-est l'est aussi, avec les sondes 23 à 27 (photo.II.23).

• Le versant ouest du Crey du Quart : sur ce terrain bien dégagé nous trouvons les sondes 35 à 49. Le réseau commence dans le fond de vallée (Combe de l'Aiguille Noire, sondes 35, 37, 43), puis remonte sur le versant ouest suivant une transversale sud-nord (sondes 37 à 45, orientées plutôt ouest-sud-ouest), avant de finir 200m sous le sommet du Crey du Quart avec les sondes 42, 44, 46 à 49.

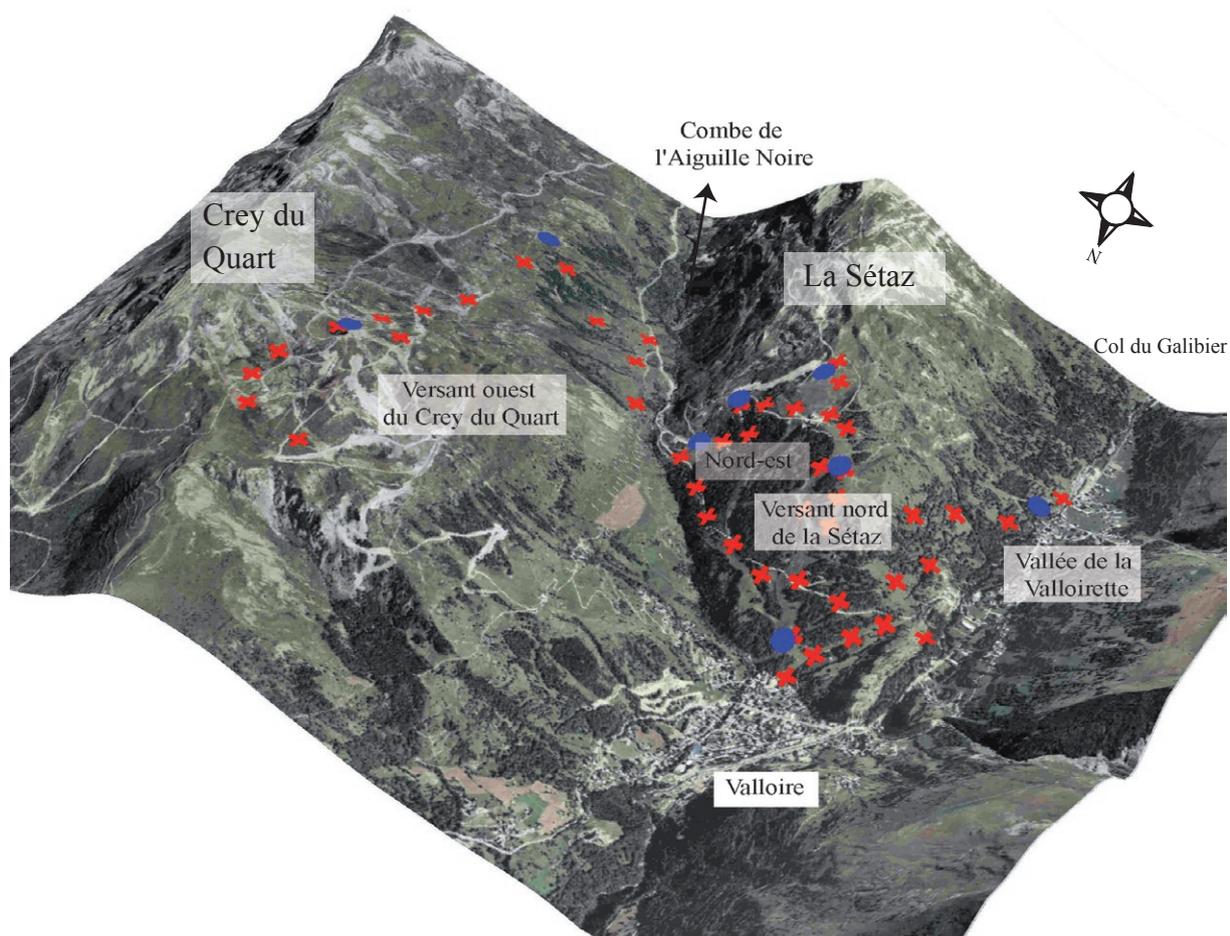


Fig. II.3.8 : Position des sondes et noms des principaux lieux à Valloire.

Croix rouge : sondes T°C/HR ; Points bleus : anémomètres.

Photo : IGN photoexplorer ; MNT : IGN BD Alti.

II.3.3.b. Les anémomètres à Valloire

La position des anémomètres à Valloire est climatologiquement des plus intéressantes. Le versant de la Sétaz en compte cinq : l'anémomètre 3 (1515m) se situe en bas de versant au-dessus de Valloire, avec une bonne prise aux brises de vallées, malgré la présence de bois légèrement en aval. L'anémomètre 1 (1844m) est quant à lui en milieu de versant dans la même configuration forestière. Et l'anémomètre 2 (2020m) a la particularité d'être perché en haut d'un pylône de télé-siège à environ dix mètres de hauteur, en haut du versant. Situé plein nord, à la frontière entre les vents venant des vallées adjacentes, ses mesures sont très variées. Puis les anémomètres 5 (1950m) et 4 (1770m) sont situés sur le versant nord-est, dans un vallon au relief peu prononcé. Les anémomètres 7 (2125m) et 9 (2300m) sont posés sur le versant ouest du Crey du Quart, le pre-

mier encore exposé au courant de la Combe. Pour finir, l'anémomètre 6 (1600m), dans le fond de vallée côté versant ouest de la vallée de la Valloirette, permet aussi de mesurer les brises de vallée et de versant, ainsi que celles descendantes du versant en vis-à-vis.

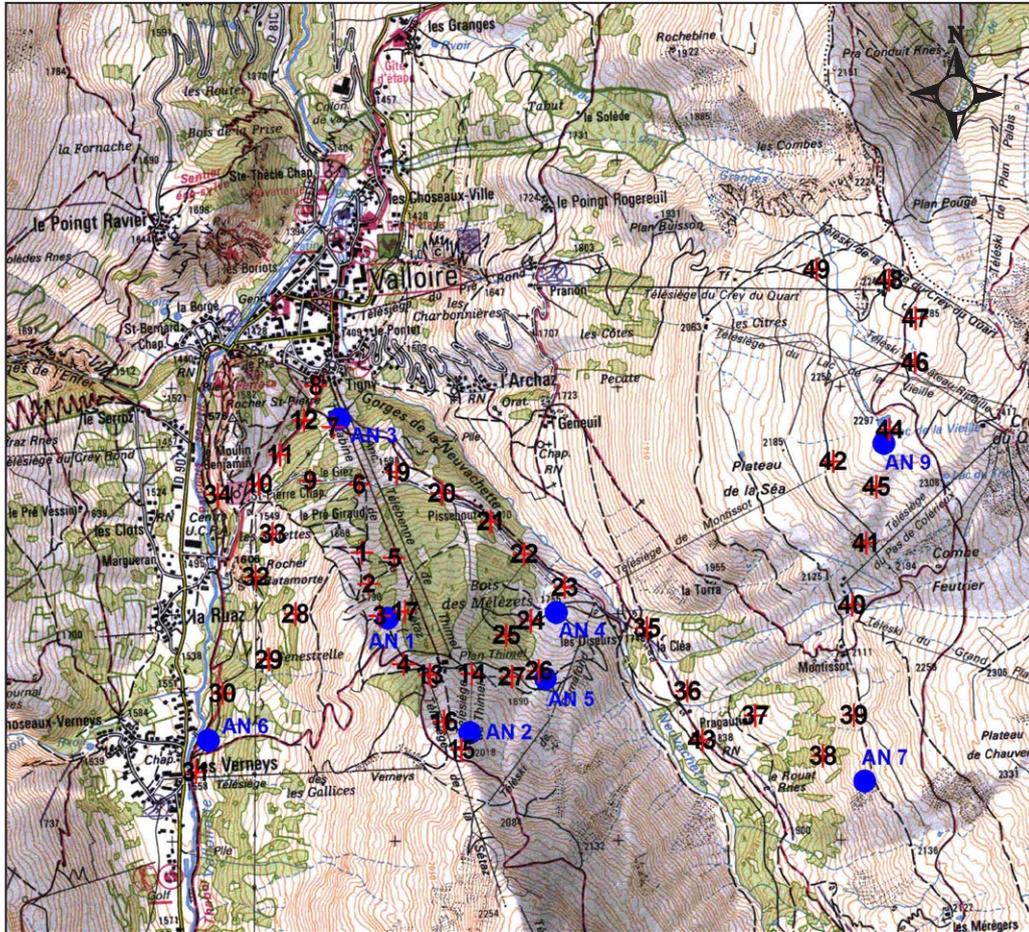


Fig. II.3.9 : Positions et numéros des sondes à Valloire.
 Croix rouges : sondes T°C/HR ; points bleus : anémomètres.
 Carte : IGN cartoexplorer.



Photo. II.23 : Le versant nord-est de la Setaz à Valloire.

Points rouges : sondes T°/HR ; Cercles bleus : anémomètres.

Photo : C.Chaix, mars 2004.

Conclusion

Les domaines géographiques retenus pour cette étude, Les Menuires et Val Thorens dans la vallée des Bellevilles, Aussois et Valloire, disposent d'une topographie variée. Ce sont des sites idéaux pour analyser les paramètres atmosphériques enregistrés par les sondes des installations d'enneigement artificiel (température, humidité relative, direction et vitesse du vent). **Les réseaux de mesures sont très denses et les sondes sont disposées dans des environnements différents, permettant une étude à échelle fine novatrice.** Les cartes et les noms de lieux sur les domaines serviront de référence durant le cheminement de la thèse. Nous avons aussi démontré que les potentialités de ces réseaux sont importantes, malgré le fait qu'ils ne soient pas conçus pour des études climatologiques, et qu'ils vont se développer dans l'avenir.

Les domaines skiables choisis ont des particularités propres qui s'adaptent parfaitement à certaines problématiques et aux phénomènes atmosphériques que l'ont veut étudier : la vallée des Bellevilles pour les inversions de températures et l'étude des brises thermiques, le versant sud d'Aussois pour observer l'influence de l'orientation, ou encore le site de Valloire pour l'influence de la forêt sur les températures. **Avec tant de sondes à notre disposition, il était important de sélectionner les approches afin de ne pas noyer l'étude dans une multitude d'informations.**

Mais avant de passer à l'étude du climat des versants alpins, nous allons dans le prochain chapitre mettre en oeuvre et utiliser une classification des types de circulations et des types de temps. Ce travail, fournissant des informations journalières, va d'abord nous familiariser avec le climat du centre de la Savoie. Dans notre logique de régression du global au local, il est important avant d'étudier les données de terrain de connaître les principaux types de temps qui s'enchaînent sur nos sites d'étude, même si les résultats de cette classification ne seront pas utilisés dans le chapitre IV sur l'étude des moyennes des températures et du vent.

CHAPITRE III

CLASSIFICATION BI-SCALAIRE DES TYPES DE TEMPS HIVERNAUX SUR LA SAVOIE

Introduction

Lors de l'analyse préalable des données météorologiques, il s'est avéré indispensable d'avoir à notre disposition un moyen qui permette de relier les mesures au sol avec des descriptions des types de temps et des types de circulations à des échelles supérieures. En effet, nous nous sommes vite rendu compte, en relation avec les connaissances générales sur les climats de montagne, que les phénomènes locaux sont fortement influencés à la fois dans leur rythme et dans leur typologie par les conditions d'échelles supérieures (JOLY D., 1994) et par l'alternance du jour et de la nuit (influence du soleil). **Il est possible en théorie de combiner les paramètres atmosphériques en une information synthétique qui permette de comparer les conditions climatiques entre chaque journée.** Il nous fallait donc une classification des types de circulations facile à utiliser (en accord avec l'un des objectifs de l'étude) et une classification des types de temps sur la Savoie qui utilise des données locales, le tout sur un pas de temps journalier au maximum. L'influence des types de circulations sur le temps en Savoie est assez bien connue (SOUHAITE P., 1993), mais il n'existe pas de classification proprement dite.

Reste ensuite à combiner ces deux types d'informations au sein d'une classification journalière que l'on peut nommer «bi-scalaire» (échelle synoptique et régionale, combinant les types de circulation et les types de temps). Ceci est possible car le rôle du relief dans le système climatique est lui-même scalaire, et dépend du point de vue de l'observateur : un type de circulation régionale peut entraîner une multitude de types de temps en fonction des massifs et même à l'intérieur de ces massifs (notion de **topoclimat**). La variabilité s'accroît donc dans les petites échelles. **Mais le relief introduit une contrainte très forte**, et chaque topoclimat garde dans le temps ses caractéristiques climatiques. Ainsi, en un point, le nombre de situations différentes est assez réduit, et plusieurs types de circulations peuvent amener le même type de temps. On a donc une simplification de l'information par la contrainte du relief, ce qui augmente la facilité de prévision du temps (observation issue de l'étude). Cette remarque nous amène à penser qu'une classification des types de temps sur la Savoie doit utiliser des données provenant de plusieurs lieux représentatifs, afin d'introduire une spatialité indispensable, et que la connaissance des conditions d'échelles supérieures, résumée journalièrement, doit être suffisante pour prévoir les comportements des paramètres météorologiques locaux réduits en phénomènes atmosphériques (types de brises de pente, inversion...). Ainsi, plusieurs types de circulations vont donner quelques types de temps possibles qui eux-mêmes donnent le même phénomène local. Même si ce découpage de l'information peut paraître aberrant par rapport à la complexité du système, on comprend que la création de cette classification bi-scalaire est un outil indispensable pour appréhender la genèse des phénomènes locaux et leur prévision au sein d'un modèle statistique.

Nous verrons donc dans un premier temps, après avoir défini certaines notions sur les types de temps, quels ont été les choix portés pour trouver une classification des types de circulation idoine parmi celles qui existent déjà. Puis, nous expliquerons la technique retenue pour élaborer une classification des types de temps sur la Savoie, les stations de mesures et les données utilisées. Enfin, nous combinerons ces informations pour créer une classification bi-scalaire des types de temps hivernaux sur la Savoie, classification nommée «Perret-Savoie».

III.1 CHOIX DE LA CLASSIFICATION DES TYPES DE CIRCULATION

III.1.1 Notions de types de temps et de circulations

Les éléments du climat s'associent dans des combinaisons très variées qui constituent des indices de temps. Le concept de type de temps est l'un des fondements de la climatologie, mais il recouvre des ensembles et des méthodes très différentes. **Chaque journée, voire même chaque instant, connaît une situation météorologique unique mais il existe certaines régularités qui reviennent saison après saison. C'est le retour de ces formes atmosphériques au-dessus d'un lieu qu'il faut étudier même si leurs modulations individuelles sont infinies.** La climatologie dynamique est définie comme étant : « le type de circulation atmosphérique qui correspond à une certaine organisation des champs de pression, qui va engendrer des conditions de temps au sol très changeantes » (PEDELABORDE P., 1958). Max Sorre ajoute dans sa célèbre définition : «le climat d'un lieu est la série des états de l'atmosphère au-dessus de ce lieu dans leur succession habituelle». Distinguons alors types de temps et types de circulation, pour une période donnée et un espace donné (DURANT-DASTES F., 2004 ; DOUGUEDROIT A., 2004 ; VIGNEAU J.P., 2004) :

- **Types de temps** : c'est l'ensemble des valeurs prises par les variables décrivant l'état de l'atmosphère (pluviosité, température, etc.). On le décrit qualitativement par des formules du genre «temps chaud et humide», etc., dans un laps de temps allant de la demi-journée à quelques jours.

- **Type de circulation** : c'est l'ensemble des caractères du champ de circulation et de pression. On le décrit comme «circulation perturbée de nord-ouest», etc.

Les problèmes d'échelle liés à ces concepts sont importants. Il est certain que ce découpage de l'information ne permet pas de suivre l'évolution complexe d'un système dynamique, dans l'espace comme dans le temps. C'est pourquoi il est primordial de rappeler que l'outil de classification servira avant tout à distinguer quels sont les types de situation (types de circulation et de temps) qui provoquent tel ou tel phénomène. Un exemple : les vents en montagne et en hiver agissent à deux échelles. En cas de système dépressionnaire, les vents locaux sont des vents synoptiques canalisés par le relief. En cas de système anticyclonique, ce sont des brises, mouvements d'air issus de la différence de température entre le haut et le bas de la vallée en fonction du relief (en négligeant bien sûr les interactions entre tous ces vents). Les vents synoptiques, comme les brises, se subdivisent en plusieurs familles qui peuvent parfois dépendre des différences entre des types de circulation. Quant aux types de temps, ils sont d'une certaine manière très proches des phénomènes observés sur les sites. Ainsi, en connaissant le type de circulation et le type de temps pour une journée, après un travail statistique préalable sur les historiques, la prévision du type de vents ou encore du type de répartition des températures est localement facilitée.

Afin d'obtenir une classification des types de temps, nous allons plutôt utiliser la technique **des ambiances climatiques**, qui correspond à la combinaison des éléments du temps au dessus d'un espace donné, indépendamment de la circulation atmosphérique qui l'accompagne.

Toutefois, il est possible de relier les deux concepts et c'est ce que nous allons effectuer dans ce chapitre. Voyons d'abord quelle classification des types de circulation adopter.

III.1.2 Les classifications des types de circulations existantes

Les plus connues sont celles de BENICHOU P. ou encore PAUL P. pour la France, HESS P. et BREZOWSKY H. pour l'Allemagne, SCHUEPP M., WANNER H., PERRET R., FALLOT J.M. pour la Suisse. De nombreux auteurs réutilisent les classifications existantes pour les réadapter à leur espace de recherche et leur problématique (FALLOT J.M., 1992).

En France, la classification de Patrick BENICHOU (BENICHOU P., 1995) automatisée est centrée sur l'Europe occidentale. Nous ne reviendrons pas sur la technique utilisée, mais notre problème principal consiste à vérifier si cette classification est représentative de la climatologie en Savoie. En fait, elle s'avère reliée à des échelles trop importantes, sur des espaces assez éloignés de la Savoie. Un décalage entre la circulation décrite pour tel jour et celle donnée par exemple par les Bulletins Climatologiques Mensuels de la Savoie de Météo-France est très souvent remarqué.

Il existe une autre grande classification, celle de HESS-BREZOWSKY (HESS P., BREZOWSKY H., 1999) que PERRET a réadaptée à l'usage des prévisionnistes suisses (PERRET R., 1987). Après comparaison avec les situations sur la Savoie, il s'est avéré que le décalage était presque nul avec la Tarentaise et très léger, en fonction des situations, avec la Maurienne. De plus, cette classification est constamment réactualisée par Météo-Suisse, nous avons donc les types de circulations par jour depuis un très grand nombre d'années (la classification Hess-Brezowsky commence en 1881 !). Depuis peu, il est possible d'obtenir les résultats gratuitement sous forme de fichier informatique. Cette classification des types de circulation est certainement la plus adaptée à notre zone d'étude.

III.1.3 La classification Hess-Brezowsky-Perret simplifiée

Chaque régime est notifié par un code allant de 1 à 9, lui-même décliné en fonction de certains critères : le principe de base de la classification H.B.P. est que dans tout régime (défini comme une situation météorologique, soit le temps qu'il fait au cours d'une journée), on distingue deux à six situations, le cas le plus simple comprenant une variante anticyclonique (code a) ou cyclonique (code b). Trois grands groupes ont donc été définis :

- Les régimes déterminés par les courants d'altitude quasi-rectilignes (code 1 à 5), avec tous les temps d'ouest.
- les régimes déterminés par des anticyclones (code 6) centrés sur l'Europe occidentale et centrale, ou des anticyclones bloquants (code 7).
- Les régimes déterminés par des dépressions sur l'Europe occidentale et centrale (code 8) ou par des thalwegs plus ou moins profonds sur l'ouest du continent (code 9).

Dans le détail, on trouve les régimes de sud (code 1), de sud-ouest (2), de nord-ouest (4)

et de nord (5). Le régime d'ouest (3) comprend quatre variantes (a, b, c ou d), la latitude du lit des perturbations étant d'une grande importance. Le régime des anticyclones sur l'Europe comprend six situations (de 6a à f), suivant la position du centre d'action (mêmes variantes pour les dépressions). On distingue ensuite les anticyclones bloquants (avec temps perturbé) avec trois situations typiques (7a à c) et enfin un régime de talwegs sur l'Europe (quatre situations, 9a à d). Quatre autres situations ont été rajoutées par rapport à la classification H.B. dont la fameuse dépression sur le Golfe de Gascogne (dépression d'altitude, code 8a, a' (qui entraîne un foehn fréquent), a², b à d).

Il n'existe pas en revanche de régimes de secteur est, car ils sont presque toujours dirigés par des anticyclones plus ou moins proches. Ainsi le retour d'est bien connu en Savoie et souvent lié à une dépression sur le Golfe de Gênes (pas toujours), est assimilé au code 1b, soit la situation de sud cyclonique. Enfin, les régimes étant tout de même très changeants, ils ne respectent pas le découpage journalier de la classification. C'est pourquoi lorsque le régime change dans la journée, on peut avoir deux codes disponibles dans le tableau. C'est une situation hybride qui arrive en moyenne une fois sur sept.

La grande qualité de cette classification est le niveau de détail qui existe dans l'interprétation des situations au niveau du temps qu'il fait en Suisse (PERRET R., 1987). Pourtant, dans le cadre de notre étude, ce n'est pas ce qui nous intéresse le plus : c'est plutôt la connaissance des régimes en place. Car pour le temps en Savoie, il vaut mieux se référer à des données savoyardes (type de temps). Nous avons alors simplifié la classification HBP de deux façon : tout d'abord, nous n'avons pris que la période hivernale, ou plutôt la moitié de l'année du 15/10 au

Codes	Situations météorologiques	%
1a	Sud anticyclonique	5,4
1b	Sud cyclonique	1,6
2a	Sud-ouest anticyclonique	4,4
2b	Sud-ouest cyclonique	1,9
3ab	Ouest anticyclonique	10,4
3cd	Ouest cyclonique	10
4a	Nord-ouest anticyclonique	4,3
4b	Nord-ouest cyclonique	3
5a	Nord anticyclonique	3,5
5b	Nord cyclonique	2,8
6	Anticyclone sur Iles Britanniques, Manche, Mer du Nord, vent de secteur nord-ouest à nord-est	16,7
6ef	Anticyclone sur Scandinavie (avec retour d'est)	3,5
7ac	Anticyclone sur nord-est de l'Europe, vent de secteur sud-ouest, avec temps perturbé	5
7b/6b	Anticyclone sur Ecosse (talweg Russie Espagne), avec retour d'est	3,6
8a	Dépression sur Iles Britannique, vent de sud-ouest, foehn	5
8a'	Dépression sur Golfe Gascogne, vent de sud à sud-ouest, foehn	1,5
8a ²	Dépression sur Scandavie, vent de nord-ouest, fronts froids	3,5
8b	Dépression sur Manche, vent de sud-ouest, fronts actifs	2,7
8c	Dépression sur France, fronts peu actifs	1
8d	Dépression sur Alpes, vent de nord-est, fronts froids, associée à la dépression sur golfe de Gênes	1,1
9ab	Talweg Scandinavie-Manche-Espagne, vent de sud-ouest, fronts actifs	2,8
9cd	Talweg Scandinavie-Europe Centrale, vent de nord-ouest à ouest, fronts froids	3,5

Tab. III.1 : Les situations météorologiques de la classification H.B.P, simplifiée pour l'étude, et leur fréquence pour la période 1995-2005 (du 15/10 au 15/04). En rouge, les trois régimes les plus fréquents.

15/04 pour englober les dates maximales d'enregistrements des installations d'enneigement artificiel, et cela de 1995 à 2005 (en relation avec la classification Savoie). Puis nous avons décidé de simplifier encore la classification, en associant les régimes similaires. Les régimes 6a, b, c, d ont fusionné en un groupe (le 6). Ils constituent à eux seuls 16.7% des cas dans la classification Perret (1995-2005), soit les cas où l'anticyclone est puissant et bien présent sur la Savoie. La description des simplifications effectuées et des caractéristiques de chaque code est présentée dans le tableau III.1.

L'enchaînement des types de circulations Perret est assez remarquable en hiver : **dans la journée qui suit l'observation, la probabilité d'avoir le même type est la plus forte pour tous les types de circulations.** Cette probabilité est de 65% pour les types 6, les plus stables, et peut descendre vers 25% au minimum pour les types dépressionnaires (calculs avec tableau croisé sur 2400 journées). A deux jours, les types 6 s'enchaînent avec une probabilité de 44%, les 3cd et ab à 30%, alors que les types 4, 5, 8a² sont alors suivis par des types 6... A trois jours, seuls les types 6 (dans 9% des cas) continuent de s'enchaîner avec les 3cd et 3ab (3%). Mais il faut nuancer les résultats car le nombre d'individus n'est pas identique entre les types, ce qui fait ressortir les types 3 par exemple. En tout cas, la place et le rôle des types de circulations 6 sont primordiaux dans la circulation atmosphérique locale (enchaînement de 13 jours en décembre 2001 par exemple !).

Quant à la progression des types de circulations de 1995 à 2005, on remarque **une nette diminution des flux de nord et nord-est au profit des flux de sud-ouest.** Le résultat le plus probant se situe au niveau des types 6 qui ont le plus fortement baissé (-1,3 jours/ an), avec les 5 et 6ef. Ce sont surtout des situations qui apportent des types de temps anticycloniques et froids. Au contraire, les situations perturbées de sud-ouest, d'ouest et de sud ont augmenté depuis 1995 (+1,3 jours/an pour 9ab, et situations 9cd, 8b, 1...). Cette étude sur la classification Perret est à relier avec les observations du GIEC (GIEC, 2007) sur l'augmentation des flux d'ouest en atlantique.

III.2 LA CLASSIFICATION SAVOIE

Afin d'approcher le mieux possible les types de temps en Savoie, nous allons créer une classification appelée Savoie qui utilise la technique des ambiances climatiques (nous préférons le terme «type de temps», en accord avec les définitions). Nous verrons ainsi les données et la technique utilisée, puis les résultats sous forme de classe et les «parangons», c'est-à-dire les jours les plus représentatifs de la classe.

III.2.1 Les données météorologiques

La classification concerne les ambiances climatiques quotidiennes sur une période hivernale allant de 1995 à 2005, du 15 octobre au 15 avril (le choix des dix années d'étude suffit pour avoir assez d'observations dans l'analyse statistique). De nombreux paramètres climatiques à l'échelle quotidienne sont à notre disposition, mais il se pose un problème important quant à la représentativité des paramètres, tant **la variabilité spatiale est importante en zone de montagne.** Etablir cette classification sur des données exclusivement chambériennes est tout simplement impossible

puisque les comportements des paramètres qui permettent de caractériser un type de temps sont corrélés à la topographie et aux phénomènes locaux, comme les inversions, les brouillards, le vent... Ainsi, avec Philippe YVRANDE (directeur du Centre Départemental Météorologique de Savoie), nous avons établi une liste de paramètres pertinents dans la constitution de cette classification, tout en sachant que les résultats devront être interprétés et que cette démarche pourra nous amener à redéfinir cette liste. Nous avons donc établi une convention entre Météo-France et l'Université afin d'obtenir un grand nombre de données. Toutefois, un problème subsiste et semble impossible à résoudre : les lacunes récurrentes des enregistrements dans les stations de mesures de montagne. Et ne parlons pas de la haute-montagne ! Leur maintenance est si coûteuse que ces stations de mesures risquent de disparaître avec le temps (cette observation place encore un fois les mesures de l'enneigement artificiel dans un rôle d'avant-garde et de survie du suivi local). Nous ne pourrions pas obtenir une couverture temporelle totale sur les dix ans, mais nous verrons que le nombre d'individus est suffisant au final.

Les facteurs de sélection des stations de mesures ont donc été :

- la capacité d'une station à mesurer au mieux et de façon très représentative un paramètre donné en fonction du relief (en concertation avec M. Yvrande, directeur départemental de Météo-France).
- l'absence de lacunes récurrentes.

Les stations Météo-France sont assez nombreuses (17 stations automatiques) en Savoie, mais leurs situations topographiques sont bien contrastées. A Chambéry (station de Voglans), seule la *pression atmosphérique* sera utilisée car il n'y a pas de lacunes, contrairement aux autres stations. C'est la seule station de «plaine» choisie. Ensuite, il existe en montagne des stations en fond de vallée, sur les versants, sur les cols ou sur les crêtes. Une station dite «synoptique» de Météo-France se trouve à Bourg-Saint-Maurice. Sa situation centrale et loin des influences thermiques du sud du département est intéressante, ainsi que le faible nombre de lacunes. Nous avons donc choisi plusieurs paramètres dans cette station :

la température de l'air, l'humidité relative, les précipitations quotidiennes, le rapport insolation sur la durée du jour et enfin la nébulosité totale. Pour les *précipitations neigeuses*, la station de Saint-Martin-de-Belleville a été préférée car elle se trouve plus près des domaines d'étude et bénéficie d'une série complète. Enfin, le choix des stations pour la mesure du vent a été difficile. En montagne, il existe plusieurs types de vents en fonction de la topographie. Une station en fond de vallée captera mal les directions des vents synoptiques, les confondant par exemple avec des brises de vallée, etc. Deux stations importantes ont aussi été éliminées en altitude : La Masse, à une altitude de 2800m (au-dessus des Menuires) qui comporte trop de lacunes, et le Mont-Cenis, en position de col. Une station a attiré notre

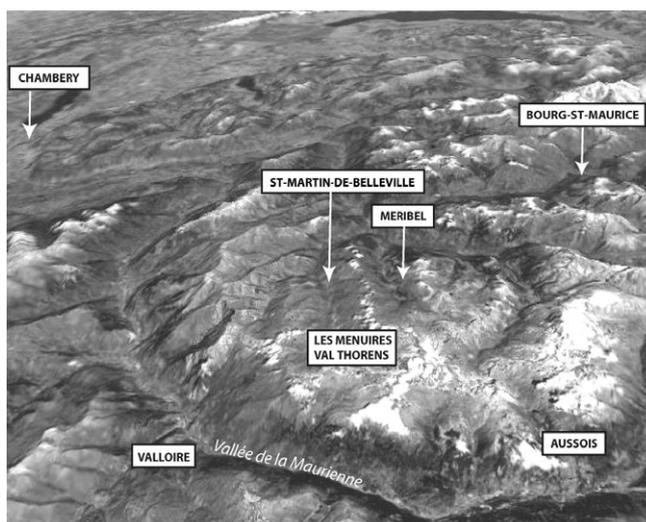


Fig. III.2.1 : Localisation des stations de mesures Météo-France utilisées (flèches) et des domaines d'étude.

Image : Google Earth.

attention, celle de Méribel Burgin. Située sur le versant d'une vallée parallèle à la vallée des Bellevilles, exposée à l'ouest, à une altitude de 2040m, elle enregistre tous types de vents dont les directions ne se mélangent pas : vents synoptiques, foehn et brises locales. Ces mesures sont typiques des versants de montagne exposés à l'ouest, ce qui répond à nos attentes. Malgré quelques lacunes, nous l'avons choisie pour les données de *direction et de vitesse du vent*.

Résumé de la base de données :

STATIONS DE MESURES	PARAMETRES	UNITES
BOURG-SAINT-MAURICE	Température de l'air	C° (moyenne de 8 valeurs tri-horaires)
	Humidité relative	% (moyenne de 8 valeurs tri-horaires)
	Précipitations quotidiennes	mm (ponctuel de 06 à 06 UTC)
	Rapport insolation sur la durée du jour	% (ponctuel de 00 à 24 UTC)
	Nébulosité totale	octas (moyenne de 4 valeurs tri-horaires)
MERIBEL	Direction du vent maxi moyen	rose de 36 (ponctuel de 00 à 24 UTC)
	Vitesse du vent maximum en m/s	m/s (ponctuel de 00 à 24 UTC)
CHAMBERY	Pression atmosphérique (red. niveau mer)	hPa (moyenne de 8 valeurs tri-horaires)
SAINT-MARTIN-DE-BELLEVILLE	Hauteur de neige	cm (quantité journalière)

Tab. III.2 : Les paramètres atmosphériques utilisés dans la classification Savoie.

La position géographique des stations de mesure apparaît sur la fig. III.2.1.

Le foehn est un phénomène important qui, malgré la complexité de sa formation et de sa prévision, doit être introduit dans cette classification. Statistiquement, nous avons contrairement aux autres données choisi de le qualifier en fonction de sa présence ou non (donnée qualitative, oui ou non). Ainsi, en partant des données de Méribel sur le vent, nous avons effectué un traitement statistique qui nous a permis de sortir les jours avec présence d'un vent dont la vitesse maximale est supérieure à 10 m/s et dont la direction est de sud (entre 140 et 220°).

Nous obtenons ainsi un fichier de données à dix colonnes (variables) et 2095 observations pour les dix hivers. Dès qu'une information était manquante, nous avons délibérément annulé l'observation (le jour). Nous sommes donc passés à 1855 observations. Ensuite 80% d'entre elles ont été tirées de manière aléatoire afin d'éliminer une possible redondance de l'information, car la période d'étude (10 ans) est courte à l'échelle climatique. Il reste au final **1388 observations**, soit 1388 jours où la comparaison avec les données de l'enneigement artificiel est possible. La classification des ambiances climatiques grâce à l'utilisation d'algorithmes nécessite une base de données suffisamment longue pour y observer un échantillon important et diversifié des situations météorologiques possibles.

III.2.2 Analyse statistique

Pour traiter le fichier de données et obtenir des ambiances climatiques (A.C), nous allons effectuer **une Analyse en Composante Principale (ACP) et Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) sur facteurs** (BERTHELOT M., 2005). Le calcul est effectué sur le logiciel SPAD.

III.2.2.a. Choix de l'algorithme de classification

Les techniques de classification font partie de la statistique exploratoire multidimensionnelle. Elles ont pour but d'explicitier la structure d'un ensemble de données importantes, permettant ainsi de formuler des hypothèses à vérifier dans une étape ultérieure. Elles sont à distinguer des méthodes de classement qui ont un but explicatif ou prédictif.

La typologie se sert de la classification pour fournir une autre forme de synthèse des données qu'une analyse factorielle. Cette synthèse de l'information contenue dans le tableau de données est présentée de la façon suivante. Les individus sont regroupés de façon automatique en un petit nombre de classes. Les individus qui se ressemblent au niveau des variables actives sont rassemblés dans une même classe. Les classes sont calculées pour que, lorsque l'on passe d'une classe à une autre, on passe d'une catégorie particulière d'individus à une catégorie différente. La synthèse de toute l'information contenue dans le tableau de données se ramène alors à la caractérisation de ce petit nombre de classes homogènes. On aura ainsi fabriqué et typé des classes d'individus. La description en clair de ces types résume l'essentiel de l'information contenue dans les données.

III.2.2.b. La méthode de classification

Afin de répondre à l'objectif de notre travail, il nous faut établir une partition d'un certain nombre d'observations en un certain nombre d'ambiances climatiques. Les A.C. doivent être composées d'observations météorologiques relativement proches. Plusieurs méthodes de classification sont à notre disposition, mais nous ne retiendrons que les méthodes automatiques qui permettent aisément de mieux justifier le nombre de classes choisies. Notre base de données autorise aussi bien l'utilisation des classifications hiérarchiques ou non. Le premier type de classification est la méthode de classification autour des centres mobiles (C.C.M.). Cette classification est probablement la technique de partition la mieux adaptée actuellement aux vastes recueils de données ainsi que la plus utilisée pour ce type de recherche. Il existe de nombreux algorithmes dont le principe général est voisin de l'algorithme autour des centres mobiles. Dans la technique des nuées dynamiques, les classes ne sont pas caractérisées par un centre de gravité mais par un certain nombre d'individus à classer (étalons) qui constituent alors un noyau ayant pour certaines utilisations un meilleur pouvoir descriptif que des centres ponctuels. Ces méthodes s'appliquent à des bases de données très importantes. De plus, différents essais ont montré une partition inadéquate, le nombre de classes étant souvent trop important avec une composition d'un faible nombre d'effectifs (BERTHELOT M., 2005). Enfin, le nombre de classes doit être fixé au départ, et la partition obtenue dépend du tirage initial des centres provisoires des classes.

La classification ascendante hiérarchique (C.A.H.) est tout aussi intéressante mais l'inconvénient majeur de ce type de classification reste la justification du nombre de classes retenues, c'est-à-dire la coupure de l'arbre de classification.

III.2.2.c. La complémentarité entre l'analyse factorielle et la classification

Les analyses multivariées et principalement l'A.C.P. sont souvent employées dans l'analyse de longues séries de données météorologiques, nous n'allons donc pas redéfinir la métho-

dologie ici. Les représentations graphiques obtenues grâce à l'A.C.P. permettent d'obtenir rapidement une sorte « d'image de la réalité ». Elles constituent donc une approximation visuelle du tableau de données. Cette visualisation sera en général partielle et difficile, du fait que seulement deux dimensions sont observables commodément à la fois, alors que l'espace à regarder peut être de dimension plus élevée. L'apport de la classification est une opération complémentaire de synthèse. Un individu est caractérisé par son appartenance à un groupe précis. Ce sont les caractéristiques moyennes de ce groupe qui résument alors les individus du groupe. A elle seule, l'A.C.P. connaît de nombreuses insuffisances. Il est toujours difficile d'interpréter les axes ou plans factoriels au-delà du plan principal. De plus, si nous ne retenons que les axes les plus représentatifs, nous pouvons être confrontés à une compression excessive des données. Mais les méthodes factorielles sont nécessaires, malgré leurs insuffisances : la visualisation des résultats sous forme d'ensemble géométrique reste irremplaçable. La classification ne réussit pas toujours à montrer l'importance de certaines tendances ou de facteurs latents continus. Pour observer l'organisation spatiale des classes, le positionnement de classes sur les axes factoriels s'avère indispensable. La classification (C.H.A.) peut aider à découvrir l'existence de groupes d'individus. L'analyse factorielle peut mettre en avant des facteurs latents inattendus. La découverte de tels phénomènes est finalement l'objectif de ces deux familles de méthodes.

III.2.2.d. Les résultats de l'analyse statistique

- L'A.C.P. est utilisée comme étape préalable à la classification pour deux raisons : pour son pouvoir de description et son pouvoir de filtrage qui devrait permettre de travailler sur des coordonnées factorielles moins nombreuses que les variables de départ. Les variables et leurs relations sont décrites dans les tableaux ci-dessous (tab. III.3, 4 et 5) :

Libellé de la variable	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Pression atmo (hpa)	1018,760	8,686	990,600	1039,800
Humidité relative (HR)	70,982	15,548	18,000	99,000
Température (°C)	4,440	5,083	-11,200	17,500
Précipitation (mm)	2,732	6,694	0,000	57,800
Insolation (insol)	40,113	29,283	0,000	83,000
Nébulosité (Octas)	4,862	2,688	0,000	9,000
Vitesse du vent (vit vent)	8,527	6,605	1,000	45,000
Direction du vent (dir vent)	165,903	100,928	0,000	360,000
Neige en cm	1,143	3,778	0,000	50,000

Tab. III.3 : Caractéristiques des variables de la classification Savoie.

Pour la direction du vent, il est bien sûr inconcevable de faire une moyenne sur une variable circulaire, mais nous verrons que cela ne pose pas de problème dans l'interprétation car en montagne et surtout à Méribel les vents par temps perturbé sont très différents de ceux par temps anticyclonique (direction et vitesse).

Le foehn a été introduit comme variable nominative. Les journées sans foehn ont une grande corrélation avec la pression atmosphérique, et les journées avec foehn semblent très liées à la vitesse et direction du vent. La logique est donc respectée.

- La classification sur facteurs : il est équivalent d'effectuer une classification des individus à partir d'un ensemble de variables ou à partir de l'ensemble des facteurs issus de l'analyse

Variables	hpa	HR	°C	mm	insol	Octas	vit vent	dir vent	Neige
hpa	1,00								
HR	-0,07	1,00							
°C	-0,23	-0,37	1,00						
mm	-0,27	0,38	-0,03	1,00					
insol	0,49	-0,46	0,04	-0,42	1,00				
Octas	-0,53	0,35	0,12	0,39	-0,85	1,00			
vit vent	-0,49	-0,01	0,18	0,40	-0,44	0,42	1,00		
dir vent	-0,17	0,08	0,02	0,14	-0,16	0,18	0,25	1,00	
Neige	-0,19	0,24	-0,17	0,61	-0,30	0,27	0,30	0,16	1,00

Tab. III.4 : Matrice des corrélations.

Les corrélations montrent une certaine indépendance des variables entre elles. Seules les variables d'insolation et les octas sont inversement corrélés. Quant aux températures, c'est la variable la plus volatile, c'est-à-dire la plus indépendante.

	Axe 1 (+37.9%)		Axe 2 (+17.7%)	
CONTRIBUTIONS POSITIVES	Octas	+19,0%	HR	+27,0%
	mm	+14,0%	hpa	+11,0%
	vitméríb	+12,0%	Neige	+5,0%
	Neige	+10,0%	mm	+3,0%
	HR	+6,0%		
CONTRIBUTIONS NEGATIVES	insol	-20,0%	°C	-41,0%
	hpa	-12,0%	vitméríb	-8,0%
			dirmeríb	-1,0%

Tab. III.5 : Contributions relatives des critères pour les deux premiers axes.

Après l'analyse factorielle, nous prenons les cinq premiers facteurs pour avoir 80% de la variance, même si les deux premiers axes contiennent l'essentiel de l'information. *vitmerib* : vitesse du vent (à Méribel). *dirmerib* : direction du vent.

factorielle (fig.III.2.2). On peut, néanmoins, ne prendre en compte qu'un sous-espace factoriel et effectuer une classification sur les premiers axes factoriels. Cela présente l'avantage d'éliminer des fluctuations aléatoires qui constituent en général l'essentiel de la variance prise en compte par les derniers axes. Le fait d'abandonner les derniers facteurs revient à « lisser » les données, ce qui en général améliore la partition en produisant des classes plus homogènes. La C.A.H. fournit un grand nombre de partitions parmi lesquelles on doit en choisir une : il n'est souvent pas aisé de choisir la coupure significative. D'autre part, l'arbre hiérarchique obtenu n'est pas un arbre optimal puisque la partition construite à un niveau donné dépend de la partition obtenue à l'étape précédente. La procédure de la C.A.H. agrège les éléments suivant un algorithme de classification hiérarchique utilisant le critère d'agrégation de Ward (critère de la variance). La C.A.H. suit la procédure réalisée avec l'A.C.P. et est effectuée sur les 5 premières composantes. Les résultats peuvent être visualisés graphiquement grâce à un arbre hiérarchique ou dendrogramme (celui-ci n'est pas exposé ici pour des problèmes de visualisation). Notre principal souci est alors d'obtenir une certaine homogénéité du nombre d'effectifs présents dans chaque classe. Il est aussi important de mesurer le comportement moyen des variables pour chacune des classes. **Ainsi, en retenant un très petit nombre de classes, la partition risque de ne pas répondre à nos attentes. De la même manière, si nous retenons un grand nombre de classes, l'interprétation des ambiances climatiques moyennes peut s'avérer être fausse.** Les nombreuses partitions effectuées au cours de cette analyse justifient le choix

Fig. III.2.2 : Projection des variables sur le premier plan factoriel.

Comme on a pu l'observer dans la matrice des corrélations, l'insolation et la couverture nuageuse contribuent fortement à la formation de l'axe F1. La température et l'humidité contribuent quant à elles à la formation de l'axe 2.

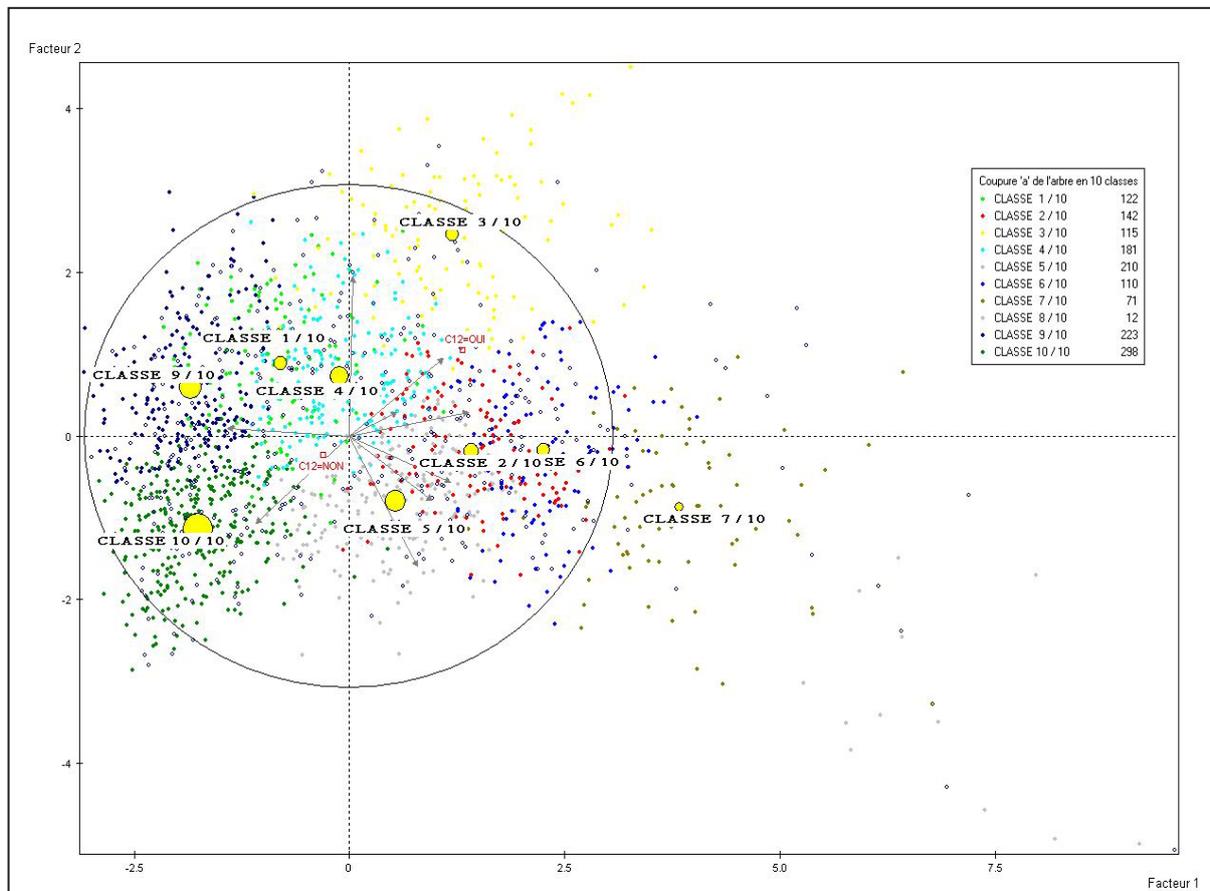
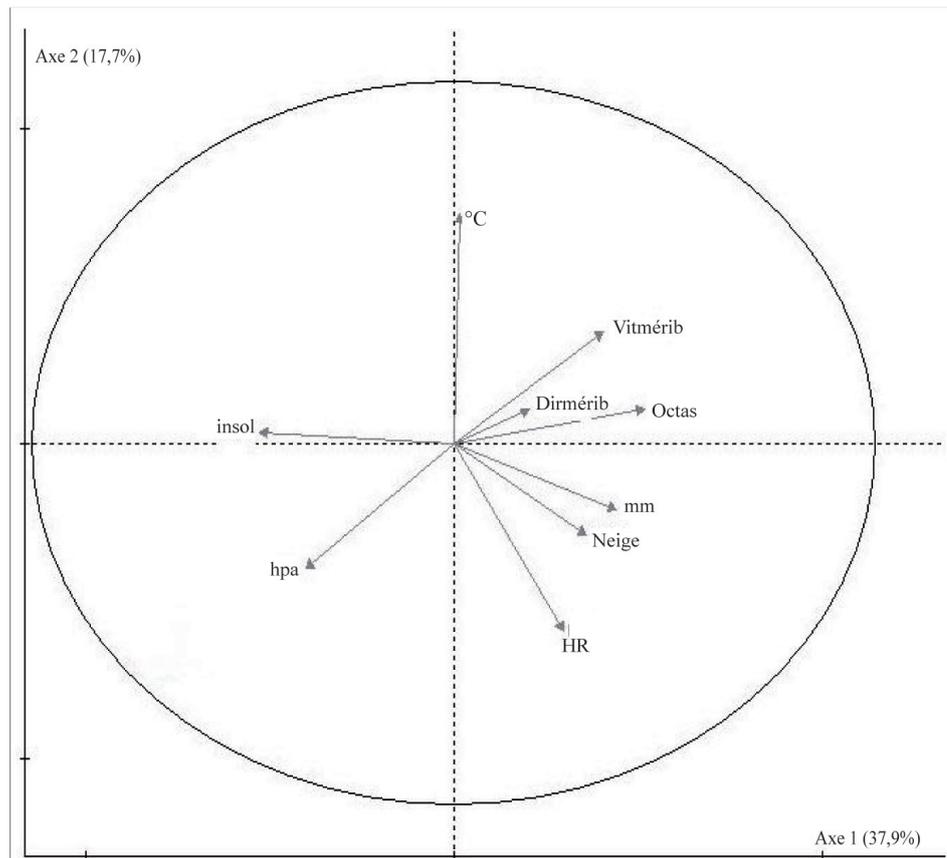


Fig. III.2.3 : Illustration des individus par une partition en 10 classes sur le premier plan factoriel
C12 : occurrence du foehn.

d'une partition en **10 classes** bien distinctes présentant des effectifs plus ou moins hétérogènes mais sans excès (fig. III.2.3).

III.2.3 Description des classes

Cette dernière procédure vise à décrire chacune des ambiances climatiques (ou type de temps) à travers les variables continues. Une variable continue caractérise un groupe d'individus si sa moyenne dans la modalité de la variable à décrire diffère significativement de la moyenne générale de la variable dans la population. Le test mis en oeuvre pour évaluer l'écart entre les deux moyennes est un test non-paramétrique de comparaison de moyennes. Plus la valeur-test associée est grande, plus l'écart est significatif et plus la variable est caractéristique. Les variables continues sont classées dans l'ordre décroissant des valeurs-tests.

Afin de simplifier le rendu, nous avons changé le nom des classes de la fig.III.2.3 pour que la classification ait un ordre lié au temps qu'il fait. **Nous avons choisi comme variable déterminante la nébulosité.** C1 correspond à une nébulosité moyenne de 2 octas, et C10 de 7.8 octas. Nous avons classé en dernier les classes où la variable neige agit. Le tableau III.6 résume les valeurs moyennes qui caractérisent le mieux chaque classe (chiffre en rouge) par rapport aux valeurs-tests. Il est alors possible d'interpréter ces résultats. Les distinctions sur les vents (régimes de brises ou vents synoptiques) ont été réalisées à posteriori, après une comparaison fine entre les classes et les mesures de la station de Méribel.

Classes	Pression en Hpa	Nébulosité en octas	Insolation en %	Température en °C	Humidité Relative en %
C1	1026	2	66	-0,5	abs
C2	1023	2	72	8	57
C3	abs	3,5	63	8	60
C4	1016	6	abs	8	65
C5	1007	6,6	22	10	50
C6	abs	6,7	16	2	83
C7	1015	7	14	2	81
C8	1011	7,6	6,6	abs	86
C9	1011	7,6	6	2,5	88
C10	abs	7,8	1,2	-0,4	91

Classes	Précipitation en mm	Neige en cm	Direction vent en degré	Vitesse vent en m/s	Occurrence foehn en %
C1	0	0	120	4	2
C2	0	0	110	6	11
C3	0,5	0	330	7	2,4
C4	1	0	115	7,5	abs
C5	1	abs	abs	20	88
C6	1,2	abs	100	6	6
C7	abs	abs	340	10	1,5
C8	11,3	abs	abs	12	47
C9	19	9	230	19	40
C10	38	29,5	270	20	abs

Tab. III.6 : Caractéristiques des classes en fonction des moyennes de chaque variable.

En rouge : valeur déterminante.
abs : variable non déterminante.

Les valeurs moyennes en rouge dans le tableau sont réparties de manière distinctive ce qui permet sur une rapide lecture de séparer les classes C1, C2, C3 (marquées par une forte pression et une forte insolation) et les classes de C4 à C10 (nébulosité forte). Ensuite, les classes C2, C3 et C4 sont différenciées par des températures moyennes élevées. Les classes C8, C9 et C10 ont quant à elles des précipitations marquées. Enfin, les valeurs sur le vent nous permettent de faire une dernière distinction entre les mesures de brises (C1, C2 principalement), et les vents d'ouest ou de nord-ouest plus ou moins forts. La classe C5 est caractérisée par une occurrence de foehn de 88%. La classe C10 se distingue par 29,5cm de neige en moyenne journalière. Notons que les classes C4 et C6 sont les plus difficiles à interpréter car les valeurs des variables nous indiquent plutôt un temps variable, un changement de temps en bref, dans des masses d'air froid (C6) ou plus chaud (C4), voire des retours d'est. Et la classe C7 diffère peu de C6 (sauf d'un point de vue dynamique, car C7 introduit ou termine un épisode perturbé). Au final, nous pouvons synthétiser ces observations pour décrire les types de temps obtenus (tab. III.7) :

N° Classe	Description météorologique	%
C1	Type anticyclonique très fort avec belle insolation et températures très froides. Régime de brises.	21,5
C2	Type anticyclonique fort avec très belle insolation et températures douces. Régime de brises.	14,8
C3	Type anticyclonique avec vent de nord-ouest dominant, belle insolation et températures douces.	7,1
C4	Temps nuageux à variable et températures douces. Pas de précipitation. Régime de brises majoritaire.	11,7
C5	Type dépressionnaire, nuageux et températures douces sans précipitation. Vent fort. C'est la classe du foehn.	7,2
C6	Temps nuageux, froid et humide. C'est la classe des changements de temps.	14,8
C7	Type dépressionnaire avec vents de nord-ouest à nord (bise), temps nuageux, humide et froid, sans précipitation.	9,7
C8	Type dépressionnaire très nuageux et arrosé avec vent fort (surtout nord-ouest).	7,4
C9	Type dépressionnaire très arrosé, très humide avec neige et froid. Vent fort d'ouest.	5
C10	Type dépressionnaire très neigeux, humide avec vent fort surtout d'ouest.	1

Tab. III.7 : Description des classes Savoie et fréquence d'apparition en %.
Observations sur 1388 jours de 1995 à 2005 (15 octobre - 15 avril).

Cette classification découpe de manière homogène les types de temps : beau temps (C1, C2, C3, 43,4% des cas) ; temps variable (C4 et C6, 26,5%) ; mauvais temps (C5 à C10, 30,1%). Le calcul sur l'enchaînement des types de temps aurait été intéressant, mais il existe des lacunes dans les jours de la classification. Toutefois, le calcul a tout de même été effectué avec des séries continues courtes, et les résultats correspondent à la logique des classifications de types de circulations (Bénichou ou Perret) qui mettent en évidence la persistance particulière des anticyclones hivernaux. Dans la classification Savoie, C1 et C2 persistent à J+1 dans 50 % des cas, et à 40 % à J+2. Les classes des types perturbés persistent plutôt dans 25% des cas à J+1 (sauf pour C10 qui ne tient qu'un jour). La classe C5 a tendance à durer deux jours (le foehn). Remarquons enfin, et cela confirme notre analyse, que le passage du beau temps au mauvais temps s'effectue souvent par C4 et C6.

Un autre travail peut nous aider à mieux discerner les classes entre elle : l'évolution des effectifs des classes en pourcentage en fonction des mois (fig.III.2.4). Nous voyons parfaitement que la classe C1 est très présente dans les mois très froids comme décembre, janvier (42% des

types de temps) et février, et qu'elle est sinon remplacée par la classe C2 (octobre, mars et avril). Nous verrons que cela est primordial dans la distinction entre certains régimes de brises. La classe C6 est très présente en novembre, décembre et janvier, lorsque le temps est souvent maussade et froid. Puis elle disparaît presque. Contrairement aux classes C3 et C4, plus en rapport avec la classe C2 (octobre, mars, avril). Quant aux autres classes, leur effectif diminue en plein hiver à cause de la prépondérance de C1. En conclusion, ce graphique nous donne un aperçu presque exhaustif des types de temps présents d'octobre à avril en Savoie, **et montre bien la prépondérance des types anticycloniques froids qui ne durent que pendant trois ou quatre mois.**

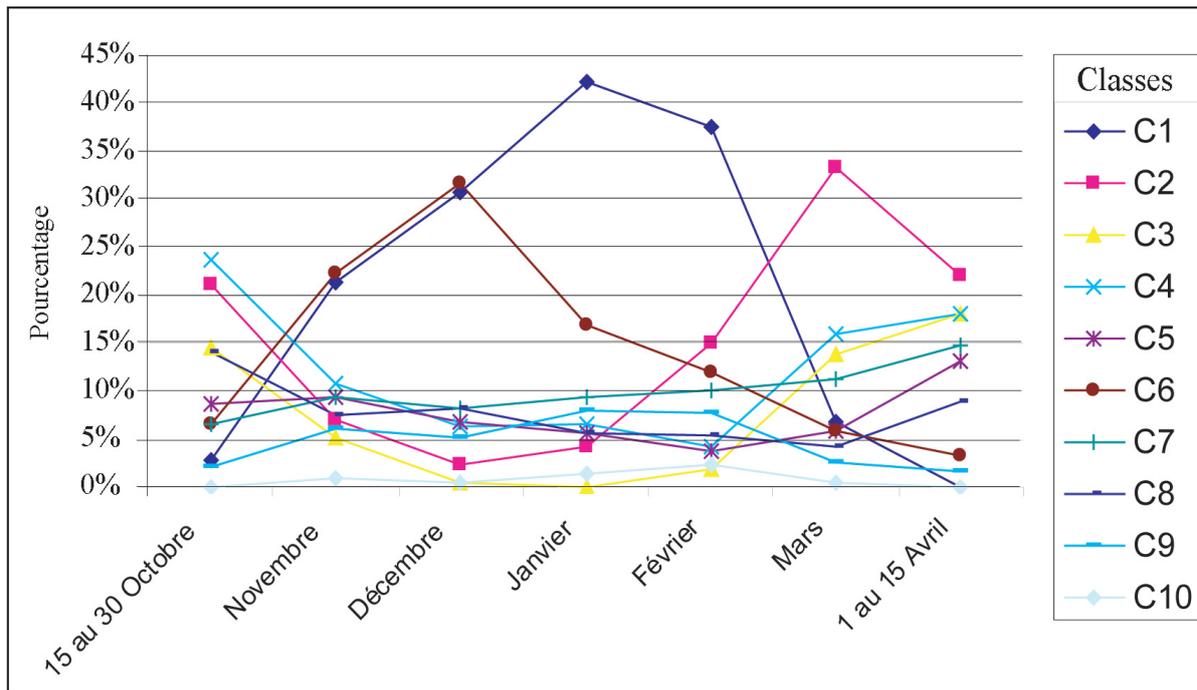


Fig.III.2.4 : Répartition et évolution des pourcentages d'occurrence des classes par mois (1995-2005).

Enfin, une comparaison avec l'étude menée par le Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industrielles de Grenoble (BRULFERT B., 2005) nous révèle des différences intéressantes entre une classification créée à partir de données de fond de vallée (prévision des pics de pollution) et la classification Savoie. Les couches d'inversions dans les vallées sont corrélées avec C1 et C6, et les vents thermiques avec C2, C3, C4. Les brises de pentes descendantes liées aux puissants anticyclones d'hiver ne sont donc pas classées dans les vents thermiques mais dans la couche d'inversion. Car en fond de vallée les brises de pente disparaissent. Le foehn est quant à lui très bien corrélé entre les deux classifications. Localement, ces deux classifications diffèrent parce que le fond de vallée et les versants n'ont pas la même climatologie hivernale. Mais synoptiquement, la classification Savoie est plus précise car les vents mesurés sur le versant peuvent être décomposés, au contraire du fond de vallée où les directions des vents et l'effet venturi rendent impossible l'interprétation. Malgré cela, ces deux classifications restent complémentaires.

Edition des parangons:

Les parangons sont les journées qui caractérisent le mieux la classe. A chaque journée contenue dans la classe est associée une distance par rapport au centre de cette classe. Plus cette distance sera faible et plus la journée sera représentative de la classe. Ainsi nous pouvons nous référer à des cartes météorologiques qui seront représentatives des situations moyennes présentes pour chaque classe. Nous avons trouvé les cartes sur le site www.wetterzentrale.de. Les parangons présentés ont une distance au centre inférieure à 0.2 (pour C1 et C2, la distance est inférieure à 0.1), sauf pour C10 dont la distance est de 2.6. Nous avons donc des parangons bien représentatifs, utiles pour visualiser les circulations synoptiques typiques amenant tels ou tels types de temps sur la Savoie (fig.III.2.5 à 2.14). Se référer au tableau III.7 pour la description des classes.

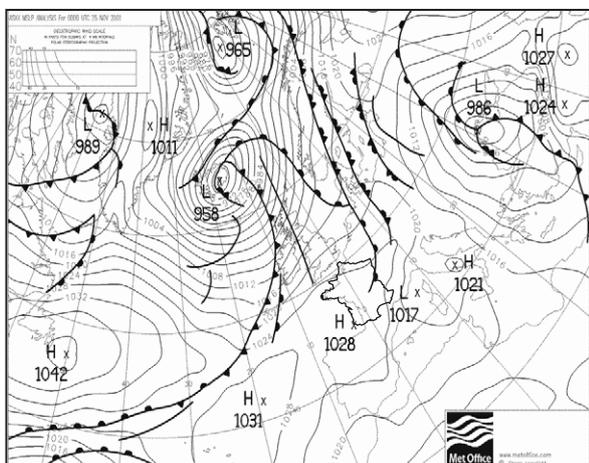


Fig.III.2.5 : Parangon de la classe C1.
Carte météorologique du 25/11/2001.

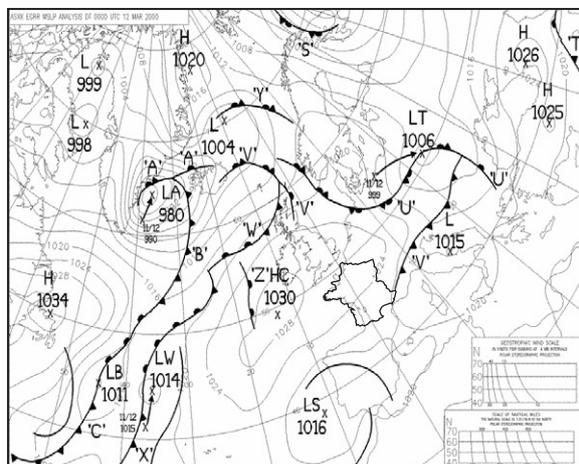


Fig.III.2.6 : Parangon de la classe C2.
Carte météorologique du 12/03/2000.

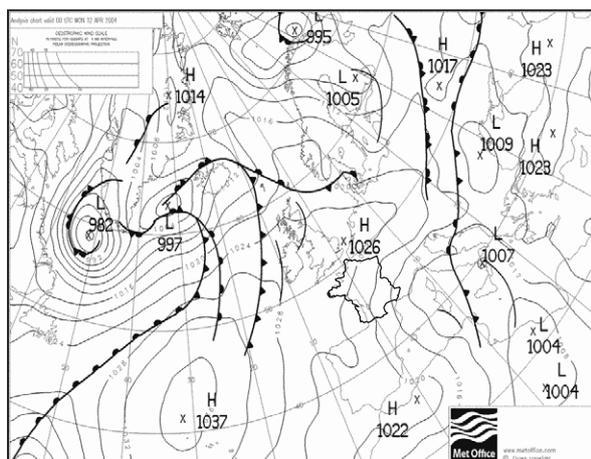


Fig.III.2.7 : Parangon de la classe C3.
Carte météorologique du 12/04/2004.

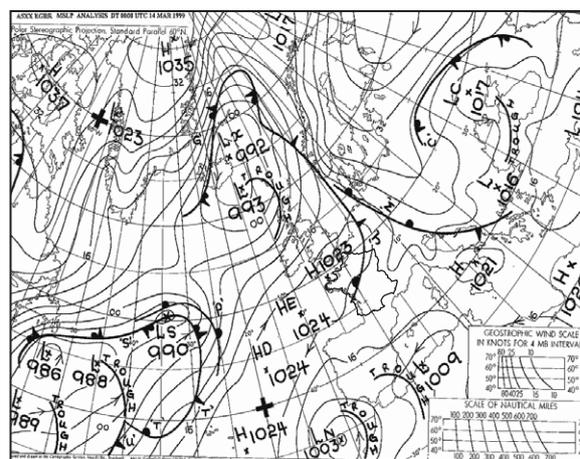


Fig.III.2.8 : Parangon de la classe C4.
Carte météorologique du 14/03/1999.

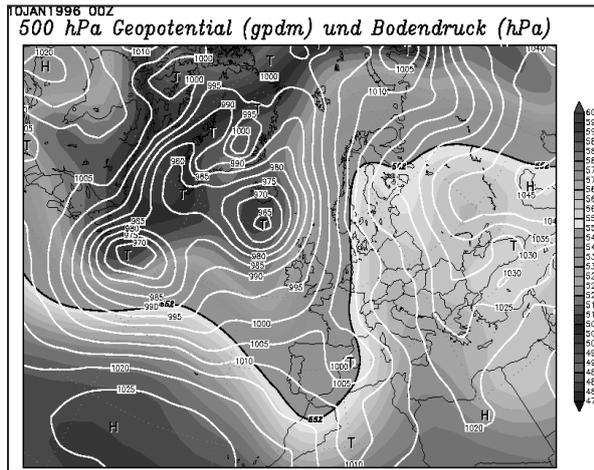


Fig.III.2.9 : Parangon de la classe C5.
Carte des pressions et géopotential du 10/01/1996.

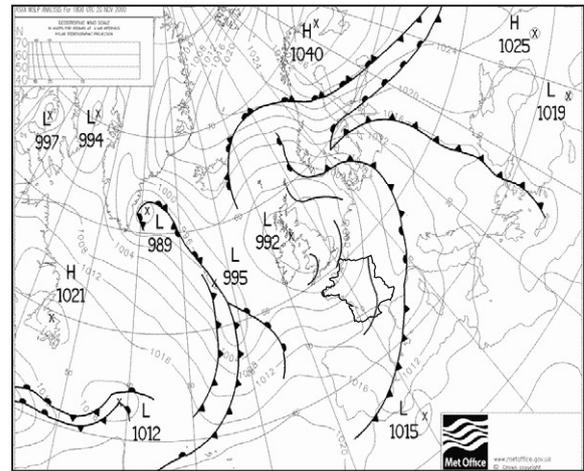


Fig.III.2.10 : Parangon de la classe C6.
Carte météorologique du 21/11/2000.

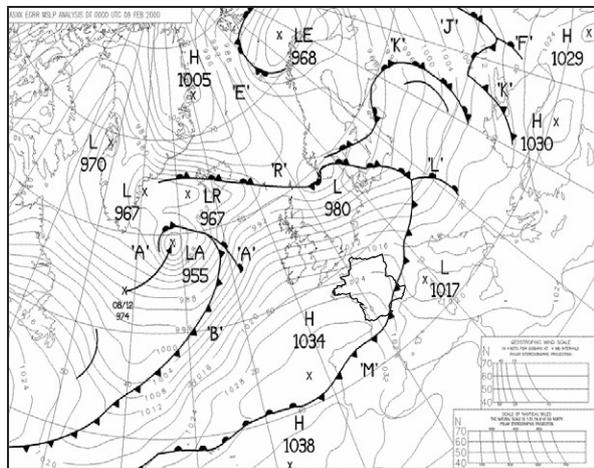


Fig.III.2.11 : Parangon de la classe C7.
Carte météorologique du 09/02/2000.

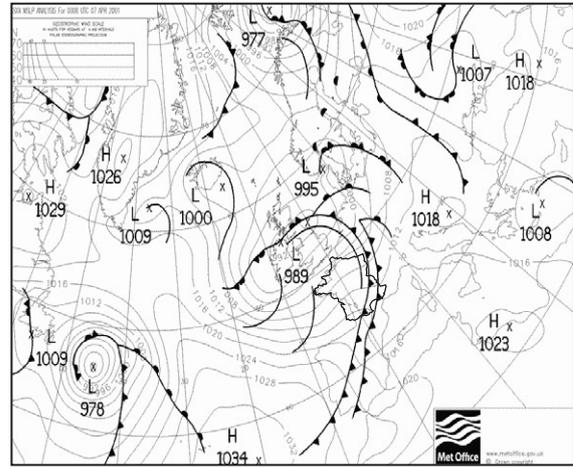


Fig.III.2.12 : Parangon de la classe C8.
Carte météorologique du 07/04/2001.

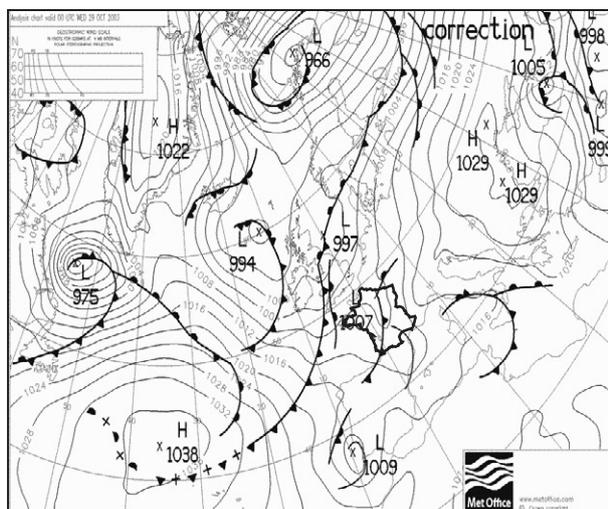


Fig.III.2.13 : Parangon de la classe C9.
Carte météorologique du 29/10/2003.

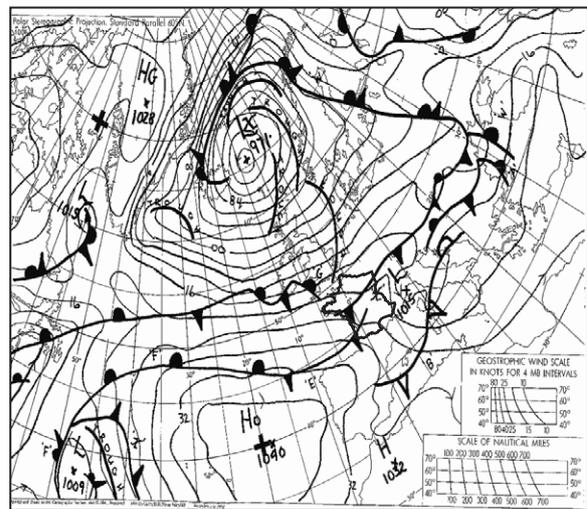


Fig.III.2.14 : Parangon de la classe C10.
Carte météorologique du 21/02/1999.

III.3 LA CLASSIFICATION PERRET-SAVOIE

III.3.1 Analyse des correspondances

Pour concevoir cette classification, il nous faut compiler les codes des deux premières classifications. La difficulté est alors de pouvoir analyser et dépouiller les croisements en repérant les combinaisons les plus ou les moins significatives. Le tableau croisé entre les deux classifications est sûrement l'outil le mieux adapté à cette analyse. Effectué sur le logiciel Sphinx, il permet d'avoir une vision synthétique des résultats, d'autant plus que l'on peut effectuer des tests de significativité qui mettent en valeur les résultats remarquables. Le tableau croisé offre tous les rapports en pourcentage et il peut être ordonné de façon à observer quels types de circulations donnent quels types de temps. Il est donc constitué de 10 colonnes correspondant aux 10 classes de la classification Savoie et de 22 lignes des 22 classes de la classification Perret simplifié. Une analyse factorielle des correspondances (AFC), outil statistique qui correspond aux tableaux croisés, complète l'étude en fournissant un aperçu graphique des relations entre les deux variables. Cet aspect facilite aussi la mise en groupe par rapport à des correspondances communes. Sur le graphique (fig.III.3.1), nous distinguons par exemple un groupe composé des types circulations et de temps définissant un temps ensoleillé et froid (cercle). En observant le tableau croisé (tab. III.8), on se rend compte que les types de situations de ce groupe sont bien déterminés et donc bien reliés. Quant aux autres, leurs situations s'étirent plus sur les deux plans factoriels et nous affinerons leurs relations dans la description qui suit (les autres plans factoriels ne changent pas leurs positions).

III.3.2 Description des types de situations Perret-Savoie.

Le croisement des données implique 166 combinaisons différentes, mais il en existe un grand nombre qui ne sont survenues qu'une fois (25 cas), 2 fois (24 cas), 3 et 4 fois (24 cas). Afin de simplifier l'analyse, et sachant que ces situations rares s'apparentent très souvent à d'autres situations plus représentatives, nous avons choisi de sélectionner seulement les combinaisons qui sont apparues 10 fois ou plus (correspondant en moyenne à une situation par an sur les 10 ans d'étude), ainsi que quelques situations pour les individus plus faibles statistiquement. On se retrouve alors avec 47 combinaisons qui mettent en jeu 17 types Perret et 9 types Savoie (pour C10, on a au maximum 5 combinaisons avec 3cd). Les types de situations Perret-Savoie les plus courants sont donnés dans le tableau III.9, on remarquera que les situations anticycloniques avec beau temps sur la Savoie sont prépondérantes, même si les perturbations d'ouest sont bien présentes (3cd). **Le type 5b/C7, fréquent, marque généralement le retour au beau temps après un épisode froid et pluvieux, il correspond donc souvent à des températures très froides et des inversions de température dans les vallées.**

La figure III.3.2 nous indique les relations les plus pertinentes entre les types Perret et Savoie et nous permet de constituer un regroupement entre les types de circulations puisque beaucoup provoquent des types de temps similaires. La figure montre une séparation entre les types anticycloniques qui apportent généralement du beau temps, les types «variables» dont les statistiques donnent une répartition assez égale entre les types de temps et surtout sur C6 et C4, et enfin

Savoie Perret	C1	C2	C6	C4	C7	C8	C5	C3	C9	C10	TOTAL
6	4,5% (123)	17,9% (75)	10,0% (27)	4,8% (13)	1,9% (5)	0,0% (0)	1,1% (3)	8,6% (23)	0,0% (0)	0,0% (0)	100% (269)
3ab	13,4% (64)	23,6% (34)	15,3% (22)	5,6% (8)	2,8% (4)	0,0% (0)	1,4% (2)	6,3% (9)	0,7% (1)	0,0% (0)	100% (144)
3cd	6,5% (9)	5,0% (7)	15,8% (22)	10,8% (15)	9,4% (13)	24,5% (34)	2,2% (3)	4,3% (6)	18,0% (25)	3,6% (5)	100% (139)
1a	7,8% (6)	28,6% (22)	10,4% (8)	11,2% (24)	1,3% (1)	1,3% (1)	18,2% (14)	1,3% (1)	0,0% (0)	0,0% (0)	100% (77)
7ac	5,7% (4)	7,1% (5)	24,3% (17)	21,4% (15)	8,6% (6)	8,6% (6)	17,1% (12)	5,7% (4)	1,4% (1)	0,0% (0)	100% (70)
8a	7,2% (5)	11,6% (8)	7,2% (5)	24,6% (17)	4,3% (3)	14,5% (10)	23,2% (16)	4,3% (3)	1,4% (1)	1,4% (1)	100% (69)
2a	21,3% (13)	45,0% (25)	14,8% (9)	11,5% (7)	0,0% (0)	0,0% (0)	1,6% (1)	9,8% (6)	0,0% (0)	0,0% (0)	100% (61)
4a	35,0% (21)	20,0% (12)	16,7% (10)	10,0% (6)	10,0% (6)	0,0% (0)	0,0% (0)	8,3% (5)	0,0% (0)	0,0% (0)	100% (60)
7b6b	10,0% (5)	2,0% (1)	32,0% (16)	14,0% (7)	20,0% (10)	2,0% (1)	8,0% (4)	8,0% (4)	4,0% (2)	0,0% (0)	100% (50)
6ef	26,5% (13)	10,2% (5)	10,2% (5)	18,4% (9)	8,2% (4)	2,0% (1)	4,1% (2)	20,4% (10)	0,0% (0)	0,0% (0)	100% (49)
9cd	6,1% (3)	0,0% (0)	18,4% (9)	8,2% (4)	24,5% (12)	12,2% (6)	4,1% (2)	4,1% (2)	16,3% (8)	6,1% (3)	100% (49)
5a	27,1% (13)	14,6% (7)	4,2% (2)	10,4% (5)	14,6% (7)	0,0% (0)	0,0% (0)	19,2% (14)	0,0% (0)	0,0% (0)	100% (48)
8a²	14,6% (7)	0,0% (0)	18,8% (9)	14,6% (7)	20,8% (10)	18,8% (9)	0,0% (0)	6,3% (3)	4,2% (2)	2,1% (1)	100% (48)
4b	4,9% (2)	4,9% (2)	26,8% (11)	2,4% (1)	29,3% (12)	4,9% (2)	0,0% (0)	0,0% (0)	22,0% (9)	4,9% (2)	100% (41)
5b	7,7% (3)	2,6% (1)	25,6% (10)	5,1% (2)	15,5% (7)	2,6% (1)	0,0% (0)	10,3% (4)	2,6% (1)	0,0% (0)	100% (39)
9ab	7,7% (3)	2,6% (1)	12,8% (5)	15,4% (6)	15,4% (6)	23,1% (9)	12,8% (5)	0,0% (0)	10,3% (4)	0,0% (0)	100% (39)
8b	0,0% (0)	0,0% (0)	8,1% (3)	13,5% (5)	18,9% (7)	18,9% (7)	21,6% (8)	0,0% (0)	18,9% (7)	0,0% (0)	100% (37)
2b	3,7% (1)	0,0% (0)	14,8% (4)	22,2% (6)	7,4% (2)	22,2% (6)	14,8% (4)	7,4% (2)	7,4% (2)	0,0% (0)	100% (27)
1b	4,5% (1)	0,0% (0)	13,6% (3)	13,6% (3)	9,1% (2)	22,7% (5)	22,7% (5)	4,5% (1)	9,1% (2)	0,0% (0)	100% (22)
8a'	0,0% (0)	0,0% (0)	0,0% (0)	9,5% (2)	0,0% (0)	9,5% (2)	17,0% (7)	0,0% (0)	0,0% (0)	0,0% (0)	100% (21)
8d	6,7% (1)	0,0% (0)	20,0% (3)	0,0% (0)	40,0% (6)	13,3% (2)	0,0% (0)	6,7% (1)	13,3% (2)	0,0% (0)	100% (15)
8c	7,1% (1)	0,0% (0)	35,7% (5)	7,1% (1)	14,3% (2)	7,1% (1)	14,3% (2)	0,0% (0)	14,3% (2)	0,0% (0)	100% (14)
TOTAL	21,5% (298)	14,8% (205)	14,8% (205)	11,7% (163)	9,7% (135)	7,4% (103)	7,2% (100)	7,1% (98)	5,0% (69)	0,9% (12)	100% (1388)

Tab. III.8 : Tableau croisé classification Savoie/classification Perret effectué sur 1388 observations.

Les valeurs affichées sont en pourcentage et en effectif (classées dans l'ordre décroissant), avec la somme des pourcentages en lignes afin de respecter la relation Perret/Savoie. Les chiffres encadrés sont les valeurs significatives du test d'indépendance, ils correspondent à des relations remarquables. Les rectangles verts sont proportionnels aux pourcentages. Exemple : 45.7% de la classe Perret 6 correspondent à la classe Savoie C1. Ainsi presque la moitié des types de circulations 6 donne le type de temps C1 (soit 8.6% de tous les cas, c'est le type de situation le plus représenté).

les types cycloniques, où le beau temps est rare, et la pluie (ou neige) courante. La situation 8a' a quant à elle été nommée pour sa capacité à provoquer du foehn.

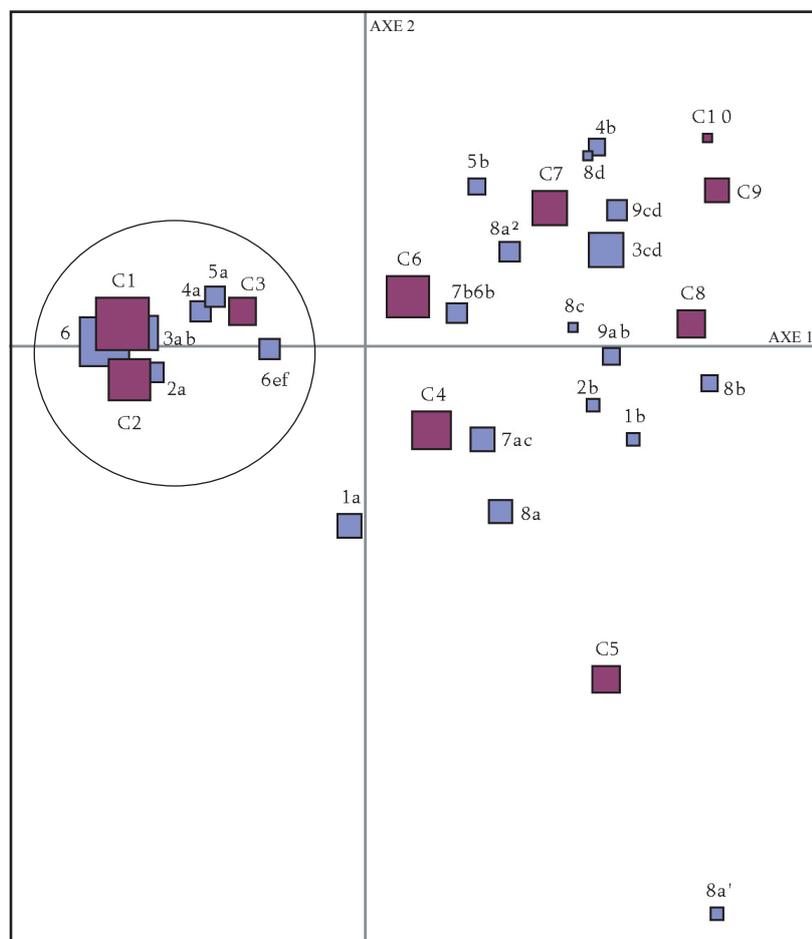


Fig.III.3.1 : Analyse factorielle des correspondances des types de circulations (carré bleu) et des types de temps (carré violet).

La taille des carrés est proportionnelle aux effectifs. L'axe 1 horizontal contient 47,6% de la variance, l'axe 2, 25,8%.

Types	Nombre	Pourcentage
6/C1	123	8,90%
6/C2	75	5,40%
3ab/C1	64	4,60%
3ab/C2	34	2,40%
3cd/C8	34	2,40%
6/C6	27	1,90%
2a/C2	25	1,80%
3cd/C9	25	1,80%
1a/C4	24	1,70%
6/C3	23	1,70%
1a/C2	22	1,60%
3ab/C6	22	1,60%
3cd/C6	22	1,60%
4a/C1	21	1,50%
5b/C7	17	1,20%
7ac/C6	17	1,20%
8a'/C5	17	1,20%
8a/C4	17	1,20%
7b/6b/C6	16	1,20%
8a/C5	16	1,20%
3cd/C4	15	1,10%
7ac/C4	15	1,10%
1a/C5	14	1,00%
5a/C3	14	1,00%

Tab. III.9 : Types de situations Perret-Savoie les plus courantes (>1%), avec leur nombre et le pourcentage par rapport aux 1388 situations.

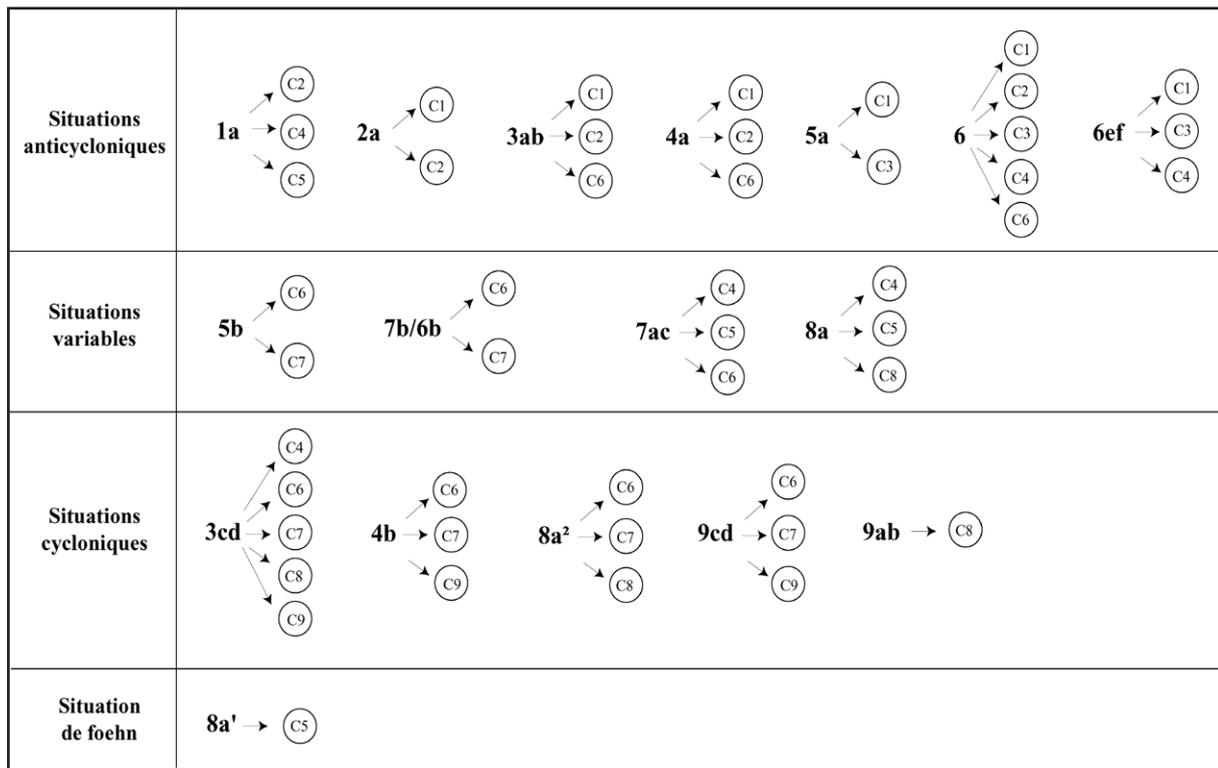


Fig.III.3.2 : Relations entre les types de circulations et les types de temps dans la classification Perret-Savoie (>10 cas).

Nous allons compiler les informations issues de l'analyse des correspondances et des descriptions de R. Perret pour caractériser le temps en Savoie. Les types de circulations à l'intérieur des groupes sont organisés de manière à annoncer les transitions avec les groupes suivants en matière de précipitation. Ainsi, plus on descend dans les groupes, plus on rencontre des situations pluviogènes.

• **Groupe 1 : beau temps généralisé (37.6%).**

6 : Régimes d'anticyclones d'altitude fermes sur l'Europe occidentale et centrale. C'est la classe des anticyclones à forte pression et températures froides (45,7% de C1). Ils durent aussi dans le temps, souvent quelques jours voire une semaine. Dans ce cas les températures augmentent naturellement avec le temps. Et comme pour 3ab, la période est importante : de décembre à mars, 6 se combine avec C1 mais avant ou après les températures augmentent et on passe à C2 (27,9%). Le stratus est souvent de règle avec de belles mers de nuages.

3ab : Situation d'ouest anticyclonique avec des températures froides en majorité (44,4% de C1), mais pas toujours. Il peut correspondre aussi à un léger réchauffement en hiver après un 6/C1. Présence de stratus bas ou brouillard.

2a : Situation de sud-ouest anticyclonique bien déterminée, avec des températures très douces (41% de C2). Présence de stratocumulus bas et mer de nuages.

• **Groupe 2 : beau temps parfois nuageux (18.2%).**

6ef : idem que 6 mais position des anticyclones sur la Scandinavie. Cette configuration apporte plus de fraîcheur mais aussi plus de variabilité du temps et de ciel obscurci (26.5% de C1, 20.4% de C3, 18.4% de C4, 8.2% de C7). Des vents de nord peuvent souffler, et les stratus sont souvent très hauts. Attention au retour d'est.

4a : Situation de nord-ouest anticyclonique, qui offre généralement des températures de saisons (35% de C1 et 27.1% de C2). Le temps peut être nuageux une fois sur trois.

5a : Situation de nord anticyclonique souvent accompagnée de bises (vent du nord). Les températures dépendent souvent de ce facteur, cependant on observe 29.3% de C3, ce qui montre que la bise n'apporte pas forcément de températures plus fraîches sur la Savoie. Le temps est parfois nuageux.

1a : Cette situation de sud anticyclonique apporte un temps doux voire très doux et souvent variable avec un ciel obscurci (31.20% de C4 et 28.6% de C2). Il n'est pas impossible que cette situation s'apparente à 1b, lorsque les perturbations arrivent par le sud des Alpes. Enfin, le foehn est assez présent et c'est une combinaison néfaste pour l'enneigement.

• **Groupe 3 : temps variable et froid sans précipitations (6.9%).**

5b : Situation de nord cyclonique, avec bise et température très froide (43.6% C7 et 25% de C6). Cette situation persiste souvent et s'enchaîne avec 5a ou 6, entraînant très souvent des inversions de températures sévères en montagne.

7b6b : Anticyclone sur Ecosse-Finlande. Situation particulière qui s'apparente à 6b, mais avec un temps plus médiocre (32% de C6 et 20% de C7). Les retours d'est sont possibles. C'est une situation très variable.

• **Groupe 4 : temps variable et doux parfois pluvieux (10%).**

7ac : Anticyclone ou dorsale bloquant sur le nord-ouest de l'Europe. Avec un vent de sud-ouest en général et un temps perturbé, cette situation est variable par excellence avec des possibilités de pluie, de beau temps et de foehn.

8a : Dépression sur les Iles Britanniques, encore plus doux et pluvieux que 7ac, mais aussi très variable. Le foehn est assez présent car le vent est généralement de sud-ouest. Et comme pour 7ac, les perturbations sont plus ou moins actives quand elles arrivent en Savoie.

• **Groupe 5 : temps froid variable à très perturbé (pluie, neige) (27.3%).**

8a² : Dépression sur la Scandinavie. Les fronts froids lents venant du nord-ouest provoque un temps très médiocre (20.9% de C7, 18.8% de C8, 18.8% de C6) et pluvieux. Pourtant il se peut qu'entre les perturbations le beau temps reviennent rapidement (14.6% de C1 et C4).

8b : Dépression sur Manche. Les fronts actifs venant du sud-ouest provoquent très souvent des précipitations (18.9 de C8 et C9) et des températures plus douces que pour les flux de nord-ouest. Sur 37 cas, on ne relève aucune corrélation avec C1, C2 ou C3 !

9ab : Thalweg Scandinavie-Espagne. Cette situation particulière est plus douce que les autres de ce groupe car les perturbations qu'elles drainent arrivent par le sud-ouest. Les pluies sont alors courantes (23.10% de C8) et le foehn bien présent. Le temps se dégage très rarement. Mais cette situation reste rare.

4b : Situation de nord-ouest cyclonique, froid et variable principalement, mais avec aussi son lot de perturbations très pluvieuses et même neigeuses.

9cd : Thalweg Scandinavie-Europe Centrale. Avec 24.5% de C7 et 18.4% de C4, le temps est souvent variable et froid. Mais les perturbations actives de nord-ouest apportent beaucoup de pluie et aussi de la neige.

3cd : Situation d'ouest cyclonique, avec de fortes précipitations (24.5% de C8, 18% de C9, et quelques C10). 15% des cas reflètent un ciel clair, ce qui laisse une grande place aux temps médiocres et nuageux. C'est la situation la plus pluvieuse sur la Savoie, et aussi la plus courante.

• **Groupe F : présence de foehn.**

8a' : La dépression sur le golfe de Gascogne provoque beaucoup de foehn avec des temps nuageux (jamais C1, C2, C3). On retrouve ensuite les situations en flux de sud-ouest ou sud (7ac, tous les 8, sauf 8a², les 1 et 2b).

• **Groupe R : situations rares.**

Temps froid variable à perturbé (pluie, neige) : 8c et 8d.

Temps doux plutôt perturbé à variable : 1b et 2b

En résumé : (classification Perret-Savoie)

Groupe	%	Types Perret	Description du temps
1	37,6	6 ; 3ab ; 2a	Beau temps généralisé
2	18,2	1a ; 4a ; 6ef ; 5a	Beau temps parfois nuageux
3	6,9	7b/6b ; 5b	Temps variable et froid sans précipitation
4	10	7ac ; 8a	Temps variable et doux parfois pluvieux
5	27,3	3cd ; 9cd ; 8a ² ; 4b ; 9ab ; 8b	Temps froid variable à très perturbé (pluie, neige)

Tab. III.10 : Les types de circulation de la classification Perret réunis en groupe et la description du temps qu'ils provoquent en Savoie.

Le phénomène de foehn se développe dans des types de temps variés, plutôt dans les groupes 3 à 5.

Conclusion

Après avoir rappelé les différents concepts de types de temps et de circulation, nous avons choisi de relier la classification Hess-Brezowsky-Perret à une classification des types de temps sur la Savoie. Cette dernière a été conçue avec des outils statistiques sur un grand nombre de paramètres et d'observations. **Cette manière de concevoir des relations privilégiées avec les ACP et les CHA entre les paramètres constitue une approche systémique tout à fait intéressante, d'autant plus que nous avons pu faire ressortir les particularités du climat savoyard de montagne par le choix de stations de mesures adéquates.** Ce travail était indispensable pour bien comprendre la climatologie de nos domaines d'étude. L'ensemble des codes de cette classification sont consultables dans l'annexe 2.

De plus, les relations statistiques établies entre nos deux échelles du climat montrent bien que différents types de circulations peuvent donner le même type de temps. Au final, la classification peut servir principalement sur deux aspects :

- Avoir des informations accessibles et globales sur le temps qu'il faisait pour un grand nombre de journées (1388 journées, de 1995 à 2005).
- Avoir une base solide quant à la prévision des phénomènes locaux sur les versants de montagne. Nous verrons dans le chapitre V que les relations entre la classification Perret-Savoie et les mesures au sol sont bien établies. Les types de circulations entraînent des types de temps spécifiques sur le versant, et ces types de temps provoquent des comportements spécifiques des paramètres locaux mesurés dans les domaines skiabiles.

En suivant notre démarche de régression d'échelle du global au local, nous pouvons maintenant étudier les données en surface enregistrées par les sondes de l'enneigement artificiel. Les moyennes de températures et du vent sont analysées et spatialisées dans le chapitre suivant (IV), puis dans le chapitre V, nous étudierons la météorologie journalière en relation avec les informations de notre classification.

CHAPITRE IV

COMPORTEMENTS ET SPATIALISATION DES TEMPÉRATURES MOYENNES ET DU VENT

Introduction

Avant d'étudier les données enregistrées par les installations d'enneigement artificiel, nous allons effectuer tout d'abord une expérience de comparaison entre les mesures des sondes York et d'une station météorologique, **afin de tester la validité des mesures** que nous allons exploiter, et les problèmes météorologiques qui en découlent.

Puis nous nous intéresserons à **l'évolution des températures depuis 1989** (date du premier enregistrement York aux Menuires) mesurées dans différents postes savoyards de Météo-France et sur nos sites d'études. Nous suivrons et comparerons l'évolution des températures à différentes altitudes, ce qui va mettre en évidence l'importance des inversions thermiques sur la Savoie mais aussi dans les hautes vallées. Cette analyse montrera tout de même les limites de cette comparaison car les particularités climatiques locales en montagne sont fortes, avec des effets de sites parfois importants.

Avec le nombre important des données obtenues depuis 15 ans, il est possible de **spatialiser les températures moyennes, moyennes minimales et moyennes maximales à échelle fine sur les versants de nos domaines d'étude**. Ces moyennes «hivernales» sont calculées de décembre à mars, les mois où nos enregistrements sont complets. L'analyse de la répartition des températures met en évidence des zones thermiques différenciées par de multiples facteurs que nous essayerons de caractériser, comme l'altitude, l'orientation des versants, la forêt, etc. Des cartes thermiques illustreront cette variabilité spatiale, et l'analyse des gradients thermiques nous apportera des informations importantes sur la réalité des inversions locales ou des ceintures chaudes.

Après les températures, **nous traiterons les données de directions et de vitesses du vent**. Les composantes du vent sont complexes à étudier car en montagne il existe différents types de vent à différentes échelles. Mais les anémomètres disposés sur les versants constituent des outils adéquats pour étudier plus finement les mécanismes des brises thermiques hivernales. L'objectif sera donc, dans un premier temps, de trouver une méthode qui permette d'analyser les mesures en séparant brises thermiques et vents synoptiques, puis de caractériser les rythmes et la nature de ces vents en fonction des positions topographiques et des conditions météorologiques.

IV.1 EVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES MENSUELLES DEPUIS 1989

IV.1.1 Validation des mesures : expériences de comparaison

Comme nous l'avons remarqué dans le chapitre 2, il est important de connaître les caractéristiques des sondes des installations d'enneigement artificiel en situation réelle pour la mesure des températures. Nous savons déjà que l'incertitude de mesure peut être estimée à 0,5°C, d'après York. Mais l'abri étant non ventilé, et connaissant les problèmes de mesures imputables aux cloches anti-radiation (LEROY M. *et al* 1993, 2002), nous avons voulu comparer les mesures de température avec un autre matériel, une station HOBO, pour estimer si les sondes York minimisent ou maximisent les mesures. Ces informations sont importantes quand on doit comprendre quels sont les facteurs de la variation spatiale des températures à échelles fines afin de ne pas confondre les effets d'artefacts liés au matériel avec ceux d'un micro-relief par exemple.

IV.1.1.a. Description de la station HOBO et campagne de mesure

La station Hobo est constituée d'un mât de 2m, d'un capuchon anti-radiation M-RSA, d'un data logger Hobo Outdoor U12 de 12 bit de résolution et de 4 sondes externes sous tube inox TMC6-H. La qualité de la mesure de ce genre de station est très bonne, reconnue et peu dispendieuse (WHITEMAN C.D. *et al*, 1999). De plus, les sondes ont été étalonnées avec un thermocouple, puis posées à côté d'une station Campbell pendant plusieurs semaines. La comparaison des résultats fut très satisfaisante, avec des mesures quasi-identiques. La station Hobo a donc été posée durant deux campagnes de mesures en hiver. Il fallait là aussi trouver un lieu qui puisse nous permettre d'avoir un accès facile, sur un terrain plutôt plat et éloigné des zones fréquentées pour éviter le vandalisme. Le lieu adéquat fut trouvé à Aussois, à côté de la sonde n° 7 (photo IV.1). Après la mise en route, nous nous sommes vite rendus compte des problèmes liés aux conditions extrêmes : en effet, vers -17°C, le data logger s'arrête très souvent et bien sûr ne reprend pas la mesure. De plus, des problèmes de courts-circuits produits par des décharges électrostatiques ont été remarqués par le constructeur. Pendant la saison 2004-2005, nous avons enfin réussi à obtenir presque deux mois d'enregistrement continu, du 25 novembre au 27 janvier, malgré des températures minimales de -18°C qui ont fini par avoir raison du datalogger le 27 janvier. Le mât fut installé à côté de la sonde York (à environ 2m), la différence de hauteur entre les deux est d'environ 75 cm.



Photo IV.1 : Sondes de température Hobo (position basse) et sonde n°7 York (position haute) en bas des pistes d'Aussois (1600m).

Photo C.Chaix, nov. 2004.

IV.1.1.b. Analyse des résultats

Pour comprendre comment réagissent les deux sondes, nous avons d'abord analysé les écarts entre les mesures pour les comparer, puis nous avons établi une régression linéaire avec analyse des résidus pour comprendre les raisons de leurs différences. Dans un premier temps, l'étude est faite sur les moyennes horaires, puis sur les minimales et les maximales.

- Moyennes horaires :

La comparaison a pu s'effectuer sur 1450 mesures horaires (du 25/11/2004 au 27/01/2005), avec des types de temps très variés et des mesures s'étalant entre -18°C et 14°C .

La régression linéaire nous donne l'équation $y = 0,93x + 1,09$ avec un coefficient de corrélation de 0,97 (fig.IV.1.1). Il existe donc une bonne relation entre les sondes, mais l'équation montre qu'une sonde a des mesures plus chaudes que l'autre : c'est la sonde 7 de York. L'analyse des écarts montre que 77% des mesures de la sonde York sont plus chaudes que celles de Hobo (fig.IV.1.2). L'écart moyen entre les mesures est de 1,18, résultat similaire à l'écart-type des résidus. L'analyse des résidus est difficile car nous avons une forte dispersion et un grand nombre d'observations. L'équation nous indique au moins que plus les températures sont froides, plus l'écart entre les deux sondes grandit. Vers -15°C , la sonde York a environ 2°C de plus que la sonde Hobo, et cet écart diminue à 1°C pour une température de 0°C , et remonte pour les maximales. En reliant l'observation des écarts avec les conditions météorologiques, on a constaté que les plus forts étaient liés aux conditions dépressionnaires et aux nuits très froides (75% des cas pour un écart supérieur à 1°C), alors que les écarts les plus faibles sont mesurés lors de nuits douces (75% des cas pour un écart inférieur à 1°C). Les écarts négatifs sont quasi-exclusivement liés à ces nuit là. Finalement, les plus forts écarts positifs entre la sonde York et Hobo ont lieu lors de nuits radiatives à température extérieure très froide (inférieure à -10°C) ou lorsque le temps est perturbé avec une humidité et un vent fort.

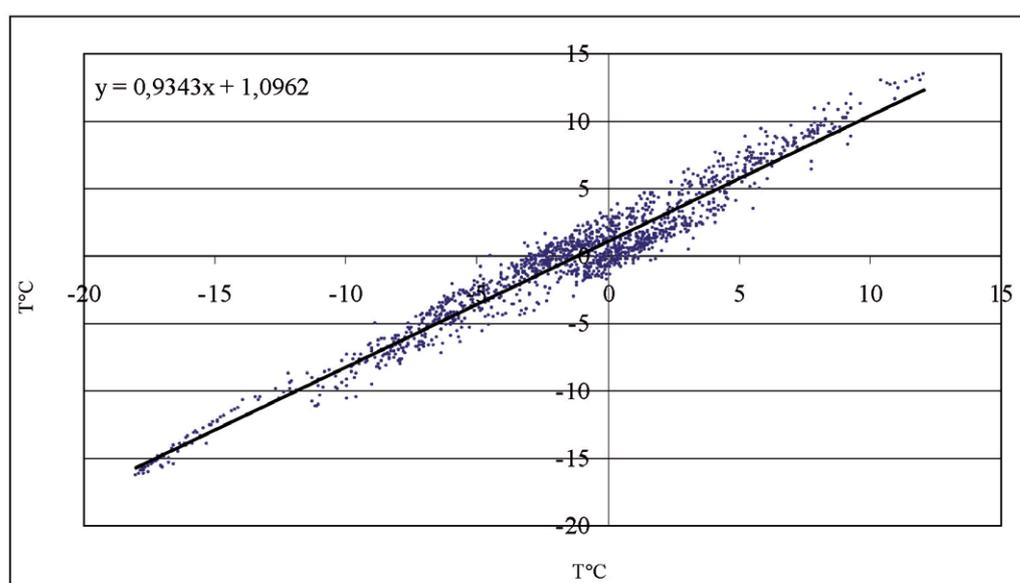


Fig. IV.1.1 : Graphique (nuage de point) des températures moyennes horaires de la sonde York et de la sonde Hobo entre le 25/11/2004 au 27/01/2005.

L'équation de la courbe de tendance linéaire est indiquée sur la figure.

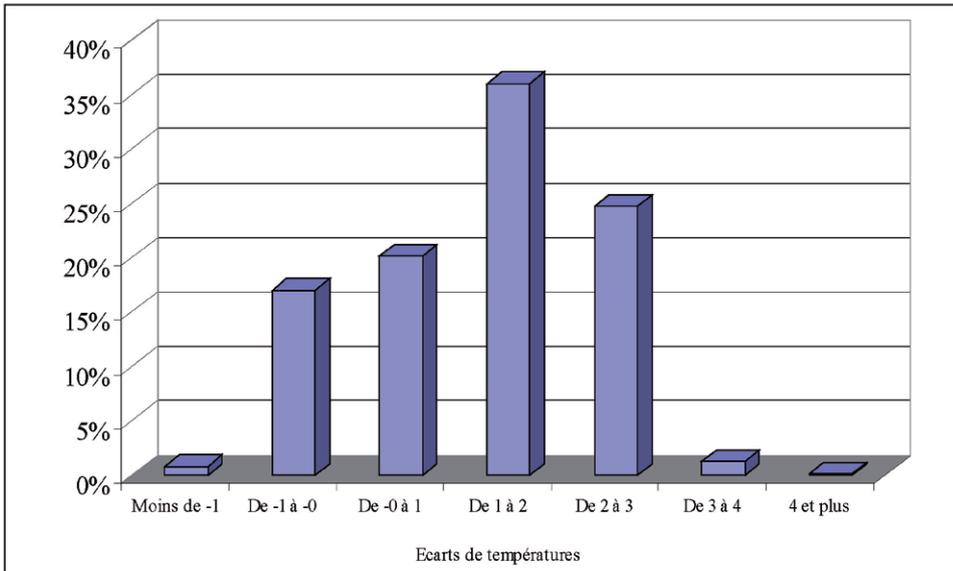


Fig. IV.1.2 : Pourcentage des écarts de températures entre la sonde York et la sonde Hobo.

On constate que les écarts sont surtout positifs et rarement supérieurs à 3°C.

En observant l'évolution des écarts lors de la période de mesure, on s'est aperçu que leurs valeurs augmentaient. Nous avons alors fait le rapport avec l'évolution des températures. Les moyennes mobiles des deux séries sont parfaitement symétriques : plus les températures horaires chutent entre décembre et janvier, plus les écarts grandissent positivement (fig. IV.1.3).

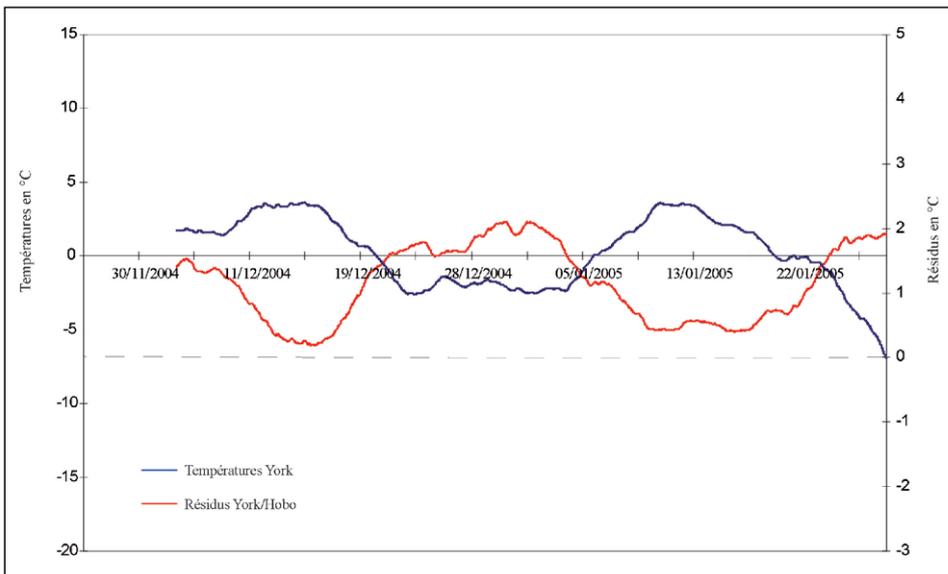


Fig. IV.1.3 : Comparaison des moyennes mobiles de la température mesurée par la sonde York et les écarts de températures sonde York/sonde Hobo.

Les moyennes mobiles ont une période d'une semaine (moyenne sur 180 mesures horaires).

Les écarts de mesures entre les deux sondes augmentent quand les températures diminuent.

- Minimales et maximales journalières.

- L'analyse des résidus nous permet de faire ressortir les journées où les différences entre les valeurs simulées par l'équation de régression et les valeurs mesurées par la sonde York sont extrêmes. Pour les minimales, les résidus ressortent grâce à un intervalle de confiance à 95%, soit + ou - 1,12°C (fig. IV.1.4). Les écarts les plus importants entre les valeurs théoriques et les valeurs observées ont lieu presque exclusivement lors de passages perturbés. Par contre, les moins forts ont lieu lors de nuits claires et douces (températures nocturnes vers 0°C).

- Pour les maximales ($y = 0,97x + 1,62$), l'analyse des résidus montre que les écarts les plus forts entre valeurs théoriques et observées ont lieu lors de belles journées ensoleillées, et les moins forts sont par contre liés à des situations météorologiques très différentes, où il est difficile de tirer des conclusions. Les écarts de températures entre les deux sondes sont plus parlantes à ce niveau : la sonde York enregistre un écart quasi-constant de $1,5^{\circ}\text{C}$ environ pour les maximales. Ainsi, les valeurs maximales se situent beaucoup plus dans l'intervalle de confiance que les minimales. Les types de temps ont moins d'importance dans la variation des écarts entre les sondes.

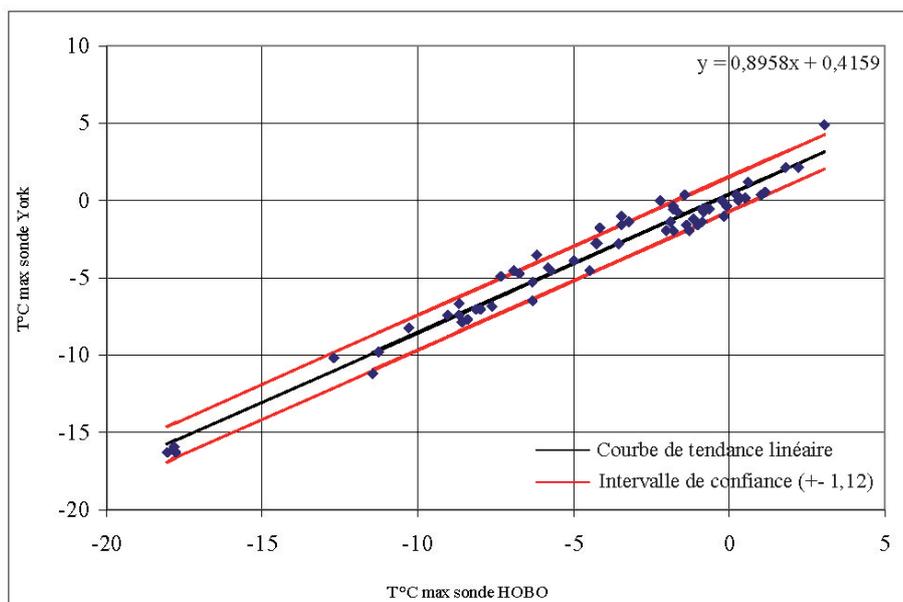


Fig. IV.1.4 : Relation entre les températures minimales journalières de la sonde Hobo et de la sonde York.

Enfin, plusieurs observations ressortent pour les mesures de la sonde York :

- Les températures très froides sont sous-estimées (inférieures à -10°C).
- Les températures maximales sont surestimées ($1,5^{\circ}\text{C}$ en moyenne).
- Les types de temps les moins ventilés sont corrélés avec des écarts importants entre les deux sondes.
- Les nuits douces (vers 0°C) ont les écarts les plus faibles.

En synthétisant ces informations, on se rend compte que les trois facteurs provoquant des écarts importants entre les deux sondes pourraient être liés à la cloche anti-radiation et à sa conception qui ne permet pas une bonne ventilation (la ventilation empêche la stagnation de l'air dans la cloche). A partir de là, il y fait plus chaud en plein soleil, et quand le vent souffle fort (l'air est moins bien renouvelé). De même, les températures très froides étant souvent provoquées par des fronts froids, on retrouve la relation ventilation / températures plus chaudes. Les mesures les plus proches entre les deux sondes ont surtout lieu lors de périodes anticycloniques douces, avec des amplitudes thermiques journalières faibles. Ces hypothèses demanderaient à être vérifiées avec des campagnes de mesures plus conséquentes, mais nous savons au moins que les sondes York ont tendance à maximiser les mesures suivant des écarts variant avec les conditions météorologiques, en moyenne de 1°C à $1,5^{\circ}\text{C}$. Mais avec les incertitudes de mesures inhérentes au capteur ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), il existe en fait assez peu de situations où les mesures sont vraiment surestimées. En tout cas, **l'homogénéité du réseau de mesures des installations d'enneigement artificiel permet au moins des comparaisons entre les sondes du réseau, et l'étude de l'évolution des températures dans le temps.**

IV.1.2 Evolution des températures sur les différents sites

Les sondes du réseau de mesures de l'enneigement artificiel offrent un suivi des données pendant l'hiver depuis la mise en route des installations. Il est évident que ces mesures ont un faible recul dans le temps mais elles permettent au moins de caractériser l'évolution des températures sur les sites. La démarche proposée ici consiste donc à observer l'évolution des températures moyennes minimales sur différents sites depuis 25 ans (date du premier enregistrement aux Menuires). Nous allons aussi comparer les mesures en fonction de l'altitude et des sites pour pouvoir mettre en évidence leurs particularités thermiques, et observer s'il existe des éléments topographiques qui ont des influences sur les températures moyennes. Cette première approche, effectuée sur des longues séries, introduit l'étude de la spatialisation des températures moyennes pour chaque site à échelles fines.

IV.1.2.a. Moyennes mensuelles des températures minimales en Savoie depuis 1988 en janvier et février (données Météo-France)

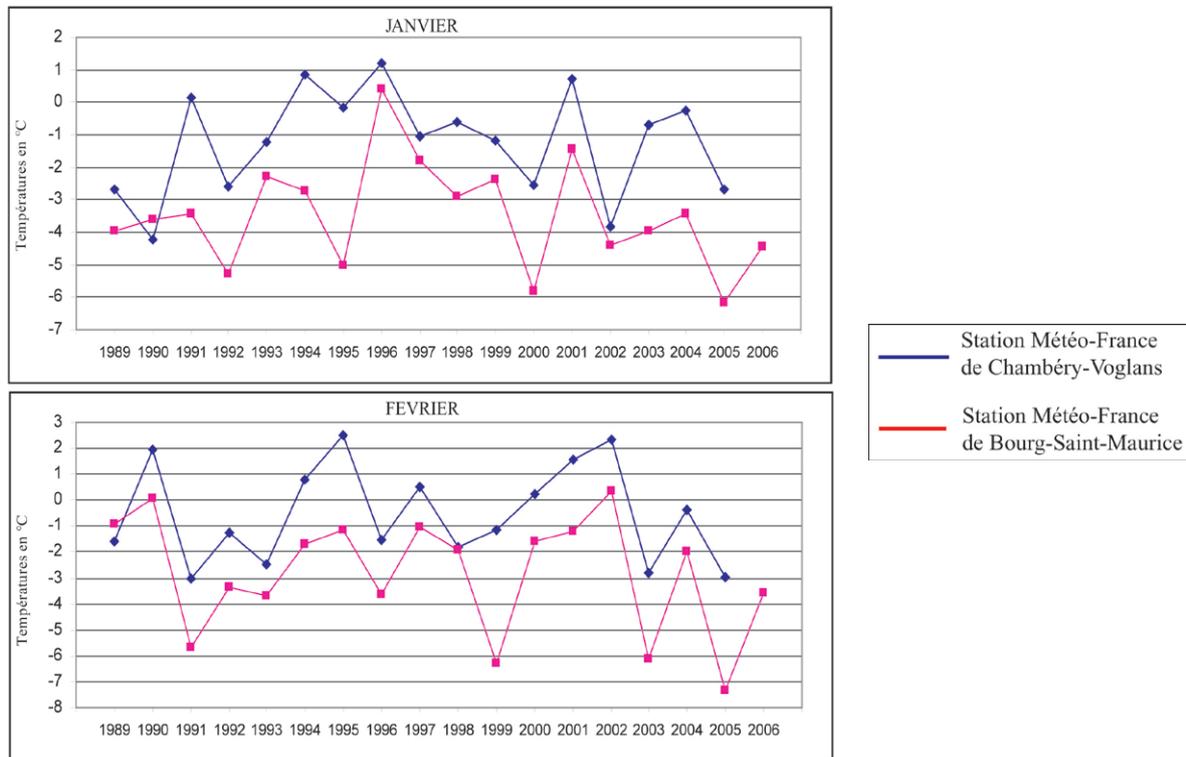


Fig. IV.1.5 : Moyennes mensuelles des températures minimales en °C des mois de janvier et février à Chambéry-Voglans (235m, courbe bleue, de 1989 à 2005) et à Bourg-Saint-Maurice (865m, courbe rouge, de 1989 à 2006).

En janvier, les températures moyennes minimales ont augmenté de 0,45°C à Chambéry et diminué de 1°C à Bourg-Saint-Maurice (pente de la courbe de tendance linéaire multipliée par le nombre d'année).

En février, elles ont stagné à Chambéry mais diminué de 1,9°C à BSM.

Nb : Il n'y a pas eu de changement de matériel et de site sur la période.

Ces courbes montrent que nous avons une forte variabilité des moyennes sur ces 16 dernières années (fig.IV.1.5). On remarque tout de même des températures plus chaudes au début des années 90, avec une augmentation de 1989 à 1996 en janvier et de 1989 à 2002 en

février, et une diminution pour les deux mois depuis, avec une forte baisse de 2000 à 2005. On assiste surtout à une forte diminution à Bourg-Saint-Maurice mais pas vraiment à Chambéry. Le caractère altitudinal et montagnard influence les tendances. Entre les deux stations nous avons des particularités remarquables : des situations d'inversion de moyennes en janvier 1990 ou encore en février 1989 ou 1998 ; des différences importantes (5°C) en janvier 1995 ou février 1999 ; le gradient thermique oscille entre 0 et $-0,80^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, avec un gradient moyen de $-0,35^{\circ}/100\text{m}$. Cette valeur est inférieure au gradient normal mais elle correspond au résultat communément admis en montagne en hiver, avec les inversions de températures (pour des températures minimales). C'est une caractéristique forte du climat hivernal en Savoie. Même s'il est admis que les températures minimales de janvier n'ont pas augmenté depuis 1960, contrairement à celles de juillet (ATUNES C. *et al*, 2003), on voit bien que certaines périodes et certains milieux ont des réactions différentes face à l'évolution climatique.

IV.1.2.b. Moyennes mensuelles des températures minimales aux Menuires depuis 1989 : une tendance à la baisse

L'évolution des températures aux Menuires depuis 1989, année des premiers enregistrements, a été caractérisée à deux niveaux topographiques, sur le milieu de versant exposé à l'ouest (sonde 8, 2420m) et en fond de vallée (sonde 48, 1675m) (fig.IV.1.4, voir chapitre 2 pour localiser les sites de mesures).

L'écart entre les deux sondes reste assez constant, entre 2 et 3°C , avec un gradient thermique mensuel qui oscille entre $-0,14$ et $-0,55^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ en janvier (moyenne : $-0,35^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ sur les 13 ans). La comparaison des courbes nous indique déjà que l'on se situe dans une même unité climatique, contrairement à la fig. IV.1.3 où les écarts entre les mesures sont plus variables. La valeur identique du gradient moyen est liée aux inversions hivernales de températures, bien présentes dans cette haute vallée alpine.

Enfin, contrairement à Chambéry, mais comme à Bourg-Saint-Maurice, **les températures minimales ont particulièrement diminué depuis 1989 en janvier et février (moins en décembre et mars), et surtout depuis 1997-1998**. Afin de pouvoir caractériser cette chute, nous avons (à partir de la fig.IV.1.6) calculé la pente de la courbe de tendance linéaire pour tous les mois. **A 2420m, sur les 17 ans de mesures (1989 - 2006), les moyennes ont chuté de 3°C en janvier et février, et de 1°C environ en décembre et mars**. Sur des données parcellaires, pour les mois de novembre et avril, les températures ont par contre légèrement augmenté.

Puisqu'il est difficile de comparer des températures à différentes altitudes car la pression n'est pas la même, l'utilisation des températures potentielles s'avère indispensable pour comparer les sites entre eux et mettre en évidence des facteurs topographiques qui pourraient expliquer l'évolution des températures avec l'altitude (voir définition dans le chapitre 1). Les résultats montrent **qu'il existe une situation d'inversion de température omniprésente** : à pression égale, en janvier, les plaines et les fonds de vallée (Chambéry, Bourg-Saint-Maurice) ont une influence froide alors que sur les versants (les Menuires) il fait plus chaud, potentiellement (fig.IV.1.7). Cette situation n'est bien sûr applicable que pour les sites étudiés, car d'autres

topographies pourraient avoir des influences différentes (comme en Haute-Maurienne). Mais en général en hiver et en montagne les températures potentielles augmentent avec l'altitude, à cause des situations de fond de vallée que l'on retrouve à basses altitudes (stabilité moyenne de l'atmosphère).

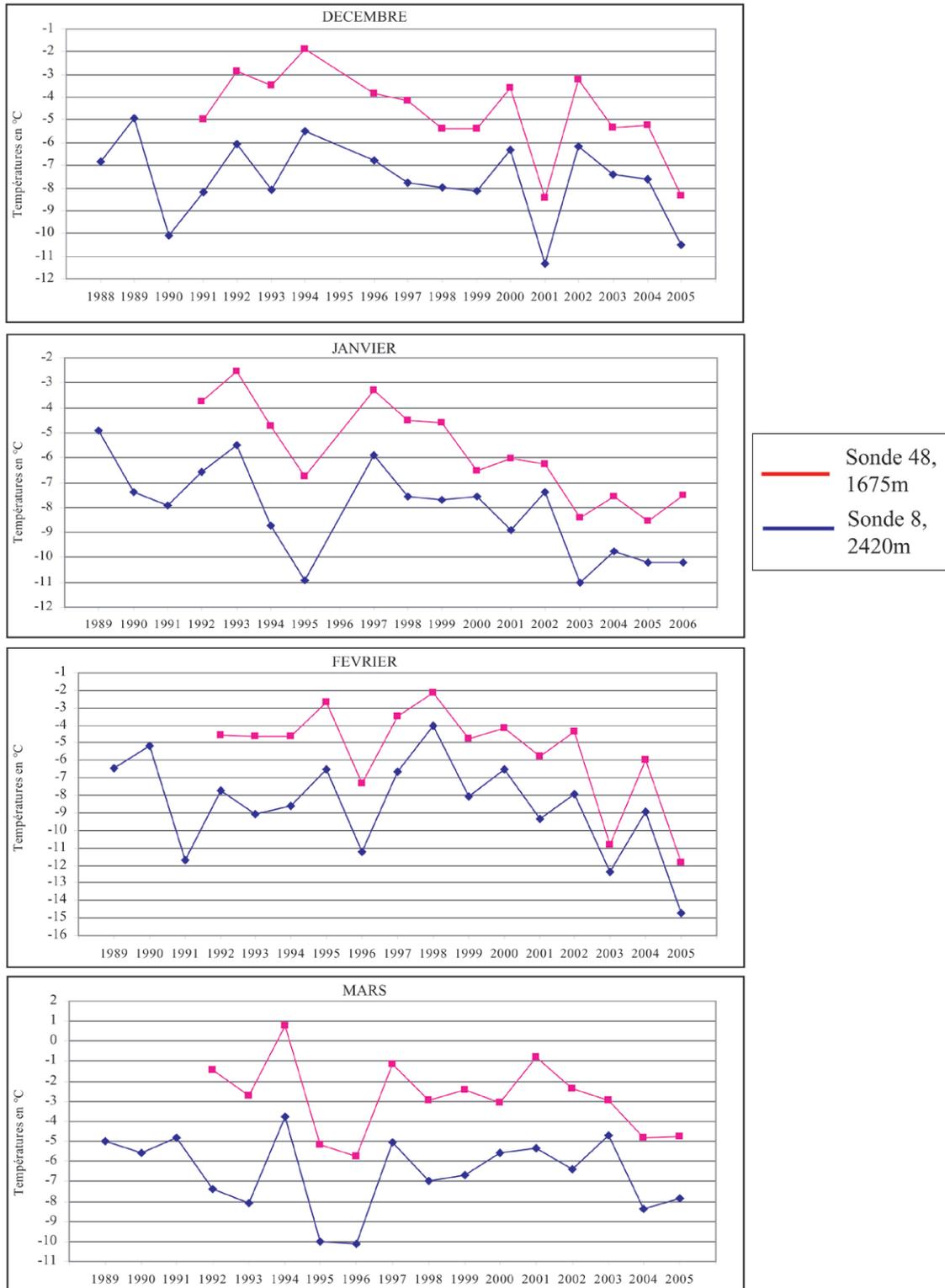


Fig. IV.1.6 : Moyennes mensuelles des températures minimales en °C des mois de décembre, janvier, février et mars aux Menuires à 2420m (sonde 8, versant ouest, courbe bleue, de 1988 à 2006) et à 1675m (sonde 48, fond de vallée, courbe rouge, de 1991 à 2005).

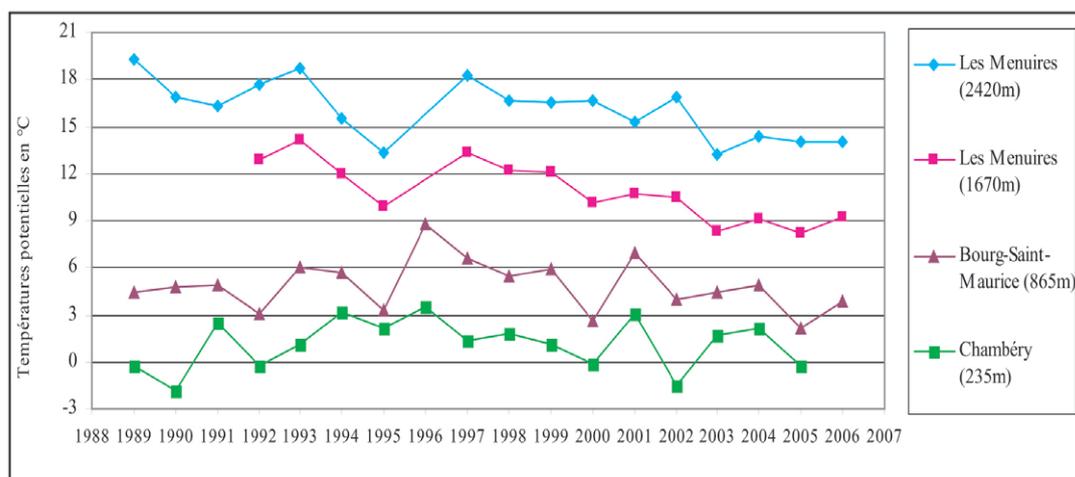


Fig. IV.1.7 : Moyennes mensuelles des températures potentielles minimales journalières des mois de janvier de 1989 à 2006.

Absence de données aux Menuires en 1996.

IV.1.2.c. Moyennes mensuelles des températures minimales journalières sur différents versants alpins.

La comparaison des moyennes des températures minimales journalières pour les mois de décembre, janvier, février et mars a été faite pour les sites de Valloire, Aussois, les Menuires, et à Val Thorens, sur les périodes les plus longues possibles en fonction des données disponibles. Le nombre de mois utilisé pour calculer la moyenne générale varie avec les sites, ce qui peut fausser la lecture, ainsi que les situations topographiques variées des sondes (positions d'abri aux fronts froids ou à la ventilation locale possible). On observe pourtant que :

- Le mois de février est le plus froid, suivi de près par janvier (sauf aux Menuires où le mois de janvier est le plus froid, mais les écarts mesurés avec février sont si faibles que cela est peu significatif).
- Les températures augmentent symétriquement avant et après. Le mois de mars se distingue par sa douceur, surtout sensible à basse altitude sur les versants sud (tab. IV.1).

	Valloire (1420m)	Valloire (1980m)	Les Menuires (1670m)	Les Menuires (2420m)	Aussois (1545m)	Aussois (2215m)	Val Thorens (2900m)
Décembre	-3,74	-4,89	-4,72	-7,62	-2,46	-5,72	-7,69
Janvier	-4,24	-5,07	-5,79	-8,12	-3,76	-6,96	-8,67
Février	-4,54	-6,18	-5,51	-8,53	-3,93	-7,87	-9,84
Mars	-2,29	-3,91	-2,84	-6,57	-0,58	-4,13	-7,46
Saisons	88/89 à 04/05	88/89 à 04/05	88/89 à 05/06	88/89 à 05/06	98/99 à 04/04	98/99 à 04/05	94/95 à 04/05
Lacunes	1994, 2000, 2001	1994, 2000, 2001	1999	1999	-	-	1998

Tab. IV.1 : Tableau des moyennes mensuelles des températures minimales journalières pour les mois d'hiver à Valloire, Aussois, Les Menuires et Val Thorens.

Valloire : Sonde 8, 1420m, bas du versant nord de la Sétaz ; sonde 16, 1980m, haut du versant de la Sétaz.

Les Menuires : Sonde 48, 1670m, fond de vallée ; sonde 8, 2420m, milieu de versant ouest.

Aussois : Sonde 8, 1545m, versant sud ; sonde 16, 2215m, versant sud.

Val Thorens : Sonde 12, 2900m, haut de versant ouest.

IV.1.2.d. Comparaison des moyennes mensuelles des températures minimales de janvier sur les différents sites : le rôle du fond de vallée

Différentes études (ATUNES C. *et al*, 2003 ; LHOTELLIER R. 2005) ont déjà montré une forte influence des inversions et des particularités topographiques locales en hiver sur la répartition des températures moyennes. Grâce aux données de l'enneigement artificiel, nous disposons d'un complément indispensable pour la mesure des températures à des altitudes supérieures à celles des stations Météo-France, et sur des versants plus accidentés. En gardant les sites de mesures précédents, on compare cette fois l'évolution des moyennes mensuelles dans le temps. Le graphique 1 de la fig. IV.1.7 nous montre les températures mesurées sur différents versants. **On distingue déjà qu'aux Menuires à 2420m et à Val Thorens à 2900m, les températures moyennes ne diffèrent guère de plus de 1°C, alors qu'il existe une différence de presque 400m.** Nous verrons que cette particularité est propre aux versants sud et ouest du cirque de Val Thorens, où les températures mesurées sont excessivement douces par rapport à l'altitude. Quant à Valloire, les températures en haut et bas de versant sont assez proches, avec parfois des inversions (1991, 1993, 2002...) liées à l'encaissement et à l'orientation au nord. On ne remarque pas ce phénomène sur les autres sites, Aussois ayant le gradient le plus fort pour une faible différence d'altitude entre le haut et le bas de versant.

L'utilisation des températures potentielles peut alors nous permettre de mettre en évidence l'influence de la topographie.



Fig. IV.1.8 : Moyennes mensuelles des températures minimales des mois de janvier en °C (1) et en températures potentielles (2) de 1989 à 2006 à Valloire, Aussois, les Menuires et Val Thorens.

Dans le graphique 2 de la fig. IV.1.8, les courbes de températures potentielles s'alignent en fonction de l'altitude (ramenée à 0m). Un premier groupe de trois courbes correspondant aux altitudes les plus basses ont aussi les températures potentielles les plus basses (Valloire 1420m, Aussois 1545m, les Menuires 1670m). Puis vient un deuxième groupe (Valloire 1980m, Aussois 2215m, les Menuires 2420m). Enfin le versant ouest de Val Thorens se détache bien avec des températures minimales potentielles en janvier de 20°C environ à 2900m ! **Ainsi, à altitude égale, les fonds de vallées sont toujours plus froids.** La position en milieu de grande vallée alpine d'Aussois, sur un replat, réchauffe les températures. Le haut versant de Valloire est quand à lui légèrement plus froid qu'aux Menuires à 2420m et que le haut de versant d'Aussois. A Val Thorens, nous avons un réchauffement important dont nous essayerons de déterminer la nature au cours de l'étude.

- Les températures moyennes minimales au mois de janvier dépendent fortement de la topographie du site, car à altitude égale il existe de forts écarts entre les mesures. Sur les 15 ans où la mesure a été possible, l'évolution des températures entre les sites a fluctué en fonction des effets d'inversion locale qui agissent à l'échelle du versant ou de la vallée. De plus, les effets d'inversions sont plus importants lors d'hivers froids et secs. Il est donc impossible de reconstituer les températures avec l'altitude à partir des seuls gradients altitudinaux de 0,5°C/100m, à partir du moment où l'on change de vallée ou de versant. L'année 2002 est un exemple parfait : un gradient nul à Valloire (0°C/100m entre 1420m et 1980m) et légèrement négatif aux Menuires (-0,14°C/100m entre 1670m et 2420m), une inversion de vallée entre les Menuires et Val Thorens (même si celle-ci est constante), et un gradient plutôt normal à Aussois (-0,40°C/100m). En 2001, la décroissance avec l'altitude est mieux respectée dans un gradient moyen de 0,42°C/100m (il a fait plus chaud en vallée), ou encore en 1999 avec 0,30°C/100m (gradient constant). **La variabilité de la répartition des températures diffère donc en fonction de la variabilité des types de temps qui provoquent au long de l'hiver des situations d'inversions de températures (constantes ou non), et les sites y sont plus ou moins sensibles en fonction de leur topographie.**

- Mais quelles sont les influences extérieures qui se substituent à l'altitude ? Les températures potentielles nous indiquent que les fonds de vallée provoquent un refroidissement important par rapport aux versants qui les surplombent. On a aussi remarqué avec les données de Chambéry et de Bourg-Saint-Maurice que ce phénomène agit aussi à grande échelle (fig. IV.1.5). **Le fond de vallée reste donc l'élément topographique majeur influant la variabilité des températures moyennes minimales de janvier en montagne.** Mais les températures mesurées à Val Thorens sont excessives par rapport au milieu de versant des Menuires, alors qu'on ne peut pas parler ici de fond de vallée. Il existe peut-être un effet de site à Val Thorens lié à la topographie de la vallée et du cirque, à moins que cela soit dû à un effet plus localisé sur le versant ouest ou dans l'environnement immédiat des sondes.

A partir de ce constat, il devient primordial d'analyser la répartition spatiale des températures sur les versants pour mettre en lumière les influences locales, aux échelles micro et topo. **En effet, la variabilité aux échelles fines (micro et topo) entraîne des décalages spatio-temporels trop importants pour permettre une comparaison à grande échelle des sites de mesures.**

L'utilisation de la moyenne hivernale (de décembre à janvier) pour chaque sonde et la spatialisation des moyennes obtenues sont des outils adaptés pour comprendre les particularités locales et aussi offrir un moyen simple de visualiser les champs thermiques moyens sur les versants.

IV.2 RÉPARTITION DES TEMPÉRATURES MOYENNES SUR CHAQUE SITE : UNE PREMIÈRE APPROCHE LOCALE

Les sites d'Aussois, de Valloire, des Menuires et de Val Thorens seront successivement étudiés afin de spatialiser les températures moyennes, minimales et maximales hivernales, et de comprendre quelles sont les raisons principales de leur variabilité spatiale.

IV.2.1 Aussois : un versant bien exposé

Il n'y a pas d'ajouts massifs de sondes depuis 1998 et il n'y a pas de lacunes non plus pour les mois de décembre à mars.

IV.2.1.a. Les températures moyennes.

L'étude a été faite de décembre 1998 à mars 2005 avec les 17 sondes de l'installation d'enneigement d'Aussois (voir fig.IV.2.3). Nous avons d'abord calculé les températures moyennes journalières pour chaque sonde, puis nous avons moyenné le tout pour chaque mois, et enfin calculé la moyenne générale 1998-2005 pour chaque sonde (nous obtenons donc la moyenne générale des moyennes mensuelles des températures moyennes journalières pour chaque sonde).

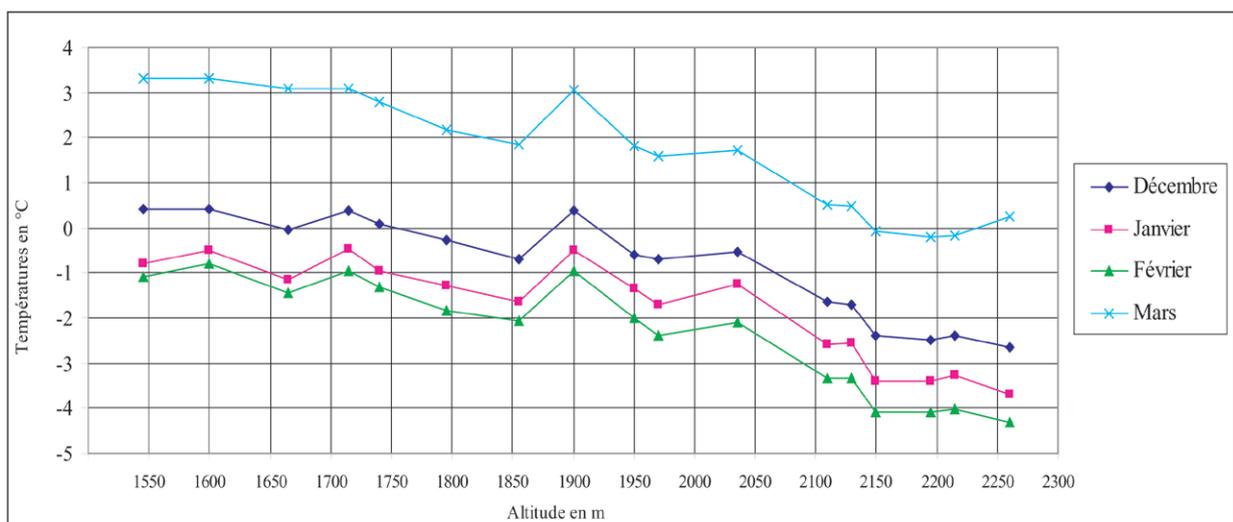


Fig. IV.2.1 : Evolution des moyennes mensuelles des températures moyennes journalières à Aussois de 1998 à 2005 pour 17 altitudes différentes (correspondant aux 17 sondes).

Le pic de température à 1900m visible sur la figure correspond à la sonde 1 située dans la forêt, mais non ombragée par les arbres.

Le graphique de la figure IV.2.1 montre bien la décroissance de températures moyennes avec l'altitude, sans vraiment d'effets d'inversion importants sur ce versant (gradients de $-0,49^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ en janvier et de $-0,52^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ en mars). Déjà, le plus remarquable reste **la différence importante des températures moyennes du mois de mars avec les autres** (environ $2,5^{\circ}\text{C}$ par rapport à décembre et $3,5^{\circ}\text{C}$ à février pour chaque sonde). Ceci confirme la douceur du climat du versant sud d'Aussois dès mars, avec des températures moyennes presque toujours positives. Le mois de décembre, contrairement au mois de janvier et février, peut donner des moyennes supérieures à zéro en bas de versant. Quant au mois le plus froid, c'est février, qui l'est encore plus avec les minimales. Pour les maximales, les mois de décembre, janvier et février se valent, ils ont des moyennes similaires.

IV.2.1.b. Particularités locales des moyennes de températures

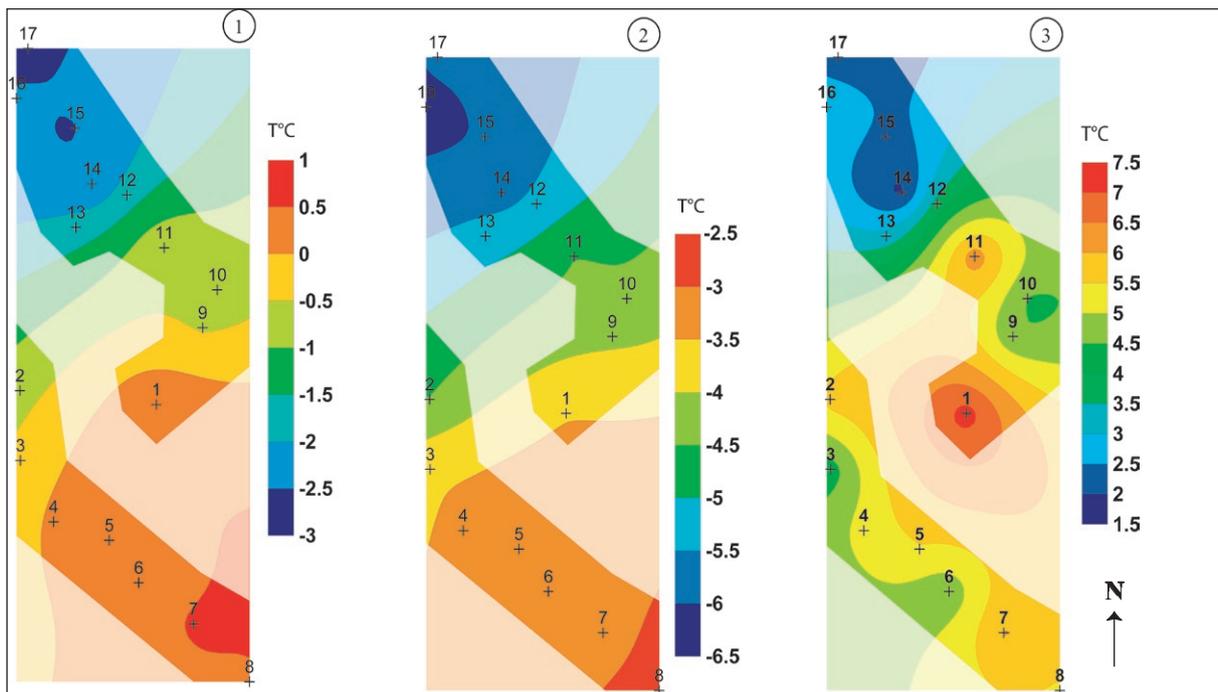


Fig. IV.2.2 : Répartition spatiale des moyennes hivernales (de décembre à mars) des températures moyennes (1), minimales (2) et maximales (3) journalières à Aussois (1998/2005).

Interpolation par krigage ; les zones blanches correspondent aux régions non informées, où l'interpolation n'a aucune représentativité.

Les numéros correspondent aux numéros des sondes.

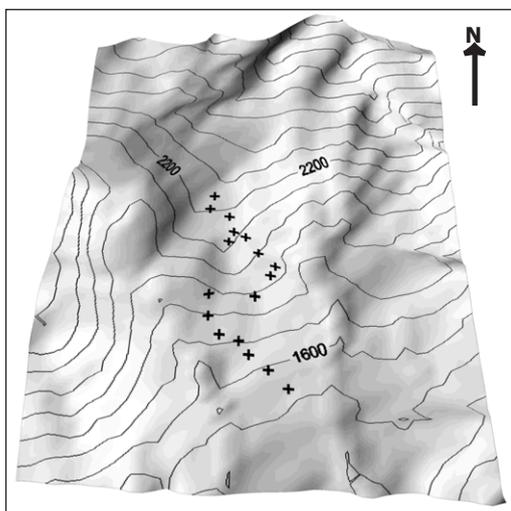


Fig. IV.2.3 : Position des sondes sur le MNT d'Aussois (équidistance des courbes de niveau : 100m).

Pour les numéros des sondes, voir la fig.IV.2.2 ou au se reporter au chapitre 2 (fig.II.3.2).

Pour faciliter l'analyse de la variabilité des températures, nous nous sommes basés sur une représentation spatialisée obtenue par krigeage. Une remarque : cette technique n'a été utilisée que pour son intérêt représentatif. L'objectif est de pouvoir, compte tenu du grand nombre de sondes, visualiser sur une seule carte les moyennes de chaque sonde. En aucun cas, elle ne sert à modéliser ou simuler les températures entre les points de mesure trop éloignés (fig. IV.2.2). Les zones blanches rappellent ce point important. Les positions des sondes par rapport au relief sont indiquées sur la figure IV.2.3.

Sur la figure IV.2.2, deux sondes se détachent : à 1900m (sonde 1 en forêt, mais exposée au soleil) et à 2035m (sonde 11, milieu du versant sud-est), avec des moyennes chaudes, par rapport au gradient moyen hivernal de $-0,48^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (R^2 de l'équation linéaire : 0,85). Les températures moyennes sont supérieures à 0°C sur le bas de versant bien exposé dans et au-dessous de la forêt, puis la décroissance s'effectue lentement jusqu'au replat de l'Eterlou au-dessus de 2100m où les moyennes atteignent $-2,5^{\circ}\text{C}$ environ.

Les températures minimales sont réparties spatialement de manière presque identique aux températures moyennes, mais les écarts sont plus forts entre le bas et le haut de versant (haut de versant plus froid, fig. IV.2.2). Enfin les moyennes maximales révèlent les particularités locales liées à l'exposition, avec un milieu de versant plus doux. Le mois de mars et le réchauffement arrivant, le comportement des minimales rejoint celui des maximales (le bas de versant se réchauffe en particulier). Les maximales ont donc un poids important dans la détermination des valeurs moyennes sur ce site. A la vue de ces résultats (comme sur la figure IV.2.2), on constate que le haut de versant (au-dessus de 2100m) est la zone la moins sensible à la fonte de la neige.

La spatialisation des températures nous a permis d'identifier **trois zones thermiques sur le versant sud d'Aussois** : un haut de versant supérieur à 2100m assez frais, avec des températures moyennes maximales proche de 2°C ; une bande plein sud thermiquement très chaude comprise entre 2100m et 1500m, avec la présence de la forêt, où l'orientation joue un rôle majeur pour les maximales ; et enfin deux bandes sud-ouest et sud-est un peu plus froides. **Topographiquement, la limite située vers 2100m marque bien la transition entre le haut de versant et le bas de versant, qui sont soumis à des influences thermiques différentes.**

IV.2.2 Valloire : un site varié topographiquement

Le développement de l'enneigement artificiel à Valloire a été assez progressif depuis le début des années 90, il est donc assez difficile d'obtenir des moyennes mensuelles sur tout le site comme pour Aussois. N'ayant que 27 sondes en 2001, aucune mesure en 2002/2003, nous allons choisir les saisons 2003/2004 et 2004/2005 pour effectuer nos moyennes. Mais attention, les moyennes de ces deux années sont environ 1°C plus froides que celles enregistrées sur une période de 1995-2005 (résultats constatés aux Menuires et Val Thorens).

IV.2.2.a. Les températures moyennes

Un problème survient à cause de la topographie du site : nous n'avons pas comme à Aussois un seul versant, mais des versants orientés au nord, nord-est, ouest, et le fond de vallée de la Valloirette. Beaucoup de sondes sont disposées le long des courbes de niveau plutôt que verticalement (fig. IV.2.4). Il n'est donc pas possible de créer un graphique de l'évolution des températures moyennes en fonction de l'altitude comme pour Aussois. La représentation des moyennes sur le site la plus expressive est donc spatiale (fig. IV.2.5).

Le gradient thermique hivernal mesuré à Valloire avec l'ensemble des sondes est de $-0,27^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (R^2 de 0,64). L'inversion moyenne de températures est donc importante. Sur le versant nord de la Sétaz, le gradient atteint $-0,18^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. La sonde la plus haute sur ce versant (sonde 15) étant située au milieu du versant de la Sétaz (qui atteint 2400m), nous retrouvons cette «**ceinture chaude**» typique des versants de montagne, située généralement jusqu'à 500m au-dessus du fond de vallée (GUYOT G., 1999). Les moyennes sur le bas de versant sont plus basses qu'à Aussois pour une même altitude, mais pas sur le haut, ce qui indique un effet de fond de vallée, ou plutôt, à la vue de la topographie, d'un effet de cuvette, d'autant plus qu'elle est dominée par un versant nord. Sur le versant ouest du Crey du Quart, le gradient moyen est de $-0,33^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, il est plus élevé que sur le versant nord parce que les sondes en bas de versant ne sont pas suffisamment positionnées dans le fond de vallée de la Combe de l'Aiguille Noire. On retrouve le même problème dans la vallée de la Valloirette, d'autant plus qu'à cet endroit la vallée est très évasée. Enfin, comme pour Aussois, les conditions adéquates pour l'enneigement artificiel ne sont réunies qu'au-dessus de 2000m, surtout pour les mois de décembre et mars.

IV.2.2.b. Particularités locales des moyennes de températures

Sur la figure IV.2.5, on constate que les températures les plus chaudes se situent sur le bas de versant ouest de la Sétaz, et que la décroissance des températures avec l'altitude est assez bien respectée. Les variations locales proviennent sûrement de masques liés à la forêt, très présente sur ce versant nord. La sonde 4, posée juste en aval d'une haie assez haute, ou la sonde 24 située en lisière aval de forêt, enregistrent aussi des températures plus froides.

En haut du versant du Crey du Quart, les températures diminuent fortement vers le sommet (sonde 46). On a alors passé le cap de la ceinture chaude.

Les températures moyennes minimales ne sont pas très différentes des températures moyennes, sauf pour les sondes 8, 12, 34, 35, 43 situées plutôt en bas de versant. Il est étonnant d'observer la grande différence qui existe entre le bas de versant de la Valloirette (sonde 30, 29...) et le bas du versant du Crey du Quart. Des conditions locales de ventilation (protection contre les vents catabatiques par la forêt ou le micro-relief en amont des sondes dans la Valloirette) doivent expliquer ces contrastes, car la sonde 31, la plus basse située presque en fond de vallée, mesure les températures minimales assez froides. Enfin les températures maximales reflètent bien l'exposition et la présence de forêt. Il existe

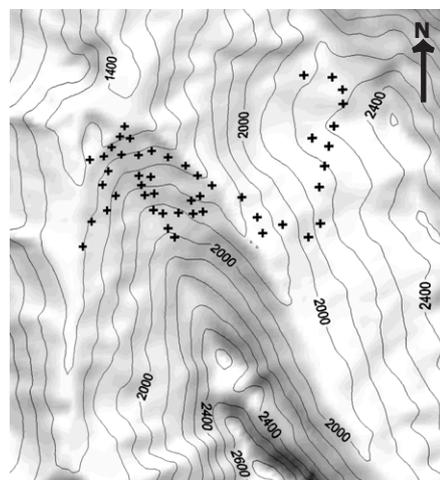


Fig. IV.2.4 : Position des sondes sur le MNT de Valloire (équidistance des courbes de niveau : 100m).

de fortes différences thermiques entre la vallée de la Valloirette et le versant nord de la Sétaz, de 7°C environ pour 400m (le versant nord est le plus froid).

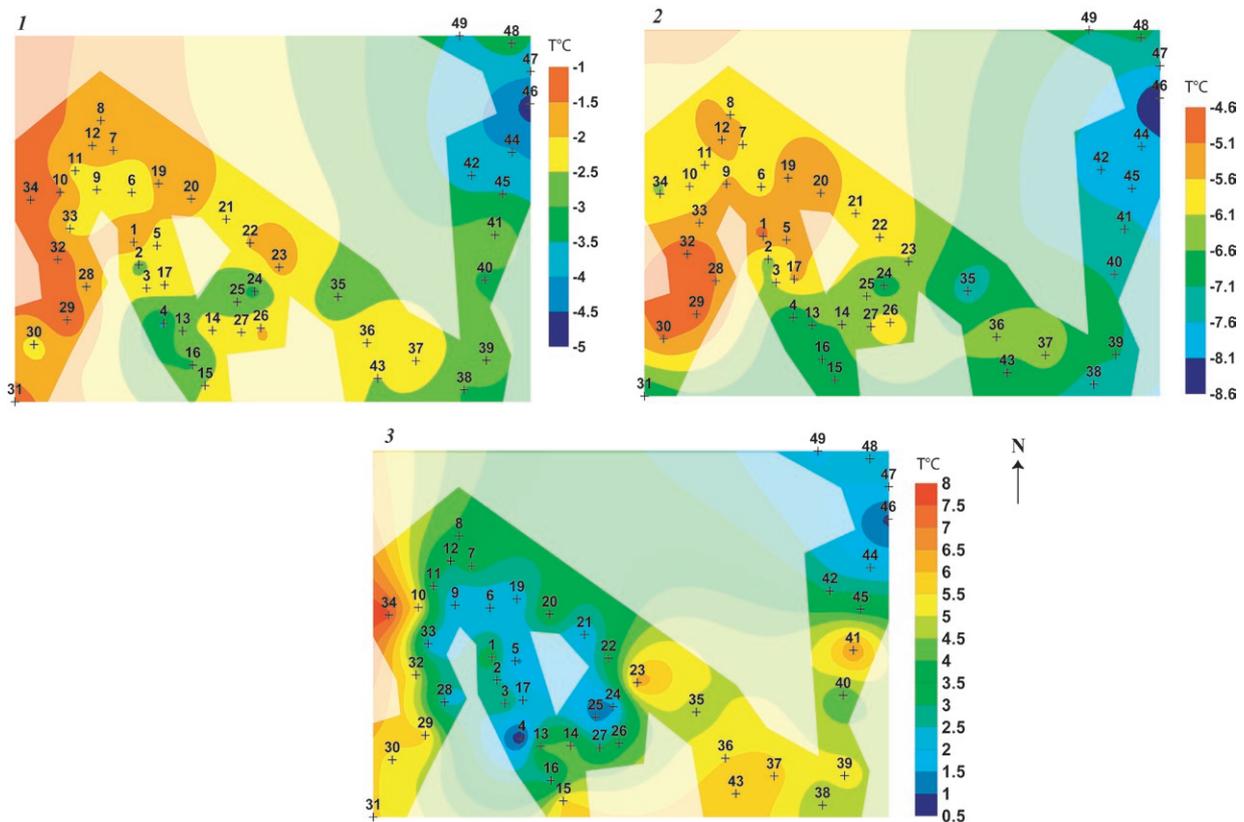


Fig. IV.2.5 : Répartition spatiale des moyennes hivernales (de décembre à mars) des températures moyennes (1), minimales (2) et maximales (3) journalières à Valloire (2003/2005).

Enfinement, la variabilité des températures et les zones thermiques qui s'observent sur le site artificiellement enneigé de Valloire sont surtout provoquées par l'altitude et le fond de vallée pour les minimales, par l'exposition et la présence de forêt pour les maximales (la forêt, ici en versant nord, a un effet contraire sur les températures maximales que sur un versant sud). L'inversion thermique se ressent surtout au bas du versant nord de la Sétaz, près du départ des télécabines (sonde 8), mais pas du côté de la Valloire, plus chaud, surtout en températures minimales. Enfin le versant ouest de Crey du Quart montre un effet de ceinture chaude, débutant 100m au-dessus du fond de vallée de l'Aiguille Noire (donc vers 1900m) et finissant vers 2200m. Ce phénomène, difficilement discernable à Valloire à cause de la disposition des sondes, est au contraire parfaitement visible au Menuires.

IV.2.3 Les Menuires : un versant de haute vallée alpine

Le domaine artificiellement enneigé des Menuires a lui aussi évolué de manière importante au cours des années, à partir d'une base constituée de 51 sondes en 1994, qui a atteint en 2003 le haut de versant du Mont de la Chambre à 2815m (sonde 75). Nous avons donc séparé l'étude des moyennes en deux parties, tout d'abord de 1994 à 2004 avec les 51 sondes (de 1668 à 2426m), puis de 2002 à 2005 avec 75 sondes (de 1668 à 2813m), pour avoir au moins trois

années de relevés. Les sondes 66, 67, 68 et 57 ont été retirées pour des problèmes de lacunes. Il existe aussi une lacune de 12 jours début février 1999.

La composition du réseau de mesure offre plusieurs zones différentes topographiquement, des zones parsemées de constructions (immeubles), et très peu de végétation (arbustes). Le fond de vallée est surtout encaissé vers la sonde 48. Quand au relief du versant ouest, il est assez régulier, on peut observer la morphologie de cette «tranche» de vallée sur la fig.IV.2.6, ainsi que la position des sondes. Plusieurs entités se détachent : le fond de vallée, le début de versant avec les immeubles et installations, puis le milieu de versant avec les pistes basses qui couvrent la totalité de cette tranche altitudinale (jusqu'à 2100m). Ensuite viennent les «langues», pistes qui descendent depuis les crêtes par des vallons, entre des reliefs plus abrupts et rocheux (voir chapitre 2). Le versant est quant à lui plus pentu au début, moins lisse. Les sondes ne montent que jusqu'à 2000m (2100m avec la sonde 70). Enfin, le bas de versant est bien plus fourni en sondes que les pistes du dessus.

IV.2.3.a : Les températures moyennes

Aux Menuires, c'est le mois de janvier qui est le plus froid sur les 10 saisons étudiées (1994/2004), contrairement à Aussois. Le mois de février est même plus chaud que décembre, mais c'est mars qui culmine à plus de 2°C que les autres, sauf pour les minimales avec 1 à 1,5°C de plus. Cette particularité du mois de février est difficilement explicable. On peut supposer que le relief alentour provoque un réel cache à l'ensoleillement en décembre et janvier, alors qu'en février il devient vraiment meilleur.

Les moyennes calculées pour la période de 1994 à 2004 ont 1° de plus que celles de la période 2002/2005. Cette différence n'apparaît pas vraiment dans la répartition des températures, elle traduit seulement la fraîcheur des derniers hivers, surtout le mois de février 2003. Enfin, pour les gradients thermiques, il faut séparer le site en trois : le versant ouest/partie nord (sonde 48 à 8, Croisette, Becca...), avec -0,5°C/100m ; le versant ouest/partie sud (sonde 34 à 75, Reberty, Mont de la Chambre) avec -0,6°C/100m, et le versant est (350m de dénivelé) avec -0,8°C/100m.

IV.2.3.b. Particularités locales des moyennes de températures

Les moyennes (échelle de mesure de 1°C sur la figure IV.2.7) mettent en évidence des zones thermiques assez bien définies : un fond de vallée légèrement plus froid (surtout la sonde 34 et 48) que le bas de versant, qui reste la zone la plus chaude (on remarquera la présence de constructions juste en amont). Ensuite une large zone de milieu de versant comporte des températures moyennes comprises entre 0 et -2°C, avec des variations locales fortes, liées soit à la

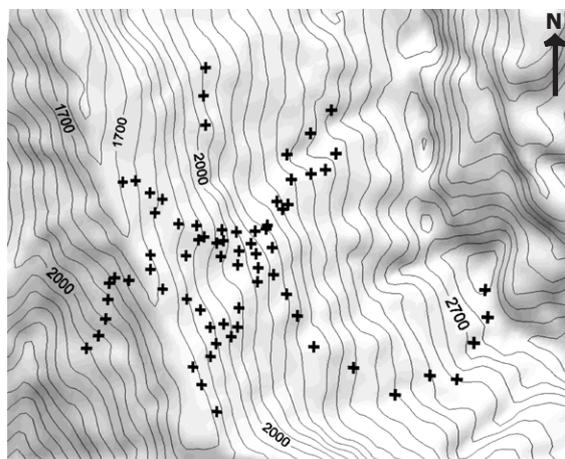


Fig. IV.2.6 : Position des sondes sur le MNT des Menuires (équidistance des courbes de niveau : 50m).

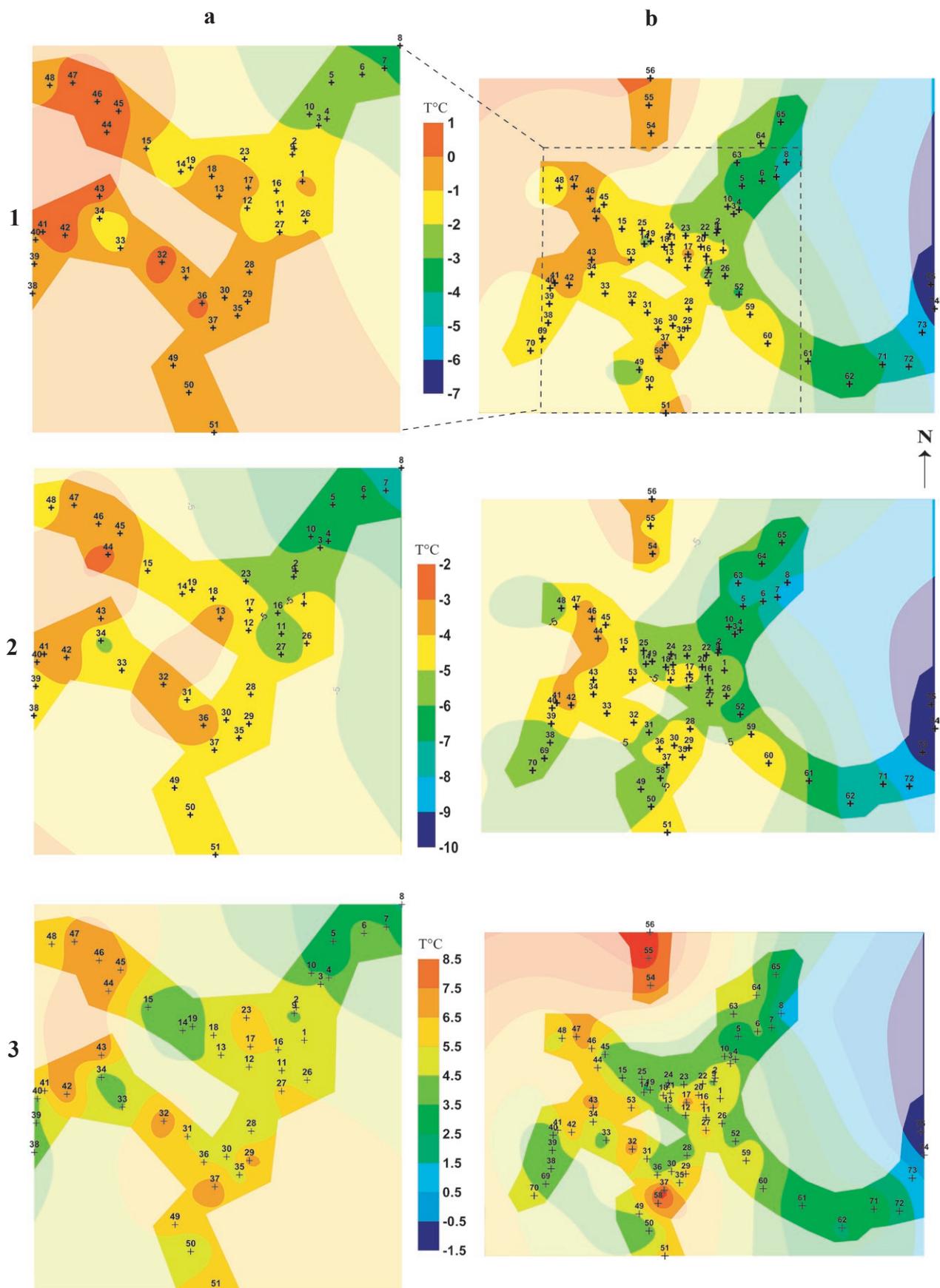


Fig. IV.2.7 : Répartition spatiale des moyennes hivernales (de décembre à mars) des températures moyennes (1), minimales (2) et maximales (3) journalières aux Menuires avec 51 sondes de 1994 à 2004 (a) et avec 75 sondes de 2003 à 2005 (b).

Il existe une différence moyenne d'environ 1°C entre les périodes étudiées (a et b). Les hivers 2003-2005 ont été plus frais, mais cela ne change pas la répartition spatiale.

topographie urbaine soit à un relief protégé. Le front de neige est par exemple plus froid (sondes 15, 14...) et la piste du Gros Tougne vraiment plus chaude par rapport à l'altitude (sondes 54 à 56). Puis les températures deviennent négatives au-dessus de 2100m, lorsque l'on commence à s'enfoncer dans un relief plus accidenté. Enfin, les crêtes sont très froides avec -7°C , et la décroissance des températures semble plus linéaire dans cette zone (cette particularité thermique se retrouve sur tous les autres sites). La variabilité des températures moyennes est donc très importante du bas de versant (vers 1800m) au milieu de versant (vers 2200m). Mais il y a aussi plus de sondes qui sont posées dans une topographie variée, alors qu'en altitude les sondes sont disposées le long des pistes qui elles-mêmes empruntent une topographie particulière plus régulière.

Ce schéma de répartition n'est que légèrement bouleversé en températures minimales. Pourtant, quatre zones se détachent parfaitement en fonction de l'altitude : le fond de vallée (plus froid), le bas de versant (zone la plus chaude), le milieu de versant (zone la plus contrastée) et le haut de versant. Au milieu de versant, des contrastes à même altitude sont frappants : par exemple, à altitude égale, la moyenne minimale de la sonde 60 est de 2°C à 3°C supérieure à celle de la sonde 10 (c'est toutefois une valeur maximale sur le site).

Enfin, les températures maximales mettent difficilement en évidence le rôle de l'orientation, car c'est un versant ouest, mais on remarque tout de même la différence entre l'exposition sud-ouest de Reberthy et de la Croisette (sondes 17, 11...), qui en plus sont en replat, et le côté nord-ouest de la Croisette avec une piste très pentue (sondes 23, 22, 15...). Les valeurs maximales sont atteintes pour les sondes 37 et 58 (départ du télécabine du Mont de la Chambre) et 54 à 56 (Gros Tougne), où il suffit de s'y rendre en hiver pour constater les îlots de chaleur existants, avec un effet notable sur la qualité de la neige (elle devient «soupe» très vite). Sur place, on constate aussi un manque chronique de ventilation par effet de protection du relief ou des immeubles face aux brises thermiques.

Ces résultats permettent d'entrevoir la logique de la répartition des températures sur ce site. Même si l'altitude est encore le facteur qui semble le plus explicatif de leur répartition, on a constaté **le rôle du bas de versant qui constitue une zone plus chaude par rapport au reste du versant. L'effet de ceinture chaude y est très visible parce que le fond de vallée, sur 50 à 100m, est bien plus froid, et que les températures vers 2000m sont encore excessives par rapport au gradient moyen**. On constate aussi que les maximales sur un versant ouest sont sensibles à la moindre micro-variation à la fois dans l'orientation mais aussi dans la ventilation. Les brises ont une faible vitesse en pleine journée et les zones protégées s'échauffent bien plus au soleil. L'effet de ceinture chaude et d'inversion apparaît graphiquement sur les figures IV.2.12 et IV.2.13).

IV.2.4 Val Thorens : un amphithéâtre naturel thermiquement contrasté

Les premières sondes ont été posées à Val Thorens en 1992/1993 (3 sondes) mais il n'y en a eu un nombre intéressant qu'à partir de 1999/2000 avec 49 sondes, puis en 2003 avec 61

sondes. Val Thorens est aussi la station de ski qui ouvre le plus longtemps dans la saison, nous avons des mesures de novembre à avril. Un problème survient pourtant, car en novembre il existe de nombreuses lacunes liées au démarrage du système et nous ne pouvons pas intégrer ces mesures dans l'étude des moyennes (mais le mois d'avril est complet). Spatialement, le réseau s'étend depuis le centre de Val Thorens (centre de l'amphithéâtre) vers les différents versants sud, ouest et nord. D'ailleurs, le réseau qui monte vers le versant ouest sous le glacier de Thorens date de 1995/1996. Pour cette étude, nous avons enlevé la sonde 48 et 58 avec trop de lacunes.

La forme en cirque du site de Val Thorens et les altitudes très hautes des sondes (presque à 3000m près des glaciers) donnent au réseau un attrait majeur (fig.IV.2.8). L'ensoleillement est assez fort sur le versant sud (et réputé) mais nous verrons par l'étude des températures moyennes que la forme topographique en forme de cirque influence grandement la répartition des températures qui ne répond plus dans certaines parties à la norme de la décroissance avec l'altitude. Par ailleurs, il s'est avéré (voir partie IV.1.2) les moyennes de températures à 2900m sont extrêmement hautes pour cette altitude par rapport aux Menuires par exemple. Un effet de site remarquable se présente ainsi, que nous allons voir dans le détail.

IV.2.4.a Les températures moyennes

Les moyennes mensuelles des températures moyennes journalières ont été calculées pour 49 sondes de 1999 à 2005 (6 saisons), et pour 61 sondes de 2003 à 2005 (3 saisons). Février apparaît comme le mois le plus froid durant la période 1999/2005, suivi de près par janvier, puis décembre (moyennes comprises dans un intervalle de 1°C). Mars a plus de 4°C par rapport à février, et avril 1°C de plus que mars. Pour respecter l'uniformité des calculs entre les sites, nous n'allons pas intégrer avril dans les moyennes, gardant les quatre mois d'hiver.

Le calcul des gradients doit se faire obligatoirement en prenant différents secteurs car les différences d'exposition et les positions des sondes à la même altitude étant nombreuses, on obtient des valeurs proches de $-0,20^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (avec 61 sondes). Toutefois, et ceci représente une forte originalité, les températures le long du transect Val Thorens - glacier de Thorens (2200m-2900m, versant ouest) décroissent avec l'altitude de $-0,23^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ pour les moyennes ou les minimales. Sur le versant sud, c'est encore plus frappant avec $0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. C'est thermiquement très homogène, les températures ne décroissent pas avec l'altitude. Enfin le versant nord (côté Combe de Thorens), le gradient est de $-0,59^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, plus proche du gradient moyen. Ces différentes valeurs de gradients en fonction de l'orientation des versants sont très étonnantes, mais elles reflètent bien l'effet de site qui agit sur les températures minimales. Le versant ouest et sud ont des gradients vraiment différents de ceux des Menuires et d'Aussois.

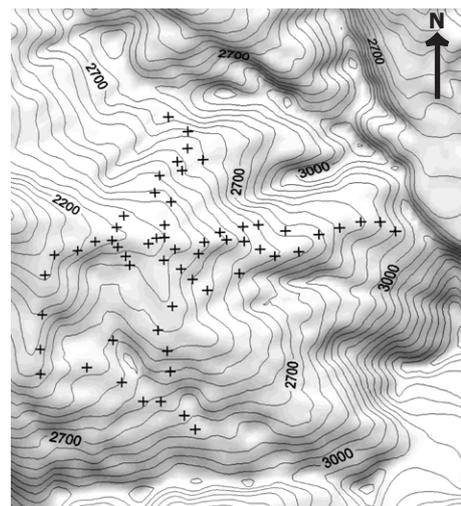


Fig. IV.2.8 : Position des sondes sur le MNT de Val Thorens (équidistance des courbes de niveau : 50m).

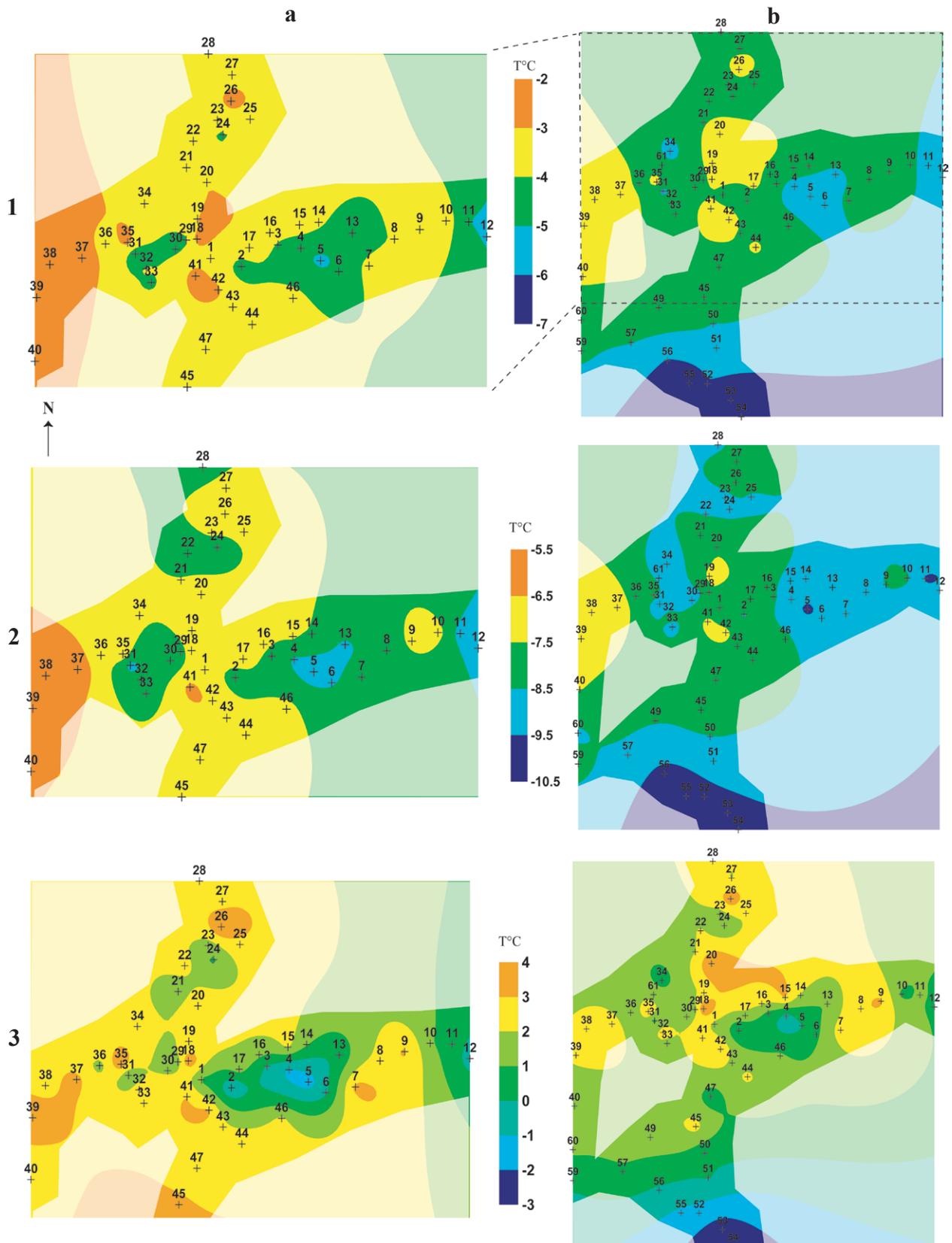


Fig. IV.2.9 : Répartition spatiale des moyennes hivernales (de décembre à mars) des températures moyennes (1), minimales (2) et maximales (3) journalières à Val Thorens avec 49 sondes de 1999 à 2005 (a) et avec 61 sondes de 2003 à 2005 (b).

IV.2.3.b. Particularités locales des moyennes de températures

Par rapport à l'altitude, les trois versants ont des comportements thermiques différents (fig.IV.2.9) suivant les températures minimales ou maximales :

- **Le versant sud est bien exposé en journée, à la vue des maximales, mais reste thermiquement très homogène pour les minimales (le gradient thermique moyen est proche de 0°C).**

- **Le versant ouest est aussi très homogène pour les minimales, mais très contrasté pour les maximales (fig.IV.2.9 carte 3b). Des effets d'exposition, d'ombrage et de ventilation liés aux micro-reliefs sont responsables de cette variabilité des températures sur le versant.**

- **Le versant nord est quant à lui parfaitement calé sur le gradient moyen de la décroissance des températures avec l'altitude dans les Alpes, entre -0,5 et -0,6°C/100m.**

Cette structure thermique du cirque de Val Thorens met en évidence la répartition suivante, que l'on peut approximativement séparer en deux parties : l'une nord, où il n'apparaît pas de variabilité dans les températures. C'est une zone que l'on peut qualifier de thermiquement homogène. L'autre sud, où les températures décroissent bien avec l'altitude. Le versant ouest sépare ces deux zones dans une interface où la variabilité spatiale est très forte. La topographie doit jouer un rôle à l'échelle du cirque dans cette structure. On pourrait aussi se demander si des influences micro-locales que nous ne pouvons déterminer sont à l'origine des fortes températures sur le haut du versant sud, mais les sondes sont posées dans des zones pentues et dégagées.

Sur le versant ouest, le rôle des micro-reliefs est plus important. Les températures maximales varient énormément. On constate de fortes valeurs pour les sondes 7, 8, 9. Ces sondes sont en position d'abri au niveau d'un replat dans le vallon laissé par le glacier de Pécelet. A l'aval de cette position, les températures sont bien plus froides, car la position d'abri disparaît au profit d'une pente plus raide et ouverte sur l'espace. Cette distinction met en évidence l'importance des formes convexes ou concaves du relief, des replats et des pentes...

Par contre, sur le versant nord, l'altitude explique à la fois pour les minimales et les maximales la répartition des températures.

IV.2.5 Les Menuires et Val Thorens : des topoclimats différents

L'étude des températures moyennes minimales sur le site de Val Thorens a mis en évidence **un effet de site qui modifie les valeurs des gradients thermiques sur les différents versants**. Alors qu'aux Menuires, la ceinture chaude est un phénomène qui explique bien la variation des températures avec l'altitude sur le versant ouest, à Val Thorens, des comportements différents s'observent et sont liés à la topographie du site. Au centre de l'amphithéâtre, les températures sont assez homogènes sur 400m (jusqu'à 2650m) puis seul le versant nord voit ses températures décroître réellement avec l'altitude. **On ne peut donc pas comparer le fond de l'amphithéâtre à un fond de vallée, car ils ont une influence inverse sur les gradients**

thermiques des différents versants. Le fond de l'amphithéâtre s'apparente plutôt à une ceinture chaude. A Val Thorens, ce phénomène doit être amplifié sur la partie nord de l'amphithéâtre par des mécanismes de circulation thermique propres. A moins que cette partie soit plus protégée des fronts froids venant du nord. L'analyse d'autres amphithéâtres de ce type pourrait nous renseigner plus précisément sur l'effet de cette topographie particulière sur les températures minimales, mais il s'avère déjà que les formes de relief d'échelle topo jouent fortement sur la variation spatiale des températures.

Synthèse de l'étude des températures moyennes

- Evolution depuis 1989 :

Les températures minimales diminuent depuis 2000/2001 par rapport aux années 90. Ce refroidissement a été surtout perceptible en montagne par rapport à la plaine, pour les mois de janvier et février. Mais l'hiver 2006-2007, non intégré dans cette étude, a surpris par sa douceur.

Le mois le plus froid est février sauf aux Menuires où il est particulièrement doux. Mais le mois de mars est vraiment plus chaud que les trois autres mois d'hiver, en moyenne de 1,5 à 3°C en fonction des années et des sites.

Les températures potentielles croissent en tout point avec l'altitude. Nous sommes donc en présence, de l'échelle de la Savoie à l'échelle du versant, à une inversion de températures constante sur la Savoie, avec des gradients thermiques correspondants à un air stable, mais dont la valeur change en fonction de la topographie locale.

Enfin les températures moyennes mensuelles changent d'une année sur l'autre en fonction de l'importance des inversions et de la réactivité topographique du site face à ces inversions.

- Les facteurs topographiques de la variabilité des moyennes de température :

L'étude des cartes thermiques et des gradients nous a permis d'identifier trois types de facteurs topographiques qui influencent la répartition des températures : **les facteurs altitude et orientation du relief, les formes topographiques de grande échelle (fond de vallée, forme du versant, amphithéâtre), et les formes topographiques de petite échelle (micro-reliefs).**

Les premiers ont un rôle prépondérant. L'altitude explique en grande partie la répartition des températures moyennes minimales sur tous les sites. Pour les maximales, l'exposition est un facteur important pour les versants nord ou sud. Pour les versants nord, le gradient reste assez lié à l'altitude, mais sur un versant sud les températures sont assez homogènes. Les versants ouest ou est ont quant à eux une variabilité interne très forte, provoquée surtout par les micro-reliefs. Bien sûr, les variations d'exposition sur un même versant ont les mêmes influences que celles citées ci-dessus. A Aussois, le haut de versant, orienté au sud mais connecté au grand versant est de la Dent Parrachée, se détache considérablement du bas de versant bien plus chaud.

Il faut pourtant nuancer ces observations en incluant les effets des seconds types de facteurs topographiques. **Le fond de vallée et la ceinture chaude qui le domine font considérablement chuter le rôle de l'altitude dans la décroissance des températures minimales dans la partie inférieure des versants.** Le talweg d'une haute vallée alpine connaît de fréquentes inversions mais qui se manifestent surtout sur une centaine de mètres au maximum. La ceinture chaude propre aux versants de vallée semble réduite à une portion de versant située entre 100m à 400m au dessus du talweg. **Au delà, la décroissance des températures moyennes avec l'altitude devient plus régulière**, même si de fortes variations spatiales sont encore présentes (entre des vallons, entre un replat et une pente forte...). Quant à la forme de relief en amphithéâtre, elle peut avoir des conséquences inattendues sur la répartition des températures minimales. En tout cas, cette superposition de facteurs d'échelles différentes rend complexe la compréhension de la variation des températures, d'autant plus que chaque site est différent.

La répartition de la température le long d'un versant varie aussi horizontalement. En dehors des différences d'exposition ou de ventilation, la topographie d'un bas de versant comme aux Menuires peut changer sur quelques centaines de mètres. Cela va modifier l'intensité de la ceinture chaude, en fonction de l'encaissement du fond de vallée et du profil du bas de versant. Sur les figures IV.2.11 à 2.13, où l'on observe la répartition des moyennes de températures hivernales minimales suivant trois coupes (fig.IV.2.10), la variation spatiale de la ceinture chaude est visible, même s'il n'existe pas de grandes différences dans les valeurs minimales de cette tranche. Il semblerait surtout que **le froid stagne plus facilement dans un fond de vallée encaissé, et qu'un profil convexe de bas de versant favorise une ceinture chaude plus prononcée par rapport à une pente régulière.** Aux Menuires, cela se traduit par des différences de 1 à 2°C en bas de versant, mais le haut de la ceinture chaude (où les températures dépassent celles du fond de vallée) reste vers la même altitude (2100m aux Menuires). On constate le même effet sur le versant ouest du Crey du Quart à Valloire, l'altitude du haut de l'inversion atteignant sensiblement la même valeur qu'aux Menuires (les versants ont des similitudes topographiques).

Enfin les micro-reliefs ont des conséquences à la fois sur les minimales (par rapport à la ventilation locale ou générale) et sur les maximales (ombrage...). Les températures peuvent varier de plus de 1°C sur quelques dizaines de mètres. Ces aspects seront mieux cernés dans le chapitre 5.

- Rôle de la forêt :

L'influence de la forêt est liée à celle de l'exposition : en versant nord, les températures y sont plus froides que sur un espace dégagé, alors qu'en versant sud il se crée une douceur importante à cause du manque de ventilation. On a remarqué aussi des températures anormalement plus froides en lisière de forêt. Ces observations seront aussi complétées dans le chapitre 5 par une étude plus précise au niveau de l'évolution des températures journalières.

L'étude des moyennes de températures a mis en évidence un certain nombre d'éléments importants dans la compréhension des facteurs qui influencent leurs variations spatiales. Ces

informations doivent être reliées aux autres paramètres mesurés ainsi qu'aux conditions synoptiques, aux pas de temps principalement horaires, afin d'avoir une vision plus systémique des phénomènes atmosphériques et d'établir des modèles de prévision basés sur la régression d'échelle entre les types de circulations et le comportement des paramètres locaux.

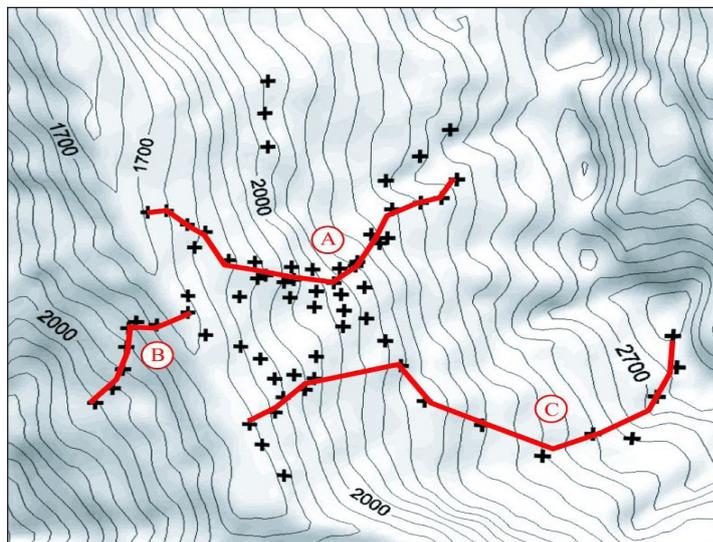


Fig. IV.2.10 : Coupes topographiques A, B et C aux Menuires.

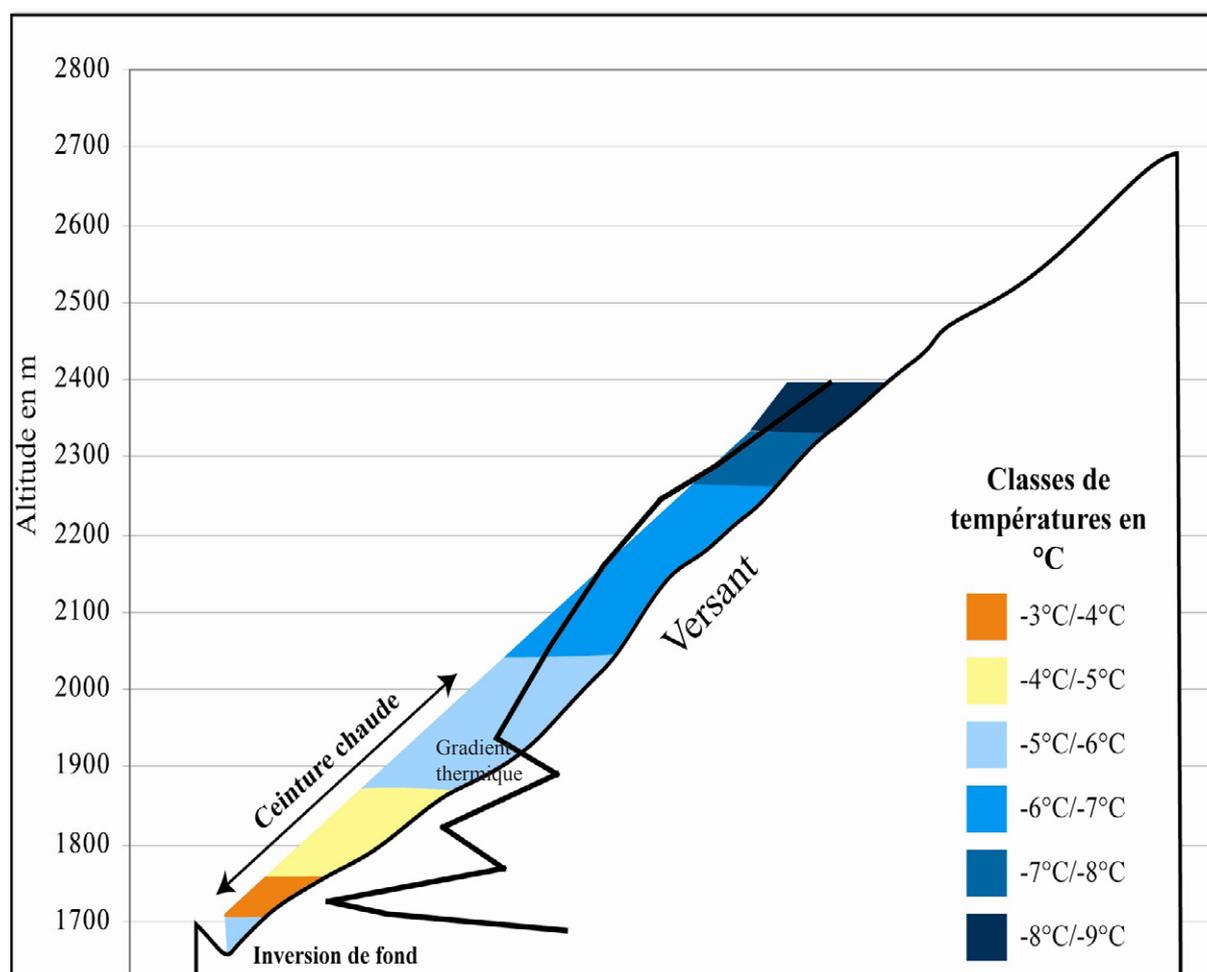


Fig. IV.2.11 : Répartition des moyennes de températures minimales hivernales (2002-2005) le long d'une coupe (A) effectuée sur le versant ouest des Menuires.

Gradient thermique : $-0,49^{\circ}\text{C}/100\text{m}$

Pour les coupes voir fig. IV.2.11.

Sondes utilisées : n° 48, 47, 46, 45, 15, 19, 18, 16, 2, 4, 5, 7, 8.

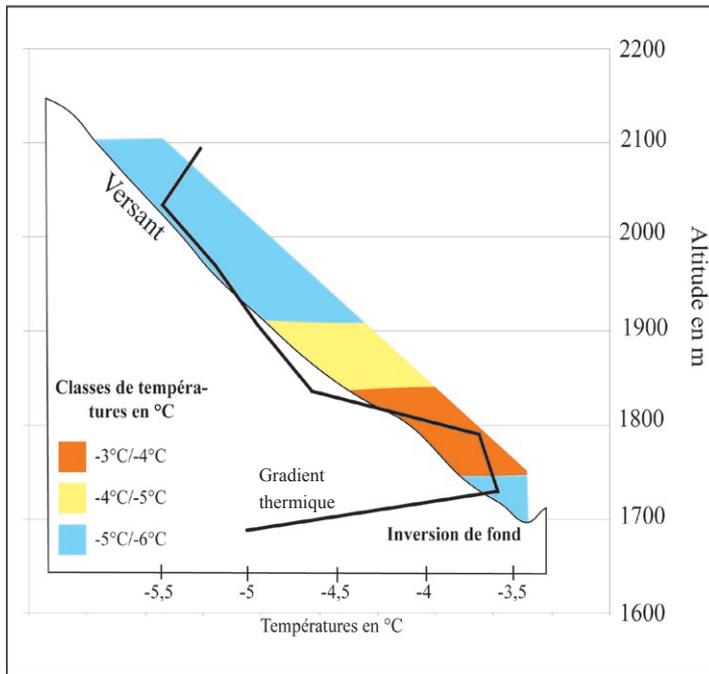


Fig. IV.2.12 : Répartition des moyennes de températures minimales hivernales (2002-2005) le long d'une coupe (B) effectuée sur le versant est des Menuires.

Gradient thermique : $-0,29^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

Sondes : n° 34, 42, 41, 40, 39, 38, 69, 70.

La ceinture chaude s'élève à la même altitude que sur le versant ouest. Le gradient est très faible car il reflète l'inversion de bas de versant provoquée par le fond de vallée et la ceinture chaude.

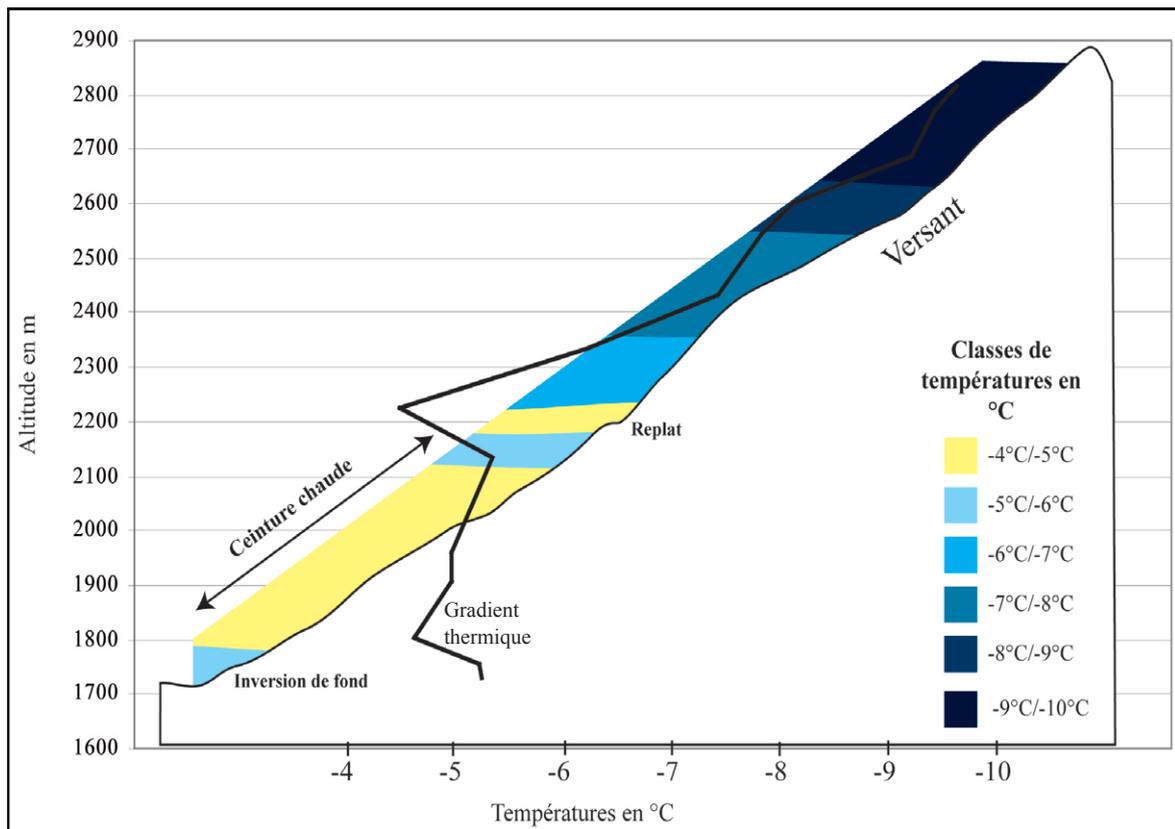


Fig. IV.2.13 : Répartition des moyennes de températures minimales hivernales (2002-2005) le long d'une coupe (C) effectuée sur le versant ouest des Menuires.

Gradient thermique : $-0,48^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

Sondes : n° 34, 33, 32, 30, 29, 59, 60, 61, 62, 71, 72, 74, 75.

Par rapport à la coupe A, la ceinture chaude est plus étirée en altitude, mais la différence fond de vallée/bas de versant est moins marquée. C'est vers 2300m que les températures se rejoignent à l'identique entre les deux coupes.

IV.3 LES VENTS SUR LES VERSANTS DE MONTAGNE

Grâce aux anémomètres posés sur les versants artificiellement enneigés des stations de ski, nous disposons d'une quantité importante d'informations sur les directions et les vitesses des écoulements en surface, en des points différents topographiquement. Etudier le comportement moyen des vents n'est pas chose aisée car il existe une multitude de types de vents qui peuvent se manifester en montagne. Ces types dépendent principalement de deux facteurs : le relief et les conditions synoptiques. En effet, on peut de suite distinguer les vents locaux type brises thermiques, et les vents synoptiques. L'enjeu réside donc dans la distinction à la fois de ces vents en tant qu'entités phénoménologiques et dans leurs interactions entre eux, lors d'une saison, l'hiver, où les études sur ce sujet sont finalement très rares, voire inexistantes.

IV.3.1 Rappel sur les brises thermiques

Différents ouvrages permettent de comprendre le phénomène de brises thermiques (FALLOT J.M., 1992 ; GUYOT G., 1999 ; MARTH L., 1986 ; THILLET J.J., 1997 ; ; WHITEMAN C.D., 2000...) ou des articles plus précis (DEFANT F., 1949 ; GARRETT A., 1983 ; MONTI P., et al, 2002 ; RAMPANELLI G., *et al*, 2004 VERGEINER I., 1987...).

Ces vents locaux ou régionaux sont générés par un gradient de pression horizontal, lequel résulte des réchauffements et refroidissements différenciés des diverses surfaces du sol et de l'air ambiant. Il existe plusieurs types de courants thermiques orographiques, que l'on classe en fonction de deux facteurs : la nature du relief (par rapport à l'échelle spatiale) et l'alternance nyctémérale (jour/nuit). Nous verrons d'ailleurs que cette typologie sur le cycle diurne est à remettre en cause en hiver, à cause de la présence de neige et d'inversion de températures quasi-généralisée. On peut aussi noter que les brises se forment par beau temps, disparaissent lors du mauvais temps et sont alors remplacées par les vents synoptiques car il n'y a plus d'effet thermique.

On distingue :

- *Les brises de vallée* (ascendantes) : brises thermiques venant de la plaine et remontant les vallées. Elles sont diurnes, car l'ensemble de la masse d'air de la vallée devient plus chaud que celle située au-dessus d'une région plane, en raison du moindre volume d'air à réchauffer par le soleil. Le relief de la vallée compte aussi beaucoup (forme en U, V...). Sur les versants, des composantes transversales l'accompagnent en remontant les pentes. On les nomme *vents anabatiques*, ou encore *brises de pente ascendantes* (brises de versant).

- *Les brises de montagne* (descendantes) : brises thermiques venant de la montagne et descendant vers la plaine (par les vallées). Elles sont nocturnes car par nuit claire, le sol perd par rayonnement infra-rouge beaucoup de chaleur et devient plus froid que l'air environnant. Celui-ci s'écoule vers l'aval car sa densité est plus grande. Une inversion de température se développe alors dans les basses couches de l'atmosphère. Le long des versants s'écoulent cette fois-ci les *vents catabatiques* ou *brises de pente descendantes*. Ils alimentent la brise de montagne, tout

comme les vallées adjacentes et par une subsidence au-dessus de la vallée.

Les brises de pentes sont elles aussi déterminées par une différence de température entre le centre de la vallée et les versants. Lorsque le centre est plus froid (jour), les brises remontent les versants et retombent au centre de la vallée par subsidence. La nuit, les versants sont plus froids, mais il n'existe pas d'ascendance au centre de la vallée (sauf en fin de soirée l'été). La brise est parfois surmontée par un contre-courant que l'on nomme *anti-vent* ou flux de compensation, destiné à boucler le système de brises thermiques. C'est au-dessus de ce flux que l'on trouve les vents synoptiques qui soufflent dans l'atmosphère libre. Enfin, en journée, la brise de vallée (et les brises de pentes associées) liée à la convection prend le relais de la brise de montagne et disparaît en fin d'après-midi, lorsque l'air se refroidit et se stabilise. Cette transition se nomme *la renverse* (du matin et du soir).

Nous verrons que les brises thermiques dépendent fortement des conditions synoptiques. Lorsque le temps est perturbé avec une atmosphère instable, les brises ne peuvent se former et sont remplacées par les vents synoptiques. Parfois ces vents peuvent interagir aussi entre eux. Ces relations sont gérées par quatre mécanismes (WHITEMAN C.D. *et al*, 1993):

- Forçage thermique (*thermally driven*) : les vents de vallée sont indépendants des vents généraux.
- Transport turbulent de haut en bas, en provenance de l'atmosphère supérieure (*downward momentum transport*). Les directions des vents en vallée évoluent en parallèle à celle des vents synoptiques (surtout si la vallée n'est pas bien protégée par les reliefs environnants).
- Canalisation forcée (*forced channeling*) : les vents synoptiques sont canalisés par la topographie et sont alignés sur l'axe de la vallée.
- Canalisation du vent dépendant du gradient de pression géostrophique le long de la vallée (*pressure driven channeling*). Les vents de vallée peuvent souffler en opposition avec le vent en altitude.

Le relief influence aussi les brises en les canalisant, ou en augmentant ou diminuant les vitesses en fonction du resserrement ou de l'élargissement de la vallée. En hiver, l'écoulement des brises de montagne peut être entravé parce que la plaine est totalement remplie d'air froid. La présence de neige empêche le réchauffement diurne de l'atmosphère et les brises montantes deviennent rares...

Notons que les cycles diurnes des brises peuvent être changés par le réchauffement asymétrique des versants de vallée. Le soleil chauffe par exemple au matin d'abord le versant est, puis en fin de journée le versant ouest. Cette différence permet d'avoir une brise montante d'un côté et une brise descendante de l'autre.

Enfin, l'influence de la couverture végétale a été déterminée par Garrett (GARRETT A., 1983) sur les vents catabatiques : plus elle est dense, plus les vents sont ralentis en surface. De 3 à 4 m/s sur une surface libre (à quelques mètres de hauteur), il passe à moins de 1 m/s pour une couverture végétale dense (arbres à 20m de hauteur en moyenne).

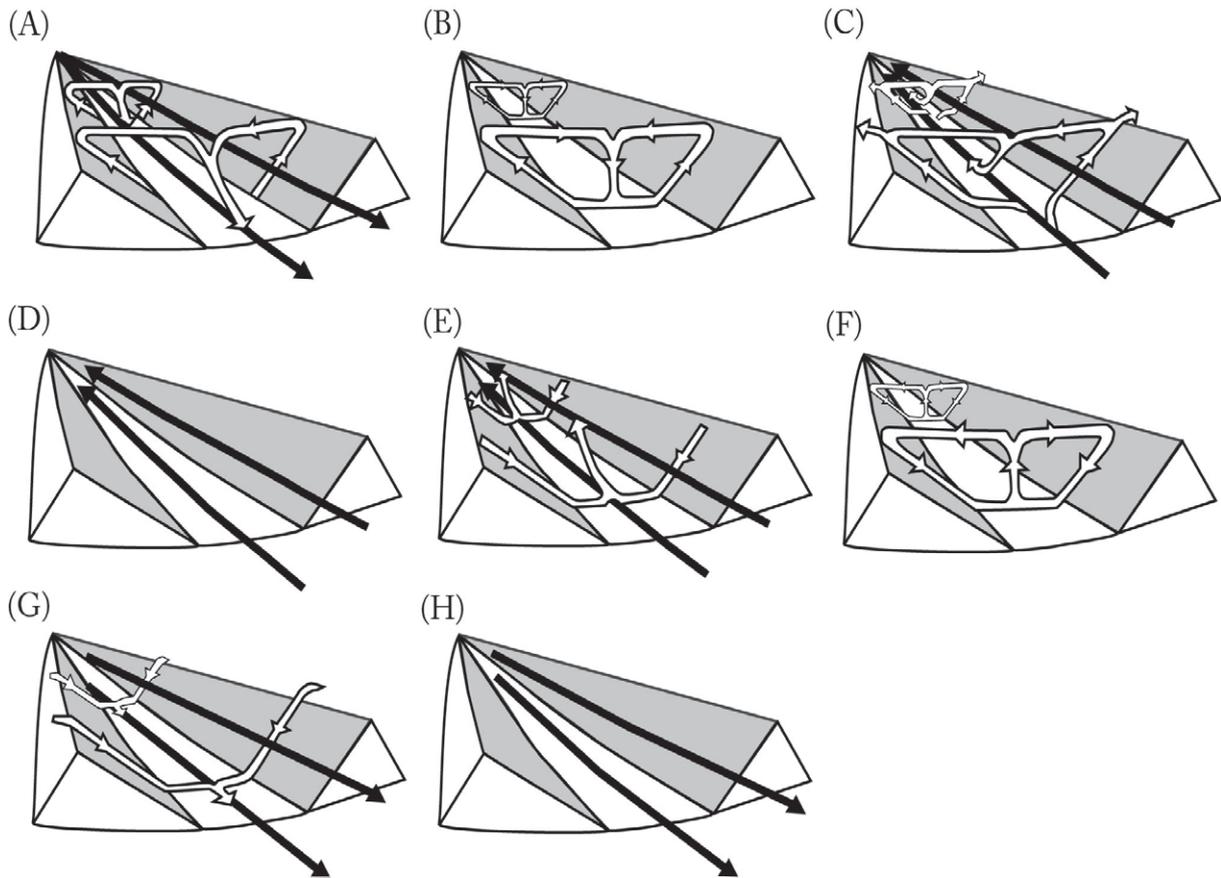


Fig. IV.3.1 : Cycle diurne des vents de vallée.

A : Lever du soleil : début des brises de pente ascendantes, brise de montagne faiblissante.

B : Milieu de la matinée : brises de pente ascendantes bien développées, passage de la brise de montagne à brise de vallée (renverse du matin).

C : Midi et début d'après-midi : brises de pente ascendantes faiblissantes et brise de vallée bien établie.

D : Fin d'après-midi : brises de pente effacées, brise de vallée bien établie.

E : Soir : début des brises de pente descendantes (catabatiques), brise de vallée faiblissante.

F : Fin de soirée : brises de pente descendantes bien développées, passage brise de vallée à brise de montagne (renverse du soir).

G : Nuit (première partie) : brises de pente descendantes, brise de montagne.

H : Nuit (seconde partie) jusqu'au matin : brises de pente descendantes effacées, brise de montagne bien établie.

D'après DEFANT F., 1949

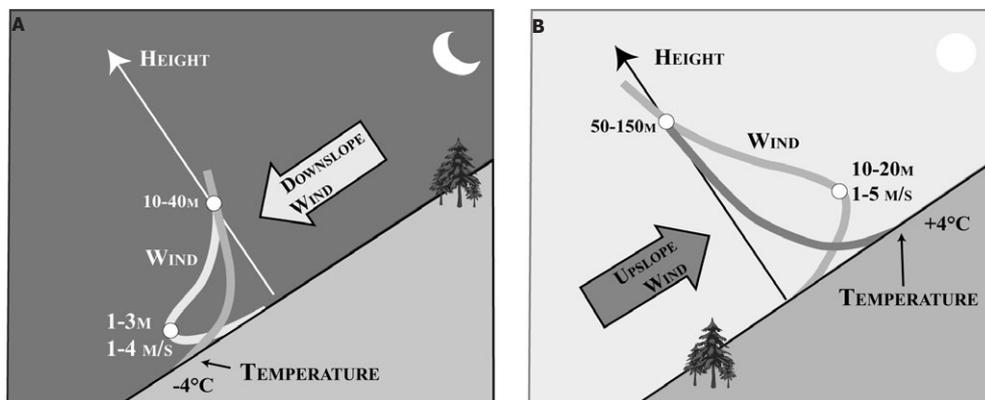


Fig. IV.3.2 : Profils typiques du vent et de la température en fonction de la hauteur au-dessus d'une pente durant la nuit (a) et le jour (b).

D'après WHITEMAN C.D., 2000.

IV.3.2 Les vents moyens sur les sites de l'étude

La nature même des écoulements d'air en montagne est gérée par le relief, elle s'exprime donc à des échelles différentes. En un point de mesure (à 3m de hauteur environ pour nos anémomètres), les vents qui soufflent se divisent en trois grand types (vents synoptiques, vents de vallée et vents de versants) et sur chacun d'eux s'impose le relief qui modifie leur vitesse et leur direction. Bien sûr, le rôle du relief est différent pour les vents synoptiques (il les canalise) par rapport aux brises (il définit leurs directions). Mais dans les deux cas, le vent subit une influence déterminante dans sa nature même (au niveau du point de mesure). N'oublions pas non plus que les vents synoptiques sont associés au temps synoptique perturbé ou dépressionnaire, à l'inverse des brises qui se forment lors de temps anticyclonique. D'autres facteurs peuvent intervenir, mais en haute montagne et en hiver ils sont rares (forêt, etc.). L'influence des différences de températures dans la vallée prend aussi moins d'importance. Nous voyons donc que les problèmes d'échelles sont primordiaux. Comment alors représenter les directions moyennes de vents multi-échelles en ce point sans tous les mélanger ? Le cycle diurne des brises impose, pour les suivre graphiquement, d'utiliser une échelle temporelle horaire, et non journalière. Les changements synoptiques qui interviennent au cours de la saison sont à l'échelle mensuelle (changements de comportements entre novembre et avril à cause de la disparition des inversions). **Il existe en effet des comportements différents entre les brises thermiques estivales et hivernales que nous mettrons en évidence.** Enfin nous devons exprimer un comportement moyen, pour avoir une vue d'ensemble. Impossible de séparer alors conditions synoptiques dépressionnaires et anticycloniques journalières, car sur plusieurs années elles se confondent. Nous ferons donc cette distinction dans le chapitre suivant, afin de relier ces conditions synoptiques au vent mesuré.

Mode de représentation choisi :

Il existe plusieurs moyens de représenter les directions et les vitesses des vents. Les roses horaires sont utilisées pour les brises en montagne, mais il faut en faire 24 pour visualiser le schéma d'ensemble (CHOISNEL E., 1987). Une rose moyenne horaire ne permet pas de distinguer des vents qui agissent à trois échelles différentes. Il existe aussi des graphiques en 2D avec des surfaces qui représentent la fréquence des directions des vents. Mais on ne peut pas voir leur évolution dans le temps long (ZAWAR-REZA P., 2004). D'autres graphiques existent mais ils s'appliquent plutôt pour un seul vent (croisement direction, vitesse), ou pour des spécificités (hodographe). Finalement, nous avons opté pour un mode de représentation original, en partant d'un fichier de données pas de temps / directions sur plusieurs années de mesures. **Nous transformons alors le pas de temps en mois/horaire, et les directions en points cardinaux** (on échappe ainsi au problème de mesure circulaire du vent). **Puis on calcule les fréquences des directions pour chaque pas mois/horaire.** On obtient alors un graphique qui permet de visualiser toutes les directions et leurs comportements durant chaque mois (et aussi leur évolution hivernale) et pour chaque heure (si l'évolution mensuelle n'est pas très marquée, on peut utiliser une échelle de temps uniquement horaire). On distingue alors les brises thermiques, les vents synoptiques et leurs fréquences.

Le grand nombre de mesures utilisé pour ces calculs (jusqu'à 100000 pour certains ané-

momètres) permet d'avoir des moyennes «représentatives», car le graphique est dynamique, et les formes des courbes soulignent les différences d'échelles. **Une brise suivra un cycle nycthéméral, un vent synoptique sera constant dans les fréquences car il est aléatoire dans le temps long.** Mais pour comparer les fréquences entre les brises, encore faut-il enlever leur part «synoptique» sur le graphique. Dans un premier temps, les formes des courbes permettent de trouver à quelles directions correspond tel type de vent. Ensuite on peut retirer la valeur de la fréquence du synoptique sur le local. Pour un vent catabatique, la fréquence vers 15h en mars donne sa valeur synoptique. Et inversement pour une brise anabatique (le comportement des brises en janvier et en mars diffère fortement dans l'après-midi).

Par contre ce graphique n'intègre pas les vitesses et la forme du relief. Pour l'une, un graphique parallèle donnant les vitesses par rapport aux directions permet de différencier par exemple une brise et un foehn, ou un vent d'ouest fort. Pour l'autre, il est indispensable de connaître la topographie du lieu où l'anémomètre est posé.

Après l'analyse des données, il s'est avéré que certains points communs topographiques ressortaient dans le comportement des vents et surtout des brises. Nous allons donc étudier les résultats par rapport **au bas de versants, au milieu de versant, au haut de versant et enfin au fond de vallée.** Nous analyserons un cas à chaque fois en le joignant aux autres anémomètres de différents sites pour étayer au maximum notre compréhension des systèmes de vents en montagne.

IV.3.2.a. Les bas de versants : un comportement bien déterminé

IV.3.2.a.a. Le bas de versant sud d'Aussois

L'anémomètre 5 (1580m) est posé à quelques dizaines de mètres de la lisière inférieure de la forêt, avec une piste débouchant en amont (voir chapitre II fig.II.3.2). L'espace est bien découvert en aval, avec une ouverture assez large vers la vallée de la Maurienne. La pente est douce et le terrain plutôt concave. On imagine déjà que les vents venant de la vallée (SW) seront bien canalisés par la vallée. Les moyennes de fréquences ont été effectuées sur 67000 mesures environ, de 2000 à 2005, soit cinq saisons. La rose des vents associée sur la fig. IV.3.3 donne les directions majoritaires mais pas la dynamique de leur évolution.

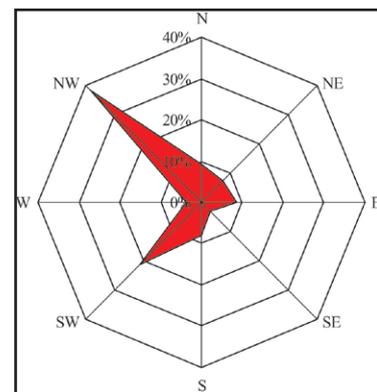


Fig. IV.3.3 : Rose des vents moyennes à Aussois (anémomètre 5).

Les brises thermiques : la figure IV.3.4 retrace l'évolution des fréquences des directions : on remarque en premier lieu une direction (nord-ouest, courbe bleue) qui correspond à une brise de pente descendante (vent catabatique) venant du haut du versant, avec une fréquence de 60% la nuit (le reste correspondant aux vents synoptiques) et à peine quelques pourcents le jour. Les vents de nord et de nord-est (environ 8% chacun) ont aussi ce cycle nycthéméral, mais ils sont plus fréquents le matin et le soir, en relation avec les renverses lorsque les brises de montagne assurent la transition entre brises descendantes et montantes (le vent tourne le matin quand le

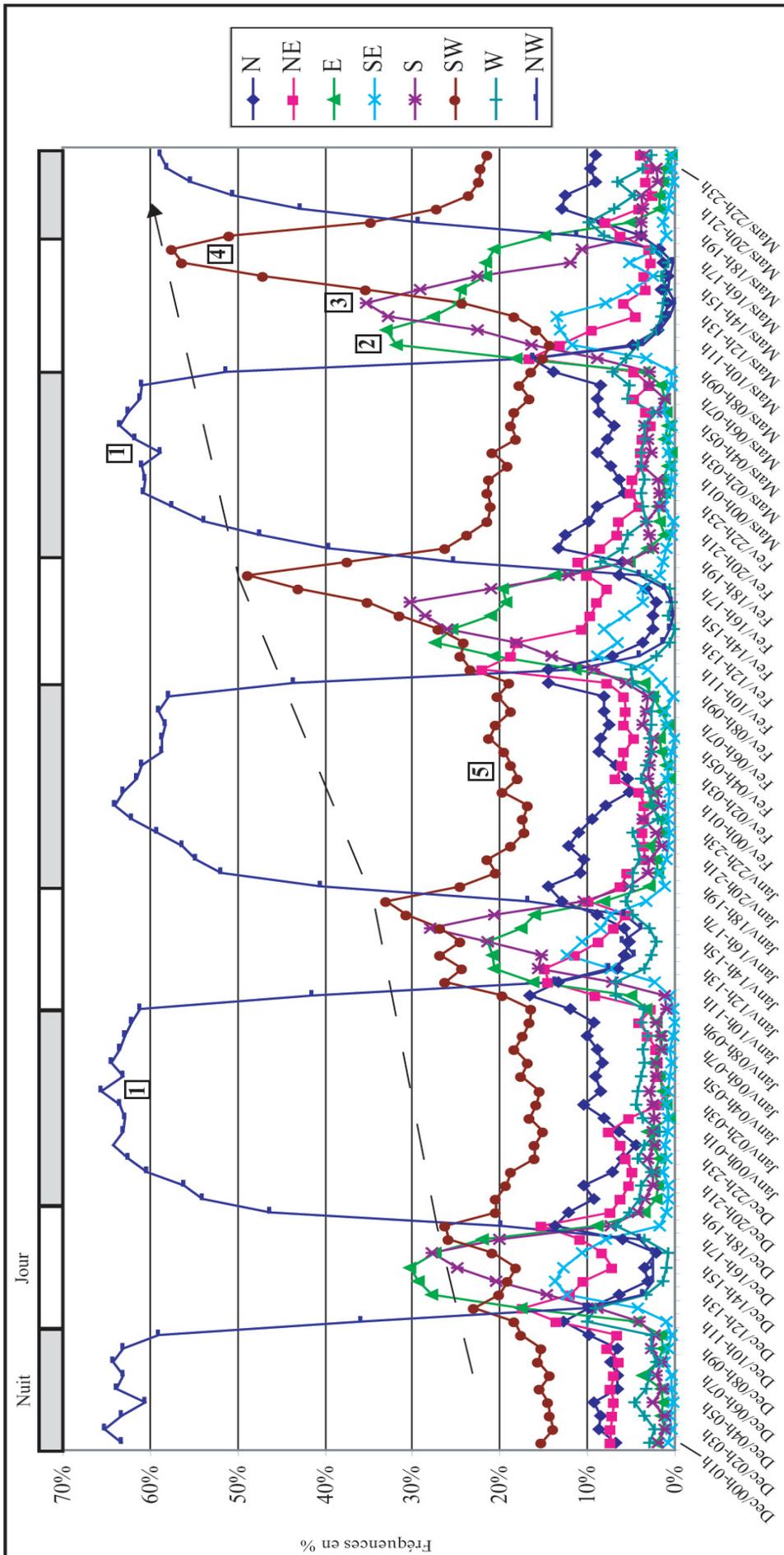


Fig. IV.3.4 : Evolution des fréquences des directions des vents (en points cardinaux) par mois/heures à Aussois (anémomètre 5).

Mesures de décembre à mars, saisons 2000 à 2005.

Fleche en pointillé montrant l'évolution de la fréquence des brises de pente montantes et brises de vallée (S à SW) de décembre à mars (+35%).

1 : brise de pente descendante ; 2 : brise de montagne ; 3 : brise de pente ascendante ; 4 : brise de vallée ; 5 : Vent synoptique.

soleil se lève vers le nord-est). Ensuite, en fonction du mois, nous avons deux évolutions diurnes :

- En décembre ou janvier, les directions sont assez confuses et cumulent des vents d'est à sud-ouest. La courte durée du jour et des conditions synoptiques favorables aux inversions et aux écoulements d'air lourds entraînent une mauvaise différenciation des rythmes. Mais cela correspond à plusieurs situations possibles : parfois les brises de montagne s'imposent toute la journée, parfois il y a temporairement des brises montantes, ou même la brise de pente descendante continue de souffler toute la journée (rare ici).

En janvier, les fréquences nous montrent cette indifférenciation. En enlevant la part de synoptique aux vents (comme pour le vent de sud-ouest avec 15% en nocturne), on a **vers 15h** :

- **25% de brise de pente ascendante de sud.**
- **18% de brise de montagne d'est (deux fois plus en décembre).**
- **12% de brises intermédiaires de nord-est et sud-est.**
- **10% de brise de vallée de sud-ouest.**
- **5% de brise de pente descendante.**

- C'est pour les mois de février et surtout mars que l'évolution est la plus marquée : le vent d'est (et sud-est) dure de 8h à 11h, puis le vent de sud jusqu'à 13h, et enfin un vent de sud-ouest jusqu'à 18h environ. Nous avons là le parcours classique des brises durant la journée : **brise de montagne, brise de pente montante, brise de vallée**. Il est plus complexe de définir un rythme : la brise de vallée peut être présente dans presque 25% des cas vers 15h, alors que son pic de fréquence est vers 17h... La brise de montagne est quant à elle la brise descendante la plus présente en journée, avec une fréquence de 20% vers 16-17h. La fig. IV.3.4 retrace la moyenne des fréquences sur les quatre mois d'hiver et permet de visualiser l'évolution diurne, et le tableau IV.2 résume le rythme des brises dans la journée.

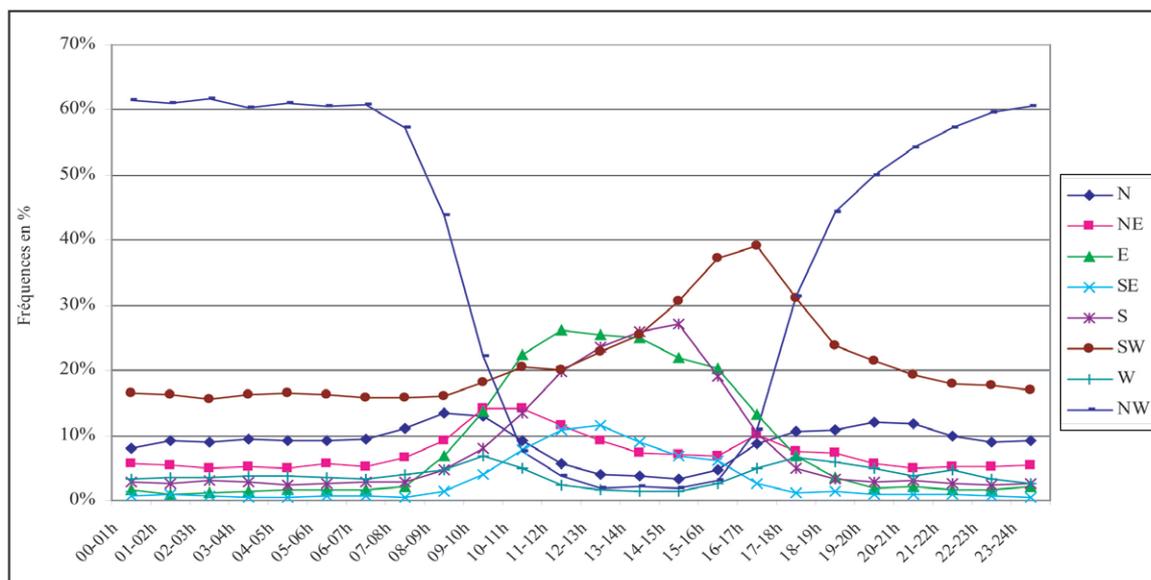


Fig. IV.3.5 : Evolution des fréquences des directions des vents horaires à Aussois (anémomètre 5).
Fréquence horaire de décembre à mars de 2000 à 2005.

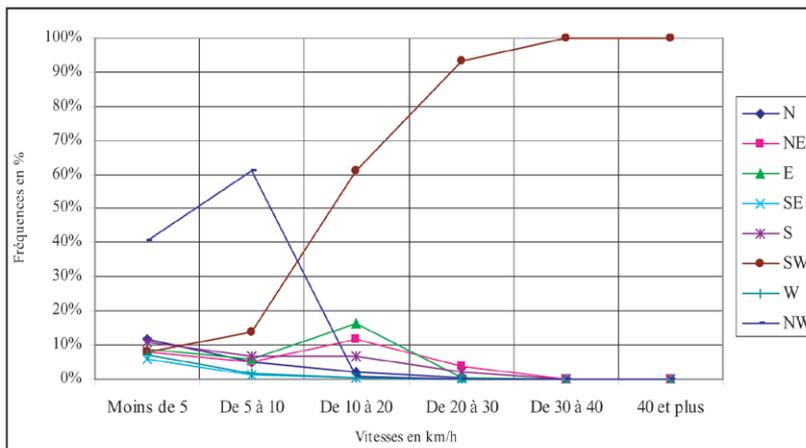


Fig. IV.3.6 : Evolution des fréquences des directions des vents en fonction des vitesses en km/h à Aussois (anémomètre 5).

MOIS	HEURES	TYPES	VITESSES
Février Mars	18h - 8h	Brise de pente descendante	< 10km/h
	8h-10h	Brise de montagne	< 10km/h
	10h-13h	Brise de pente ascendante	< 10km/h
	13h-18h	Brise de pente ascendante, brise de vallée.	< 20km/h

Tab. IV.2 : Rythme des différents types de brises à Aussois en bas de versant (anémomètre 5) en février et mars.

La probabilité d'apparition des brises varie sur le temps et non dans leur type. Seule la brise de montagne peut s'imposer dans la journée sur les brises anabatiques.

Remarques sur le vent de nord : ses fréquences d'apparition augmentent de 5 à 10% le matin et surtout le soir, vers 18h, alors qu'il ne correspond pas à une direction liée à une brise de vallée (ou montagne). Les deux «pics» visibles correspondent au cas où le vent repasse par le nord-est et le nord après la brise de montagne et de vallée.

Les synoptiques : il en reste 40% qui arrivent principalement du sud-ouest et du nord. Ce résultat est corrélé à la somme des fréquences nocturnes puisque la seule brise de nord-ouest est à 60%. **Un vent sur trois environ n'est donc pas une brise.** Les vents synoptiques n'ont pas de comportement temporel particulier, leurs courbes doivent être horizontales. **Le vent majoritaire vient du sud-ouest et constitue presque la moitié des vents synoptiques mesurés.**

Les vitesses : les différences entre les vents dépendant fortement des conditions synoptiques, leurs vitesses mesurées permettent de séparer les brises à vitesses faibles des vents synoptiques à plus grande vélocité. En hiver, les brises remplacent très rapidement les vents synoptiques, ce qui minimise la marge d'erreur liée aux vents synoptiques faibles. Sur le graphique IV.3.5, trois classes de vitesses se distinguent : en-dessous de 10 km/h, 50% des vents viennent de nord-ouest, correspondant à la brise catabatique. Puis entre 10 et 20 km/h elle laisse sa place au vent sud-ouest, composé à ce niveau de brise de vallée et de vent synoptique faible. Enfin au-delà ce vent synoptique constitue la totalité des vents forts. La vitesse du foehn (est) est d'ailleurs assez faible paradoxalement, mais ce vent souffle beaucoup plus fort en haut du versant.

Les autres anémomètres à Aussois : L'anémomètre 4 et 3 ont des mesures similaires dans le comportement mensuel et journalier, avec des différences de directions liées à la topographie. Mais plus on monte en altitude, plus les fréquences des brises montantes diminuent. La brise de montagne venant de l'est reste toujours bien présente, surtout le matin.

IV.3.2.a.β. Les autres versants

- Aux Menuires : des brises anabatiques rares, même en bas de versant.

Même si la vallée des Bellevilles est de dimension beaucoup plus réduite et plus élevée en altitude que la vallée de la Maurienne, nous retrouvons le même comportement des brises catabatiques, mais pas pour les brises anabatiques qui sont rares (10% de décembre à février, 30% en mars). La brise de pente descendante interagit avec la brise de montagne le matin, formant 55% des brises diurnes de décembre à janvier, et autant que les brises anabatiques en mars (30%). Les brises de vallée s'imposent alors surtout à partir de 15h (pas de brise de pente montante). **Le bas de versant des Menuires a donc une ventilation différente de celle d'Aussois car les brises de vallée sont remplacées par des brises de montagne diurne qui descendent la vallée durant l'après-midi.** Ce système rappelle donc plus les mesures de la position de l'anémomètre 1 à Aussois que de l'anémomètre 5. On remarque déjà une différence fondamentale entre la vallée de la Maurienne et celle des Bellevilles, car dans cette dernière, plus étroite et plus haute, les brises de vallée n'arrivent pas à souffler en hiver.

- A Valloire : deux versants distincts.

Versant nord de la Sétaz : en bas de ce versant (anémomètre 3), nous avons deux types de mois différents : décembre et janvier, février et mars. Dans le premier cas, on observe une brise de pente descendante bien constante de sud-est entre 20% et 30%, sans rythme diurne. Elle est associée à une autre direction de sud, oscillant entre 50% la nuit et 20% le jour. La brise de montagne arrive de l'est et du sud-est depuis la vallée de l'Aiguille Noire. **On trouve 20% de brises de vallée en journée en décembre et janvier, puis on passe à 70% (avec brises de pente ascendantes) en février et mars.** On remarque une brise de pente qui arrive de l'ouest vers 15h, brise venant du versant est à l'ouest du village.

Au milieu de ce versant (anémomètre 1), on retrouve le même système avec des vents de sud-est à est (brise de montagne) et de sud la nuit. Mais les vents de sud-ouest s'imposent souvent en journée, et le matin en mars (les brises anabatiques prenant le relais). C'est aussi une brise de montagne mais elle vient de la vallée de la Valloirette (dans 25% des cas) ! On observe donc une alternance de brises de montagne en fonction du jour et de la nuit. **Le soleil se dirigeant vers l'ouest, la brise de montagne arrive le matin par la vallée de l'Aiguille Noire et dans l'après-midi par la Valloirette.** Mais en mars on retrouve autant de brises anabatiques (avec le même système de rotation de l'ouest au nord durant la journée) qu'en bas de versant. Ce site en forme de Y a une ventilation spécifique qu'il faudra étudier en fonction des conditions synoptiques.

Dans la combe de l'Aiguille Noire, l'anémomètre 7 est posé à une cinquantaine de mètres du fond de vallée sur le versant ouest. Les brises catabatiques arrivent bien sûr du haut du versant, avec une forte variabilité dans leurs directions, celle de nord-est étant privilégiée (même constat sur l'anémomètre 9). Il faut ajouter que les fréquences n'ont pu être calculées que sur deux ans. Ensuite, ces brises ne cessent que tard dans la matinée. Les brises de montagne arrivent alors du sud, et si elles se maintiennent, passent au sud-ouest puis reviennent au sud

et sud-est en fin d'après-midi. Au contraire, si les brises anabatiques soufflent jusque là, elles passent d'abord par une brise de pente venant du versant opposé (brise qui descend le versant est et revient sur le ouest), puis viennent enfin du nord-ouest ou nord, c'est-à-dire des gorges qui surplombent Valloire. Les similitudes dans la ventilation sont fortes avec le bas de versant des Menuires (anémomètre 3), à mettre en relation avec les similitudes de la topographie des deux hautes vallées.

IV.3.2.b. Les milieux de versant : des différences de ventilation en fonction de la topographie des vallées et des versants

IV.3.2.b.a. A Aussois, les brises et vents synoptiques interagissent

L'anémomètre 1 est situé sur un espace bien dégagé, de forme plutôt convexe, permettant de mesurer les vents à des échelles plus diverses qu'en bas du versant. En effet il y a une meilleure prise aux vents synoptiques, qui se confondent souvent avec les brises, et qui soufflent de toute part car la canalisation est moindre. Légèrement avancé dans la vallée et éloigné des micro-reliefs, ce point de mesure donne un aperçu très intéressant d'une échelle topographique supérieure. Les graphiques IV.3.7 et 8 ont été établis sur 95000 mesures, de 1998 à 2005 (7 saisons).

Deux cycles affectent tous les vents, en fonction du rythme nyctéméral :

- La nuit, on observe (part du synoptique enlevée) : **30% de vent de nord, 15% de nord-est, 15% de nord-ouest, soit 60 % de brises catabatiques (plus 40 % de synoptiques)**. On remarque aussi la forte présence du vent d'est, de jour comme de nuit. Le problème est que cette direction correspond à la fois à une brise de montagne mais aussi au foehn. Après analyse des données, nous avons déterminé la part du foehn dans cette direction car il souffle presque constamment au-dessus de 20 km/h (30% des vents, voir fig.IV.3.8). En ajoutant la part des foehns inférieurs à 20 km/h, mais en enlevant les vents d'est synoptiques (comme un retour d'est), on peut accepter que 30% des vents d'est sont des foehns. Ainsi, on peut calculer que 10% des

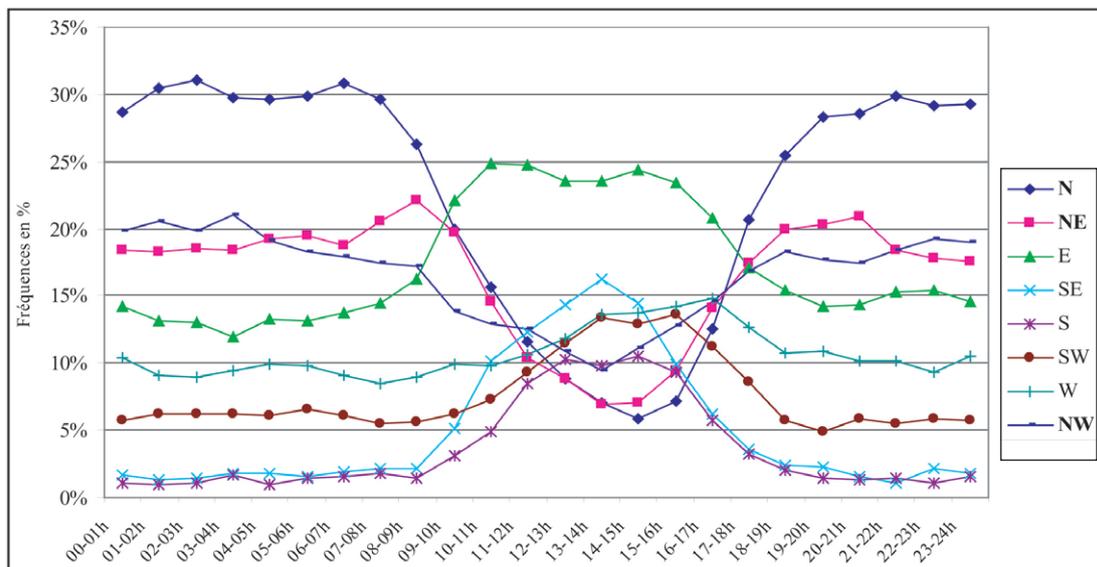


Fig. IV.3.7 : Evolution des fréquences des directions des vents par heure à Aussois (anémomètre 1). Les directions en gras dans la légende représentent les vents qui diminuent pendant la journée.

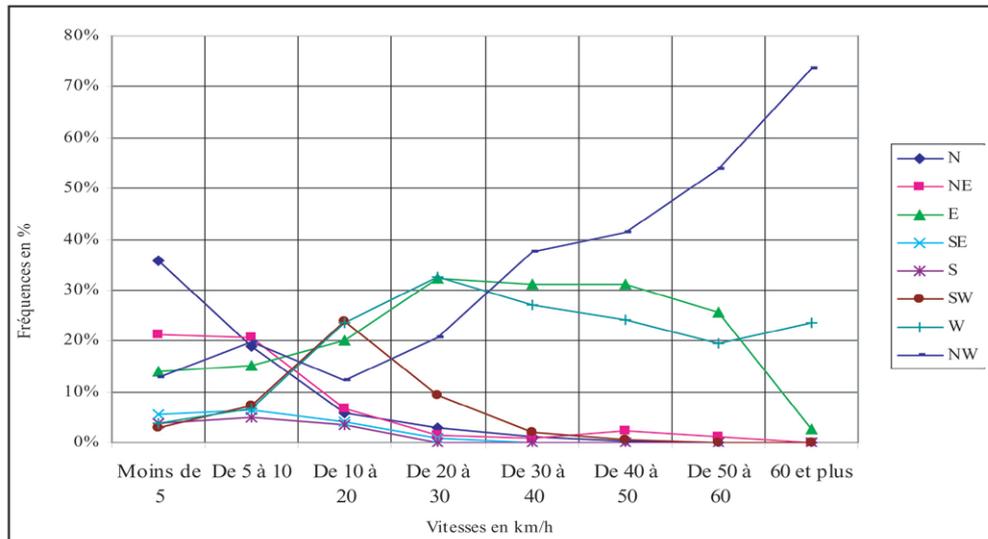


Fig. IV.3.8 : Evolution des fréquences des directions des vents en fonction des vitesses en km/h à Aussois (anémomètre 1).

vents nocturnes viennent de l’est. Il est étonnant de retrouver un tel pourcentage nocturne, mais cela peut s’expliquer par la position de l’anémomètre qui capte des écoulements venant de plusieurs pentes en amont, oscillant entre le nord-ouest et l’est. Ce phénomène nous montre déjà que **les brises catabatiques sont différenciées dans les reliefs convexes et au contraire canalisées dans les concaves.**

• En journée, on distingue toujours cette évolution journalière, avec de décembre à janvier environ :

- 20% de brises de pente descendante
- 20% de brise de montagne et 15% de brises de sud-est.
- 5% de brises de pente montantes avec un pic vers 14h.
- 10% de brises de vallée en fin d’après-midi.

En mars, le vent tourne sensiblement comme en bas de versant, avec une brise de montagne qui s’arrête désormais avant midi afin de laisser progresser les brises montantes de versant (13%) et de vallée (25%). **Ces deux brises anabatiques doublent donc en fréquence entre 11h et 18h en mars.**

MOIS	HEURES	TYPES
Mars	18h-8h	Brise de pente descendante
	8h-11h	Brise de montagne
	11h-16h	Brise de pente ascendante
	16h-18h	Brise de vallée

Tab. IV.3 : Rythme des différents types de brises à Aussois en haut de versant (anémomètre 1) en mars.

Les vents synoptiques sont bien représentés, avec des vents d’ouest, d’est, de sud-ouest et nord-ouest qui forment 80% du total. Les autres sont plus rares, surtout pour les vents de sud-est et de sud. Au niveau des vitesses (fig.IV.3.8), on discerne les brises catabatiques qui faiblissent très vite, le vent d’est qui augmente fortement quand c’est un foehn, et deux vents synoptiques très forts, d’ouest et surtout de nord-ouest (max : 80 km/h). Les vents supérieurs à 20km/h sont constitués par 30% de vents d’ouest, 30% de vents de nord-ouest, et 6% de sud-est.

Sur le versant ouest d'Aussois, l'anémomètre 2 mesure une brise de montagne qui n'arrive plus de l'est mais du nord-ouest, c'est-à-dire du Fond d'Aussois. Cette brise devient très importante en mars en fin d'après-midi, car le grand espace du Fond d'Aussois en amont se refroidit plus vite dans la journée de par son ombrage, et souffle en s'opposant aux brises de vallée présentes en bas de versant, formant des écoulements contraires. On constate déjà que la variabilité importante des types de brises diurnes est liée à des notions d'ombrage et de formes topographiques emboîtées. **Il n'est pas rare d'observer des brises de directions contraires en haut et en bas de versant durant toute la journée.**

IV.3.2.b.β. Aux Menuires : des brises catabatiques majoritaires

Située au débouché d'un vallon et sous un escarpement rocheux (photo IV.2), en milieu de versant dans un terrain plutôt concave en amont d'un relief bien convexe, la position de l'anémomètre 1 permet de mesurer les vents à l'échelle d'un vallon de versant. Nous disposons d'un grand nombre de mesures (101000, sur 10 ans, de 1994 à 2004).

Ce qui étonne le plus sur la fig. IV.3.9, c'est que même si l'on retrouve bien le rythme nyctéméral, les brises sont principalement descendantes et oscillent entre l'est et le nord-est. **Nous avons donc la nuit une brise de pente descendante, qui provient du nord-est, c'est-à-dire de l'escarpement située en amont. Ensuite, de 9h à 16h environ, la direction de cette brise change et provient de l'est, c'est-à-dire du haut de versant** (vallon de la Becca). Nous sommes donc en présence d'une brise de pente descendante diurne. Ce cas n'est pas exceptionnel, puisque nous avons remarqué que les brises descendantes pouvaient souffler le jour, mais ici c'est surtout le changement de direction qui réagit directement avec l'ensoleillement qui est inédit. On se retrouve avec 50 % de brise de nord-est et un peu plus de 20% de brise d'est de nuit, et 15% et 45% respectivement le jour, de décembre à février. La brise de montagne de sud est reléguée au second plan, avec seulement 5% en fréquence, soit autant que les brises anabatiques. *De jour, durant cette période, les brises montantes sont rares. Elles passent par contre en mars à 35% des vents.* Elles proviennent de l'ouest (brise de pente ascendante) ou

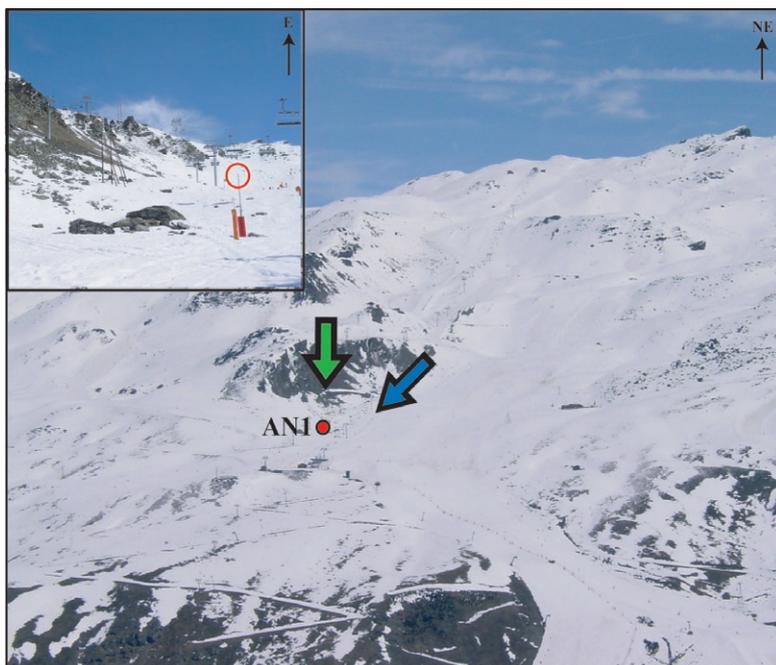


Photo IV.2 : Position de l'anémomètre 1 aux Menuires sur le versant ouest et directions des brises catabatiques, vallon de la Becca. En encadré, zoom sur les sondes.

Le cercle rouge entoure l'anémomètre.

La flèche verte montre la direction de la brise de pente descendante nocturne (nord-est).

La flèche bleue montre la direction de la brise de pente descendante diurne (est).

du nord-ouest (brise de vallée), suivant un processus diurne similaire à Aussois, de rotation de sud au matin (brise de montagne) au nord-ouest en fin d'après-midi. Il est alors intéressant de constater que la brise de pente descendante d'est se comporte alors comme une brise de montagne le matin. On peut en conclure que pendant les mois froids, il se forme un type de vent assez inédit dans sa constance sur les parties supérieures des grands versants ouest : **la brise de pente descendante diurne**.

Les vents synoptiques sont plus rares en fréquence, et viennent surtout du nord (presque 50%), de l'est et du sud-est (foehn). On retrouve les brises pour les vitesses faibles, et deux directions se distinguent pour les grandes vitesses : l'est et le sud-est (fig.IV.3.10). Mais on remarque un comportement particulier : entre 40 et 50 km/h, 80% des vents viennent de l'est, et 20% du nord-est. Puis au-delà, la tendance s'inverse. Ces vents forts sont forcément des foehns (par rapport aux directions), il semblerait donc que le relief soit en cause, en canalisant les vents de cette direction différemment en fonction de leur puissance. Les autres vents (nord et nord-ouest) soufflent plutôt en-dessous de 30 km/h.

Il faut établir finalement si les observations faites en ce point de mesure sont généralisables ou si ce sont des exceptions. Les fréquences des brises catabatiques sont vraiment importantes par rapport aux brises anabatiques, mais celles-ci reviennent dès mars. Quant à la brise de pente descendante diurne, nous pouvons nous poser la question du système plus général des directions des vents dans cette vallée. **A l'échelle du vallon, la brise diurne provient non plus de la pente la plus raide et la plus proche (vent de gravité nocturne), mais d'un relief canalisant issu d'une échelle juste supérieure (comme le vallon)**. Cette brise semble d'ailleurs se comporter comme une brise de montagne. **Cette relation brise de montagne/brise de pente descendante est primordiale pour comprendre le caractère catabatique des vents en hiver et en journée**. Car alors nous ne sommes plus dans une logique classique aux échelles de versant et de vallée, mais dans une logique d'interaction où l'échelle d'action se situe entre les deux précédents. Il doit exister aussi un niveau dans la vallée où les brises montantes et descendantes doivent se rencontrer. Ce niveau, aussi appelé **front de stagnation** (MONTI P., 2002),

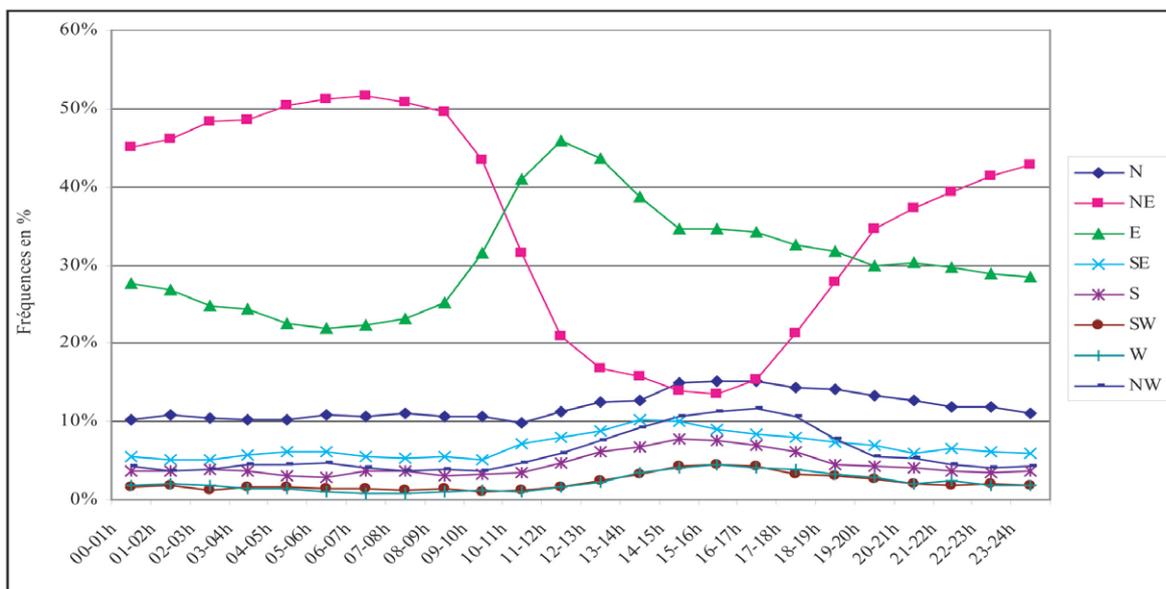


Fig. IV.3.9 : Evolution des fréquences des directions des vents par heure aux Menuires (anémomètre 1).

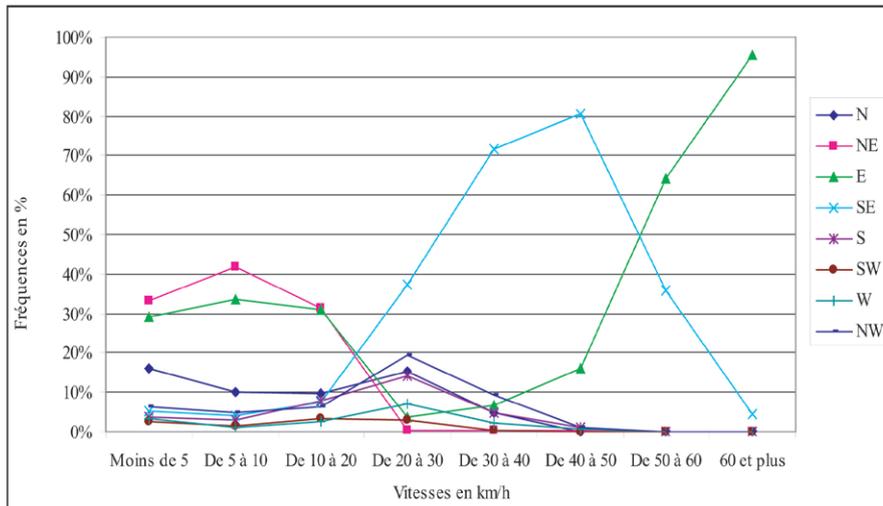


Fig. IV.3.10 : Evolution des fréquences des directions des vents en fonction des vitesses en km/h aux Menuires (anémomètre 1).

doit varier dans la journée et en fonction des conditions synoptiques (grâce à la classification Perret-Savoie nous pourrions ultérieurement déterminer ces relations). Enfin, si la brise de montagne continue de souffler la journée, c'est que les fonds de vallée ou les plaines n'arrivent pas à se réchauffer et que l'air au sol reste froid en montagne. Comme le voit, il est difficile d'établir un modèle car en hiver le système de brise varie fortement.

MOIS	HEURES	TYPES	MOIS	HEURES	TYPES
Décembre Janvier Février	17h-9h	Brise de pente descendante (nord-est)	Mars	18h - 8h	Brise de pente descendante (nord-est)
	9h-17h	Brise de pente descendante (est)		8h-11h	Brise de pente descendante (est)
				11h-13h	Brise de montagne
				13h-16h	Brise de montagne, brise de pente ascendante.
				16h-18h	Brise de vallée

Tab. IV.4 : Rythme des différents types de brises aux Menuires (anémomètre 1).

Le vent mesuré plus en aval à l'anémomètre 2 a un comportement presque identique, avec cependant plus de brises montantes pendant les mois froids. Sinon l'alternance entre les brises de pente diurne et nocturne existe aussi, mais subit les influences des brises montantes. La brise de montagne venant du sud commence à être plus forte, car on se rapproche du bas de versant.

IV.3.2.b.γ. L'amphithéâtre de Val Thorens

Sur le versant ouest (anémomètre 1, 2480m), on retrouve l'alternance entre deux directions correspondant à des brises de pente descendantes comme précédemment. La nuit, on mesure 50% de vent d'est, 12% de vent de sud-est et 8% de nord-est. Le jour, la brise de sud-est remonte à 25% alors que celle d'est diminue. De décembre à février, outre les vents synoptiques, on ne trouve presque que des brises de pente descendantes et quelques brises montantes de nord-ouest très rares. En mars, les brises anabatiques de nord-ouest atteignent 30% des vents, et suivent la rotation du sud au nord. La brise de montagne vient donc du sud-

est et du sud depuis le versant nord, ou en tout cas de la Combe de Thorens et du vallon de la Moraine. Encore une fois on remarque l'importance de la topographie et du vallon en amont qui draine la brise de montagne, présente surtout le matin, mais aussi parfois la journée.

Sur le versant nord (l'anémomètre 6, 2400m) le rythme nyctéméral est beaucoup moins évident. Une brise de pente descendante de sud reste presque constante avec 35% des mesures de décembre à mars, ce qui donne une brise sur deux qui vient de cette direction. Il existe aussi une brise sud-est (plus présente le matin), et de sud-ouest (l'après-midi). Ces brises de pente constituent pratiquement la totalité des vents mesurés. En mars, le système tourne aussi de la brise de montagne de sud-est et d'est au matin, puis passe par le sud et le sud-ouest et enfin finit par des brises montantes d'ouest et de nord-ouest. Il n'y a pratiquement jamais de vent de nord-est et de nord, les vents synoptiques arrivant du nord-ouest ou du sud-est (foehn). Le nord-ouest correspondant au débouché du cirque sur la vallée des Bellevilles.

*Les similitudes entre les versants des Menuires et de Val Thorens sont flagrantes : des brises de pentes descendantes nocturnes et diurnes majoritaires, avec une composante brise de pente/brise de montagne qui souffle le matin en priorité, et des directions qui «**tournent**» de l'est à l'ouest du matin à la fin de l'après-midi. On peut d'ailleurs se demander si la brise de montagne a ici une existence propre. Nous sommes dans sa zone de création, il serait donc plus juste de parler de **brises de pente descendantes diurnes qui tournent vers l'ouest** (fig.IV.3.11). Les brises montantes sont quant à elles rares sauf en mars où elles constituent environ 35% des vents l'après-midi, soit un peu plus que les brises de pente descendantes. Enfin l'enchaînement des brises pendant la journée se fait par la même rotation qu'aux Menuires, puisque nous sommes dans la même vallée.*

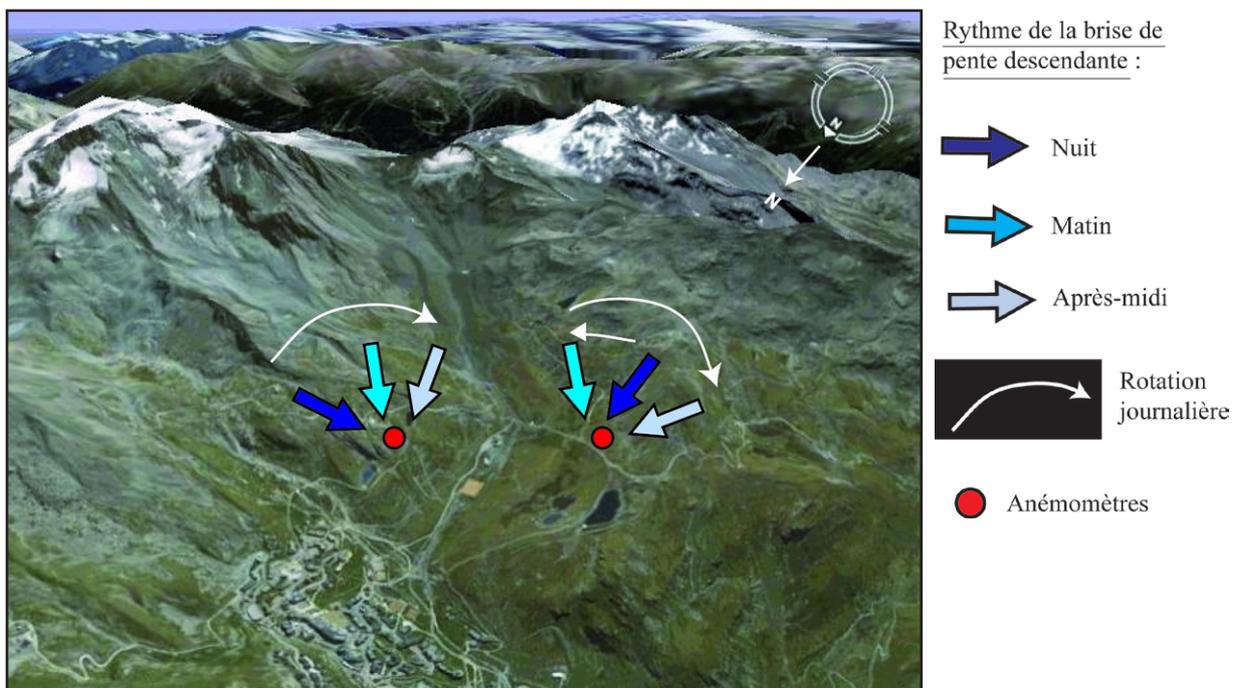


Fig. IV.3.11 : Directions des brises de pente descendantes et leur évolution diurne à Val Thorens, en plein hiver.

Anémomètre 1 (à gauche sur la figure), versant ouest.

Anémomètre 6 (à droite), versant nord.

Le matin, la brise provient du vallon de la Moraine situé au centre de l'image (flèche bleu ciel, direction sud-est), puis elle se décale vers le sud (versant ouest) et l'ouest (versant nord).

Image 3D : Google Earth

IV.3.2.c. Les hauts de versants : vents catabatiques et synoptiques

Aux Menuires, l'anémomètre 5 (2800m) est posé en haut du versant ouest près de l'arrivée du télécabine du Mont de la Chambre. Mais attention, la topographie ne permet pas de dire qu'il s'agit vraiment d'une situation de crête. Situé à une cinquantaine de mètre du point le plus haut, l'anémomètre est surplombé par une légère pente orientée au sud-ouest. La question est de savoir si cette petite pente peut créer une brise descendante ou si nous sommes en présence de vents synoptiques (ainsi que les brises de vallée).

Le graphique IV.3.12 montre bien la prépondérance d'un vent de nord-est, qui vient justement de la pente en aval, et qui ici peut être considéré comme une brise de pente descendante. En décembre et janvier, ce vent compte pour 40 à 50 % des vents qui soufflent en ce point. En février et surtout en mars, il est remplacé en journée par des vents d'est, surtout au matin, et des brises montantes d'ouest et de sud-ouest plus tard dans la journée. Ce vent d'est se comporte comme pour l'anémomètre 1 des Menuires, mais il est moins fréquent. Ces brises de pente descendantes doivent prendre naissance au-dessus du relief. Les autres directions sont bien représentées, avec 5% pour le plus faible (sud-est). Leurs vitesses montrent tous les vents synoptiques sauf ceux de nord, ce qui est étonnant, mais lié en fait à la topographie qui oriente les vents de nord au nord-ouest. Encore une fois, le foehn est le vent le plus véloce, et provient surtout du sud-est (fig.IV.3.13).

Fréquences des vents en mars à 14h :

- **15% de brises de pente descendantes de nord-est**
- **15% de brises de pente descendantes d'est.**
- **10% de brise de montagne de sud.**
- **20% de brises anabatiques.**
- **40% de vents synoptiques (de sud-ouest à nord-ouest).**

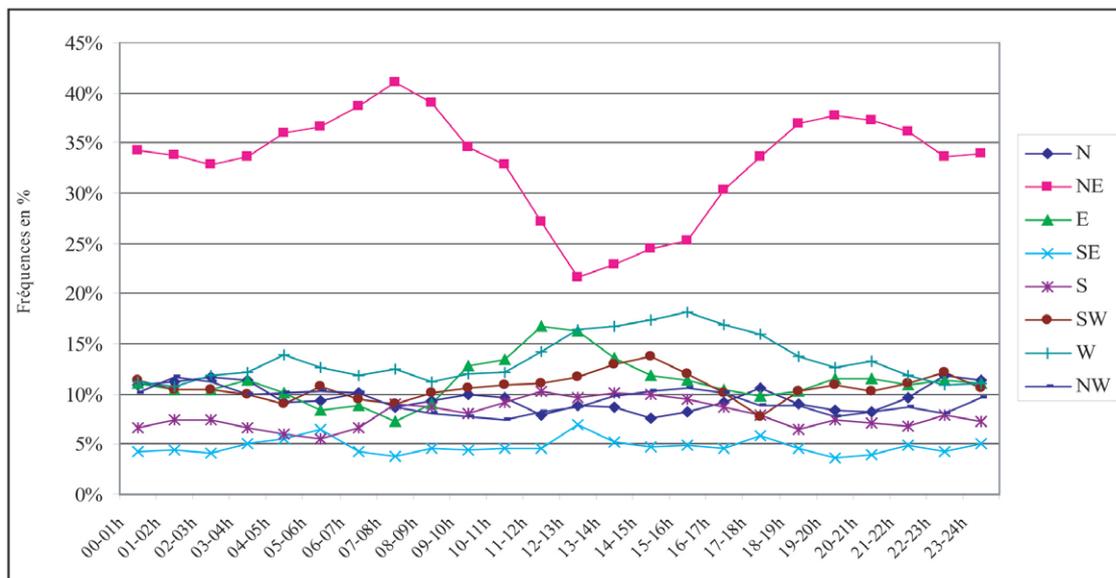


Fig. IV.3.12 : Evolution des fréquences des directions des vents par heure aux Menuires (anémomètre 5)

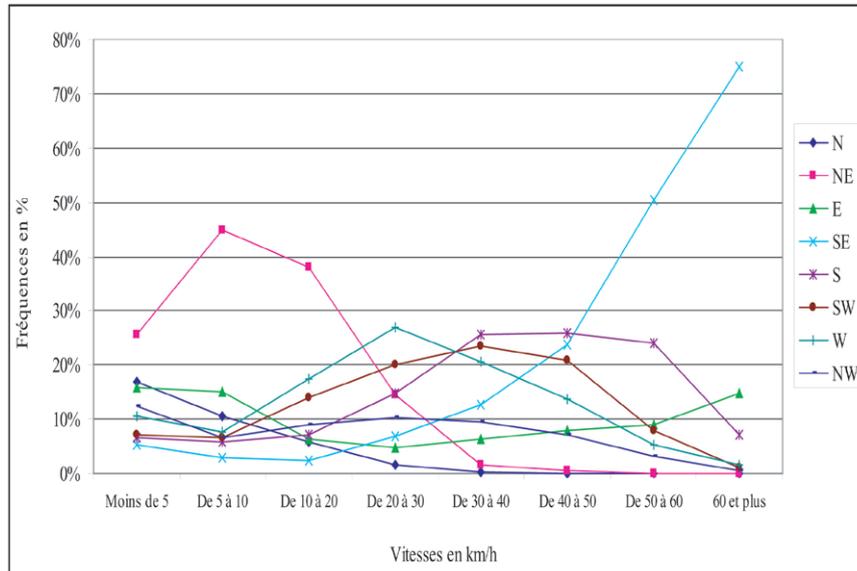


Fig. IV.3.13 : Evolution des fréquences des directions des vents en fonction des vitesses en km/h aux Menuires (anémomètre 5).

En conclusion, il semble difficile de faire la distinction entre les positions de milieu de versant et de haut de versant, car les brises de pente descendantes diurnes soufflent sur ces deux zones. C'est surtout la fréquence des brises montantes qui peut être corrélée avec l'altitude. Plus on monte sur le versant, plus leur fréquence diminue. Mais à Valloire, le versant nord est très influencé par des vents d'est diurnes (brise de montagne) provenant d'une vallée adjacente... Chaque lieu a bien sûr sa propre ventilation, mais ces détails sont marquants... Ils nous amènent à penser que les brises descendantes diurnes suivent **la course du soleil**, puis sont remplacées (surtout en mars) par les brises de vallée. Cette configuration nous donne un mouvement rotatif caractéristique.

IV.3.2.d. Les fonds de vallée : le règne des brises de montagne

IV.3.2.d.a. Le fond de la vallée des Bellevilles

Situé au niveau d'un replat en fond de vallée, l'anémomètre 4 (1770m) des Menuires a une position intéressante car ni trop sur le versant ni trop dans un espace encaissé. Par contre, il faut souligner qu'en amont la vallée se divise en deux, vers le cirque de Val Thorens et vers celui du lac du Lou. Les mesures ont été effectuées de 1999 à 2005, et vont nous permettre de mieux cerner les relations qui existent entre les brises de montagne et les vents de versants.

- Les brises de montagne nocturnes : avec une fréquence de 50% environ, le vent de sud-est se détache bien avec son rythme nyctéméral. Cette direction est celle du cirque de Val Thorens. Un autre vent de sud, c'est-à-dire dans l'axe de la vallée, souffle aussi dans 25% des cas. Enfin un vent d'est correspondant à la brise de pente descendante constitue 10% des cas. De nuit, les brises catabatiques oscillent donc entre ces trois directions.

• En journée de décembre et janvier, on retrouve là aussi une variation de direction de brises catabatiques car le vent de sud s'impose bien par rapport à celui de sud-est dans 35% des

cas. Un peu comme sur les versants, on passe à une brise de montagne, la direction correspondant parfaitement à l'axe de la vallée. 10% de brises de sud-ouest, provenant du cirque du Lou, sont remarquables. Lorsque les brises anabatiques se développent, après un matin avec cette brise de montagne, on distingue d'abord vers 12-13h une brise de pente descendante qui arrive du versant est, puis les brises de vallée se développent, mais seulement dans 15% des cas pour en janvier. Les jeux d'ombrage dûs à la course du soleil expliquent bien ce système de brise. **Enfinement, dans 50% des cas en janvier les vents diurnes mesurés au fond de vallée sont des brises de montagne, 15 à 20% sont des brises anabatiques et 30% des vents synoptiques de nord principalement** (fig.IV.3.14).

- En février et mars, seules les brises de pente descendantes d'est diminuent la nuit. Sinon, un phénomène particulier se produit : **de 13h à 16h, nous observons que la brise de montagne en provenance du cirque du Lou passe à une fréquence de 40% !** Avant et après, la brise de montagne de sud reste bien présente. Ce qui donne à cette brise un comportement pendulaire, semblable à la brise de pente descendante diurne observée sur le versant. Déjà remarquée les mois précédents, la fréquence de cette brise est multipliée par quatre, alors que les brises anabatiques ne sont que légèrement plus importantes (fig.IV.3.15).

En mars à 14h :

- **40% de brises de montagne de sud-ouest.**
- **20% de brises de montagne de sud.**
- **10% de brises de pente descendante d'ouest.**
- **15% de brises anabatiques.**
- **15% de vents synoptiques.**

Les vents synoptiques proviennent presque toujours du nord et presque jamais de l'ouest. L'orientation de la vallée et le versant abrupt d'est ne permettent pas aux vents d'ouest de souffler dans leur axe. Quant aux vitesses, les vents venant du nord restent inférieurs à 30 km/h, puis au-delà ce sont les vents de sud qui atteignent une très forte vitesse, correspondant encore une fois au foehn.

Le parallèle que l'on peut effectuer entre **le mouvement pendulaire** des brises de pente et des brises de montagne est intéressant car il met en lumière un mouvement général de suivi de la course du soleil. Peu remarquable en janvier, on observe ce phénomène surtout en mars. Et que l'on soit sur le versant ou en fond de vallée, ces deux types de brises catabatiques interagissent sans cesse. Quant aux brises de vallée, on remarque qu'elles soufflent surtout sur le versant ouest, en remontant la vallée, mais que leur fréquence est très faible au niveau de l'anémomètre 4.

Un schéma résume le mécanisme de pendularité de la brise de montagne dans la conclusion partielle de ce chapitre, figure IV.3.20. et 21. La figure IV.3.25 montre les différentes configurations possibles aux Menuires. Enfin à Valloire, ce mécanisme est tout aussi important mais les différences de topographie font apparaître des nuances importantes (fig. IV.3.22).

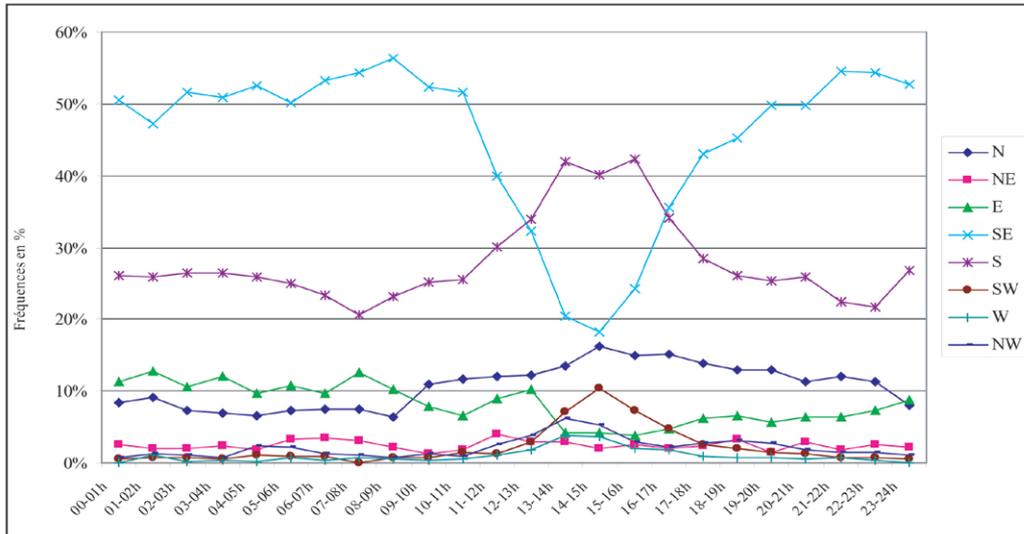


Fig. IV.3.14 : Evolution des fréquences des directions des vents par heure au mois de janvier aux Menuires (anémomètre 4).

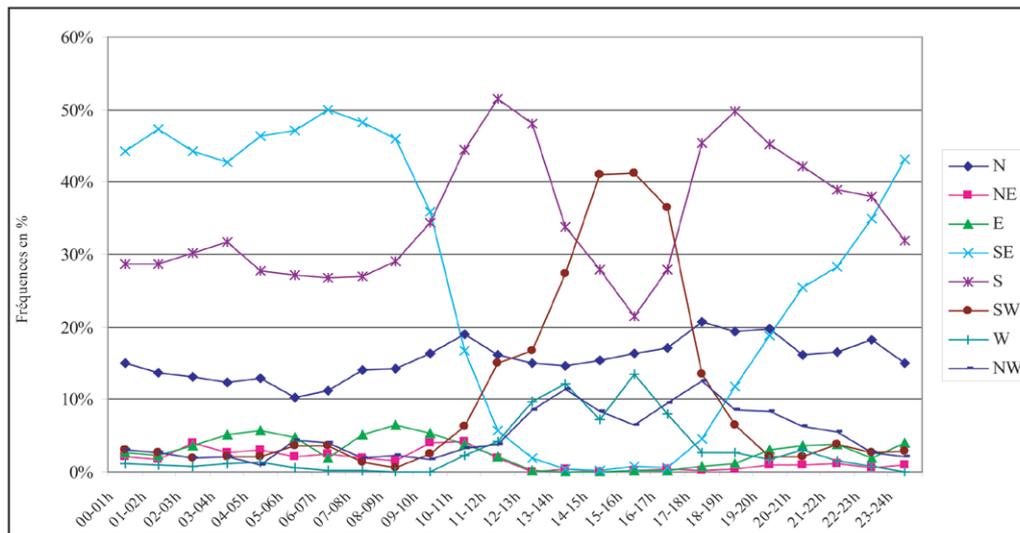


Fig. IV.3.15 : Evolution des fréquences des directions des vents par heure au mois de mars aux Menuires (anémomètre 4).

IV.3.2.d.θ. Les fonds de vallée à Valloire

La forme en Y du site de Valloire permet d’observer les directions des vents au sein d’un système topographique assez complexe. L’altitude des talwegs diminue du sud au nord, la vallée débouchant sur la vallée de la Maurienne, mais bien au-dessus du talweg de celle-ci. On a déjà remarqué que sur le versant nord de la Sétaz les brises de montagne alternent du sud-est (nuit et matin) au sud-ouest (jour). **On retrouve comme dans la vallée des Bellevilles cette pendularité journalière : quand les brises anabatiques n’arrivent pas à remplacer la brise de montagne, cette dernière oscille de l’est à l’ouest.** Notons que cette similitude est liée au fait que les deux vallées sont orientées de la même manière, du sud au nord, et que la forme en Y se retrouve aussi dans la vallée des Bellevilles, mais à une échelle inférieure.

Dans la vallée de la Valloirette, l'anémomètre 6 (1580m) est posé juste en contrebas du versant ouest. Nous disposons de seulement deux années de mesures, mais les résultats obtenus sont probants. La nuit, un vent de sud souffle venant du fond de la vallée de la Valloirette dans 50 à 70% des cas, soit une belle brise de montagne. On retrouve des vents de sud-est et d'est qui correspondent aux brises de pente descendantes du versant ouest (20%). En fin de matinée, une brise de sud-ouest se développe, assez peu en janvier (30%) mais plus en mars (presque 50%), et dure jusqu'à 16h environ. **On retrouve encore la pendularité de la brise de montagne.** On observe aussi la rotation des brises qui passent de l'ouest au nord et nord-est, avec 7% de brises de pente descendante d'ouest et environ 20% de brises anabatiques. Quant aux vents synoptiques, ils viennent principalement du nord.

En bas du versant nord-est de la Sétaz, la position de l'anémomètre 4 peut être considérée comme un fond de vallée, celle de l'Aiguille Noire, juste en amont des gorges de Neuvachette. La nuit, deux vents se partagent la ventilation : un vent de sud et de sud-ouest, oscillant entre les deux directions. Puis le matin le vent de sud s'impose généralement, correspondant à la brise de vallée, avant de laisser la place de nouveau à la brise de sud-ouest, qui elle correspond à une brise de vallée combinée à la brise de pente descendante (70% des vents l'après-midi). Il est impossible de les différencier, car sur ce versant la brise de pente est très présente de jour comme de nuit. En mars, les brises anabatiques (de vallée principalement) prennent plus d'importance avec une fréquence de 30%. On retrouve aussi la brise de pente descendante du versant ouest lorsque l'on passe en fin de matinée d'une brise de pente de sud-ouest à la brise de montagne de sud. **Ce phénomène est lié à l'exposition différentielle des versants.**

L'anémomètre 5, situé plus en amont sur ce même versant, n'a pas été introduit dans les observations de milieu de versant car le comportement du vent à cet endroit est très spécifique: **une brise de pente descendante quasi-généralisée** de sud-ouest, à une fréquence de 60%, complétée par une faible brise de montagne (10%) de sud. Cette brise de pente garde une direction très stable en décembre et janvier. En février et mars, elle perd 15% de sa fréquence, au profit à la fois de la brise de montagne et aussi des brises anabatiques qui deviennent plus fréquentes en journée et là aussi tournent par l'ouest pour arriver au nord (20% des cas). La position de l'anémomètre dans un vallon de versant assez encaissé, et orienté plutôt à l'est, génère donc de des brises de pente descendantes omniprésentes (voir fig.IV.3.24).

Finalement, le comportement du vent en fond de vallée (vallée orientée sud-nord) ressort bien de l'analyse des données : des brises de montagne nocturnes quasi-généralisées (parfois combinées avec des brises de pente descendantes) qui tournent vers le soleil durant la journée (et viennent alors du sud-ouest) plus on avance dans la saison. Lors des mois de février et surtout de mars, on observe le développement des brises de vallée dans 15 à 30% des cas. Ce qui nous donne, en enlevant les vents synoptiques, une journée sur trois où les brises de vallée se développent bien à cette époque. Et quand c'est le cas, le vent tourne toujours du sud au matin au nord l'après-midi en passant par l'ouest. La variabilité des brises est donc surtout liée à la présence ou non de brises anabatiques.

IV.3.2.e. Un cas particulier : l'anémomètre 2 de Valloire

Cet anémomètre se distingue des autres car il est placé au sommet d'un pylône de télésiège, vers 10m de hauteur. Situé en haut du domaine skiable du versant nord de la Sétaz, on peut dire que sa position est de milieu de versant. Les mesures montrent une plus forte variabilité des vents de toutes directions, et une plus grande représentativité des vents synoptiques. Toutefois, la brise de pente descendante de sud représente 30% des vents nocturnes, et le vent oscille fortement entre les directions d'est à sud-ouest. Au total, cela représente 70% des vents nocturnes (foehn enlevé). De jour, comme sur les autres points, on a environ 20% de brises anabatiques, avec des directions variables et difficiles à déterminer.

Plusieurs observations peuvent expliquer cette variabilité :

- l'altitude du point de mesure : on est à environ 7m de plus que les autres anémomètres. Cela suffit pour sortir de la zone d'influence de la brise de pente.
- les vents provenant des deux vallées adjacentes doivent souvent interagir avec la brise de pente.
- on peut s'interroger sur l'effet aérodynamique du pylône qui peut provoquer des tourbillons sur l'anémomètre.

IV.3.3 Quelques vitesses moyennes de brises...

Les brises thermiques ont des vitesses spécifiques à leurs types. Généralement, en été, les brises anabatiques soufflent plus fortement que les brises catabatiques, les brises de pente restant les plus faibles. Les fréquences des vitesses par rapport aux directions ont montré que les brises ne dépassent pratiquement jamais 20 km/h en hiver. Mais ces calculs, qui ont permis de séparer les brises thermiques des vents synoptiques, ne nous ont pas donné les différences de vitesse entre les types de brises. Pour obtenir ce résultat sur les vitesses moyennes des brises thermiques, nous avons calculé les moyennes des vitesses par mois et par heure. Ainsi, il est possible d'observer la variation des vitesses en fonction du déroulement de la journée et pour chaque mois de décembre à mars. Le problème principal réside dans l'élimination des vents synoptiques dans le calcul. Nous avons décidé de retirer les vitesses supérieures à un certain seuil déterminé en fonction des observations.

IV.3.3.a. Sur le versant d'Aussois

Le site dispose à la fois d'un grand nombre de mesures mais aussi, contrairement aux Menuires, d'une ventilation plus variée. Pour l'anémomètre 1, nous avons considéré qu'il reste au final environ 1% de vents synoptiques pris en compte qui sont inférieurs à 20 km/h. Pour chaque moyenne (mensuelle et horaire), nous avons environ 450 mesures. Pour l'anémomètre 5 en bas de versant, nous avons fixé le seuil plutôt à 15 km/h car les vents soufflent moins fort à cet endroit.

En haut du versant (milieu de versant à l'échelle de la vallée), **les vitesses moyennes enregistrées varient finalement assez peu en fonction des heures de la journée, sauf en mars où la brise de vallée devient plus vélocé.** Sur la figure IV.3.17, on observe bien cette

régularité au cours des mois de décembre à février, avec toutefois une légère baisse vers 12h ou en fin d'après-midi, correspondant à une faiblesse marquée des brises catabatiques, parfois au profit des quelques brises anabatiques qui peuvent parfois souffler ici (moyenne de 6,4 km/h pour les brises catabatiques, 7 km/h en février). Mais en mars, une forte augmentation s'opère l'après-midi, de 11h à 19h environ. Les brises de vallée atteignent 9,5 km/h en moyenne vers 15h (fig.IV.3.17).

En bas du versant, les brises anabatiques sont naturellement plus présentes. Pour tous les mois, les brises catabatiques restent à peu près à la même vitesse moyenne, entre 5 et 6 km/h. Mais en journée, on observe deux cas : en décembre et janvier, la vitesse tombe vers 4 km/h de 10h à 17h, avec une légère accélération en milieu d'après-midi. Cette chute correspond bien sûr au passage le matin à la brise de montagne et l'après-midi aux brises anabatiques. En février et mars, le schéma est clair : dès la fin de la brise catabatique, les vitesses chutent fortement jusqu'à 10h. La brise de montagne faiblit très clairement et on peut qualifier ce phénomène de *renverse*. Puis, les vitesses augmentent jusqu'à 7 km/h en février et 9 km/h en mars, le maximum étant atteint vers 15h, c'est-à-dire lors de l'installation de la brise de vallée.

Ces mesures montrent aussi que :

- La brise de montagne souffle en moyenne de 2 km/h de plus en haut qu'en bas du versant sud d'Aussois. L'essentiel des différences de vitesses mesurées entre ces deux points provient de cette brise. Quant à la brise de pente descendante, elle souffle à environ 1 km/h de plus en haut qu'en bas du versant. On ne peut savoir si cela est dû à la forêt ou à la topographie, mais cette différence est quand même très faible. On peut toutefois constater que les vitesses de cette brise sont très constantes durant la nuit, même s'il existe des variations rapides liées à la turbulence (DOBRINSKI P., 2005) qui échappent à notre échelle de mesure.

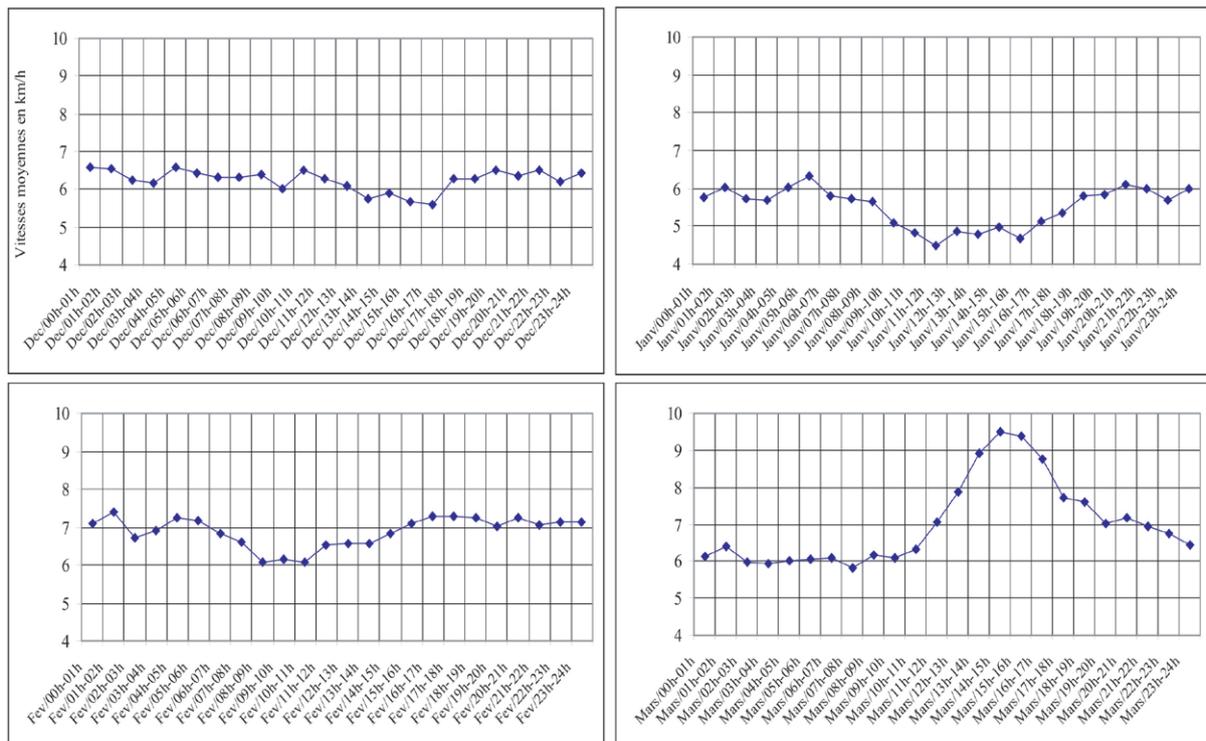


Fig. IV.3.16 : Evolution des vitesses moyennes des vents inférieurs à 20 km/h par mois (de décembre à mars) et par heure à Aussois en haut de versant (anémomètre 1).

Les vents inférieurs à 20 km/h peuvent être considérés comme des brises.

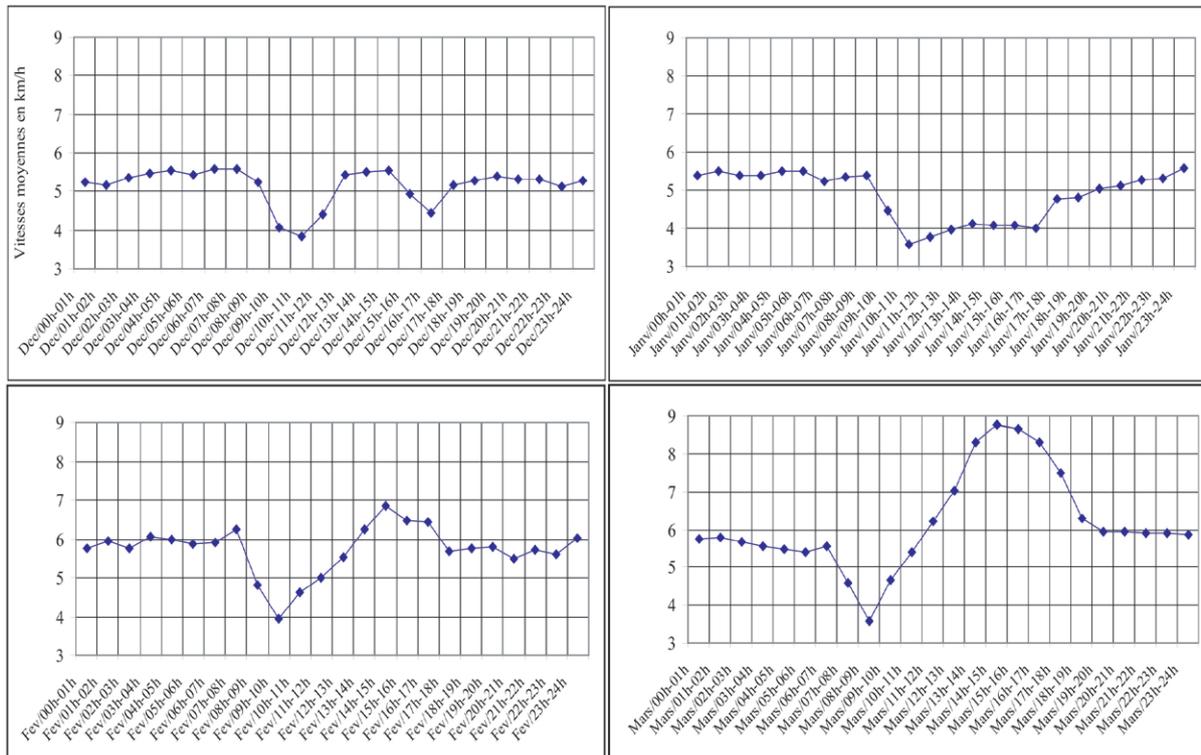


Fig. IV.3.17 : Evolution des vitesses moyennes des vents inférieurs à 15 km/h par mois (de décembre à mars) et par heure à Aussois en bas de versant (anémomètre 5).

Les vents inférieurs à 15 km/h peuvent être considérés comme des brises.

- Les brises anabatiques sont, de décembre à février, moins rapides que les brises catabatiques, les brises de montagne matinales restant les plus faibles.

IV.3.3.b. Aux Menuires

Contrairement à Aussois, les brises de vallée sont plus rares que les brises de montagne et les brises de pente descendantes diurnes. Il en résulte des courbes de vitesses moyennes légèrement différentes sans pic de vitesse en fin d’après-midi en mars. Ainsi il n’existe pas sur les quatre mois de l’étude d’évolution mensuelle significative. Nous avons donc représenté les résultats moyens par heure (fig.IV.3.18).

- Au milieu du versant ouest des Menuires (anémomètre 1), la vitesse moyenne de la brise catabatique de nord-ouest est légèrement supérieure à celle d’Aussois, vers 7,5 km/h. Dès 10h, la vitesse chute, puis atteint son minimum vers 15h et remonte ensuite. Les brises de vallée sont très rares en ce point et les brises de pente ascendantes très faibles en vitesse. La brise de pente descendante diurne souffle donc à 2 km/h de moins que sa consœur nocturne. Les brises de pente montantes (rares) font de même.

- Afin de mieux percevoir les vitesses moyennes de la brise de vallée, nous avons effectué le calcul en fond de vallée sur les mesures de l’anémomètre 4 (fig.IV.3.19). Les brises nocturnes, composantes entre les brises de montagne et brises de pente, soufflent en moyenne vers 6 km/h les deux premiers mois puis plus fort les autres mois. Cette augmentation de vitesse cor-

respond à une diminution de la vitesse moyenne des brises qui soufflent vers 12h en mars. Cela est lié au fait que l'on a deux systèmes différents :

- Un système de vents catabatiques nocturnes et diurnes en décembre et janvier, les vents nocturnes étant plus forts. La vitesse minimale est atteinte vers 15h, au moment où le système de mouvement gravitaire est le plus faible. On remarque aussi que la vitesse moyenne diminue légèrement pendant la nuit, phénomène connu pour les brises catabatiques d'été, mais finalement cantonné au fond de vallée dans nos sites d'étude.

- Un système de brises catabatiques et anabatiques qui se met en place en février et s'installe vraiment en mars. Les brises de vallée de fin d'après-midi (vers 18h) deviennent les vents les plus véloces (vers 7 km/h). Par contre, la vitesse minimale se situe vers 12h, ce qui correspond au passage entre les brises catabatiques et anabatiques, mouvement qui dure quelques heures.

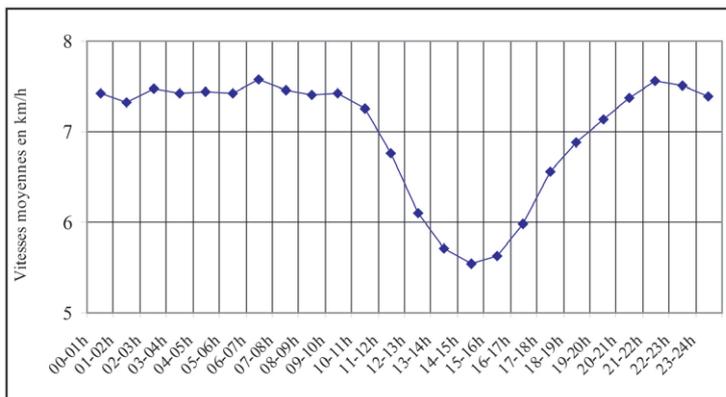


Fig. IV.3.18: Evolution des vitesses moyennes des vents inférieurs à 15 km/h par heure aux Menuires au milieu du versant ouest (anémomètre 1).

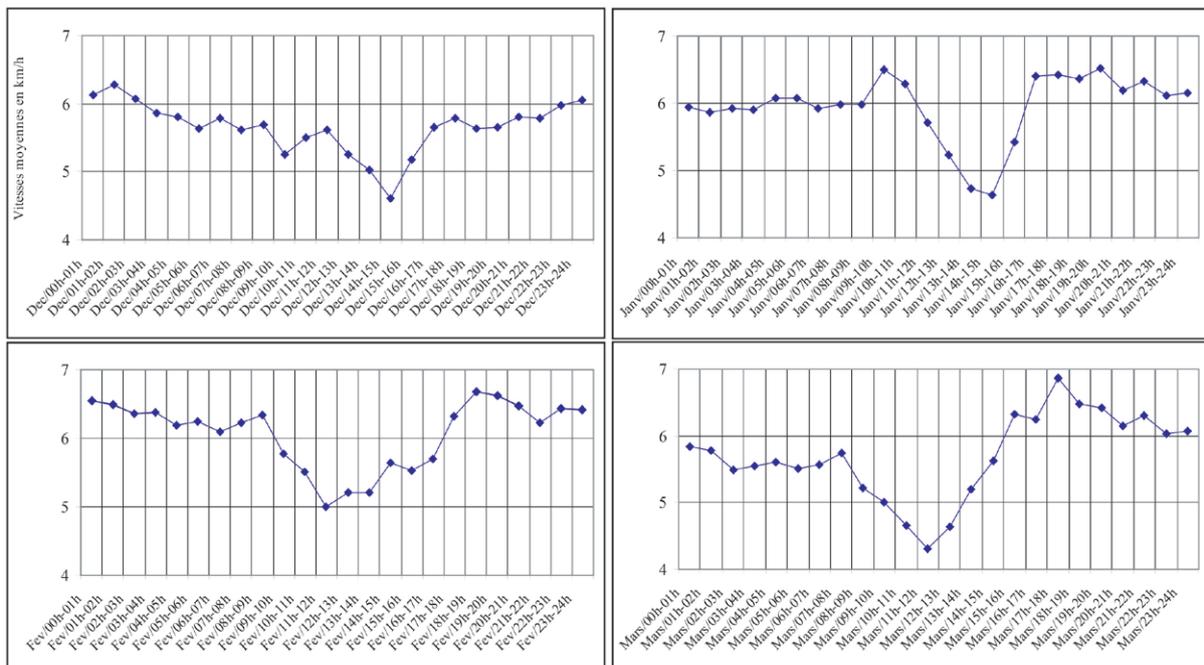


Fig. IV.3.19 : Evolution des vitesses moyennes des vents inférieurs à 15 km/h par mois et par heure aux Menuires en fond de vallée (anémomètre 4).

Synthèse sur l'étude des vents

La méthode utilisée avec les fréquences moyennes des directions des vents et des vitesses moyennes permet d'avoir un aperçu exhaustif du comportement des vents et surtout des brises en montagne. La méthode est rapide dans les calculs et différents types d'informations ressortent à plusieurs échelles, sans avoir besoin dans un premier temps de suivre les mesures de direction au pas à pas et pour chaque situation synoptique. L'usage des fréquences d'apparition est adéquat lorsque l'on travaille dans un système complexe car nous parlons en terme de probabilité.

Sans considérer les comportements moyens des mesures de chaque anémomètre, il ressort de l'analyse **un certain nombre d'observations uniques sur les brises en montagne et surtout en hiver qui ont été découvertes grâce aux données de l'enneigement artificiel**. Ces résultats nous apprennent dans un premier temps qu'il faut être extrêmement prudent à l'égard de toute généralisation et que **les modèles de brises diurnes déjà établis connaissent de fortes variations en hiver**. Il existe en fait plusieurs modèles de brise qui caractérisent leurs évolutions journalières, stables en plein hiver, mais très variables dès que le printemps approche. Nous allons synthétiser les facteurs les plus importants qui expliquent les mécanismes des brises thermiques, puis nous identifierons de façon précise les types de brises et leur variabilité.

- L'influence de la topographie et la course du soleil :

Chaque site connaît sa propre ventilation, mais certains comportements communs peuvent nous permettre de tenter une synthèse. Topographiquement, nous avons remarqué des différences entre les fonds de vallée, les bas de versants, les milieux de versant et les hauts de versants. A une échelle plus fine, les micro-reliefs convexes ou concaves conditionnent à la fois les écoulements divergents ou convergents sur le versant mais aussi la prise aux vents de vallée, qu'ils soient des brises de montagne ou des vents synoptiques. L'orientation et la forme des vallées sont primordiales car elles conditionnent l'évolution diurne des brises dans leur direction (directions tournantes en fonction de la course du soleil) et la fréquence des brises de montagne. La forme du début et de la fin de la vallée, ou la présence de vallée transversale, sont autant de facteurs à rajouter pour comprendre les contraintes qui s'appliquent aux systèmes de brises. On peut tout de même remarquer que les versants nord ont un système de brises catabatiques puissants qui empêche les brises anabatiques de monter vers les crêtes, contrairement aux versants sud. Les versants ouest et est diffèrent sur deux points liés à l'exposition et la course du soleil qui influencent l'heure d'apparition des brises (on peut toutefois extrapoler sur les versants est en supposant que les brises de vallée sont assez rares). **La topographie et l'orientation d'une vallée ou du versant, ainsi que la course du soleil sont donc trois facteurs primordiaux pour comprendre le développement des différents types de brises en dehors des mouvements thermiques.**

La topographie conditionne aussi, avec les conditions synoptiques, la présence des inversions de température, qui favorise les brises catabatiques en hiver et en journée. Même s'il existe une inversion moyenne généralisée sur la Savoie en hiver, il peut faire très froid dans des vallées internes encaissées même dans l'après-midi, ce qui ne permet pas à certaines brises de

vallée de souffler, contrairement à une grande vallée alpine ouverte sur les plaines.

- Les facteurs cosmiques :

Ils sont liés à la révolution de la terre autour du soleil, entraînant un allongement des jours avec la saison, et un réchauffement des fonds de vallée et des plaines. Ces deux aspects se combinent et provoquent **une augmentation considérable des brises anabatiques de décembre (où elles sont rares) à mars (où elles sont majoritaires) pendant les après-midi**. Les pics de fréquences des brises diurnes (qu'elles soient montantes ou descendantes) s'étalent dans la journée au fur et à mesure que les mois passent. A Aussois, le pic fréquentiel de la brise de montagne est à 13-14h en décembre, et 10-11h en mars, alors que sa fréquence ne bouge pas (pic à 25% des vents).

- Types de brises et variations spatio-temporelles :

La séparation des brises thermiques en fonction de l'échelle topographique de la vallée et du versant semble être un découpage de l'information un peu rapide. Nous devons nuancer en fonction de l'époque de l'année et de la position à la fois dans la vallée mais aussi sur le versant:

- En janvier, **les brises catabatiques deviennent pendulaires** : elles suivent le versant (brise de pente) ou le fond de vallée (brise de montagne) la nuit, puis changent légèrement de direction **en fonction de la course du soleil et de l'orientation de la vallée**. Seuls les bas de versants et les fonds de vallée des grandes vallées alpines ou au début des hautes vallées alpines peuvent ressentir le souffle d'une brise de vallée...

- En mars, sur presque tout le versant, on assiste alors à **un système rotatif** car les brises anabatiques viennent forcer le système dans le début de l'après-midi. On assiste alors à l'enchaînement suivant (voir fig.IV.3.23 pour un exemple à Aussois) :

Brise de pente descendante (nuit)

Brise de montagne (matin)

Brise de pente ascendante (début après-midi)

Brise de vallée (fin d'après-midi).

Nous avons remarqué que des directions intermédiaires peuvent perdurer quelques heures entre deux brises de directions bien établies. Alors nous ne passons plus entre un système de quatre brises, mais dans un **système tournant** où chaque jour connaît une période différente de transition entre les brises. **De plus, toutes ces brises interagissent au cours de la journée, et forment des «fronts de stagnation» très dynamiques**. Interfaces entre deux ou plusieurs brises «opposées», ils expriment la complexité de la ventilation des vallées alpines quand les conditions printanières se développent. Il devient donc difficile d'établir un modèle fiable sans prendre en compte d'autres facteurs que la position du soleil et les heures de la journée. C'est ce que nous essayerons de déterminer dans le prochain chapitre.

• Caractéristiques des différentes brises et des vents synoptiques :

- La brise de pente descendante : *omniprésente la nuit*, sa direction dépend de la pente la plus proche. Suivant le point de mesure, elle reste très constante en direction et vitesse dans les vallons mais devient très variable sur les parties convexes du relief. La topographie influence complètement son écoulement.

- La brise de pente descendante diurne : soufflant la journée de 10h jusqu'à la fin de l'après-midi, on la retrouve surtout en haut et au milieu des versants, laissant sa place à la brise de montagne vers une limite située à 300m au-dessus du fond de vallée. Surtout présente de décembre à février, elle forme avec la brise de pente nocturne un système nyctéméral. *Sa direction diurne correspond à celle de la brise nocturne mais avec un changement lié à la course du soleil et au relief local (vallon), en prenant environ 45° vers cette composante (vers l'ouest pour une vallée orientée sud-nord)*. Sa vitesse diminue vers le milieu de l'après-midi jusqu'à devenir presque imperceptible, avant de reprendre son cycle vers la brise de pente nocturne. Ce phénomène a été remarqué sur tous les sites de l'étude.

- La brise de montagne : elle se manifeste surtout le matin. Sur les versants, elles perdurent parfois toute la journée en lieu et place des brises de pente ou de vallée. A Aussois, elles constituent 25% des vents diurnes, et un vent sur deux le matin. Aux Menuires en fond de vallée, elles représentent 80% des brises diurnes en mars, et vers le haut de versant 10% seulement. **La brise de montagne et les brises de pente descendantes sont donc les deux vents majoritaires en montagne et en hiver.**

- Les brises anabatiques : quasi-absentes en décembre et janvier, elles se développent surtout à partir de février. Après la brise de montagne matinale, on observe d'abord la brise de pente ascendante puis la brise de vallée. Leurs vitesses sont très faibles puis augmentent en mars et deviennent alors plus fortes que les brises catabatiques, surtout pour la brise de vallée.

En moyenne, on retrouve donc sur les versants de montagne en hiver 50% de brises catabatiques (brises de pentes descendantes nocturnes et diurnes, brises de montagne), 20% de brises anabatiques (brises de pente ascendantes et brise de vallée) et 30% de vents synoptiques. Vers le haut des versants, les brises anabatiques passent à 10%, remplacées par des brises de montagne ou des vents de compensation. **La variabilité des brises augmente donc lorsque l'on se situe entre le fond de vallée et le milieu de versant, car c'est la tranche la plus exposée aux brises de vallée** (surtout sur les versants ouest et sud sur nos sites d'étude).

- Il n'existe pas de renverse lorsque les brises catabatiques perdurent toute la journée et que leur écoulement est assuré par de l'air très froid. On observe juste **une diminution de la vitesse des brises dans l'après-midi quand les conditions thermiques ne sont plus favorables au maintien de l'écoulement gravitaire**. Mais en mars, avant l'installation des brises de vallée, on observe bien les vitesses diminuer en dessous de 5 km/h. A cette vitesse, on atteint la limite de la sensibilité de l'anémomètre. On peut alors parler de renverse car le vent a presque cessé, et qu'il va changer de direction.

- Les vents synoptiques : ils constituent environ 20 à 30% des vents mesurés entre décembre et mars. La canalisation par les vallées est très importante, d'autant plus si l'on se situe près des fonds de vallée. Pourtant, les mesures de l'anémomètre 5 des Menuires montrent que même à quelques mètres des crêtes, les brises descendantes sont très importantes. En janvier par exemple, elles constituent 40 à 50 % des vents mesurés ! Cela confirme le fait que pour bien capter les vents synoptiques sans les brises, il faut effectuer les mesures bien au-dessus des crêtes, avec des anémomètres qui mesurent la composante verticale du vent.

- Le foehn : c'est le vent qui souffle le plus fortement et provient du sud et du sud-est sur les sites des Menuires et de Valloire. Par contre, à Aussois, sur un versant face au vent, dans une grande vallée alpine orientée est-ouest, il provient de l'est et sa vitesse est souvent moins forte que les vents synoptiques.

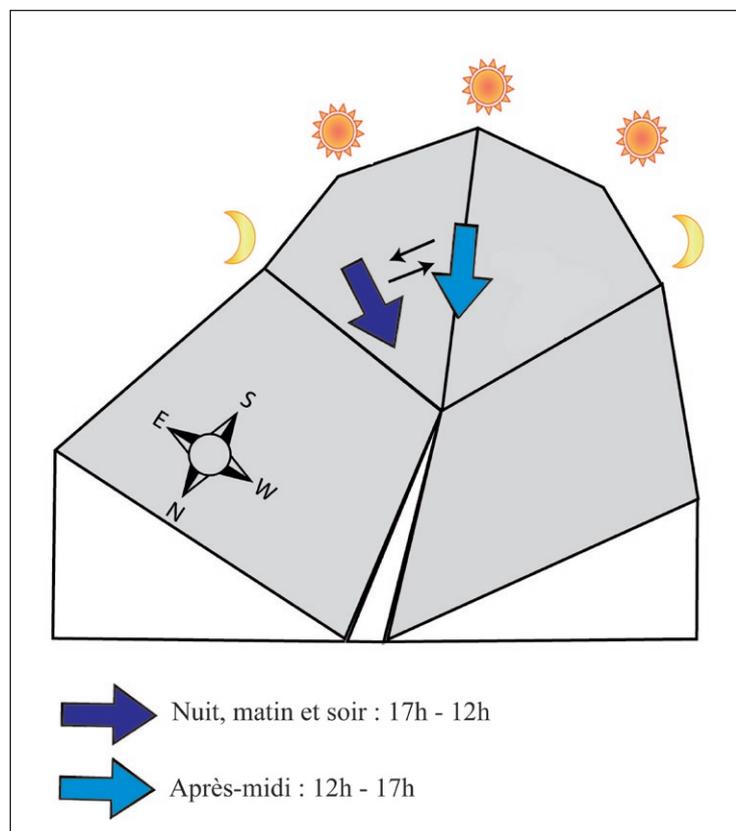


Fig. IV.3.20 : Système d'aller-retour de la brise de montagne en fonction de la course du soleil dans une vallée fermée au sud au mois de janvier.

Pas de brises anabatiques durant la journée. La topographie s'inspire de celle de la vallée des Bellevilles.

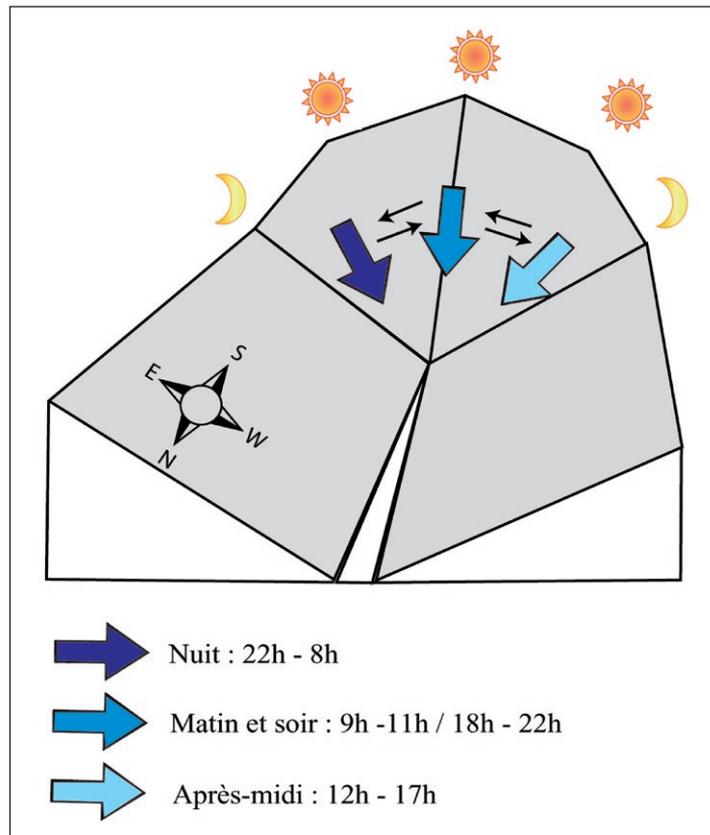


Fig. IV.3.21 : Système d'aller-retour de la brise de montagne en fonction de la course du soleil dans une vallée fermée au sud en mars
 Pas de brises anabatiques durant la journée. La topographie s'inspire de celle de la vallée des Bellevilles.

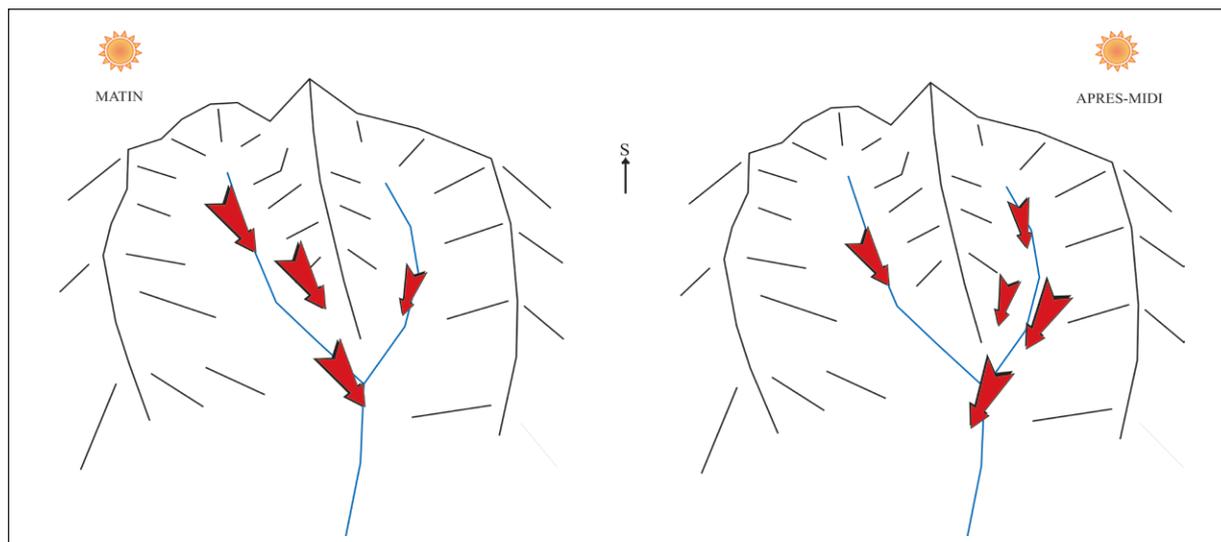


Fig. IV.3.22 : Système similaire d'aller-retour de la brise de montagne en fonction de la course du soleil, mais dans deux vallées adjacentes.

La ventilation lors de ces journées froides et ensoleillées alterne entre la vallée située à l'est et celle située à l'ouest (topographie de Valloire sur la figure). Sur les hauts versants ou dans les vallons encaissés, les brises de pente descendantes diurnes continuent de souffler.

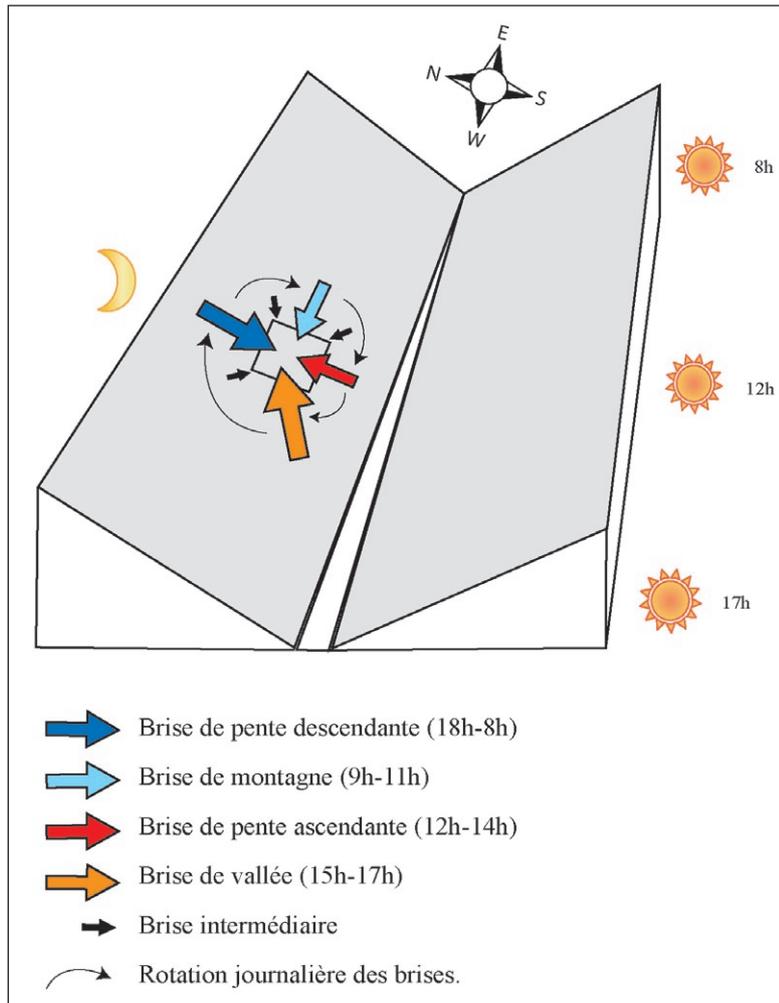


Fig. IV.3.23 : Système de rotation des brises thermiques en mars ou lors de belles journées ensoleillées en fonction de la course du soleil dans une grande vallée alpine orientée d'est en ouest.

Ce système rotatif se retrouve dans toutes les vallées mais son sens dépend de l'orientation de la vallée par rapport au soleil. L'intensité des vents anabatiques dépendra alors de la hauteur du point de mesure par rapport au fond de vallée.

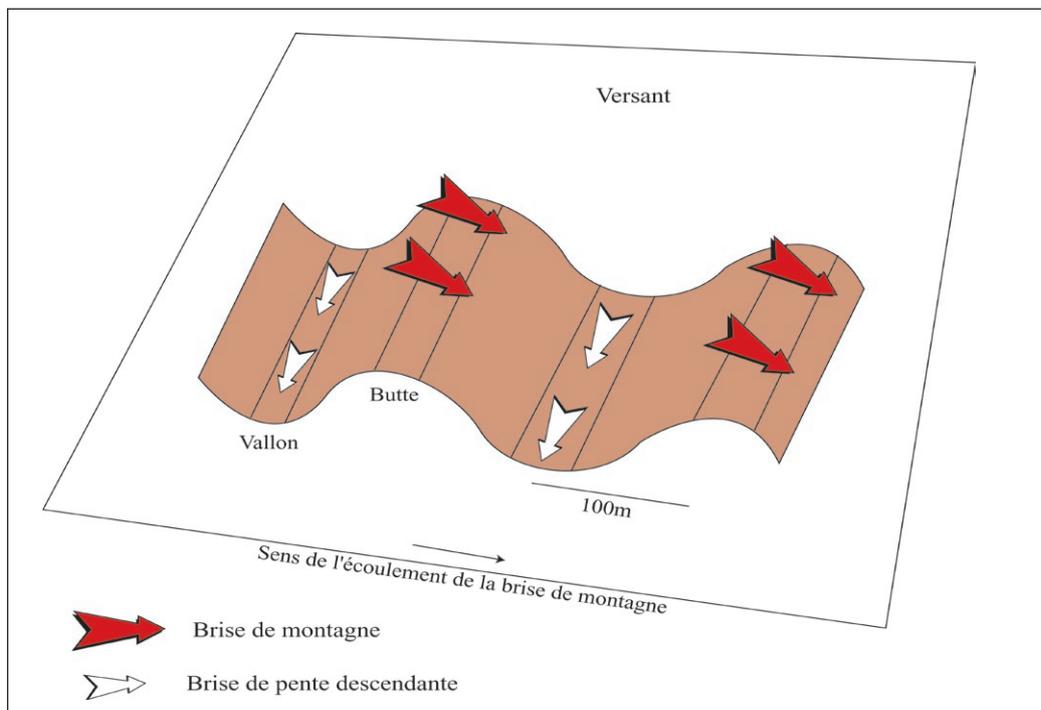


Fig. IV.3.24 : Persistance des brises de pente descendantes diurnes dans des vallons encaissés lorsque la brise de montagne souffle dans l'axe de la vallée.

On trouve un exemple flagrant à Valloire sur le versant nord-est de la Sétaz.

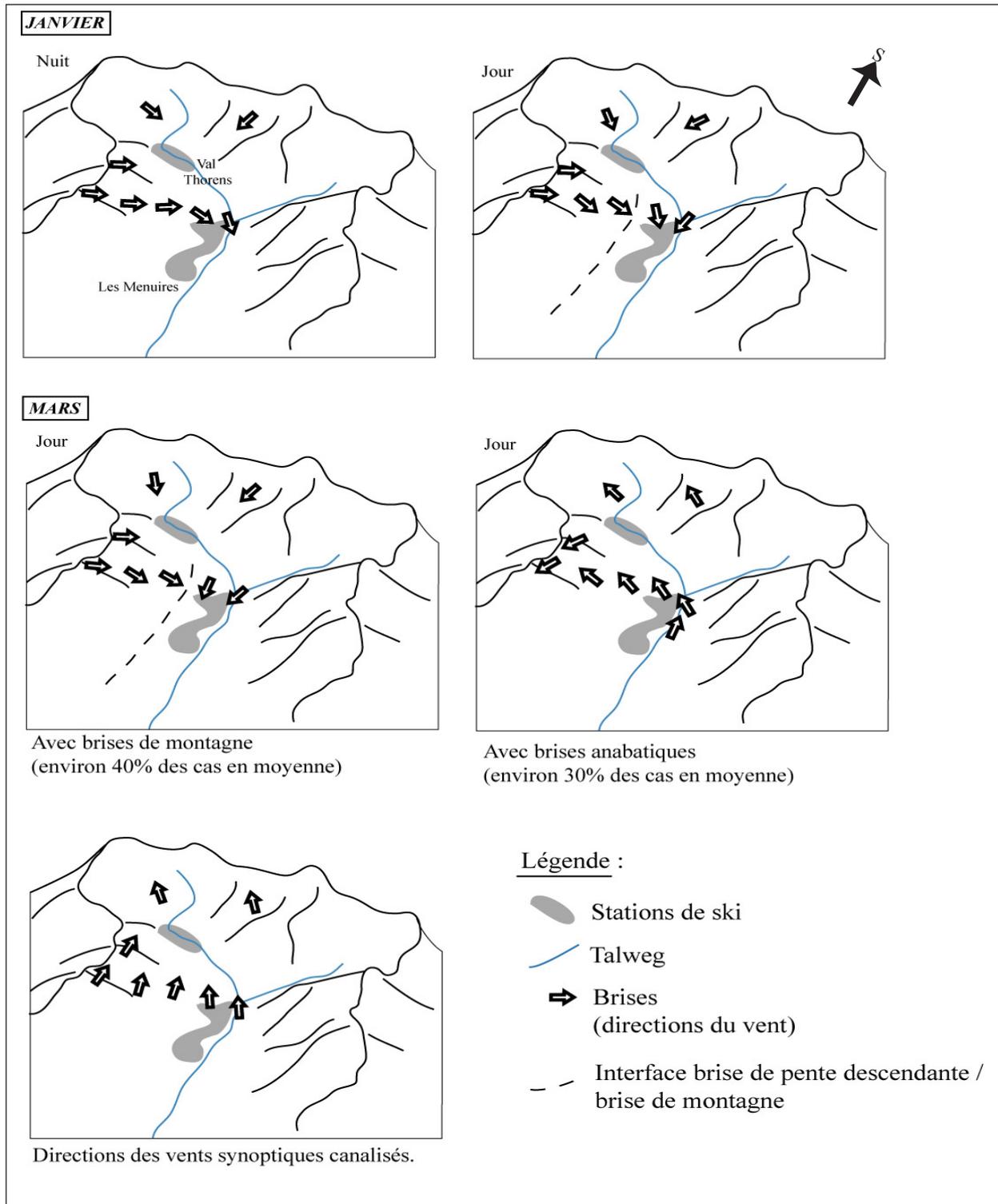


Fig. IV.3.25 : Directions des vents mesurés aux Menuires et à Val Thorens dans la vallée des Bellevilles (orientée sud-nord).

En mars, les directions moyennes nocturnes sont similaires à celles de janvier.

La figure «directions des vents synoptiques canalisés» est reliée à des flux de nord-est à ouest.

Conclusion

L'analyse du comportement moyen des variables climatiques telles que la température et le vent, basée sur plusieurs années d'enregistrement, nous a apporté un grand nombre d'éclaircissements sur la climatologie hivernale des versants et des vallées. Au-delà de l'étude de l'évolution des températures depuis 15 ans - montrant une tendance au refroidissement en haute-montagne et la difficulté finalement de comparer les moyennes entre les différents sites - la spatialisation des températures à échelle fine et l'étude de leur variabilité nous ont fait comprendre *le rôle des formes topographiques à différentes échelles et leur emboîtement, qui modifie l'influence de l'altitude et de l'exposition sur les valeurs minimales et maximales.* Plus précisément, on a remarqué que la «ceinture chaude» liée à l'inversion de température joue un rôle prépondérant sur les gradients thermiques. Mais dans l'amphithéâtre de Val Thorens, les versants ont des particularités thermiques étonnantes, nous amenant à relativiser l'existence de comportements thermiques identiques entre des formes de relief similaires. *Seule une étude systématique du maximum de domaines skiables serait à même de nous donner des réponses plus précises.*

Les brises thermiques hivernales, dont l'étude des mécanismes a été facilitée par le calcul des fréquences des directions en mois/heure, nous ont montré à la fois des comportements très contraints par les conditions climatiques et le relief (au point où les brises de pente descendantes peuvent s'imposer pendant plusieurs jours), mais aussi une très grande variabilité en fonction des positions topographiques (encore une fois à des échelles différentes) et de l'époque de l'hiver. De multiples observations ont été faites, *mettant en lumière des mécanismes jusqu'ici inconnus*, comme par exemple **l'influence de la course du soleil sur la direction des brises catabatiques, ou encore l'évolution de la fréquence des brises de vallée avec l'arrivée du printemps.** Un modèle qui combinera ces résultats avec les analyses du prochain chapitre sera proposé à la fin de cette thèse.

Afin de mieux caractériser les relations entre les paramètres climatiques et des facteurs de grande ou de petite échelle, nous allons observer leur comportement en fonction des types de temps et de situations météorologiques particulières dans le chapitre V. Les phénomènes propres au milieu montagnard comme les inversions de températures seront étudiées en détail, ainsi que l'évolution des températures à échelle fine lors de belles journées ensoleillées ou lors d'épisodes de foehn ou de tempête. Finalement, notre démarche de régression d'échelle et de modélisation empirique atteint dans le prochain chapitre son niveau le plus complexe car nous allons essayer de répondre aux différentes problématiques posées dans l'introduction. L'étude des moyennes nous ayant donné des pistes très intéressantes, il est temps de vérifier nos observations avec l'analyse et la mise en système des paramètres atmosphériques locaux enregistrés par les installations d'enneigement artificiel.

CHAPITRE V

CLIMATOLOGIE HIVERNALE À ÉCHELLE FINE DES VERSANTS ET DES HAUTES VALLÉES ALPINES

Introduction

Ce dernier chapitre nous amène à l'étude des relations entre les conditions synoptiques et le comportement des paramètres météorologiques étudiés (températures, humidité relative, vent), les relations qui se tissent entre eux et leur variation spatiale en fonction des facteurs physico-géographiques. Les résultats obtenus viendront répondre aux problématiques posées au début de la thèse, en complément des observations faites dans le chapitre précédent.

Outre la classification Perret-Savoie générée dans le chapitre III, les cartes synoptiques de Météo-France, les bulletins climatologiques mensuels, les cartes synoptiques des pressions et des températures (sites de *www.westwind.ch* et *www.microclimat.net* avec des archives complètes, les «quicklook» de NOAA pour les images satellites sur *www-grtr.u-strasbg.fr*) vont nous permettre de balayer un bon nombre d'échelles allant de l'Europe au département. Nous nous servirons de ces informations pour prendre **des situations «classiques»** : anticyclones puissants ou plus doux, passage de fronts, tempêtes, chute de neige, périodes de foehn... (Ces situations choisies devaient répondre à plusieurs critères, dont l'absence de lacune de données sur l'ensemble des domaines skiables, la représentativité par rapport aux situations similaires...). **La réaction des paramètres lors de ces épisodes sera mise en évidence afin de mieux cerner la climatologie de nos sites d'études.**

Les phénomènes particuliers engendrés par ces situations seront précisément étudiés, comme **la dynamique des inversions de température, l'influence des vents de gradient sur les brises ou encore l'effet de foehn sur les différents sites. Nous spatialiserons ensuite les températures mesurées par toutes les sondes dans la vallée des Bellevilles en fonction de six types de temps que l'on retrouve couramment durant l'hiver.**

Dans une deuxième partie, nous établirons **un modèle de prévision du comportement journalier des températures à différentes altitudes et des inversions aux Menuires en fonction des types de temps de la classification Savoie et des types de circulations Perret.** La simplification d'échelle provoquée par le relief sur les paramètres locaux peut permettre ce genre de modélisation. Nous testerons cette technique avec des enchaînements anticyclone/dépression pour intégrer la dynamique météorologique dans notre analyse. Nous verrons que l'évolution des températures, de l'humidité relative et des vents au cours du temps se calque sur des comportements précis qui dépendent des conditions synoptiques et des types de temps. Le choix du domaine des Menuires se base sur la topographie (fond de vallée - crête).

Toutes ces analyses et mises en relation nous amèneront à synthétiser dans une troisième partie **les influences des facteurs physico-géographiques sur la variation spatiale des températures et du vent.** Nous verrons l'importance des micro-reliefs sur la modification de la ventilation locale et les conséquences induites sur les températures.

Enfin, nous établirons **un modèle empirique du mécanisme de brises hivernales** basées sur les probabilités d'apparition en fonction de facteurs cosmiques et météorologiques. Nous verrons que la variabilité des types de brises diurnes augmente fortement durant la saison hivernale.

V.1 RÉACTIONS DES PARAMÈTRES LOCAUX LORS D'ÉPISODES ATMOSPHÉRIQUES PARTICULIERS

Les températures, l'humidité relative et le vent sont déterminés en partie par les conditions synoptiques et par la stabilité ou l'instabilité de l'atmosphère. Avant d'observer le comportement de ces paramètres sur les versants en fonction de ces conditions, et de faire ressortir des phénomènes particuliers, rappelons quelles relations d'ordre général ont pu être constatées durant l'étude des données météorologiques, dont sont issus ces constats :

Influence des conditions synoptiques :

En hiver, on retrouve toujours une même dynamique au long de la saison dans l'évolution des températures entre 1500 et 3000m sur les versants :

- En novembre/décembre : fronts actifs d'ouest et foehn se succèdent entre des anticyclones peu puissants. Les températures minimales peuvent descendre jusqu'à -10°C à la faveur d'un front froid mais remontent vite.

- En décembre/janvier/février : ce sont les fronts froids qui font descendre les températures, parfois de manière spectaculaire (jusqu'à -25°C vers 2800m, -20°C vers 1500m). Puis les températures remontent quand l'anticyclone s'installe jusqu'à ce qu'un autre front arrive. Dans ce cas, les températures minimales se maintiennent vers -10°C dans des flux orientés au nord, ou entre -10°C et 0°C s'il y a peu de fronts froids et des flux d'ouest. Les anticyclones de type 6/C1 peuvent rester une semaine.

- En mars : il y a moins de perturbations et les températures minimales peuvent dépasser 0°C , après de lentes remontées liées à des flux de sud et de fronts de plus en plus chauds.

L'étude des gradients thermiques :

Les températures évoluent avec l'altitude et le fait de disposer de plusieurs points de mesures le long des pentes permet de caractériser les états de l'atmosphère (malgré l'influence du relief et de la couverture neigeuse sur les températures, le gradient ne change pas significativement). Les courbes de températures ainsi obtenues en fonction du temps reflètent en partie les conditions météorologiques. On distingue en synthétisant deux cas principaux :

1) Les températures décroissent avec l'altitude par atmosphère instable (les courbes de températures sont alors «parallèles» sur un graphique, en fonction de l'altitude, par type dépressionnaire et passages de fronts). Le gradient est généralement contenu entre $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ et $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Ce gradient pseudoadiabatique est parfois élevé à cause d'un réchauffement ou d'un refroidissement local, mais c'est un cas particulier lié aux conditions hivernales, à l'influence du sol et au relief. Quant aux cas extrêmes ($> -1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), correspondant à un gradient suradiabatique, on le rencontre souvent le lendemain d'une transition front froid/anticyclone, vers 12h, lorsque le soleil réchauffe fortement les fonds de vallée alors que les sommets restent froids. Enfin le foehn a un fort effet sur le gradient qui s'approche alors de $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, comme

pour une atmosphère instable par temps perturbé.

2) Les températures réagissent au soleil en créant des «pics» journaliers significatifs, avec des inversions apparentes (gradient nul) ou réelles (gradient positif) durant la nuit et le matin. (nous verrons les modalités de leur apparition). Les amplitudes thermiques journalières sont alors très fortes. Dans des conditions anticycloniques assez douces (-5°C la nuit, 10°C le jour à 2000m), le gradient nocturne peut avoisiner les $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, mais c'est souvent la valeur maximale car les conditions d'ensoleillement et les inversions nocturnes rendent l'atmosphère assez stable du fond de vallée jusqu'aux crêtes.

Les vents : en résumant, les brises thermiques sont provoquées par des conditions stables, les vents synoptiques par les instables (voir chapitre précédent).

V.1.1 Conditions anticycloniques et inversions thermiques

Il existe plusieurs conditions anticycloniques qui dépendent principalement de la position des centres d'actions qui vont diriger les flux, comme précisé dans la classification Perret. En hiver en Savoie, ce sont les types 6 qui sont les plus présents, correspondant à des régimes déterminés par des anticyclones d'altitude, se déplaçant du centre de l'Europe vers le nord des îles britanniques. Généralement le temps est beau et les températures froides. Puis on trouve des flux de sud au nord anticycloniques (types 1 à 5), et les retours d'est (6ef, 1b). Il est évident que plus le flux provient du sud plus les températures sont élevées. Mais en plein hiver ces situations restent rares. Le profil des températures sur le versant évolue peu pendant ces périodes anticycloniques, si ce n'est les inversions qui connaissent des évolutions nocturnes assez variées en fonction du réchauffement ou du refroidissement du fond de vallée, ou des températures de la masse d'air en altitude. On distingue d'ailleurs **les inversions réelles ou apparentes**, en fonction du gradient thermique (voir fig.V.1.2) (KERBIRIOU M.A., 2004).

Quant aux brises, on a déjà constaté que la fréquence des brises anabatiques augmente avec le réchauffement et l'allongement des jours. Mais il existe aussi **des variations du système de brises en plein hiver en fonction de la direction du flux synoptique** : aux Menuires comme à Valloire, lorsque celui-ci est dans l'axe de la vallée (bise), les brises anabatiques sont comme poussées, alors qu'elles peuvent être nulles en cas de flux d'est, de sud ou d'ouest, remplacées par les brises de montagne. Les brises catabatiques règnent évidemment la nuit sauf pour les crêtes et les hauts de versants où le flux synoptique peut venir perturber durablement la brise de pente. C'est le cas aux Menuires lorsque le flux arrive du sud ou de l'ouest, selon des directions opposées aux orientations de la vallée (ouverture au nord) et du versant (orienté à l'ouest). Pour les autres sites, sans cette «aide», c'est après le passage d'un front froid (5b/C7) générateur d'inversion et en 6/C1 que les brises anabatiques sont inexistantes. Cette configuration est bien sûr rare en novembre et même en mars, mais classique le reste de l'hiver.

V.1.1.a. Situations anticycloniques puissantes et froides de type 6/C1

Du 25 au 31 janvier 2005, aux Menuires (c'est le site le plus adapté pour suivre les gradients thermiques), un anticyclone (flux de nord-est) se met en place après le passage d'un front froid de nord, et les températures deviennent très basses (fig.V.1.1). Le 27, une remontée

des stratocumulus provoque une stagnation des températures et le rétablissement d'un gradient pseudoadiabatique, et les températures remontent jusqu'au 31. Cet enchaînement intéressant illustre bien les conditions classiques lors de ce type d'anticyclone.

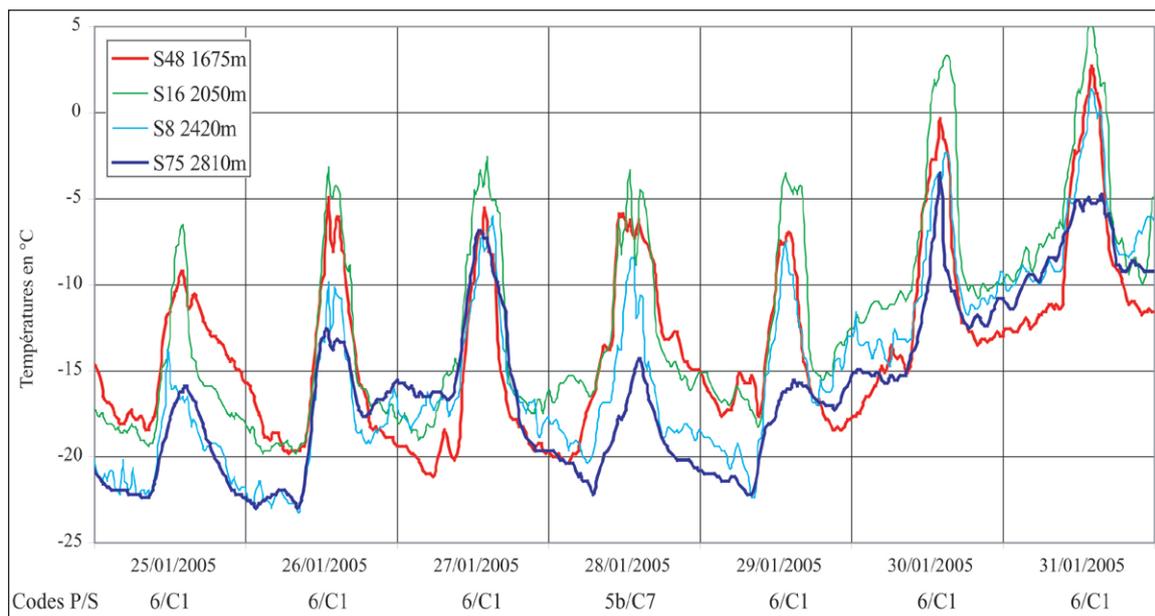


Fig.V.1.1 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 25/01/2005 au 31/01/2005, et les codes Perret/Savoie associés.

Les courbes en rouge (fond de vallée) et en bleu (crêtes) mettent en évidence les inversions de températures.

Rappel :

S48 : sonde 48, fond de vallée (1670m) ; S16 : milieu de versant (2055m) ; S8 : milieu haut de versant (Becca, 2420m) ; S75 : haut de versant (2810m).

Après la fin de la dépression (5b/C7) du 24, le gradient thermique nocturne présente une structure à deux couches, que l'on retrouve aussi souvent les nuits douces de mars. Cette structure se présente avec des températures entre 3 à 5°C plus froides sur la moitié supérieure du versant que sur la partie inférieure. Ceci est typique du premier jour anticyclonique après un épisode dépressionnaire, surtout après une grosse chute de température. Les véritables inversions interviennent ensuite : celles-ci ne se déclenchent que lorsque les températures remontent le soir et pendant la nuit sur le site (principalement après un front froid), alors que le fond de vallée se refroidit le soir puis suit le réchauffement général. Nous verrons que lorsque les températures générales ne remontent pas, il n'y a pas d'inversion réelle, car les températures en altitude refroidissent plus au cours de la nuit que le fond de vallée. Il en reste néanmoins des inversions de bas de versant, **car c'est vers 2000m que les températures nocturnes sont les plus chaudes.**

Dans la nuit du 26 au 27, nous assistons à une inversion très forte des températures sur tout le versant, qui commence vers 20h et ne se termine que vers 10h le lendemain. **C'est une inversion réelle avec un retournement total des températures par rapport à l'altitude. Le haut de versant se réchauffe alors que le fond de vallée se refroidit. Le gradient atteint +0,42°C/100m à 6h** (fig. V.1.2, type 1). Il existe cependant une multitude d'évolutions des gradients thermiques durant la nuit. La figure V.1.3 donne des exemples classiques de maintien des températures nocturnes vers -4°C avec des variations spatiales identifiées comme des inversions de types 2 à 4.

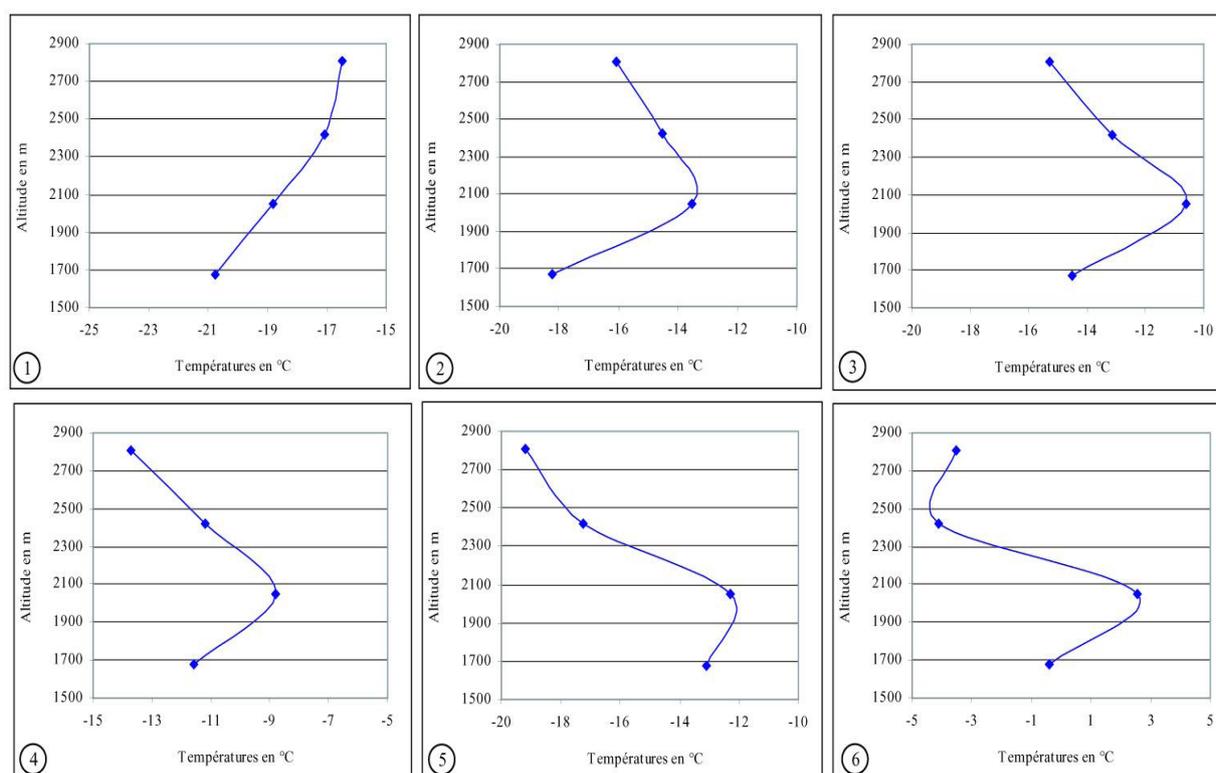


Fig.V.1.2 : Représentations graphiques de gradients thermiques communs sur le versant ouest des Menuires, lors d'anticyclones puissants et froids, la nuit (graphiques de 1 à 5) et le jour (graphique 6).

Type 1 : inversion réelle, fréquence rare (gradient $> 0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) ; Type 2 : Forte inversion de fond de vallée (gradient $= 0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) ; Types 3, 4 : Inversion partielle avec réchauffement du fond de vallée (inversion apparente, gradient légèrement positif). Type 5 : Cas classique sans inversion. Type 6 : Gradient diurne classique.

Le fond de vallée est presque toujours plus froid que le milieu de versant (environ 300m au-dessus), créant l'effet de ceinture chaude.

Nous avons remarqué que les inversions totales ou de fond de vallée (graph. 1 à 4 de la fig.V.1.2) ne sont provoquées que dans des conditions particulières, après un refroidissement des températures lié au passage d'un front froid et une remontée de celles-ci par conditions anticycloniques. Dès que les températures stagnent ou diminuent légèrement (toujours en conditions anticycloniques), les températures sur le versant s'organisent plutôt comme le graphique 5 de la fig. V.1.2, c'est-à-dire avec un gradient autour de $-0,69^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, et une petite inversion de fond de vallée par rapport au bas de versant, qui peut d'ailleurs disparaître certains jours. Cette situation est d'autant plus courante en mars et avril, avec seulement des inversions de fond de vallée qui n'arrivent qu'au matin, après une remontée des températures entre deux nuits.

La journée, les températures augmentent différenciellement sur le versant, en relation avec les températures moyennes maximales calculées dans le chapitre précédent. Il existe une variante dans le réchauffement en haut de versant, qui peut être très faible en amplitude thermique journalière en fonction des types de temps. La ceinture chaude, sous 2000m, avec des amplitudes de 15°C en période froide et parfois 20°C lors de réchauffement brusque en plus de masse d'air chaude, se comporte différemment. Le fond de vallée peut aussi, mais rarement, rester plus froid que le milieu-haut de versant, mais jamais plus froid que les crêtes à 2800m, même si l'on trouve des cas où le gradient thermique reste vers $0^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ (adiabatique). Les pics de températures sont aussi liés à l'exposition et à la présence de nuages ou de brouillards, avec des chutes parfois de 5°C sur deux ou trois heures. Le graphique 6 montre une situation

qui peut parfois s'amplifier vers un gradient extrême bien supérieur à $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.

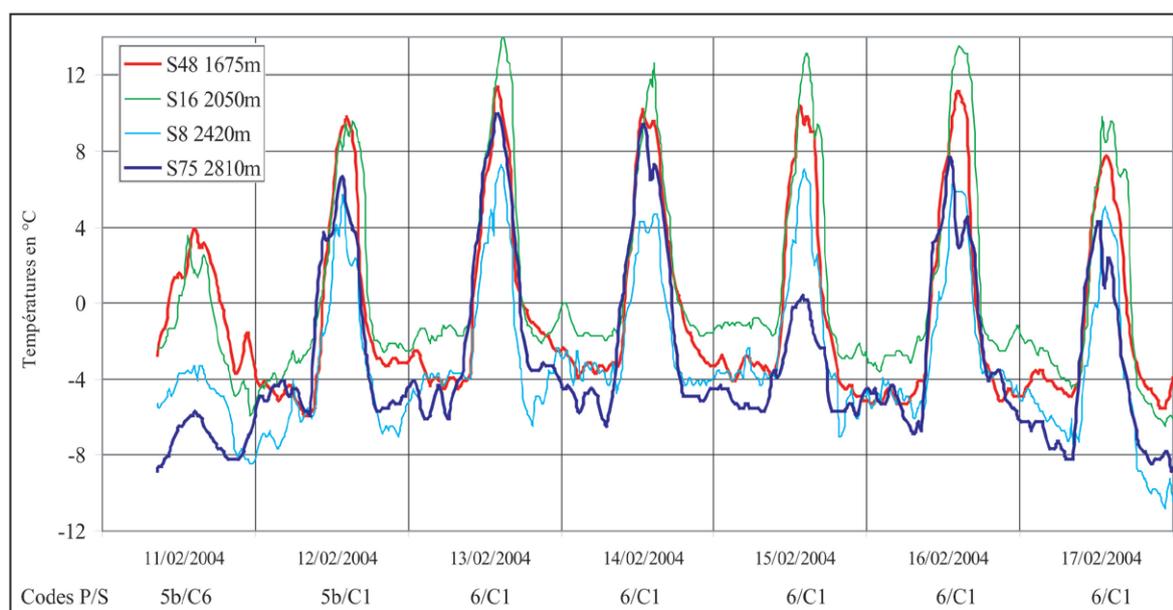


Fig.V.1.3 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 11/02/2004 au 17/02/2004, et les codes Perret/Savoie associés.

Avec des températures plus clémentes suite au passage d'un front, les inversions sont de types 3, 4 ou 5 de la fig. V.1.2, mais pas réelles. Par rapport à l'épisode précédent (fig.V.1.1), les températures de début de soirée stagnent plus durant la nuit, ce qui empêche le différentiel thermique de l'inversion de se créer.

Humidité relative :

Lorsqu'un anticyclone est bien établi (contrairement à l'exemple du 25 au 31/01/2005), les valeurs de l'humidité le long du versant sont généralement réparties comme ceci :

- En journée : vers 30% sur tout le versant sauf en fond de vallée avec parfois 10% de plus.
- La nuit : entre 10 et 50% sur tout le versant sauf en fond de vallée où on atteint parfois 70%. Logiquement le taux d'humidité décroît avec l'altitude car il est lié aux températures. Mais il existe là encore de multiples cas. *On peut seulement en conclure que l'humidité relative est plus forte en général dans le fond de vallée (surtout avec des inversions thermiques) que sur le reste du versant.*

Températures humides (pour l'enneigement artificiel) :

L'évolution des températures humides sur le versant est peu différente de celui des températures. Les phénomènes comme les inversions sont donc transposables en température humide, avec une bonne précision. Pour l'enneigement artificiel, les inversions sont les seuls «moments» où les basses altitudes sont plus froides que les hautes. Il est donc important de ne pas rater ces inversions pour bien programmer les réseaux à enneiger, car ensuite les températures remontent vite et il devient plus difficile d'avoir des températures humides adéquates pour une bonne neige en bas de versant. **Ces inversions constituent donc les moments privilégiés (en fenêtre de froid) pour les bas de versant, zones «à risque» pour l'enneigement.** Malheureusement, en novembre comme en avril, les inversions sont quasiment inexistantes.

- **Aussois :**

Contrairement aux Menuires, le versant d'Aussois n'a pas de liaison directe avec le fond de vallée. Il est donc plus difficile de trouver de belles inversions. En fait, celles-ci ne se déclenchent vraiment que lorsque les températures nocturnes remontent après le passage d'un front froid, et surtout s'il fait très froid (vers -15°C). Il n'y a ainsi eu en 2004/2005 qu'environ cinq inversions. Et celles-ci sont pratiquement toutes **le résultat d'un réchauffement nocturne en haut du versant, alors que le bas reste à la même température**. Cette situation est liée au passage d'un air chaud en altitude qui se ressent dans la ventilation du haut de versant. On atteint alors des gradients positifs.

- **Valloire :**

On retrouve sensiblement les mêmes phénomènes qu'aux Menuires, avec des inversions bien présentes, que l'on peut extrapoler des températures moyennes minimales (chapitre IV). La vallée étant orientée dans le même sens que celle des Bellevilles, la présence des vents de vallée est donc aussi liée à la direction du flux synoptique. Voici deux exemples frappants pour illustrer ce phénomène :

- du 01 au 06/02/2004, situation synoptique 6/C1 (anticyclone sur les îles britanniques, flux de nord), températures fraîches, présence importante de brises anabatiques.
- du 12 au 16/02/2004, situation synoptique 2ab/C1 (sud-ouest anticyclonique), températures douces, aucune présence de brises anabatiques pendant toute cette période.

V.1.1.b. La mise en place de fortes inversions de températures

Après avoir observé une très belle inversion réelle le 26/01/2005, provoquée surtout par un refroidissement nocturne du fond de vallée et du bas de versant par rapport au reste, nous allons nous intéresser aux deux inversions les plus fortes de la période 2002-2005 (avec la sonde 75 en haut de versant). Mais ici, le contraste s'établit surtout par le très fort réchauffement des températures sur le versant par rapport au fond de vallée, et ceci dès le début de la nuit. Après le passage d'un front froid et le rétablissement de l'anticyclone, **l'air plus lourd en altitude semble littéralement «tomber» vers le fond de vallée**.

- Cas du 05/01/2004 (fig.V.1.4) : après plusieurs passages perturbés de nord (9cd, 5b), une situation de nord-ouest anticyclonique (4a) se stabilise le 03 et on observe alors de belles inversions nocturnes. L'inversion devient majeure dans la nuit du 04 au 05. On remarquera une faible amplitude thermique journalière en haut du versant, alors que le bas connaît de gros écarts. C'est alors que pendant la nuit un différentiel important se crée entre le fond de vallée et le reste du versant, avec des différences de températures de plus de 10°C entre le fond de vallée et le bas de versant ! **Le gradient atteint alors $+0,43^{\circ}\text{C}/100\text{m}$** . On retrouve la même situation à Aussois mais sans ceinture chaude (car le réseau de mesure ne comprend pas l'ensemble du versant de la vallée de la Maurienne). C'est le gradient le plus fort enregistré.

L'analyse du vent montre un phénomène particulier : un vent fort d'altitude souffle sur les crêtes et les hauts de versant, simultanément au réchauffement d'altitude. Il est d'ailleurs très fort à Aussois (30 km/h) et s'arrête au milieu du versant. La limite est bien marquée et même soulignée par le comportement des températures. L'écoulement subsident de l'air froid et l'accumulation en bas de versant sont très nets.

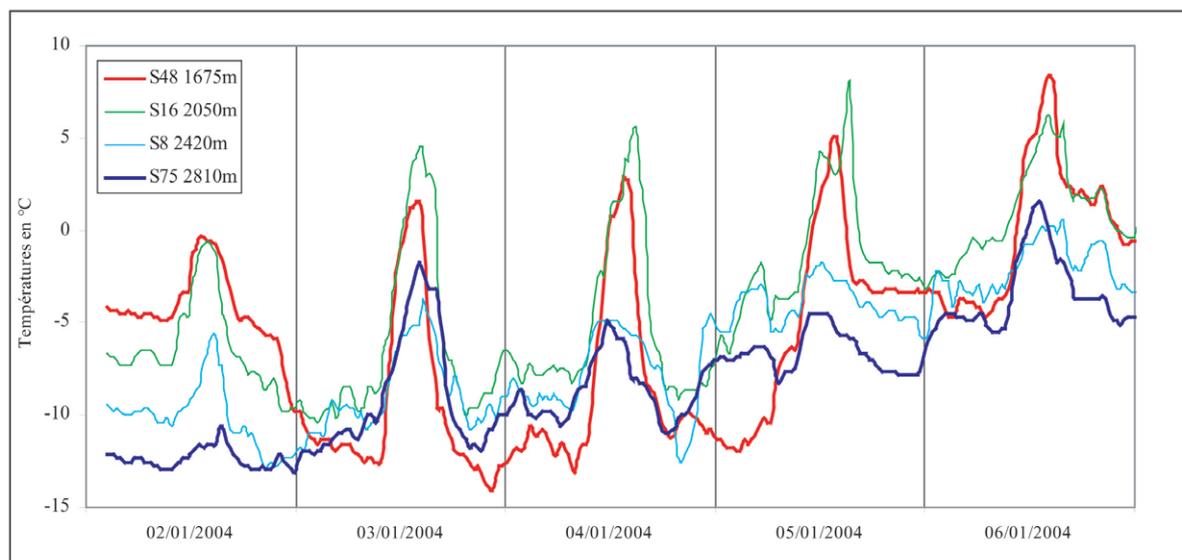


Fig.V.1.4 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 02/01/2004 au 06/02/2004.

L'inversion de température maximale est atteinte le 05 vers 2h.

- Cas du 03/02/2005 (fig.V.1.5) : La mise en place synoptique est presque la même que pour l'exemple précédent (5b/C7 puis 4a/C1 le 02 et 03). Par contre, l'inversion est majeure en début de nuit car ensuite les températures diminuent en haut de versant à partir de 2h. Le gradient atteint $+0,41^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ à 23h. Mais il existe dans cet exemple une originalité importante. En soirée, le 03, les températures restent assez hautes jusqu'à 17h à 2810m et à 2050m, alors qu'elles chutent en fond de vallée et à 2420m. **Ceci va provoquer un gradient de $+0,47^{\circ}\text{C}/100\text{m}$.** Ce phénomène ne se retrouve pas les jours d'avant et d'après. Les brises ont aussi un comportement classique, sauf en haut de versant vers 17h et 20h avec un vent de sud faible, mais qui pourrait être relié avec la hausse des températures. Sauf en fin de journée où la brise de montagne est remplacée par des brises de pente assez fortes. La relation avec les températures n'est pas évidente dans ce cas là.

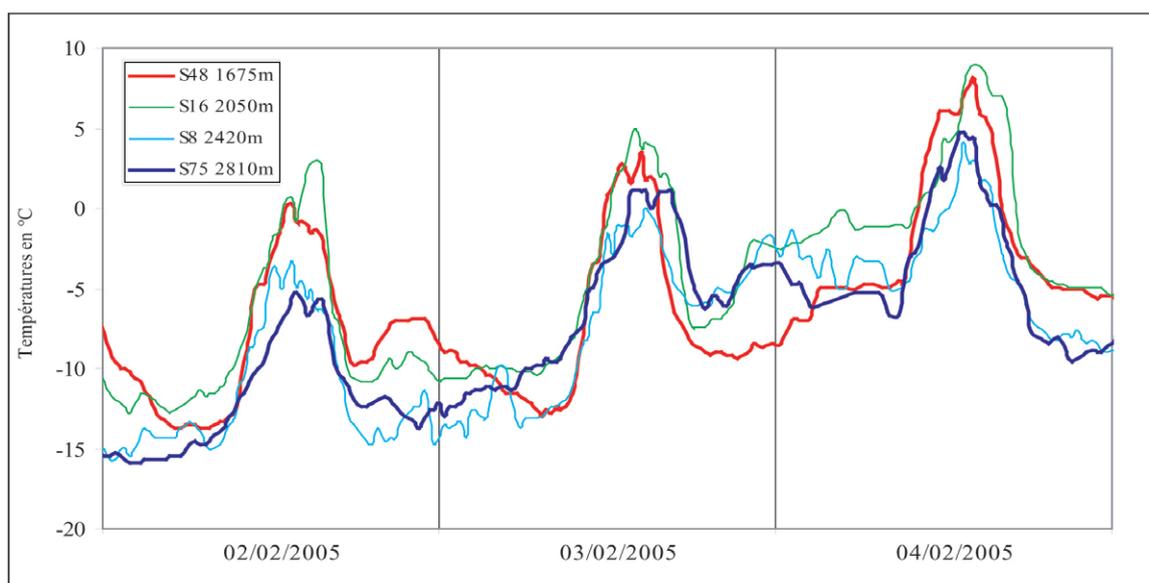


Fig.V.1.5 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 02/02/2005 au 04/02/2005.

On retrouve deux fortes inversions le 03 (au matin et le soir).

En conclusion, ces deux exemples nous montrent encore une fois que les phénomènes d'inversions de températures sont extrêmement **variables** dans leur mise en place. **Les plus fortes inversions ont toujours lieu deux jours après la fin du passage perturbé lorsque les températures nocturnes remontent en haut de versant, alors qu'elles diminuent fortement en fond de vallée. Agissant comme un réceptacle, le fond de vallée cumule les écoulements de l'air froid très lourd. L'air qui alimente ce système en altitude peut parfois provenir de masse d'air beaucoup plus chaude, ce qui provoque des inversions assez spectaculaires.**

V.1.1.c. Dynamique de deux inversions thermiques

De nombreuses études sur les inversions ont eu lieu à travers différentes campagnes de mesures (ASCOT, MAP...), des modèles numériques ont été développés (KERBIRIOU M.A. 2004 ; WHITEMAN C.D. 1982...). Mais finalement assez peu de mesures ont été prises in situ et surtout en hiver. Généralement les modèles utilisent des formes topographiques établies (exemple de vallée surmontée de plateau), et partent du principe que le système de brises thermiques correspond à celui de l'été. Comme on a déjà pu le constater avec nos mesures, les brises catabatiques nocturnes font souvent place en fond de vallée à des brises de montagne matinales, et l'inversion est détruite bien avant l'arrivée (peu probable) des brises anabatiques. Nous allons donc grâce aux observations dans la vallée des Belleville essayer de proposer **un modèle de dynamique des inversions de températures** dans les hautes vallées alpines en hiver, même s'il existe un grand nombre de cas différents.

Les inversions de températures qui se présentent à nous sont des **inversions de fond**, qui s'inscrivent dans des inversions de grande échelle (plaine-montagne). La présence de neige sur le sol augmente le refroidissement et l'écoulement de l'air. La couche stable ainsi établie isole l'intérieur de la vallée de l'atmosphère libre au-dessus. Nous avons décrit les conditions synoptiques de déclenchement de ces inversions (transitions fronts froids/anticyclone), mais lors de leur mise en place, nous allons nous affranchir du découplage ou couplage possible entre les grandes échelles et l'intérieur de la vallée. Généralement, le temps est beau, clair et froid, avec des brises catabatiques omniprésentes.

Remarque sur les problèmes d'échelle internes aux mesures : la caractérisation d'un phénomène et les mesures d'un de ces paramètres sont soumises aux problèmes d'échelle et de complexité. A partir de combien de points de mesures peut-on vraiment décrire ce que l'on observe ? En prenant deux sondes par exemple pour caractériser une inversion thermique, on néglige les variations qui peuvent se faire entre ces deux mesures, ou même en dehors. Il est important dans un premier temps de définir les limites du système. Ici, cela sera le haut de versant et le fond de vallée. Ensuite, à l'intérieur du système, existe une multitude de variations spatiales (échelle) qui peuvent faire complètement varier les observations. Or nous n'étudions pas des objets fractals ! Plus on densifie le réseau de mesure, plus on observe des détails qui viennent bouleverser la vision d'échelle supérieure. De plus les influences externes au système climatique viennent s'ajouter à la dérive d'échelle. Pourtant, nous ne pouvons pas négliger ces variations d'échelles inférieures. Pour simplifier ce problème, nous allons prendre une mesure tous les 100m environ. Puisque le gradient oscille entre -1 et +1°C/100m, nous restons dans des écarts limites. L'étude des moyennes (qui font déjà ressortir les zones thermiques)

et la comparaison effectuée entre les sondes nous permettent de les choisir en prenant celles qui semblent subir le moins d'influences extérieures possibles. Enfin, la radiation solaire est différente en fonction de l'orientation des versants. Nous n'allons donc visualiser la dynamique d'une inversion que sur le versant ouest des Menuires.

L'analyse et la représentation des données nous permettent de suivre au cours de la nuit les variations des températures et le développement de l'inversion. En outre, cela va aussi nous conduire à déterminer les paliers altitudinaux qui se comportent de manière similaire, en tant que zone thermique. Les sondes choisies sont les numéros 48, 14, 16, 5, 8, 73, 75.

Deux cas particuliers vont illustrer cette dynamique : une inversion apparente et une inversion réelle.

1) Inversion apparente (gradient thermique nul) le 03 et 04/01/2004 (4a/C1).

Figure V.1.6

Cette inversion est assez classique même s'il existe de nombreuses possibilités quant à sa progression dans le temps en fonction des conditions locales et synoptiques. Il ressort tout de même de cet exemple des constatations applicables pour la dynamique de nombreux autres cas.

En premier lieu, les températures vers 14h le 03 sont organisées sur le versant comme sur le type 6 de la fig.V.1.2. Les températures au-dessous de 2100m sont supérieures à 0°C, le fond de vallée étant froid de 2 à 3°C. Puis en fonction de l'ensoleillement, on voit que le haut de versant reste plus chaud que le milieu de versant. Mais c'est un cas un peu particulier car à la même altitude des zones mieux orientées auront des températures plus élevées. Puis, lorsque le soleil commence à être caché par le versant est, la température chute de 10°C en 2h (jusqu'à 16h) en fond de vallée. Le reste du versant est encore ensoleillé. Vers 19h nous passons en nocturne, et le gradient se stabilise à 0°C/100m, et le restera toute la nuit jusqu'à 10h du matin.

L'inversion qui se développe est une véritable inversion de fond (si on enlève les mesures en fond de vallée, on retrouve un gradient plus normal, sauf à 16h avec un refroidissement important à 2400m). Sa dynamique s'observe sur la fig.V.1.6. (variations visualisées par des flèches) :

- **Le fond de vallée se refroidit surtout le soir et le matin.**
- **Le bas de versant connaît une période de réchauffement vers minuit, avant de se refroidir légèrement.**
- **Le haut de versant se refroidit le soir, puis se réchauffe durant la nuit.**

On peut ainsi distinguer trois zones au comportement thermique différent :

- Le fond de vallée (altitude inférieure à 1800m).
- Le bas de versant (altitude entre 1800 et 2300m).
- Le haut de versant (altitude entre 2300m et 2800).

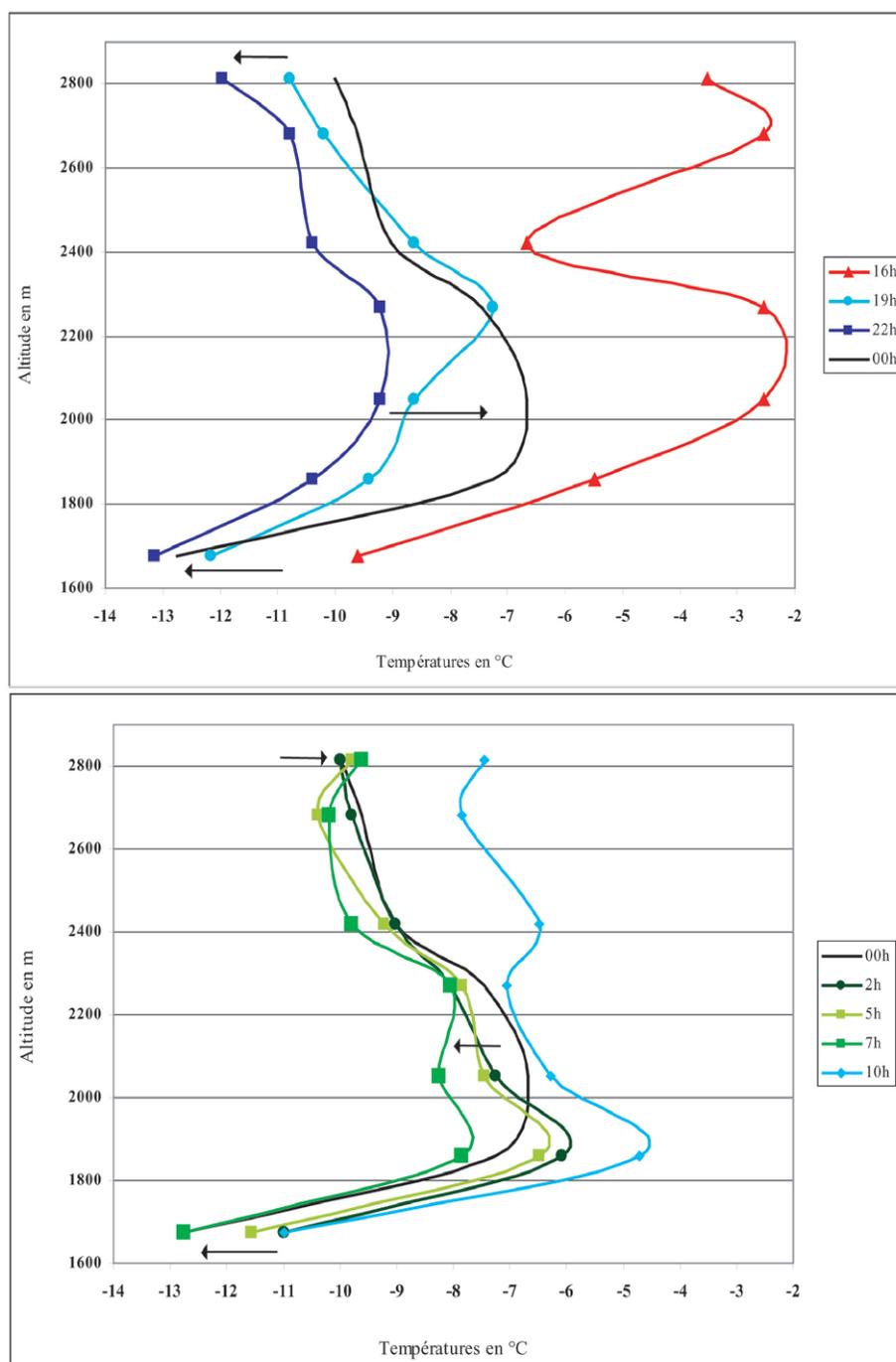


Fig. V.1.6 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 03/01/2004 à 16h au 04/01/2004 à 10h. Inversion de température apparente.

Nous avons séparé les mesures avant et après minuit, la transition étant matérialisée par une courbe noire. Les flèches représentent les mouvements les plus significatifs des températures.

Par rapport au fond de vallée, le bas de versant est environ 5°C plus chaud, et le haut de versant 3°C. Ceci correspond au gradient de type 2 de la fig.V.1.2. L'humidité relative reste durant la nuit entre 30 et 40 % sur tout le versant, sauf en fond de vallée avec des valeurs de 70%. Quant à la ventilation de la vallée, elle s'effectue exclusivement avec des brises catabatiques, même de jour.

2) Une inversion réelle (gradient positif) le 27/01/2005 (6/C1).

Figure V.1.7

Par rapport au cas précédent, les températures d'après-midi sont beaucoup plus froides, et surtout en haut du versant. Le gradient est de $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ à 14 h alors qu'il était de $0^{\circ}\text{C}/100$ à 15h le 03/01/2004. Une évolution différentielle s'établit encore une fois, car les températures ne refroidissent que très peu en haut du versant (-5°C entre 14h et 6h du matin), alors qu'elles perdent 15°C en bas de versant et fond de vallée. D'ailleurs, l'inversion réelle s'établit ici parce que le bas de versant est bien refroidi, ce qui n'était pas le cas le 03/01/2004. On atteint à 5h un gradient de $0,4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Enfin le matin, le milieu de versant se réchauffe en premier.

Les températures deviennent homogènes entre 18h et 22h, car le haut de versant ne se refroidit plus. Elles oscillent entre -17 et -18°C . Ensuite :

- Le fond de vallée se refroidit constamment jusqu'à 5h (-21°C).
- Le bas de versant aussi mais reprend son réchauffement dès 3h.
- Le haut de versant se réchauffe de 2°C avant minuit, puis les températures stagnent jusqu'au matin.

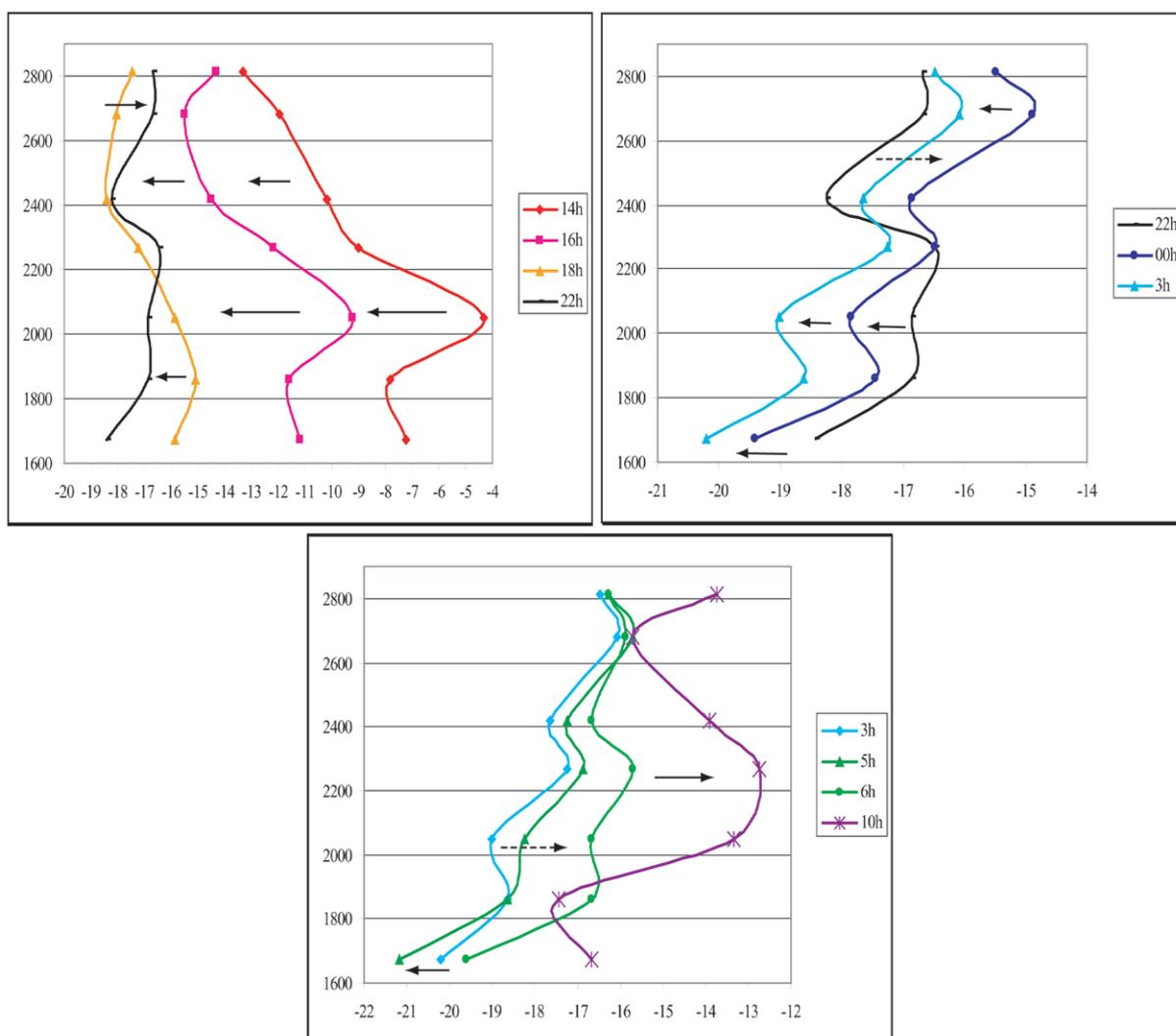


Fig.V.1.7 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 26/01/2005 à 14h au 27/01/2005 à 10h. Inversion de température réelle.

L'inversion s'établit dans ce cas parce que le haut de versant se réchauffe pendant que le bas de versant et le fond de vallée se refroidissent. Deux limites ressortent encore une fois de cette dynamique : à 1800m et à 2300m.

L'humidité relative reste bien constante pour tous les points de mesure durant la nuit. On a environ 60% du fond de vallée au milieu de versant, puis une diminution vers 2400m avant une forte augmentation à 80% en haut du versant. C'est une répartition quelque peu inverse du cas précédent.

Enfin les brises thermiques sont bien régulières, avec des brises de pentes descendantes du haut en bas de versant, sûrement stimulées par le courant synoptique de nord-est, et la brise de montagne de sud-sud-est en fond de vallée. Les vitesses sont faibles, avec des pointes à 12 km/h en haut du versant.

Val Thorens : l'inversion évolue comme aux Menuires, mais c'est dans la Combe de Thorens que les températures sont les plus basses (-20°C), suivi du fond du cirque (-18°C), puis il y a réchauffement jusqu'en haut de versant à 2800m (-15°C). A altitude égale, le site de Val Thorens est bien plus doux, même s'il existe des micro-inversions liées au relief (Combe de Thorens).

Aussois : on remarque un décalage important dans la mise en place de l'inversion. Le gradient reste parfaitement «normal» vers $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ jusqu'à 4h le 27. A ce moment là, les températures passent de -18°C à -14°C sur le haut du site, et de -16°C à -14°C au milieu du site. Seul le bas de versant sous la forêt (1600m) conserve ses températures qui diminuent légèrement, provoquant alors vers 6h une inversion. Les pressions et la stabilité de l'atmosphère n'ont changé que bien plus tard dans la nuit par rapport à la vallée des Belleville.

Valloire : les températures en haut de versant se réchauffent à partir de 2h, alors que le fond de vallée se refroidit constamment, créant l'inversion vers 5h. Sur ce site, on peut observer que les températures augmentent par le haut, en redescendant avec l'altitude jusqu'au milieu des versants (en 2h).

Conclusion sur la dynamique des inversions :

Les inversions réelles sont très rares à l'échelle d'une haute vallée alpine comme celle des Bellevilles, avec un talweg vers 1500m et des sommets approchant les 3000m. On en constate seulement 3 à 5 cas au maximum par an, en janvier et février. *Elles ne se déclenchent qu'après le passage d'un front froid qui abaisse rapidement les températures, souvent de 15°C , les amenant entre -15°C et -20°C sur le site.* Lorsque les pressions remontent, le beau temps revient, l'humidité diminue. Un jour ou deux après, le soleil brille la journée et réchauffe surtout la moitié inférieure de la vallée, et les basses altitudes, alors que la moitié supérieure reste plus froide. La nuit approchant, les températures diminuent surtout en fond de vallée, et par effet radiatif sur l'ensemble de la région les températures de la couche limite se refroidissent et forment une inversion de grande échelle. *L'air plus froid en altitude s'écoule alors vers le bas par les vents catabatiques et les températures s'inversent en se réchauffant en altitude et en se*

refroidissant constamment en fond de vallée et bas de versant. L'effet de subsidence est alors important. Ce phénomène, qui tend vers la stabilité, s'homogénéise à la fin de la nuit. Dès que le soleil se lève, le milieu de versant se réchauffe en premier, puis vient le fond de vallée et on retrouve la situation diurne précédente.

Ensuite, les températures générales continuent d'augmenter, avec de très faibles amplitudes thermiques journalières en haut de versant. Des inversions se créent encore, parfois brutales lorsque les températures générales augmentent fortement pendant la nuit. *Mais les inversions restent surtout apparentes.* Puis les températures nocturnes se stabilisent et *il n'y a plus d'inversion*, sauf de légères entre le fond de vallée et le bas de versant. *Il s'est avéré que pratiquement aucune inversion même apparente ne s'est produite lorsque les températures sur le site diminuent pendant la nuit, même légèrement.*

Enfin, même s'il existe une multitude de conditions synoptiques qui peuvent provoquer des inversions sur la Savoie (air froid résiduel et réchauffement d'altitude, isothermie...), on observe encore une fois que les réactions sur les versants sont très contraintes. Les profils de températures sont souvent similaires sauf pour des cas particuliers vus ci-dessus. Seul le processus de réchauffement en altitude induit de la variabilité.

V.1.1.d. Influence du flux synoptique dans la création de vent de vallée

Le système de brises en hiver est conforme aux moyennes calculées dans le chapitre précédent. Pourtant, il existe une variante qui mérite d'être étudiée plus précisément :

Lors de périodes anticycloniques, de décembre à février, **les variations de directions des brises thermiques peuvent dépendre de la direction du flux synoptique** (mise en place ou non de brises anabatiques). **Les flux de nord et la bise vont provoquer dans les vallées ouvertes au nord la création d'un courant qui soit va pousser les brises anabatiques, soit va se transformer en un vent propre, lorsque vers 13 h les brises catabatiques sont les plus faibles.** Nous ne pouvons pas malheureusement distinguer les brises anabatiques de la bise. Un vent de nord-ouest dans la vallée des Bellevilles souffle et principalement vers le milieu de versant, alors que d'habitude les brises de montagne règnent durant cette période. Ceci est d'autant plus remarquable qu'avec un flux d'altitude d'ouest par exemple (code 3ab/C1), ce vent d'après-midi n'est pas créé. On remarque aussi (fig.V.1.8) que vers 13h30 il longe le fond de vallée, puis vers 14h30 monte sur le versant (remplacé alors en fond de vallée par une brise de montagne), avant de disparaître. Il est aussi ressenti à Val Thorens mais pas sur les crêtes. Bien sûr, ce phénomène dépend aussi de l'intensité de la bise.

Les interactions entre les vents synoptiques et les brises thermiques se déroulent généralement de cette manière :

- Forçage thermique la majorité du temps. Les brises descendantes règnent et leurs directions varient la journée en fonction de la course du soleil et donc de l'exposition asymétrique des versants.

- Canalisation forcée lorsque le flux synoptique est aligné avec l'axe de la vallée, et qu'il n'existe plus de forçage thermique (vers 13-14h en plein hiver, cas assez rare).

En mars, les brises anabatiques non forcées apparaissent enfin mais leur intensité est beaucoup plus forte à Valloire qu'aux Menuires car la connexion de la vallée suspendue est plus directe en aval avec la vallée principale.

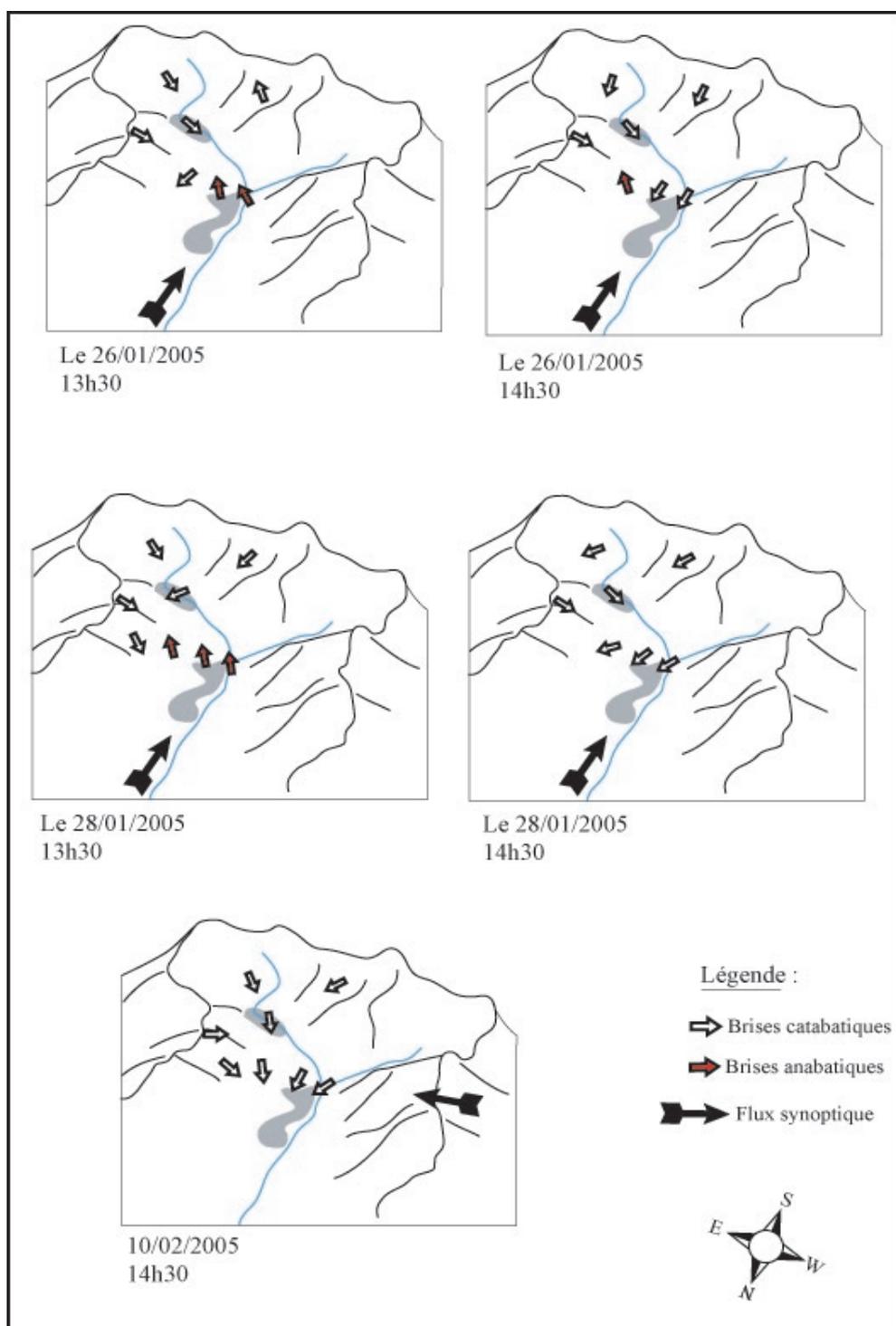


Fig.V.1.8 : Formation de brises de vallée lorsque le flux synoptique est orienté au nord dans la vallée des Bellevilles (6/C1), mais pas quand il est orienté à l'ouest.

Le 26/01/2005 : la brise de vallée souffle en fond de vallée (13h30) puis remonte vers le milieu du versant ouest (14h30) avant de s'arrêter.

Le 28/01/2005 : la brise est plus forte (13h30) mais elle ne dure qu'une heure.

Le 10/02/2005 : absence de brise de vallée (flux synoptique d'ouest, 3ab/C1).

V.1.1.e. Situations anticycloniques plus douces de début et fin de saison

Jusqu'à mi-décembre et à partir de mi-mars, les situations anticycloniques se diversifient et les flux synoptiques proviennent d'avantage d'une composante sud, ce qui apporte un air beaucoup plus doux. Les perturbations sont aussi principalement constituées de fronts plus chauds et les brusques chutes de températures qui leur étaient liées deviennent quasi-absentes. A partir de là, le profil des températures devient plus régulier, comprises entre -10°C et 0°C la nuit, et presque toujours positives le jour, au moins en bas de versant. La notion climatique de fond de vallée perd alors quelque peu sa signification, les inversions disparaissant. On se retrouve avec des inversions de type 4 ou 5 de la fig.V.1.2, voire même sans inversion nocturne.

V.1.2 Conditions dépressionnaires et perturbations

En général, les courants porteurs de conditions fraîches, pluvieuses, neigeuses et venteuses viennent du nord au sud-est en passant par l'ouest. Nous avons déjà «fait le tri» dans leur fréquence d'apparition au cours de l'hiver (voir chapitre III), ce qui permet déjà de faire la différence entre les flux de nord à ouest qui ont une incidence froide certaine sur les conditions météorologiques en montagne, et les flux de sud-ouest à sud-est plus adoucis ou provocateurs de foehn, même si la neige peut être au rendez-vous. Afin d'illustrer le comportement des paramètres locaux face à des situations dépressionnaires, nous avons choisi d'étudier plusieurs cas «d'école» qui sont des exemples révélateurs des changements de conditions météorologiques. Encore une fois, le nombre de situations possibles et la complexité de leur agencement ne permettent pas de généraliser, mais nous verrons que pour un site particulier beaucoup de situations synoptiquement différentes amènent les mêmes réactions des paramètres atmosphériques sur les versants.

V.1.2.a. L'arrivée de fronts neigeux sur la Savoie du 26 au 29 janvier 1998

Trois perturbations se succèdent dans un flux très rapide qui passe de l'ouest au nord (de 3cd à 5b) avec trois jours de fortes précipitations, succédant à un flux d'ouest anticyclonique. Dès le 30, l'anticyclone centré sur les Iles Britanniques revient avec le beau temps (6/C1) (Tab.V.1). Le vent synoptique a donc tourné de l'ouest au nord (bise) en quatre jours. Nous allons d'abord étudier les données de Météo-France puis les relier à celles de l'enneigement artificiel.

Cette situation particulière a provoqué de grosses chutes de neige en Savoie. La présence d'air relativement chaud en altitude favorise des précipitations très abondantes qui finissent par tomber sous forme de neige à très basse altitude. En quatre jours, on mesure un cumul de neige d'environ 75 cm à Valloire, à Saint-Marcel-de-Belleville et à Aussois (stations Météo-France à 1500m environ). Ce cumul est représentatif de cette altitude pour la vallée de

Dates	Classification P/S
24/01/1999	3ab/C1
25/01/1999	3ab/C1
26/01/1999	3cd/C10
27/01/1999	4b/C9
28/01/1999	9cd/C10
29/01/1999	5b/C7
30/01/1999	6/C1
31/01/1999	6/C1
01/02/1999	6/C1
02/02/1999	6/C1

Tab.V.1 : Code Perret/Savoie du 24/01 au 02/02/1999.

la Maurienne. En Tarentaise, on trouve des cumuls plus élevés comme à Pralognan (1420m, 141cm !), on encore à Bourg-Saint-Maurice avec un cumul de 101cm (BLANCHET A., 2003). Il est intéressant de constater que la vallée des Bellevilles se situe plutôt dans l'espace neigeux de la Maurienne que de la Tarentaise. Dans ces régimes de nord-ouest, la Maurienne est toujours moins bien fournie que la Tarentaise, il faut attendre plutôt les retours d'est pour que cette tendance s'inverse.

Les vents synoptiques ont soufflé assez fort, avec des vitesses *maximales* de 79 km/h à Méribel et à 155 km/h à Val Cenis. A la pointe de la Masse (2800m), qui constituera une station Météo-France de référence (lorsqu'il n'y a pas de lacunes), la vitesse maximale atteignait 105 km/h le 28 au soir, pour un vent de secteur nord. Durant cet épisode, le vent fut d'abord de secteur ouest à nord-ouest le 26 en fin d'après-midi pour la première perturbation, puis de nord-ouest le 27 au matin et enfin de nord le 28 et le 29. Les vitesses moyennes horaires n'atteignent évidemment pas de telles valeurs, elles sont similaires aux vitesses mesurées sur les hauts versants par les anémomètres de l'enneigement artificiel, vers 50 km/h au maximum (cas plus précis avec l'exemple suivant de la tempête). Entre ces trois perturbations, la vitesse maximale a diminué en dessous de 20km/h durant quelques heures (fig. V.1.9), permettant le retour des brises locales.

Quant à l'humidité relative, elle augmente vraiment avec l'arrivée de la première perturbation et ne chute pas avant le 01 en restant vers 90% (fig. V.1.10).

Entre le fond de vallée et le sommet de la Masse, les températures évoluent sensiblement différemment. On constate une faible amplitude thermique journalière mesurée à la Masse, avec des températures qui augmentent très peu le jour (l'amplitude thermique journalière diminue avec l'altitude). A partir de 2500m, quand l'exposition et les conditions topographiques ne sont pas trop propices à un réchauffement direct, le froid résiduel reste important. L'analyse des mesures des sondes posées près des crêtes en 2003 confirme cet effet. Puis lorsque les perturbations arrivent le 26, les températures chutent de -15°C à 2800m mais restent vers 0°C en fond de vallée, jusqu'à la fin de la dépression. Le gradient thermique est corrélé à la stabilité de l'atmosphère et donc à l'altitude. Il augmente lors de l'instabilité puis quand l'anticyclone revient il diminue en liaison avec les inversions de température que l'on observe alors le 01/02 et le 02/02 au matin, avec un gradient de $0,3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. En fond de vallée les températures diminuent dès le 29, on atteint alors le 31 les températures les plus froides. **On voit bien dans cet exemple la dynamique différentielle de refroidissement et de réchauffement entre le fond de vallée et les sommets des montagnes, en fonction de l'état de l'atmosphère.**

On observe un superbe réchauffement le 28 en fin d'après-midi. **Comme pour une tempête, le front chaud et le vent très fort qui lui est lié passent par dessus les massifs.** Les températures augmentent alors en altitude puis le réchauffement gagne progressivement les fonds de vallée. Pendant quelques heures le gradient thermique diminue.

Enfin les chutes de neige sont survenues le 26 au soir avec l'arrivée du premier front d'ouest (26 cm à 1500m), puis le 28 avec le front chaud de nord-ouest (35 cm). Cette situation se retrouve étrangement quelques jours plus tard, du 5 au 11/02/1999, avec encore une fois une succession de fronts, d'abord d'ouest qui virent ensuite au nord (3cd ; 4b ; 9cd ; 5b).

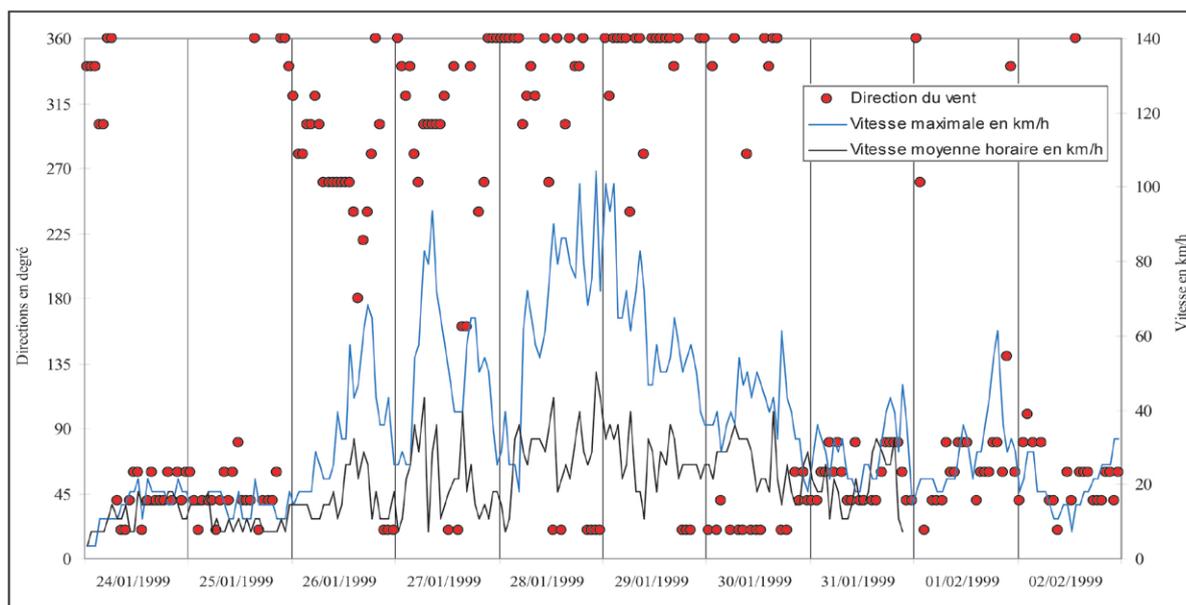


Fig.V.1.9 : Evolution des directions et des vitesses du vent maximal et moyen horaire mesurées à la station Météo-France de La Masse (2800m) du 24/01 au 02/02/1999.
Données Climathèque.

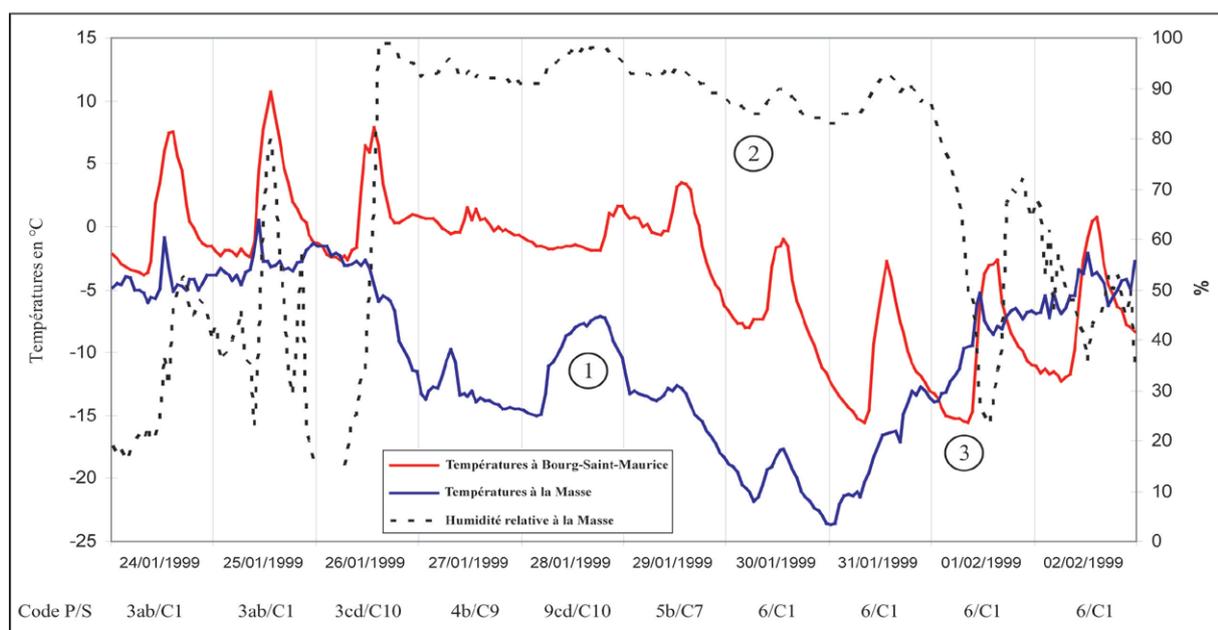


Fig.V.1.10 : Evolution des températures et de l'humidité relative horaires mesurées à la station Météo-France de La Masse (2800m) et à Bourg-Saint-Maurice (865m) du 24/01 au 02/02/1999. Codes de la classification Perret/Savoie pour chaque jour.

1 : Passage du front chaud ; 2 : Arrivée du beau temps ; 3 : Début des inversions nocturnes en fond de vallée (Tarentaise).

Données Climathèque.

• Réactions des températures et du vent aux Menuires :

Les mesures de trois sondes vont nous suffire à visualiser l'évolution des températures sur le versant ouest des Menuires (fig.V.1.11). Cette évolution aux Menuires s'inscrit bien dans le contexte décrit sur la Savoie. Pendant l'épisode perturbé, les températures se calquent sur le gradient thermique par atmosphère instable, soit ici environ $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ dans la nuit du 27 au 28. Dès le 30, le fond de vallée se refroidit, rejoignant le milieu-bas de versant, mais les tempé-

ratures minimales sont atteintes à 2420m dans la nuit du 30 au 31, soit 48h après la remontée anticyclonique. C'est enfin à la faveur d'une remontée générale des températures (+ 5°C pendant la nuit du 31 au 01), moins visible en fond de vallée, que de belles inversions se développent et se maintiennent : le 01 au matin avec un gradient de 0,6°C/100m (mesures avec les trois sondes) et le 02 avec 0°C/100m. Il est intéressant de constater que lorsque l'inversion augmente entre la Masse et Bourg-Saint-Maurice, elle diminue dans la vallée des Bellevilles.

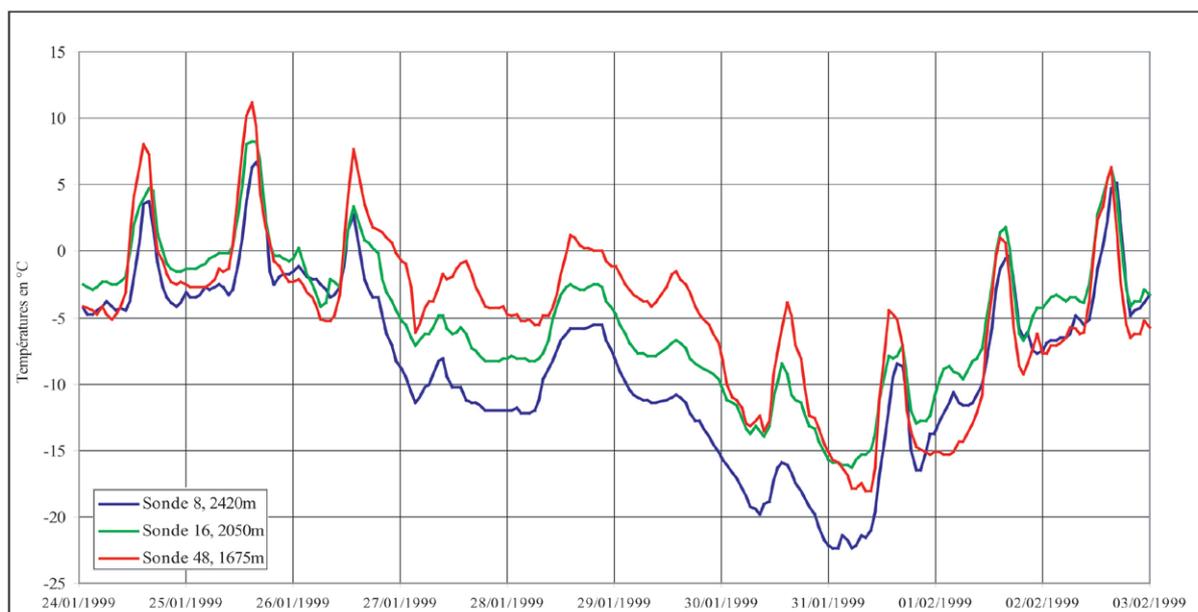


Fig.V.1.11 : Evolution des températures en bas et au milieu du versant ouest des Menuires du 24/01/1999 au 02/02/1999.

Sonde 48 : fond de vallée ; Sonde 16 : milieu-bas de versant ; Sonde 8 : milieu-haut de versant.

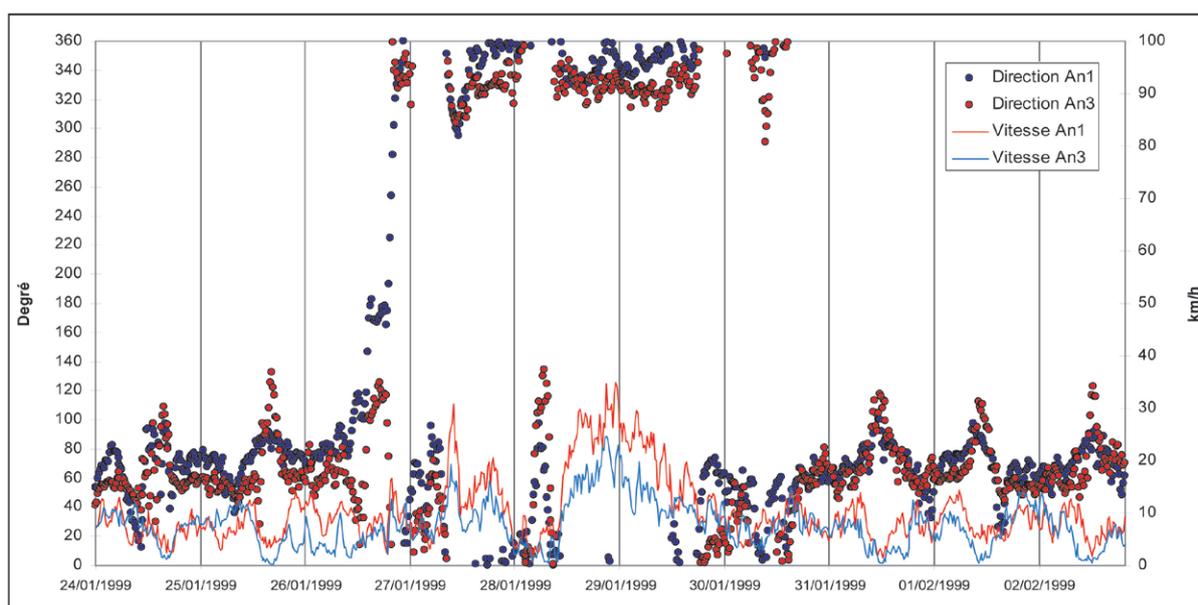


Fig.V.1.12 : Evolution de la direction et de la vitesse du vent au bas et au milieu du versant ouest des Menuires.
An1 : milieu de versant (2280m) ; An3 : bas de versant (1860m).

Les vents mesurés sur le versant ont aussi une dynamique bien définie (fig.V.1.12). Par beau temps, on distingue des brises de pentes descendantes nocturnes (fortes) et diurnes (faibles). Lors des perturbations, un vent de nord canalisé (il ne réagit pas vraiment au changement de direction du flux de nord-ouest à nord) atteint des vitesses peu élevées, 35 km/h à 2270m et 10 km/h de moins en bas (vitesses moyennées sur 10 minutes). Entre les perturbations, on constate que les brises de pente reviennent très vite, d'autant plus que ces périodes de transition interviennent la nuit (27 et 28). Ces observations rejoignent l'étude sur les vents moyens, même si la brise de montagne paraît ici inexistante.

• Réactions des températures et du vent à Aussois :

L'évolution des températures est très proche de celle des Menuires, avec des valeurs similaires (fig.V.1.13). Elles ont diminué lors du passage des perturbations avec une bonne correspondance dans la relation altitude/température. On observe aussi de belles inversions, dont une réelle entre le 31 et le 01 vers minuit. Les mesures de la sonde 10 paraissent exagérées durant les journées ensoleillées du 01 et 02, mais les autres sondes confirment ces valeurs sur ce versant sud-est qui bénéficie d'une «anomalie» thermique locale, peut-être liée aux problèmes de radiation sur la cloche de l'instrument de mesure quand la ventilation est faible.

Les variations du vent décrivent bien le passage entre brises thermiques et vents synoptiques. En premier lieu, les brises anabatiques sont bien présentes en bas de versant, avec ce vent tournant de l'est au nord pendant la journée (fig.V.1.14). Le 27, les vents synoptiques arrivent au moment de la mise en place des brises anabatiques, et proviennent du nord-ouest en haut du versant, et du sud-ouest en bas, en accord avec la topographie. Ces directions ne sont pas étonnantes, ce sont plus les vitesses qui sont hétérogènes, avec une moyenne de 20 km/h mais des pointes vers 40, 50 et même 65 km/h en haut de versant. Comparé aux Menuires, les vents sont plus constants durant la période perturbée et connaissent des pics de vitesses qu'on ne retrouve pas, comme dans la nuit du 27 au 28 et surtout du 29 au 30. Le versant ouest des Menuires est bien mieux protégé que celui d'Aussois, ce qui peut paraître étonnant, étant donné que la vallée des Bellevilles est davantage exposée aux flux de nord-ouest. Ceci est en fait provoqué par l'ouverture vers le nord-ouest (Fond d'Aussois), accélérant les vents, qui rentrent dans la vallée de la Maurienne sans glisser le long du versant sud d'Aussois. *On imagine alors bien la ventilation au niveau de cette vallée avec un vent provenant du sud-ouest dans les basses altitudes, et des vents transversaux qui les surplombent en étant canalisés et accélérés par les ouvertures du versant sud de la vallée (voir fig.V.1.19). Le flux synoptique domine ensuite les directions à partir des crêtes.*

De plus, il est remarquable de constater (et cela se confirmera avec le foehn), que les positions abritées du versant par rapport au vent voient des écoulements inversés (vent de sud-est sur le versant sud-est pour un vent synoptique de nord-ouest). *La topographie plus accidentée du versant d'Aussois permet de mettre en évidence ce phénomène de retour de vent en rotor.*

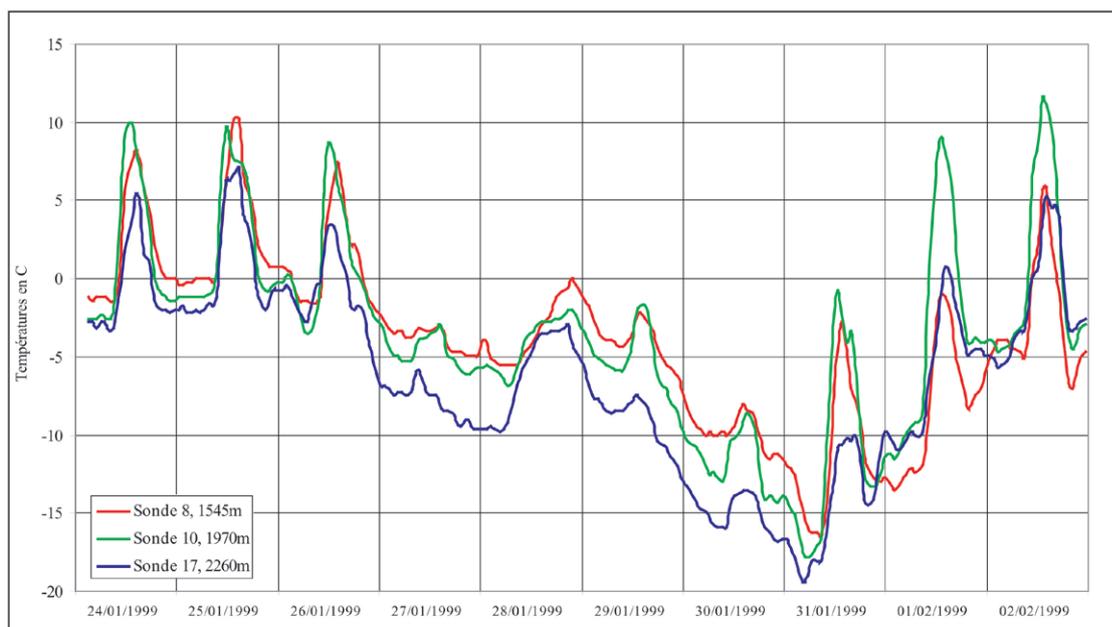


Fig.V.1.13 : Evolution des températures en bas, au milieu et en haut du versant sud d'Aussois du 24/01/1999 au 02/02/1999.

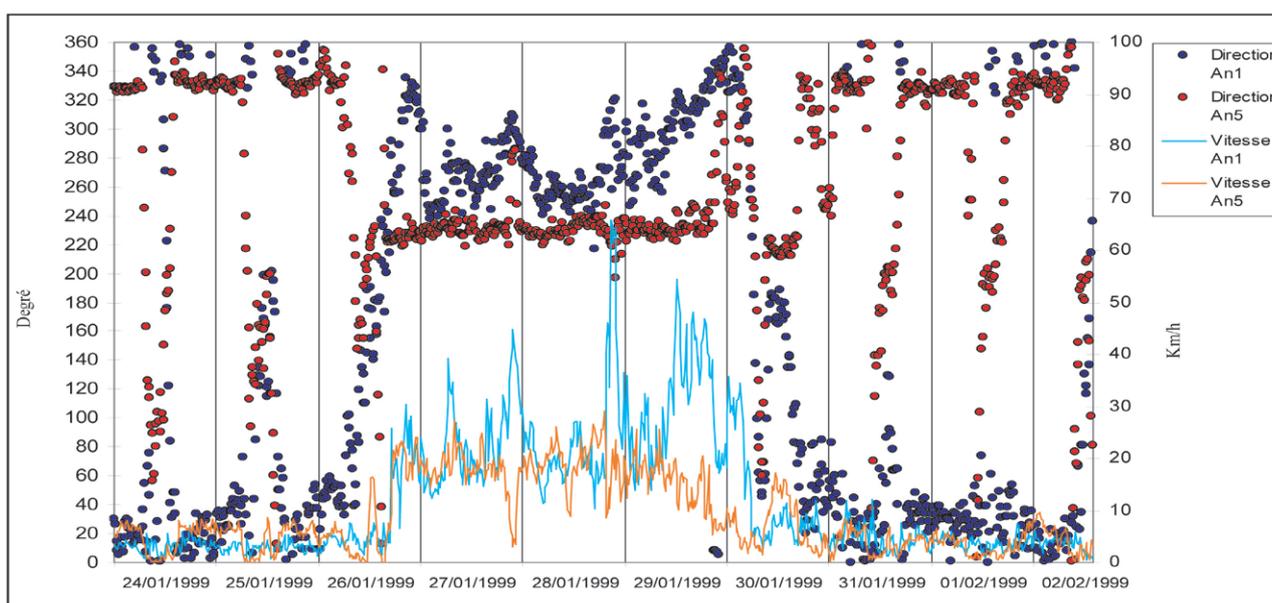


Fig.V.1.14 : Evolution de la direction et de la vitesse du vent en bas et en haut du versant sud d'Aussois.
An1 : haut de versant ; An5 : bas de versant.

V.1.2.b. Les tempêtes de décembre 1999

Evénements marquants dans la météorologie récente française, la succession des deux tempêtes du 25 au 26 puis du 27 au 28 décembre 1999 fut à l'origine d'une catastrophe naturelle exceptionnelle. D'un point de vue climatologique, l'étude des vents en Savoie en complétant les données de Météo-France va nous permettre de déterminer l'intensité et la variation des écoulements sur les versants, tout en observant l'évolution des températures.

Un problème survient lors des tempêtes : c'est l'arrêt des stations de mesures soit à cause d'une casse par des rafales, soit par arrêt volontaire des systèmes. C'est pourquoi, à la fois

dans le réseau Météo-France ou dans les stations de ski, il existe de nombreuses lacunes de données.

- Situation générale :

Les tempêtes sont presque exclusivement attachées à un courant rectiligne d'ouest, type 3cd en classification Perret. Pour notre cas, la situation est passée d'ouest cyclonique alignée sur la moitié nord de l'Europe le 24 et 25 à un courant aligné sur le sud de l'Europe du 26 au 27. Le 28, la dépression s'est centrée sur les Alpes, avant qu'un flux de nord-ouest anticyclonique ne s'installe le 29. La pointe de vitesse du vent des deux tempêtes se situe entre le 27 et 28 vers minuit. Enfin on trouve une belle période de calme le 27 entre 8h et 18h.

Ce mois de décembre 1999 fut prolifique avec une période intense de mauvais temps du 09 au 14, aussi en flux d'ouest cyclonique, avec une tempête du 12 au 13. Les chutes de neige furent au rendez-vous avec 50cm cumulés vers 1500m, et le même total se retrouve du 26 au 29. Ces tempêtes furent intéressantes de ce point de vue. D'ailleurs si on analyse les paramètres climatologiques entre ces deux événements du mois de décembre, seule la vitesse du vent diffère. A l'ouest du département et au-dessus des reliefs, les vents ont presque été deux fois plus forts fin décembre. Mais sur les versants, on reste vers des valeurs entre 40 et 60 km/h, sauf le 28 où localement des accélérations ont été fulgurantes. Sans ce coup de vent, il aurait été difficile en montagne de faire la différence entre ces deux épisodes. Les températures pendant ce mois ont souvent effectué des allers-retours entre 2°C (vers 2000m) et -15°C, à cause du nombre impressionnant de perturbations qui sont passées sur les Alpes.

La situation dépressionnaire a commencé le 25 pour finir le 29, les températures ayant commencé à chuter lentement pour atteindre -15°C vers 2500m le 30 au matin. Mais il se passe un phénomène peu commun le 27 avec une chute des températures dès 4h du matin qui se prolonge jusqu'à 10h (-4°C) puis une remontée spectaculaire jusqu'à minuit (+8°C). Ce réchauffement commence d'abord en altitude et descend vers les basses couches, confirmant que le coup de vent est associé à un front chaud dont le flux d'air est rejeté de plus en plus haut au fur et à mesure de la pénétration vers les hauts massifs (SOUHAITE P., 1993). On retrouve le même phénomène le 26 vers 12h lors de la première tempête (fig.V.1.15).

Remarque : l'analyse des postes Météo-France doit se faire en distinguant bien *les mesures de vent instantanées et les mesures moyennes*. Les différences sont très importantes, car les rafales engendrées par la tempête peuvent être extrêmement véloces par rapport au vent moyen horaire (contrairement aux directions). Les mesures des anémomètres des installations d'enneigement artificiel sont aussi des moyennes sur environ 15 minutes, elles se rapprochent alors des mesures moyennes horaires de Météo-France.

- Les vents mesurés (Les Menuires, Val Thorens, Aussois) :

Les enregistrements se sont arrêtés le 26 à 18h aux Menuires, ce qui permet tout de même d'observer des directions de nord-ouest en fond de vallée avec des pointes à 30 km/h à 13h et des directions d'ouest sur le versant à 2420m avec des maximales de 40 km/h. Au même moment, les vents moyens atteignent 50 km/h à la Masse et à Val Thorens (fig.V.1.16). Le 26

au matin, lors d'une accalmie, les vents s'orientent aux Menuires au sud, comme une brise de vallée. *Les différentes observations montrent que contrairement aux crêtes, dès que le vent synoptique faiblit sous 20 km/h, les brises reprennent le relais très vite sur le versant.* Le 27 à midi, le vent se calme complètement et les directions reprennent leurs directions de brises, comme à Aussois (fig.V.1.17, 18, 19 pour la situation à Aussois). A chaque fois ces périodes de calme correspondent à une chute des températures (voir fig.V.1.18).

Les vents mesurés par les installations d'enneigement artificiel ne prennent pas en compte les rafales car leur durée est bien inférieure au quart d'heure. Pourtant, en prenant les vents moyens, on constate *une nette diminution de la vitesse lorsque l'on s'enfonce dans les fonds de*

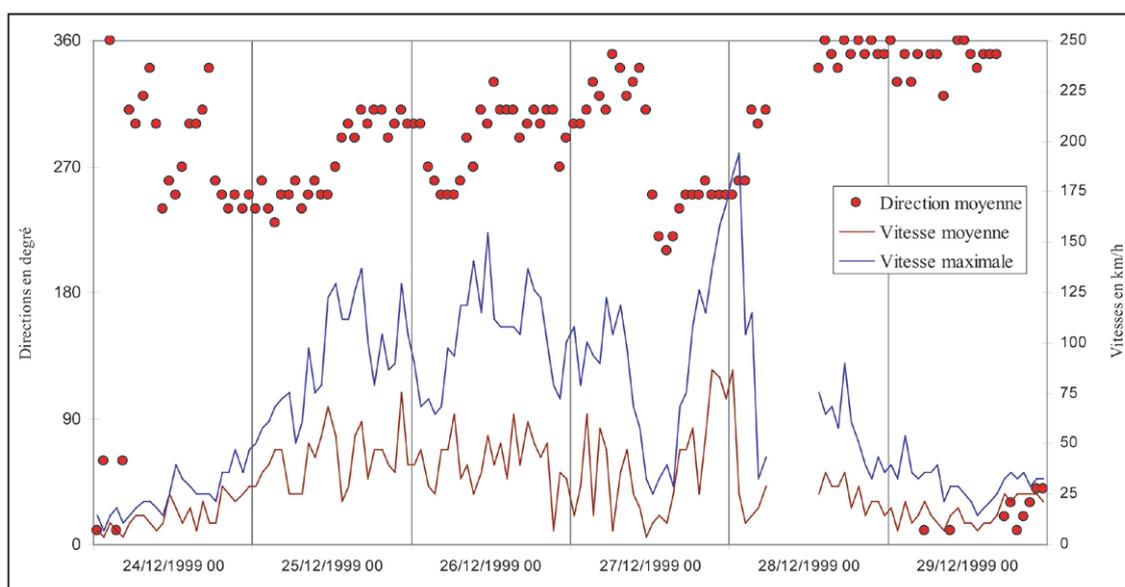


Fig.V.1.15 : Evolution des directions moyennes horaires et des vitesses moyennes horaires et maximales instantanées du vent à la station Météo-France de La Masse du 24 au 29 décembre 1999 (2800m, sur crête).

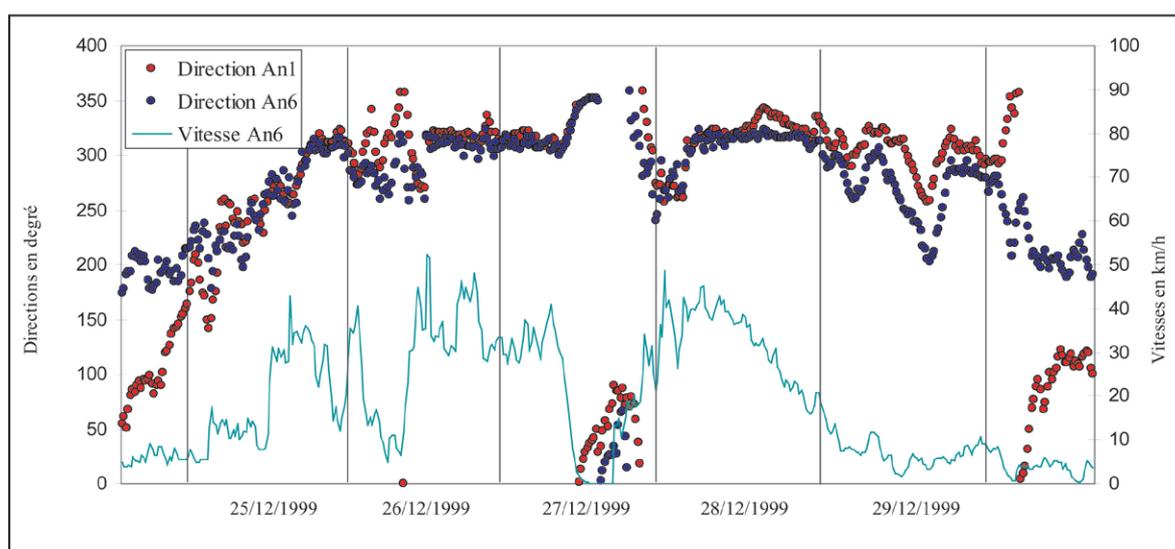


Fig.V.1.16 : Evolution des directions et des vitesses à Val Thorens sur les versants ouest et nord du 25 au 30 décembre 1999.

An1 : versant ouest ; An6 : versant nord ; les vitesses des deux anémomètres sont similaires. On distingue bien les brises de pentes avant et après les tempêtes.

vallée, sans toutefois observer un écart vraiment important, et sans forcément une diminution linéaire avec l'altitude. Par contre les directions changent car l'effet de la topographie locale devient déterminant dans l'orientation du vent. Ainsi au fond de la vallée des Bellevilles, le vent prend une composante nord. On peut aussi imaginer que les rafales à ce niveau sont bien plus rares et moins puissantes qu'en haut de versant.

• Relations températures / vents :

Elles sont remarquables pendant les tempêtes. Durant 3 jours, du 25 au 28, les températures évoluent en fonction des masses d'air chaudes amenées par des vents violents, et des refroidissements provoqués par une chute de la vitesse du vent et l'imposition des brises. En fin de perturbation, les températures chutent alors vraiment avec le passage du front froid associé et le retour de l'anticyclone. Ce système est assez classique en hiver, mais **seules les perturbations venant de l'ouest provoquent des remontées aussi spectaculaires des températures** (fig. V.1.18). Généralement elles stagnent avant de tomber. Les chutes de neige sont aussi associées à cet épisode d'ouest.

Finalement, la vulnérabilité des stations de ski face aux vents forts dépend donc de la prévision des tempêtes ou du foehn. Ce sont les seules conditions synoptiques qui provoquent des vents suffisamment forts pour engendrer des dégâts. L'analyse des données nous permet de caractériser avec précision les directions et les vitesses de ces vents, ce qui donnent aux acteurs et aménageurs de la montagne des indications importantes dans la compréhension des risques locaux (à Aussois par exemple nous verrons que le foehn est bien moins puissant que les vents de tempêtes, ce qui n'est absolument pas le cas aux Menuires, à Val Thorens et à Valloire).

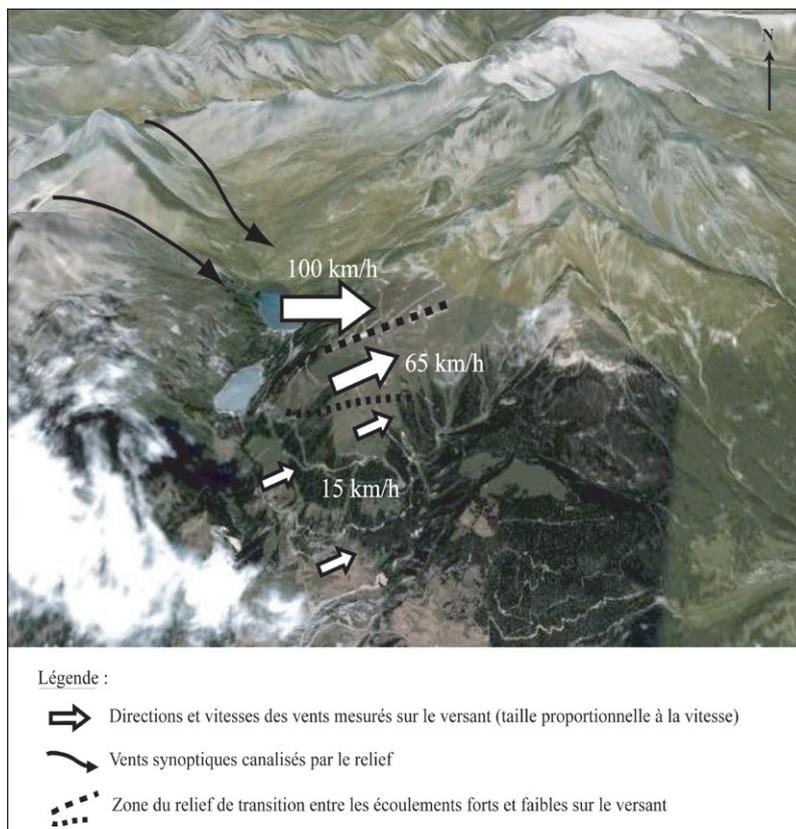


Fig.V.1.17 : Vitesses maximales du vent enregistrées à Aussois le 28/12/1999 à 13h.

Le relief agit sur deux échelles pour orienter et canaliser les vents forts : en bas de versant, le vent arrive de la vallée de la Maurienne et a été fortement ralenti. Au niveau de la combe du Fond d'Aussois, l'accélération est manifeste, par les ouvertures des cols orientés à l'ouest et nord-ouest (flèches noires). Sur le versant, les traits pointillés délimitent les saillies du relief qui décomposent le versant sur des distances très courtes et sélectionnent ainsi les écoulements d'échelle supérieure.

Image : Google Earth/CNES.

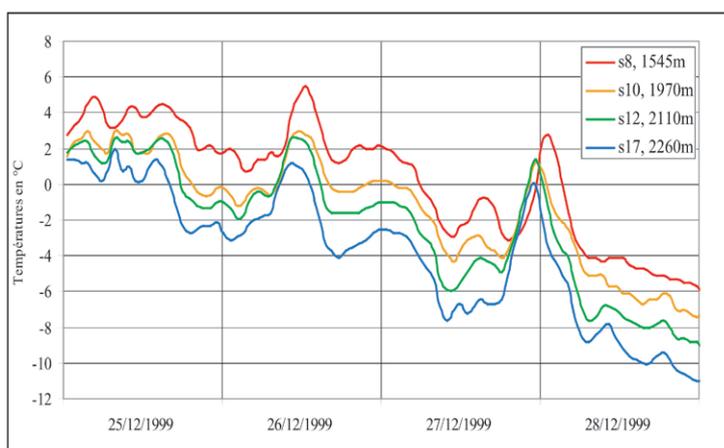


Fig.V.1.18 : Evolution des températures à Aussois du 25 au 28 décembre 1999 sur le versant sud d'Aussois.

On observe un pic de température vers minuit le 27/12/1999 correspondant au passage de la seconde tempête.

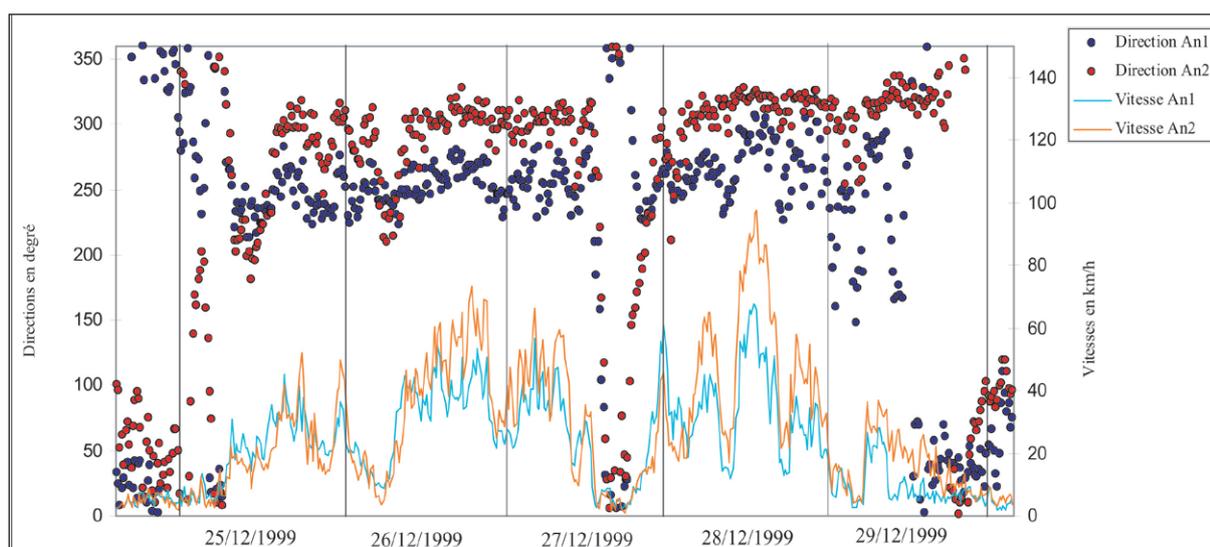


Fig.V.1.19 : Evolution des directions et des vitesses du vent du 24 au 29 décembre 1999 en haut du versant d'Aussois (2200m).

Le pic de vitesse n'est pas enregistré vers le 28 vers minuit mais il se décompose en trois dont le summum est atteint vers 13h, soit 12h après le passage du front chaud. Les valeurs maximales de vents sur les versants ne sont pas liées aux maximales en altitude, car plus l'on s'enfonce à l'intérieur du massif, plus les vents sont canalisés en multiples courants.

L'anémomètre 2 orienté à l'ouest capte les vents les plus forts. Il n'y a pourtant que 350m séparant les deux anémomètres, mais cela suffit pour que le 28 à 13h il existe une différence de 35 km/h (en moyenne la différence de vitesse est plutôt de 10 km/h).

V.1.2.c. Types de circulations entraînant des chutes de neige

Nous avons corrélé la classification Perret et les hauteurs de neige journalières à Aussois et St-Marcel-de-Belleville, deux postes de mesure situés à 1500m dans deux vallées différentes. L'objectif est dans un premier temps de déterminer quels sont les types de circulations qui provoquent des chutes de neige supérieures à 5cm par jour, et de voir ensuite s'il existe une différence notable entre les deux sites par rapport aux résultats.

- La quantité de neige tombée de 1995 à 2005 est de 20% supérieure à St-Marcel qu'à Aussois.
- Généralement lors d'un même épisode neigeux, il neige plus à St-Marcel.
- Dans les deux cas, les situations synoptiques les plus propices aux chutes de neiges

sont **les situations d'ouest cycloniques (30% des cas à Aussois, 22% à St-Marcel)**. Puis viennent tous les flux du nord au sud en passant par l'ouest (9cd, 8b, 4b). Les retours d'est sont peu propices car peu courants, avec 4% des cas pour les deux stations, mais alors il neige plus à Aussois. Notons aussi que 25% des cas de neige plus abondante à Aussois sont provoqués par des situations d'ouest cyclonique, suivis par les flux de sud-ouest. La vulnérabilité de la Haute-Maurienne par rapport à l'enneigement est issue de plusieurs facteurs (position d'abri, exposition...), dont celui synoptique qui implique que les fronts froids doivent venir plutôt du sud-ouest, corrélation loin d'être évidente.

V.1.3 Périodes de foehn

V.1.3.a. Rappel sur le foehn

Le foehn est un vent chaud, sec et turbulent qui dévale les pentes en aval d'un relief montagneux abordé par un écoulement atmosphérique. En montagne et en hiver, ses conséquences se ressentent sur le manteau neigeux et sur la violence des vents.

Longtemps, le foehn fut considéré comme un mythe dans les Alpes françaises. Ce n'est qu'en 1976, après la thèse de Claude BUCHOT, que le foehn fut vraiment considéré comme tel, dans les vallées de la Tarentaise et de la Maurienne (BUCHOT C., 1978). La station de Bourg-Saint-Maurice servit d'ailleurs à étudier ce phénomène. La thèse de Marie Lothon (LOTHON M., 2002), tirée de l'expérience MAP, permet de faire le tour du sujet. Son étude phénoménologique nous amène à la figure V.1.20 :

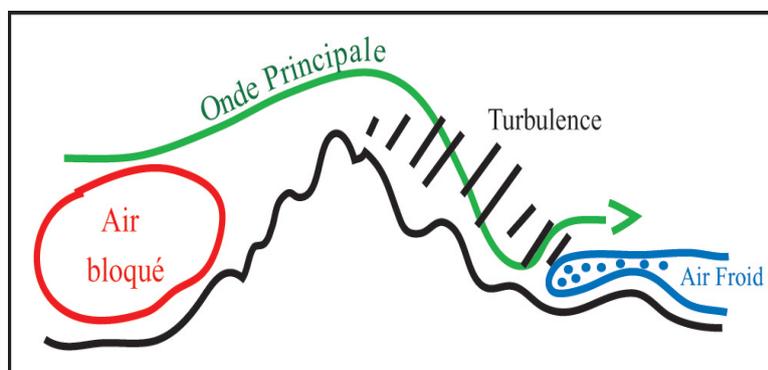


Fig.V.1.20 : Schéma directeur bi-dimensionnel du phénomène du foehn.
D'après LOTHON, 2002.

La masse d'air froid située sous le vent est à relier avec le vent de compensation mesuré dans le fond de vallée des Bellevilles grâce aux données de l'enneigement artificiel (fig.V.1.24).

Le foehn en Savoie ne souffle que dans les vallées de Haute-Tarentaise et de Maurienne (axe Bourg-Saint-Maurice - La Toussuire). Il existe différents indices qui permettent de prévoir l'éminence d'une séquence foehnique : un talweg sur l'Atlantique à 500 hPa, une dorsale située sur l'Italie. Le système hautes-basses pressions subit une déflexion vers l'est due à la rotation de la Terre. Le foehn se déclenche quand la partie occidentale de la dorsale mobile passe sur les

Alpes. Enfin, l'air froid en altitude est déterminant dans le processus engendrant le foehn. La goutte froide, située généralement au large du Portugal, détermine son déclenchement. Il existe au final quatre situations classiques de déclenchement du foehn : océanique de sud-ouest ; classique de sud ; méditerranéenne de sud-est ; continentale de nord-est (SOUHAITE P., 1993). La figure V.1.21 nous montre les types de circulations Perret qui provoquent le plus le phénomène de foehn. Les types 8a' et 8a correspondent à des situations océaniques de sud-ouest.

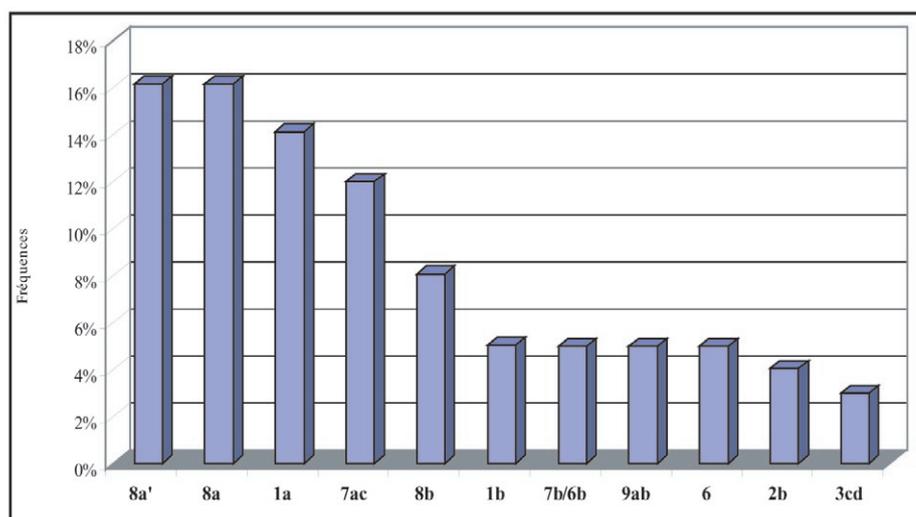


Fig.V.1.21 : Fréquence des situations Perret entraînant des types de temps C5 (foehn).

Les dépressions sur les Iles Britanniques et surtout sur le golfe de Gascogne provoquent 32% des épisodes de foehn par des courants de sud-ouest particuliers.

V.1.3.b. Un exemple de foehn fort

Le foehn est un phénomène qui donne aux températures, à l'humidité et aux directions des vents **des valeurs très constantes dans le temps**. Pour chaque site, le relief oriente toujours le foehn de la même manière, qui facilite la prédiction des directions des vents. Par contre, les vitesses sont quant à elles plus aléatoires, mais parfois très fortes. Pour illustrer ce phénomène et observer le comportement des paramètres sur les versants, nous allons analyser une période de foehn particulière, **du 01/12/2003 au 04/12/2003**. La situation synoptique se présente comme ceci : après une situation de sud cyclonique le 30 (1b/C6), une dépression sur le golfe de Gascogne s'installe et les Alpes se retrouvent dans un flux de sud-ouest du 01 au 03 (8a'/C5). Le 04, on passe en 6/C1, mais le foehn perdure. A Bourg-Saint-Maurice, les températures moyennes journalières sont de 11°C environ, l'humidité de 40%, l'insolation très faible. Le vent est fort (25m/s en rafale). A Bessans, dans le fond de la vallée de la Maurienne, on note tout de même des précipitations ainsi qu'à Aussois, mais pas ailleurs sur le département.

Tous les sites de l'étude sont sensibles au foehn. Une rapide analyse des vents montre qu'il arrive par le sud dans la vallée des Bellevilles, par le sud à Valloire et par l'est à Aussois. Les vitesses croissent aussi avec l'altitude. Le foehn souffle donc de manière rectiligne en altitude, puis épouse la forme du relief en ralentissant. Les grandes vallées comme la Maurienne ne permettent pas au foehn de souffler dans sa direction synoptique, car il est plutôt canalisé du haut vers le bas de la vallée, en provenant donc de l'est. La limite entre le foehn d'altitude et

celui canalisé sur le versant sud de la Maurienne n'a pas pu être définie, mais elle est supérieure à 2300m. **Quant aux versants, ceux exposés au nord reçoivent un foehn de sud, ceux de l'ouest et de l'est un foehn de sud-est et de sud-ouest respectivement. Il est plus difficile de caractériser les directions sur les versants sud car cela dépend de la protection offerte par son vis-à-vis de nord.** Enfin dans la vallée des Bellevilles ou à Valloire, le foehn souffle depuis le sud dans les fonds de vallée. Cette situation rappelle les directions des brises de montagne diurnes dans la vallée des Bellevilles, montrant que le relief peut provoquer un effet similaire pour deux situations bien différentes. Le foehn entraîne aussi des gradients thermiques très caractéristiques, de mêmes valeurs que ceux provoqués par les dépressions.

Les Menuires : le foehn commence le 01 vers minuit et finit le 04 vers midi. Deux périodes ont connu une baisse du foehn, le 03 vers minuit et le soir. Il est très régulier du 01 au 03, puis connaît deux gros sursauts le 03 et le 04. Les directions et les vitesses (fig. V.1.23) mesurées en trois points (fond de vallée, milieu de versant, haut de versant) nous procurent des indications importantes pour comprendre la climatologie locale engendrée par le phénomène de foehn. Pendant l'épisode maximal (du 01 au 02), *les directions sont très constantes par rapport à l'altitude. Mais plus on s'approche des crêtes, plus la variabilité de la direction du foehn est marquée (An4 : 5° ; An1 : 15° ; An5 : 20°), dans des proportions qui restent tout de même faibles.* **La direction du foehn en fond de vallée est remarquable par sa régularité, comme pour les brises de montagne.** Les vitesses sont plus variables. Lors de l'installation du foehn, elles restent assez uniformes sur le site, et atteignent 50 km/h en 12h, puis les crêtes subissent des périodes d'une heure environ à des pointes de 100 km/h, alors que le reste des vents soufflent vers 50 km/h, et 30 en fond de vallée. On constate aussi que lorsque le vent atteint 100 km/h sur les crêtes, les vitesses sur le versant diminuent, alors que lorsque les vitesses atteignent 70 km/h au milieu de versant, les vitesses sur les crêtes diminuent. **En moyenne, la vitesse du foehn est divisée dans ce cas par deux entre les crêtes et le fond de vallée situé 1200m plus bas** (fig.V.1.24).

Deux phénomènes particuliers se produisent à la faveur d'une baisse de la vitesse du foehn. Le 02 au soir, un vent de nord, de faible vitesse, remonte le fond de vallée. Il apporte de la fraîcheur car les températures en fond de vallée diminuent à ce moment là. **Il existe donc un vent de compensation qui amène de l'air du bas de la vallée des Bellevilles quand le foehn se calme.** Se produisant en nocturne, le faiblissement de la vitesse entraîne une aspiration. Ce phénomène particulier se reproduit dans la nuit du 03 mais le vent de nord ne touche que le milieu du versant, avec un cisaillement très important.

Les températures (fig.V.1.22) sont bien régulières sur le versant du 01 au 03, en restant dans une marge de 2°C pour chaque sonde. Le gradient oscille alors vers -0,8°C/100m. Puis, l'insolation va marquer les températures et en journée on atteint le 03 et le 04 un gradient de +1°C/100m. Les températures redescendent alors la nuit. Mais cette relation n'existe que pour les sondes situées sous 2000m. *Le bas de versant réagirait donc différemment du haut de versant, en étant plus sensible au réchauffement diurne, et au refroidissement provoqué lors de la mise en place du vent de compensation* (fig.C.1.25).

L'humidité relative est assez forte sur le site pendant cette période. Les taux sont uniformes vers 60%, sauf pour la sonde 14 (bas de versant) avec 50% et le haut de versant avec 80%.

L'humidité est donc plus importante que prévue. L'évolution constante des taux s'interrompt le 04 à 18h, en corrélation avec les autres paramètres.

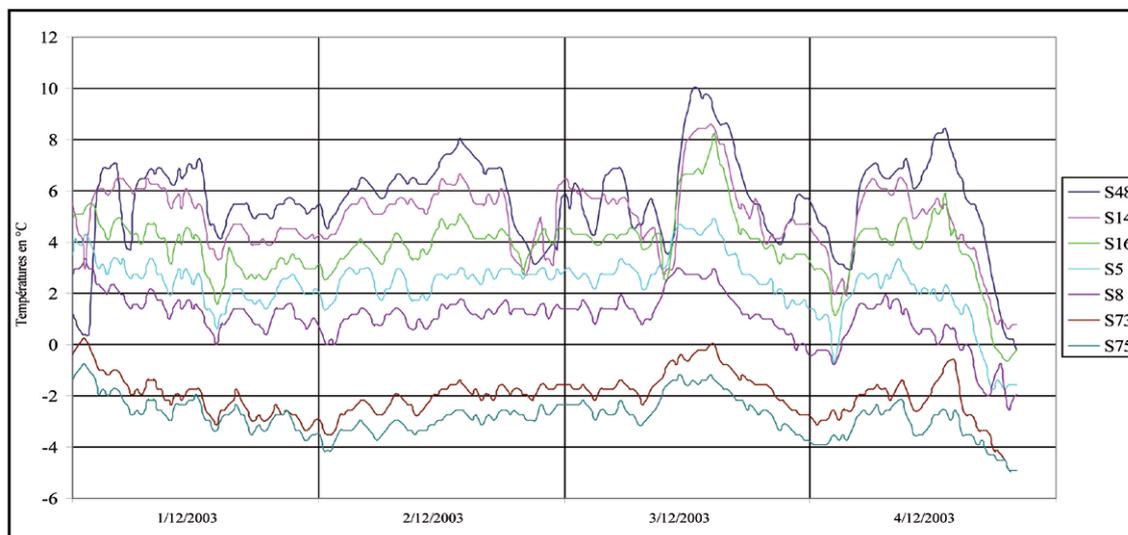


Fig.V.1.22 : Evolution des températures à sept points de mesure sur le versant ouest des Menuires lors d'une période de foehn du 01/12/2003 au 04/12/2003.

Altitudes : s48 : 1675m ; s14 : 1860m ; s16 : 2050m ; s5 : 2270m ; s8 : 2420m ; s73 : 2682m ; s75 : 2813m.

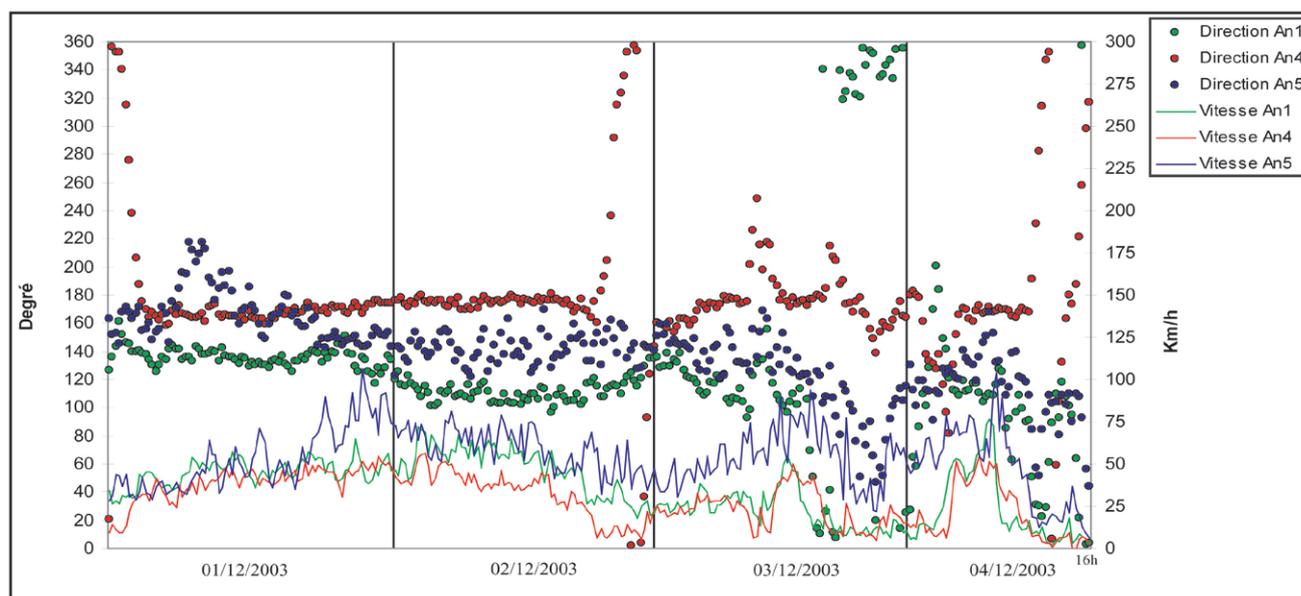


Fig.V.1.23 : Evolution de la direction et de la vitesse du vent en trois points de mesures sur le versant ouest des Menuires du 01/12/2003 au 04/12/2003.

Altitudes : An1 : 2280m ; An4 : 1770m ; An5 : 2800m.

Val Thorens : les températures et le vent restent très constants du 01 au 04 à 14h, ce qui montre que seul le fond de vallée des Menuires connaît des variations liées à l'effet d'aspiration. Les directions restent très constantes sur le site avec des écarts-types de seulement 10° en partie provoqués par les turbulences, et les vitesses sont sensiblement identiques que sur le milieu de versant des Menuires. Les températures s'étalent de -4°C vers 2800m à 1°C à 2200m (le versant sud est le plus chaud). Même si l'effet de foehn contraint en effet fortement les paramètres atmosphériques, on retrouve les particularités thermiques qui font du centre du cirque de Val Thorens, ainsi que le versant sud et ouest, des zones vraiment chaudes par rapport à l'altitude.

Quant à l'humidité relative, elle garde les mêmes valeurs qu'aux Menuires, vers 60%.

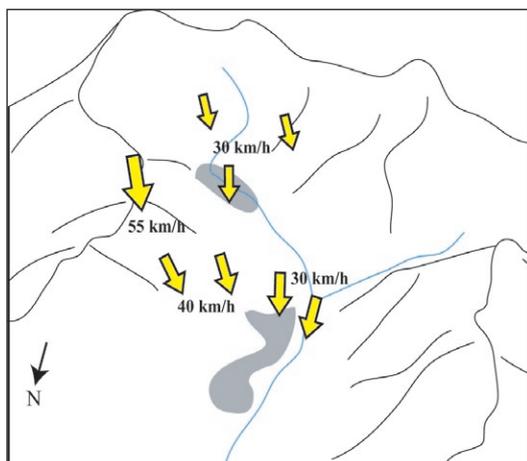


Fig.V.1.24 : Directions et vitesses moyennes du vent dans la vallée des Bellevilles lors de l'épisode de foehn du 01 au 04/12/2003.

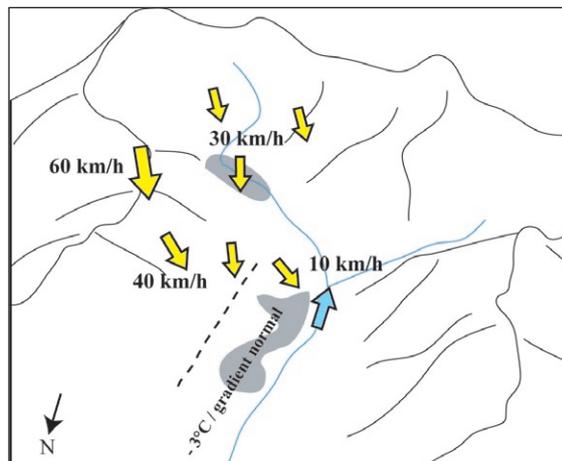


Fig.V.1.25 : Directions et vitesses du foehn ainsi que du vent de compensation (flèche bleue) et chute des températures associée en fond de vallée (symbolisée par les traits pointillés) le 02/12/2003 au soir.

Aussois : alors que le 29/12/2003 le temps est beau avec des brises thermiques, le 30, le flux passe au sud et le temps devient variable avec des vents de nord sur tout le versant, de vitesse inférieure à 5 km/h. Cette aspiration dans la mise en place du foehn est tout à fait remarquable puisqu'elle dure pratiquement toute la journée du 30. Ensuite, les vents mettent deux heures à tourner du nord à l'est, dès le début du 01. Car sur ce versant, le foehn souffle depuis l'est, canalisé par la vallée de la Maurienne (mais pas vers les crêtes où il souffle depuis le sud comme pour Val Thorens). Un seul cas remarquable, l'anémomètre 4 situé sur le versant sud-ouest qui enregistre pendant cet épisode des vents de sud et de sud-ouest quand la vitesse faiblit (fig. V.1.26). D'ailleurs, on observe une variabilité spatiale des directions beaucoup plus importante que dans la vallée des Bellevilles, à cause des écoulements bidirectionnels engendrés par la topographie. La vitesse maximale enregistrée est de 60 km/h pour l'anémomètre 1 (contrairement aux Menuires, le vent le plus fort n'est pas le foehn, mais les synoptiques d'ouest), bien exposé, alors que l'anémomètre 2 situé en amont sur le versant ouest enregist-

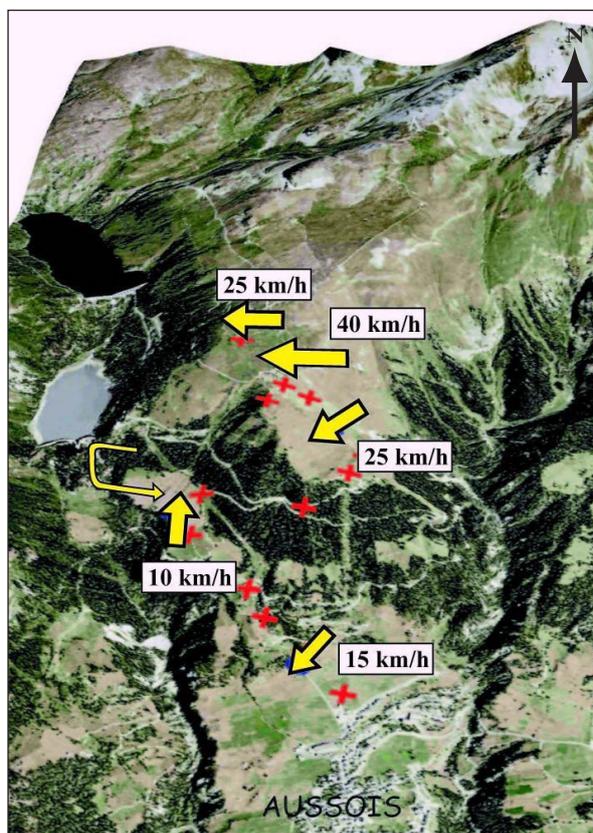


Fig.V.1.26 : Directions et vitesses moyennes du foehn sur le versant sud d'Aussois du 01 au 04/12/2003.

Le rotor visible (ou inversion de la direction) sur le versant sud-ouest se met en place lorsque la vitesse générale du foehn faiblit. Quant aux vitesses maximales, elles sont mesurées sur le relief le plus exposé à l'est et avancé dans la vallée.

Image : Photoexplorer IGN. MNT : IGN BD Alti.

tre des vitesses de 15 à 20 km/h de moins. En bas du versant, le foehn n'atteint guère plus de 25 km/h. On observe aussi de fortes variations de vitesses surtout en haut du versant, allant du simple au double. Le gradient thermique quant à lui oscille entre $0,90^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ et $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ le jour, pendant tout l'épisode. *On peut accorder à cette valeur de gradient la spécificité du foehn.* Aucun refroidissement de bas de versant n'est remarqué. On se situe à 5°C en bas de versant à 1500m et -1°C à 2200m. Enfin l'humidité relative est forte, proche de 70%.

Remarques : ces valeurs ont été vérifiées lors d'autres épisodes de foehn, même si l'épisode étudié ici correspond à un foehn fort et qui perdure dans le temps. Souvent les périodes de foehn sont plus courtes (1 à 2 jours).

Valloire : C'est un site connu pour ses périodes importantes de foehn, comme toutes les vallées orientées sud-nord du sud de la Savoie. Le foehn comme les vents synoptiques atteignent des vitesses maximales similaires, vers 60 à 70 km/h en haut du versant ouest du Crey du Quart, et vers 45 km/h sur la Sétaz. La Combe de l'Aiguille Noire engendre lors des périodes de foehn les vents les plus forts du site. La comparaison ne peut malheureusement pas être faite avec le fond de vallée de la Valloirette, car l'anémomètre, posé au début du versant ouest, reste bien protégé. Le vent y dépasse rarement 25 km/h. L'anémomètre 3 est aussi protégé sur le versant nord, en étant posé sur une piste bordée de forêt (fig.V.1.27). Mais on peut extrapoler en montrant d'après ces résultats que, pour ces deux vallées, le foehn diminue fortement lorsque l'on approche du fond de vallée, d'autant plus s'il existe des barrières naturelles comme la forêt par exemple (analyse des vents en surface). Les anémomètres 3 et 6 connaissent des variations de directions très importantes, de l'est à l'ouest, en passant par le sud. Par contre, les autres anémomètres situés plus en hauteur, sont très réguliers.

Les températures sont moins constantes que sur les autres sites. Le versant nord de la Sétaz reste positif ($4,5^{\circ}\text{C}$ à Valloire, 2°C à 1850m), sauf vers 2000m sur le replat où l'on est légèrement négatif. Même constat dans la vallée de la Valloirette avec des températures de 3 à 5°C . Sur le versant nord-est de la Sétaz, on est légèrement positif, et enfin sur le versant ouest du Crey du Quart, le gradient est respecté, de 1°C au fond de la vallée de l'Aiguille Noire (1800m) à $-3,5^{\circ}\text{C}$ à 2400m. Au final, le gradient thermique oscille entre $-0,7$ et $-1^{\circ}/100\text{m}$. Mais il existe un réchauffement autour du versant nord de la Sétaz jusqu'à 2000m. Signalons que les températures gé-

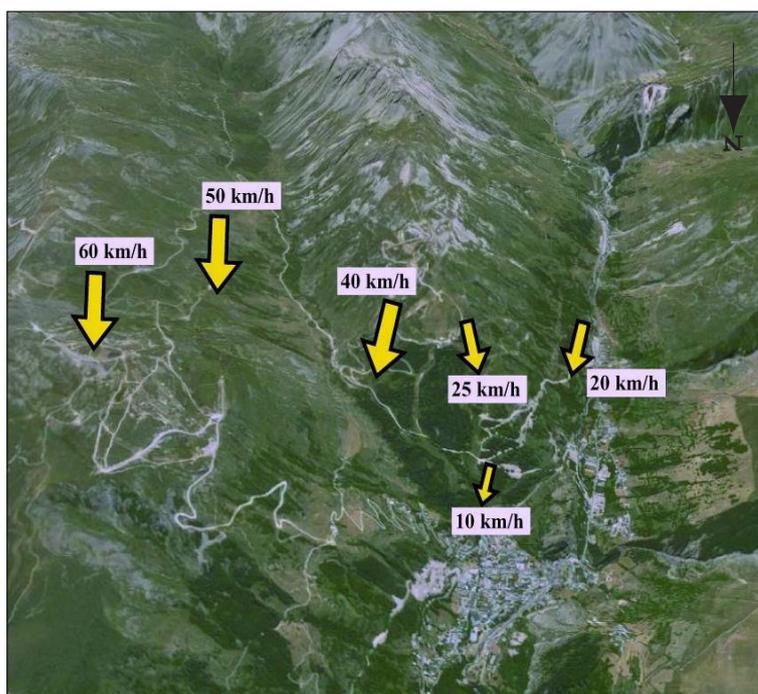


Fig.V.1.27 : Directions et vitesses moyennes du foehn à Valloire du 01 au 04/12/2003.

Image : Google Earth / CNES/Spot Image.

nérales prennent 2°C de plus en journée. Enfin l'humidité relative est forte, de 60% en fond de vallée à 90% en haut de versant.

Variabilité spatiale de l'effet de foehn : l'épisode que nous venons d'étudier ne reflète pas forcément la multitude des mises en place qui peuvent exister. Souvent l'épisode de foehn est faible et ne se fait ressentir qu'à certains endroits. Ainsi, du 24/02/2003 au 26/02/2003, alors que le flux est orienté au sud, l'analyse des données montre que les vitesses et les directions du vent ne réagissent qu'à Val Thorens sur le versant nord et ouest. Les vitesses sont fortes (40 km/h). En face, sur le versant sud, les anémomètres enregistrent un faible vent de sud au début puis un vent de nord constant et faible (donc un vent en sens contraire). Aux Menuires, pas de foehn ni en haut des crêtes ni en bas, mais des brises. On remarque même vers 14h des brises de vallée en fond de vallée... Qui pourrait être dans ce cas un vent de compensation. Le foehn interagit donc ici avec les brises, en ne soufflant qu'en haut des crêtes.

Plusieurs autres observations ont montré que le foehn est très souvent présent lors de flux de sud-ouest à sud-est, alors qu'il n'est pas capté par les stations Météo-France. On le retrouve à Valloire mais pas à Aussois, ou l'inverse... Le foehn semble donc souffler très souvent en altitude lors de ces flux synoptiques, et échappent aux capteurs. Les hauts des versants nord (comme à Val Thorens) sont alors vulnérables face à ce vent chaud pour l'enneigement.

V.1.3.c. Remarques sur les retours d'est

Le retour d'est naît de la déflexion du courant de sud-est, et provoque de fortes précipitations (parfois neigeuses) et du foehn sur la Haute-Maurienne. Ces précipitations sont vraisemblablement liées à la Lombarde qui souffle sur la Maurienne et la Vanoise. Généralement les retours d'est sont impatientement attendus par les professionnels du ski et par les touristes, mais ils restent très rares, surtout en hiver. Et si la vitesse du vent en altitude est trop forte, on n'observera que des précipitations sur la crête frontalière de la Haute-Maurienne et du foehn violent partout ailleurs. Associés à la classique dépression sur le golfe de Gênes, les retours d'est sont plus fréquents en automne avec des conséquences catastrophiques (crues de l'Arc et de ses affluents en Haute Maurienne). Depuis plusieurs années nous n'avons pas constaté de retours d'est importants (1 à 2 par hiver).

V.1.4 Spatialisation des températures dans la vallée des Bellevilles.

Les températures peuvent être spatialisées afin de mieux observer comment elles varient en fonction de situations météorologiques particulières, comme celles étudiées dans la partie précédente : forte inversion de température, conditions dépressionnaires, nuits anticycloniques, foehn. Comme pour représenter les températures moyennes, nous avons effectué un krigeage sur les données avec le logiciel Surfer, en retirant les zones non renseignées. La densité du réseau de sondes et le choix important de situations différentes nous permettent de faire des comparaisons entre les différentes cartes et ainsi de mieux comprendre les particularités thermiques de cette vallée. Avec un exemple de versant de vallée et d'un amphithéâtre, au comportement thermique assez contrasté, nous avons ici le suivi de deux formes topographiques intéressantes.

Nous avons représenté sur la fig. V.1.28 la répartition des températures moyennes de la saison 2003-2004 sur le site. Cette carte nous rappelle les gradients thermiques du versant ouest des Menuires (avec l'importante ceinture chaude) et de l'amphithéâtre de Val Thorens (homogénéité des températures), ainsi que les étonnantes moyennes du versant ouest de Val Thorens. Cette répartition peut servir de référence afin de comprendre comment les autres situations météorologiques qui vont être représentées modifient la répartition moyenne. Nous n'indiquerons pas les valeurs des gradients thermiques qui, comme nous l'avons montré, n'ont aucun sens sur des zones aussi thermiquement contrastées par le relief (fig.V.1.29 à 1.34).

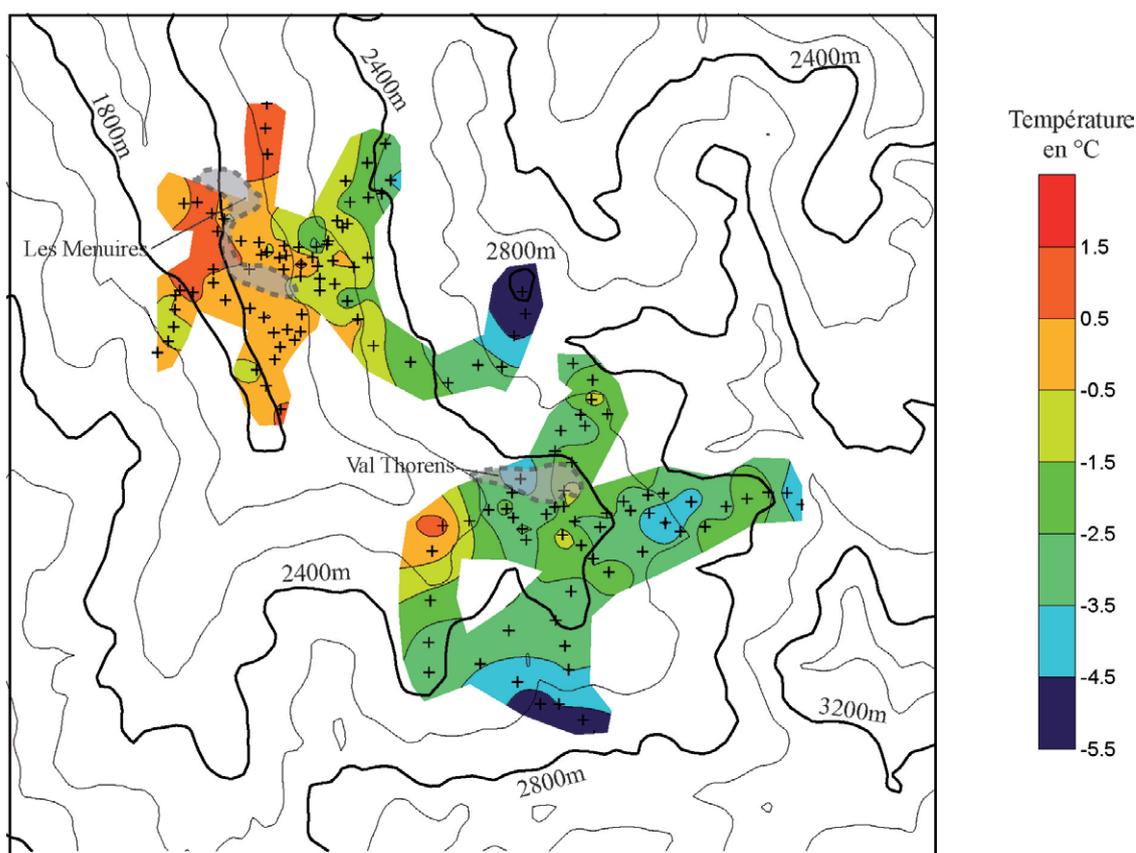


Fig.V.1.28 : Spatialisation des températures moyennes (de décembre à mars, saison 2003-2004) dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens.

MNT : BD IGN Alti. Krigeage avec Surfer.

On remarquera que l'altitude n'explique pas vraiment la répartition des températures moyennes annuelles sur les versants sud et ouest de Val Thorens.

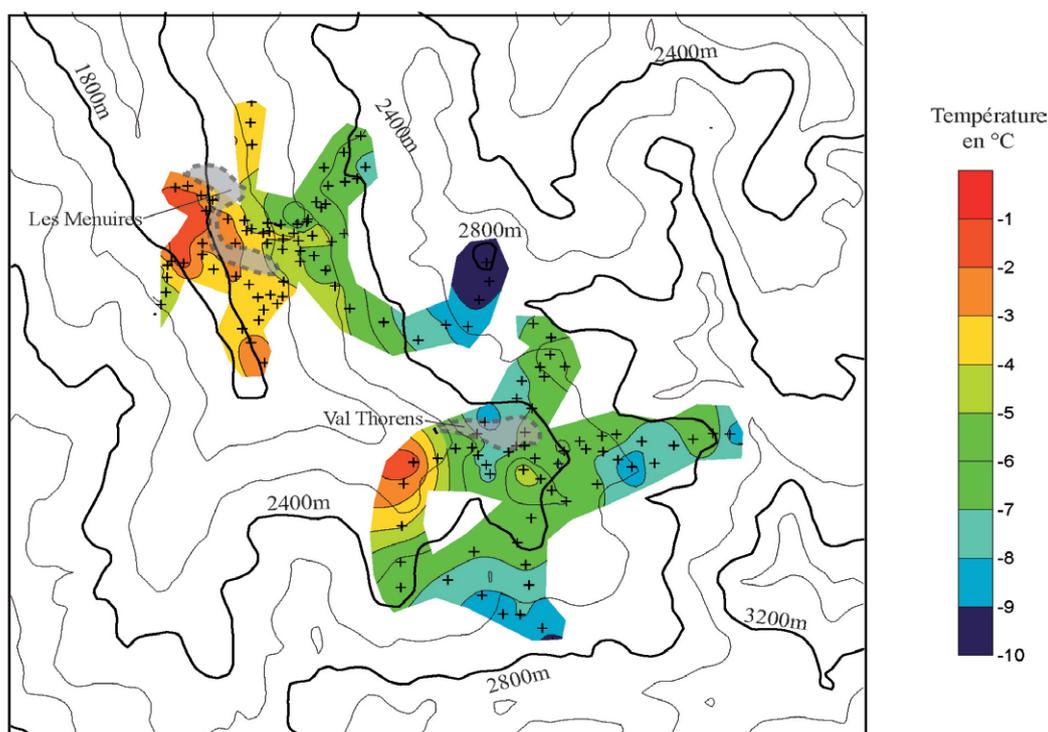


Fig.V.1.29 : Spatialisation des températures le 14/12/2003 à 14h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situation météorologique : code Perret/Savoie 4b/C7.

MNT : BD IGN Alti. Krigeage avec Surfer.

Le passage d'un front froid de nord-ouest apporte froid et instabilité. Les températures se calquent assez bien sur l'altitude, sauf dans le centre de l'amphithéâtre de Val Thorens qui semble être protégé des flux.

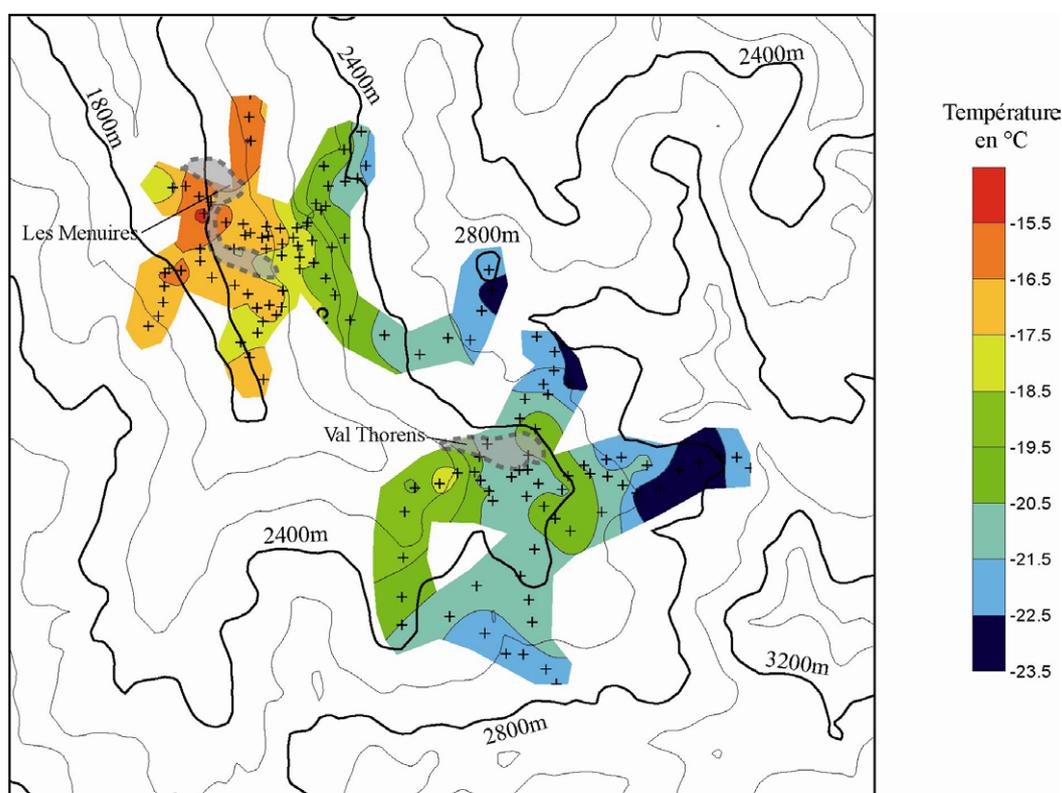


Fig.V.1.30 : Spatialisation des températures le 05/01/2004 à 4h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situation météorologique : passage code PS 5b/C7 à 6/C1.

MNT : BD IGN Alti. Krigeage avec Surfer.

Similaire au cas précédent, ce flux de nord cyclonique apporte un froid très intense assez rare. Dans ces conditions, les températures se calquent très bien sur l'altitude. Le bas des versant des Menuires reste la zone la plus chaude.

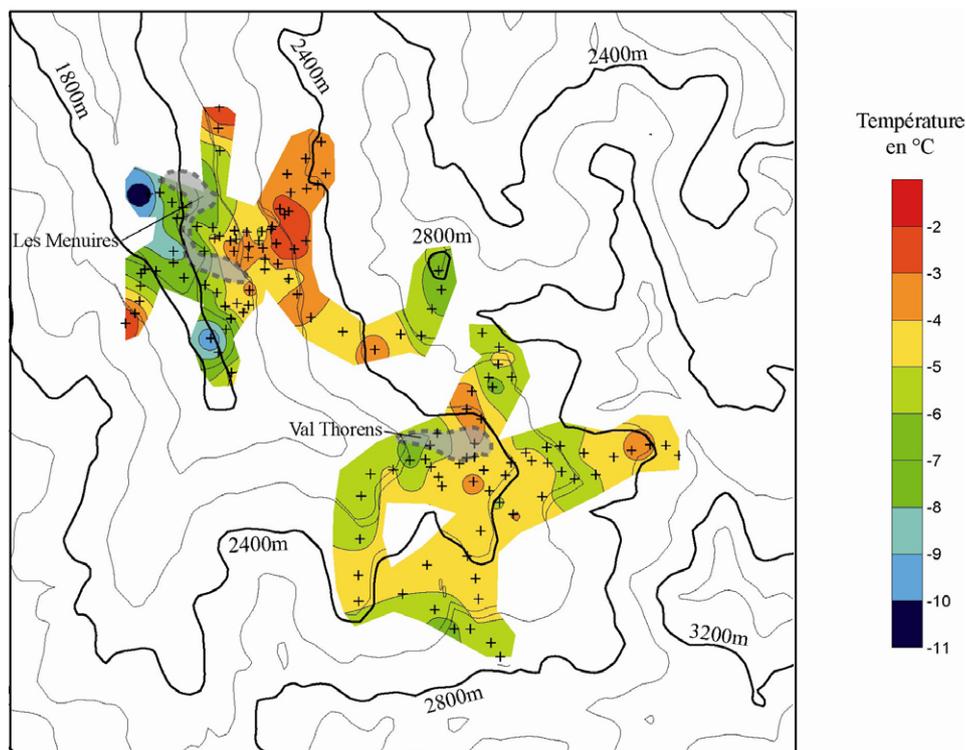


Fig.V.1.31 : Spatialisation des températures le 05/01/2004 à 4h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situation météorologique : code PS 4a/C1.

MNT : BD IGN Alti. Krigeage avec Surfer.

Voici une très belle **inversion de températures** particulièrement visible entre le fond de vallée et le milieu de versant des Menuires (8 à 9°C de différence). L'amplitude à A Val Thorens est plutôt de 3°C, pour une dénivelée identique.

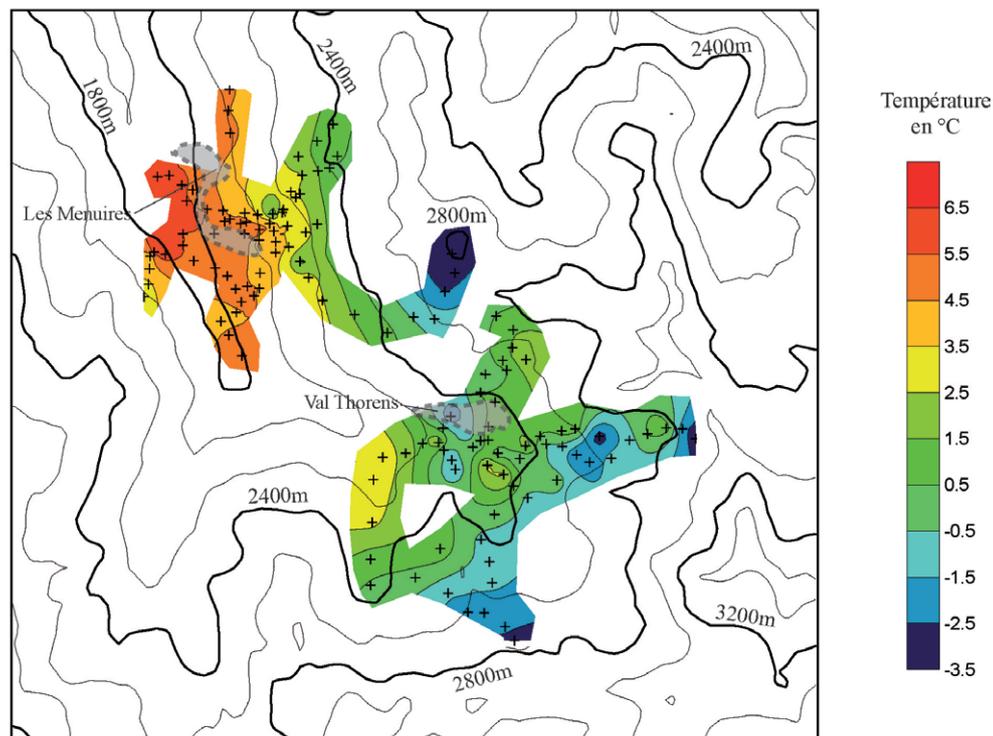


Fig.V.1.32 : Spatialisation des températures le 02/12/2003 à 3h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situation météorologique : code PS 8a/C5

MNT : BD IGN Alti. Krigeage avec Surfer.

Cette intense **période de foehn** nous montre que les températures s'organisent parfaitement avec l'altitude (sauf pour le versant sud de Val Thorens). Ce phénomène est typique des périodes de foehn, contrairement aux conditions dépressionnaires. On retrouve cette répartition pratiquement chaque fois que ce phénomène est bien déclenché.

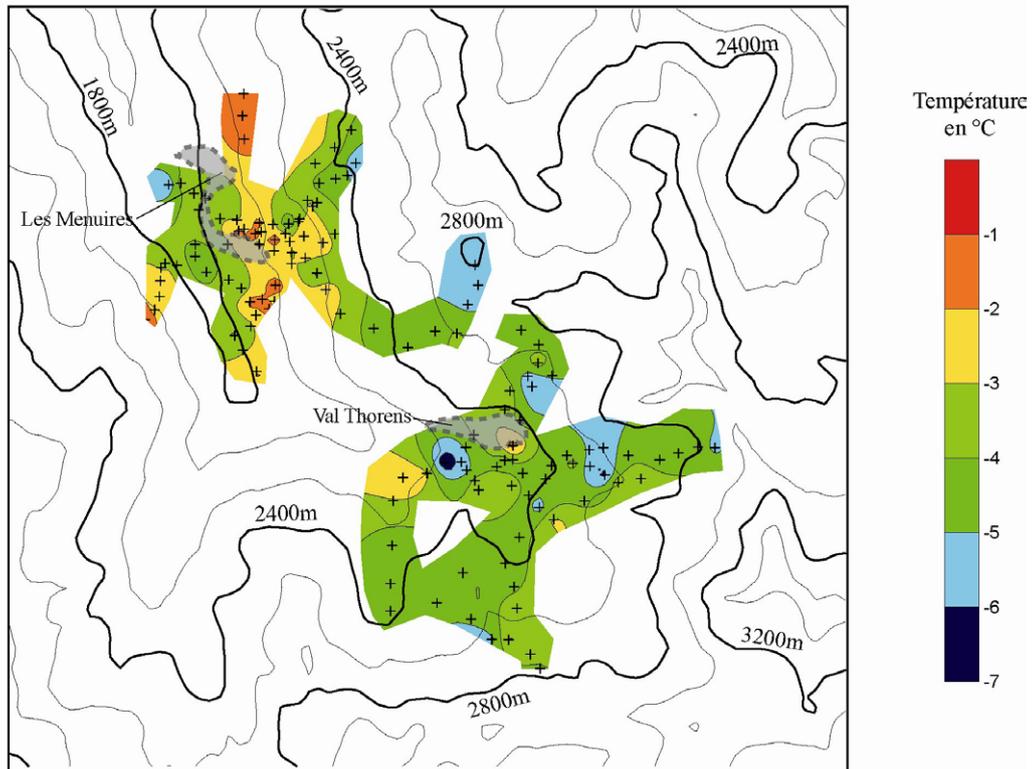


Fig.V.1.33 : Spatialisation des températures le 12/02/2004 à 8h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situation météorologique : code PS 5a/C1.

MNT : BD IGN Alti. Krigeage avec Surfer.

Un régime anticyclonique est installé avec une inversion apparente de températures. Sur le versant ouest des Menuires une symétrie s'est installée à partir du milieu du versant. Par contre, à Val Thorens, des îlots de fraîcheur apparaissent dans une répartition générale peu différenciée. C'est assez courant 5 jours après l'installation de l'anticyclone (voir partie V.1.1).

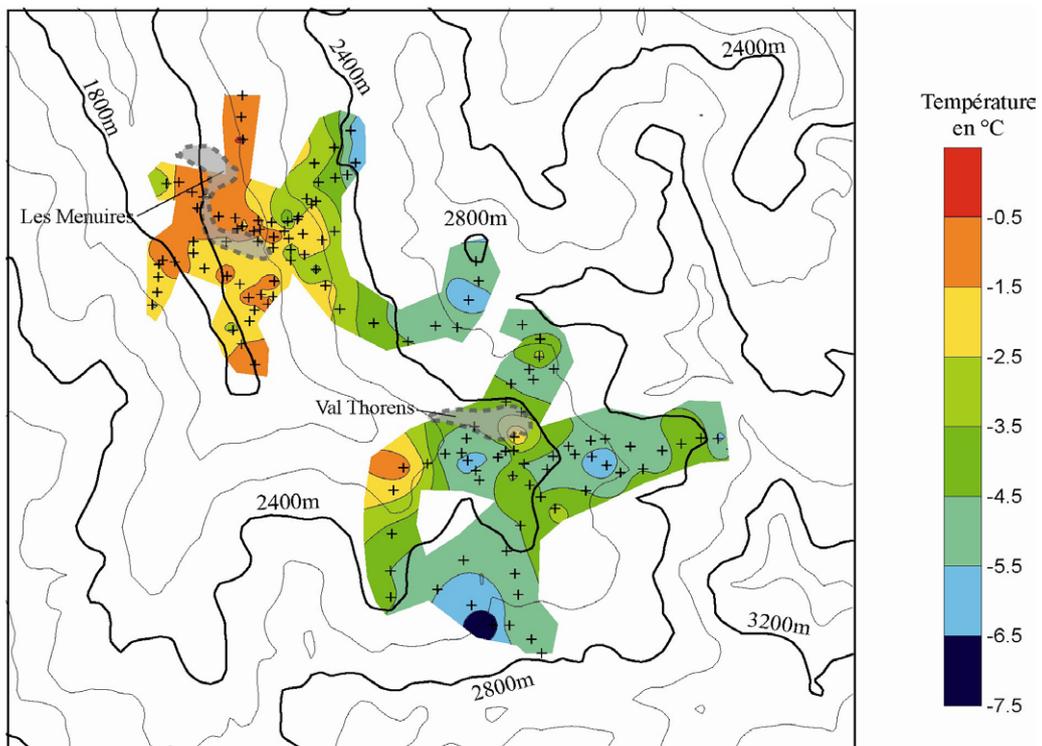


Fig.V.1.34 : Spatialisation des températures le 12/02/2004 à 20h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situation météorologique : code PS 5a/C1.

MNT : BD IGN Alti. Krigeage avec Surfer.

Au soir, la répartition des températures diffère du matin parce que les basses altitudes sont plus réchauffées.

Il existe bien sûr un nombre infini de combinaisons dans la répartition des températures en milieu complexe. Les cartes ici présentées nous offrent surtout un aperçu des «schémas» les plus courants qui ressortent de l'analyse des données. Ils mettent surtout en évidence les différentes dynamiques entre le site des Menuires et de Val Thorens. Alors que le premier, sur un versant complet, connaît des alternances inversion de fond / inversion apparente, avec une importante ceinture chaude (dont le rôle augmente sur les minimales), le second site de Val Thorens est beaucoup plus difficile à cerner à cause de la forte variabilité spatiale des températures qui s'exprime pourtant dans des amplitudes locales faibles. Le versant sud, sauf sur la figure V.1.30 par grand froid, a un gradient souvent nul.

Synthèse

Nous avons pu observer les réactions des températures, de l'humidité relative et du vent sur nos différents sites d'étude en fonction de certaines conditions synoptiques «classiques» qui se répètent assez souvent dans le temps. Le choix des sondes de mesures, principalement celles du versants des Menuires, fut motivé par le fait que nous disposions alors d'un transect de plus de 1000m sur un versant, du fond de vallée aux crêtes. En complétant ces mesures avec celles des autres sites, nous disposions d'un bon panel de situations pour étudier les réactions des paramètres locaux lors de phénomènes particuliers.

En conditions anticycloniques : les températures nocturnes sont beaucoup plus explicites que les diurnes car nous n'avons pas le problème de variabilité spatiale engendrée par l'ensoleillement. Nous aborderons d'ailleurs ce problème dans la prochaine partie de ce chapitre. Ce sont donc les phénomènes **d'inversions thermiques** qui sont les plus remarquables. **Presque toujours engendrés par le retour du beau temps après le passage d'un front froid, à la faveur d'une remontée nocturne des températures générales, leur mise en place est souvent complexe.** La topographie du site joue bien sûr un rôle important, car elle détermine l'intensité du refroidissement de fond de vallée et la présence de la ceinture chaude. De plus, *la dynamique nocturne des inversions est souvent différente d'un jour à l'autre, par les multiples changements thermiques qui s'opèrent à des échelles météorologiques supérieures.*

Les brises thermiques sont les principaux vents que l'on mesure pendant les conditions anticycloniques. Leur régime et leur type, bien définis par les moyennes, se révèlent parfois différents dans l'après-midi à cause des vents synoptiques qui soufflent dans l'axe des vallées. Mais en général, les brises, les températures et l'humidité lors des périodes anticycloniques sont fortement reliées entre elles, sauf lors de légères variations thermiques et humides qui ne se reflètent pas dans la ventilation catabatique.

En conditions dépressionnaires : d'une atmosphère stable à instable, les gradients thermiques changent complètement et les températures se calent sur l'altitude, avec parfois des chutes spectaculaires de températures. Les brises disparaissent et laissent leur place aux vents forts synoptiques, l'humidité augmente jusqu'à 90%... Dans ces conditions, c'est l'ensemble des paramètres qui réagit aux changements. Les observations faites sur les versants lors d'épisodes neigeux ou lors des tempêtes nous ont permis d'approcher à des échelles fines le comportement des para-

mètres mesurés. Au final, seul le vent connaît une phase «extensive» et devient alors le phénomène le plus remarquable. Le rôle de la topographie dans la modification de ses directions et de ses vitesses a donc pu être observé de plus près avec les sondes de l'enneigement artificiel, et il s'est avéré qu'au niveau de la surface, les vents synoptiques deviennent peu véloces lorsque l'on descend dans les fonds de vallées. Ils sont souvent vite remplacés par les brises thermiques catabatiques qui en hiver règnent sur la haute montagne.

Les transitions : entre conditions dépressionnaires et anticycloniques, le temps est «variable». Mais en hiver, **le changement est assez «abrupt»**. On dit que le temps change vite en montagne, mais ce constat est surtout lié à l'été. Car en hiver, même si les conditions de brouillards ou de mers de nuages varient en quelques heures, les paramètres comme les températures ou le vent subissent une contrainte forte et suivent le conditionnement des échelles supérieures. En, il fait très beau ou très mauvais...

Le foehn : ce vent semble d'après nos mesures bien plus présent qu'on ne le soupçonnait. Provoquant presque «l'immuabilité» des températures et de l'humidité durant son développement dans le temps, ce vent reste aussi très constant dans sa direction et sa vitesse sur la surface des versants. Soufflant très fort, et même plus que les forts vents d'ouest sur les versants, il provoque parfois lors de ses accalmies **des vents de compensation** dans les fonds de vallées, de direction opposée.

Après avoir observé le comportement des paramètres climatiques en fonction des types de circulations et leur enchaînement, nous allons étudier les relations qui existent entre les types de temps et ces paramètres, afin de systématiser les rapports et les liens observés entre les échelles du climat. Cette méthode, qui peut s'apparenter à un modèle de prévision statistique, sera complétée ultérieurement par l'analyse de la répartition spatiale des températures et des vents aux Menuires.

V.2 REGRESSION D'ÉCHELLE ENTRE LES TYPES DE TEMPS ET LES PARAMÈTRES ATMOSPHÉRIQUES MESURÉS AUX MENUIRES

En utilisant la classification Perret-Savoie, nous pouvons établir des rapports récurrents entre les types de temps et les mesures de températures sur les domaines skiabiles. Comme nous l'avons mis en évidence, lorsque l'on régresse dans les échelles en passant du synoptique au local, le comportement des paramètres tend à se simplifier. **C'est pourquoi un grand nombre de types de situations provoque un nombre beaucoup moins élevé de types de temps, qui eux-mêmes entraînent des comportements des températures ou du vent encore mieux définis.** Bien sûr, le nombre de cas est d'un point de vue systémique infini, mais à notre échelle d'étude on peut retrouver des similarités. Il suffit de connaître la température de la masse d'air (annoncée par exemple par Météo-France) à une altitude donnée, et le type de temps associé, pour retrouver grâce à la classification le type d'évolution temporelle et spatiale des températures sur le site. Pour cela, nous allons mettre en évidence les relations entre ces deux échelles climatiques. Il suffit ensuite de connaître les variations spatiales moyennes ou journalières des températures pour anticiper le comportement des températures sur l'ensemble du site. *Cette méthode s'apparente à un système de prévision statistique.*

V.2.1 Méthodologie

Nous allons utiliser la classification Savoie et les parangons qui ont été déterminés par l'analyse statistique. Ces parangons représentent les journées «types» qui correspondent le plus à la classe. Dans l'analyse, le programme de statistiques indique cinq parangons, mais nous avons aussi observé l'évolution des températures de ces journées types sur d'autres cas, afin d'avoir une vision d'ensemble. Les classes sont fortement sensibles aux températures moyennes. C'est pourquoi nous savons déjà qu'une classe C1 est plus froide qu'une C2. Mais cela entraîne parfois des variations locales spécifiques, comme les inversions de températures qui se déclenchent beaucoup plus avec des classes C1. Le gradient thermique est aussi fortement corrélé aux types de temps, il augmente avec les classes (de C1 à C10, de l'anticyclone puissant au front neigeux). Mais tout l'intérêt réside dans le fait d'utiliser plusieurs sondes à différentes altitudes représentatives de leur milieu local, pour ensuite se référer aux études sur les variations spatiales des températures.

Nous avons aussi analysé les taux d'humidité relative, mais finalement nous n'avons retenu ce paramètre que pour les types C1 et C2 et préféré des moyennes représentatives. Pour les vents, nous indiquerons les tendances générales, car leur nature (brises, foehn...) reste prévisible, même si aux échelles fines il existe des effets de cisaillement ou turbulence qui entraînent des directions et des vitesses différentes et donc des variations importantes, surtout par temps perturbé où les brises remplacent rapidement les vents synoptiques faiblissants.

Enfin, nous montrerons comment utiliser les résultats des croisements Perret/Savoie pour établir le système de prévision, le tout s'insérant dans la dynamique des enchaînements des types de temps.

V.2.2. Les correspondances types de temps / températures

Les sondes 48 (fond de vallée, 1670m), 18 (milieu de versant, 1940m), 7 (milieu haut de versant, 2380) et 75 (haut de versant - crête, 2810m) ont été retenus pour leurs mesures.

Les températures :

• *Type de temps C1*

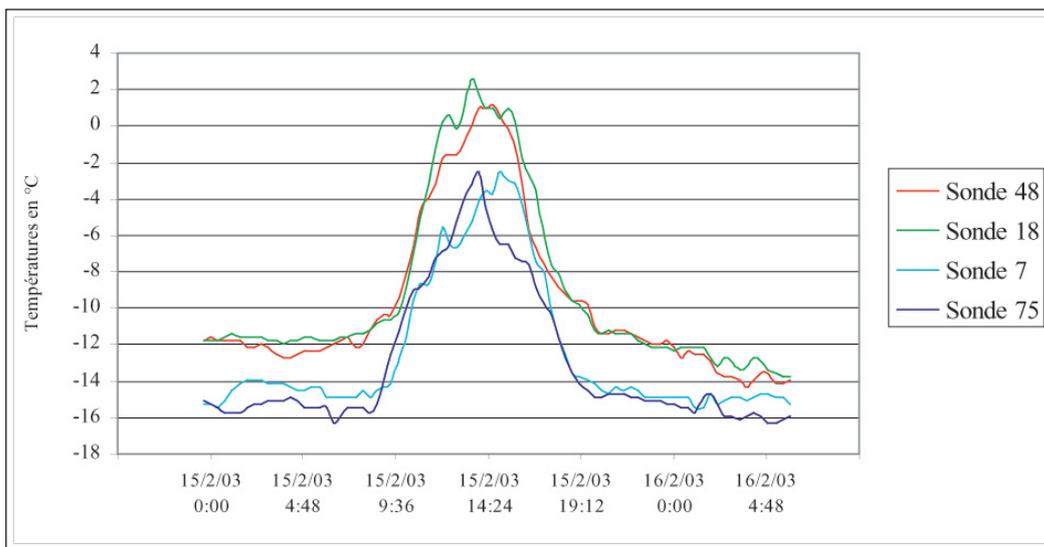


Fig. V.2.1 : Evolution des températures le 15/02/2003 aux Menuires.

Des températures froides et pas d'inversion nocturne, avec des possibilités de dégel en-dessous du milieu de versant. Sur plusieurs jours, l'évolution nocturne alterne entre chute et remontée des températures. Cette évolution ou configuration est vraiment typique des belles journées anticycloniques froides qui ne suivent pas directement le passage d'un front froid.

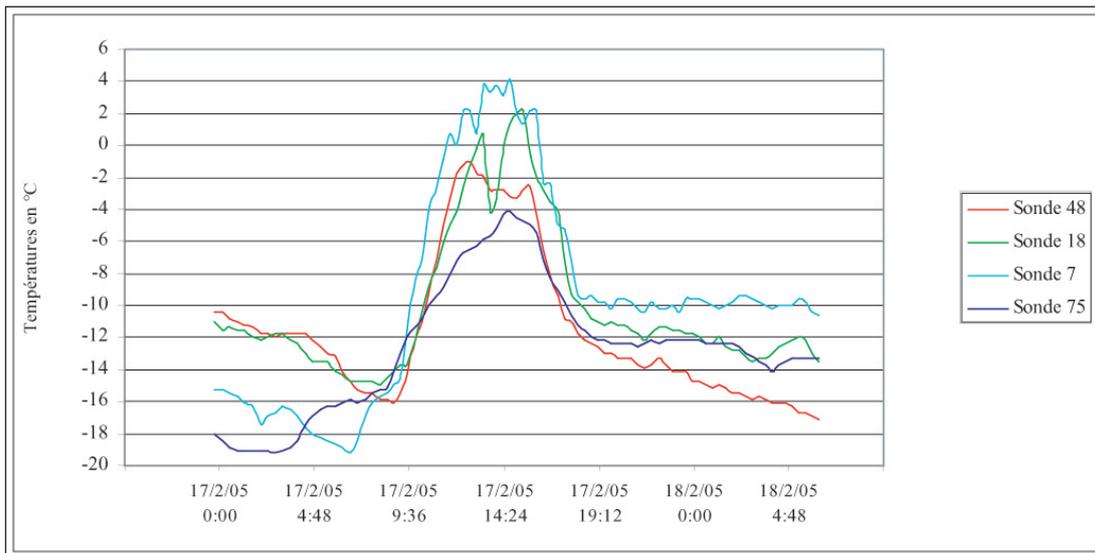


Fig. V.2.2 : Evolution des températures le 17/02/2005 aux Menuires.

L'inversion se manifeste juste avant le lever du soleil par la remontée des températures nocturnes en haut du versant. Elle se maintient aussi la journée, ce qui nous donne une bande plus chaude au milieu du versant. On retrouve cette situation pendant deux ou trois jours après le passage d'un front froid. Pour les brises, idem pour la figure V.V.1.

• *Type de temps C2*

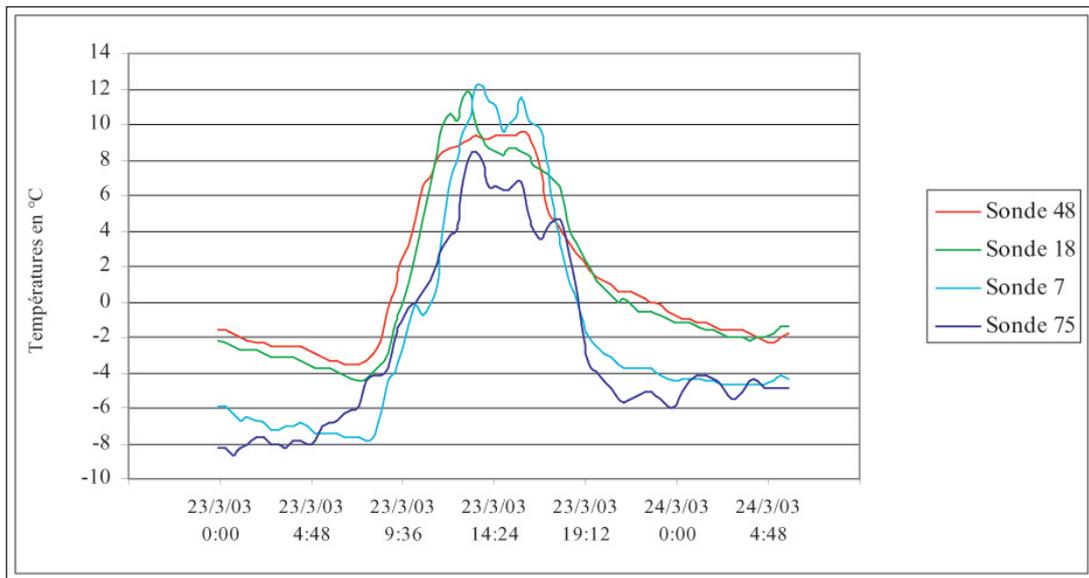


Fig. V.2.3 : Evolution des températures le 23/03/2003 aux Menuires.

Même configuration que C1 sans inversion.
Les brises de vallée font leur apparition.

• *Type de temps C3*

Comme le type C2 mais avec des vents de nord-ouest dominants, souvent antérieurs à l'arrivée d'une perturbation.

• *Type de temps C4*

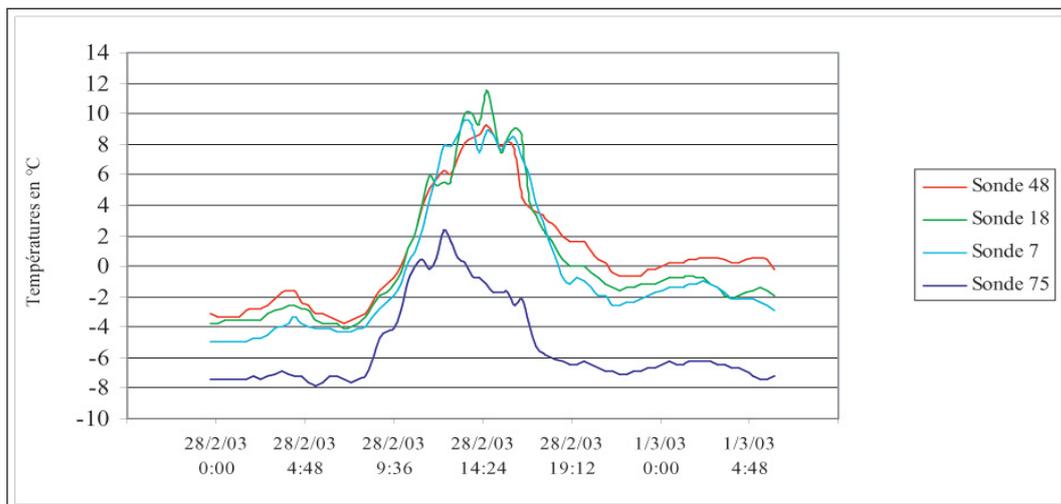


Fig. V.2.4 : Evolution des températures le 28/02/2003 aux Menuires.

Les températures sont très douces en journée sauf en haut de versant (décembre-février), et on remarque leur uniformisation sur le reste du versant, marquant le passage à une atmosphère perturbée. Le gradient thermique tend vers $0,7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. En mars, les températures sont douces aussi en haut de versant. Quant aux vents, ils se calquent sur le sens du changement de temps, mais les brises restent majoritaires.

• *Type de temps C5*

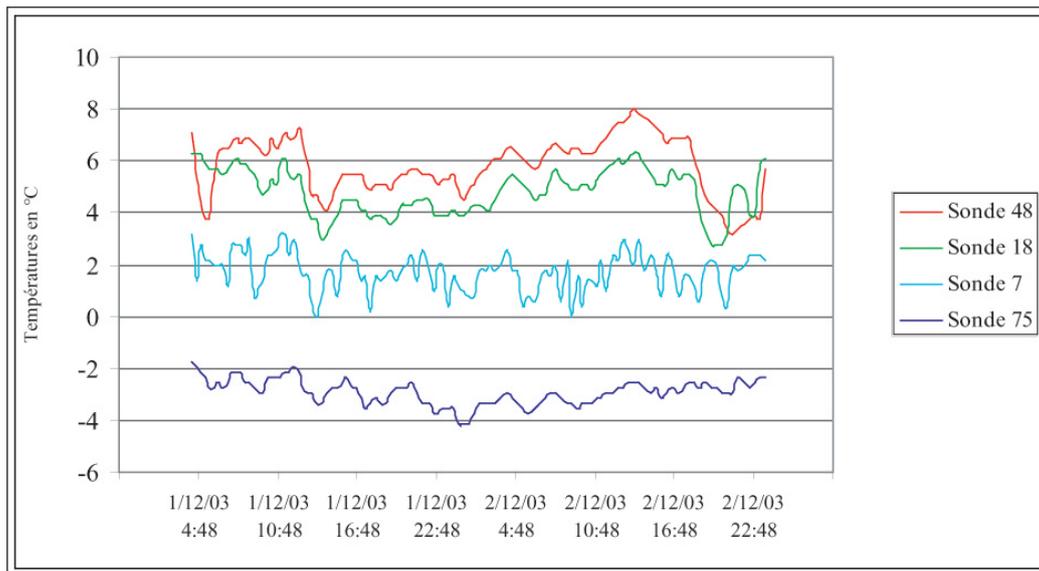


Fig. V.2.5 : Evolution des températures le 01/12/2003 aux Menuires.
 C'est le cas assez classique de la présence de foehn avec gradient thermique fort et températures douces.

• *Type de temps C6*

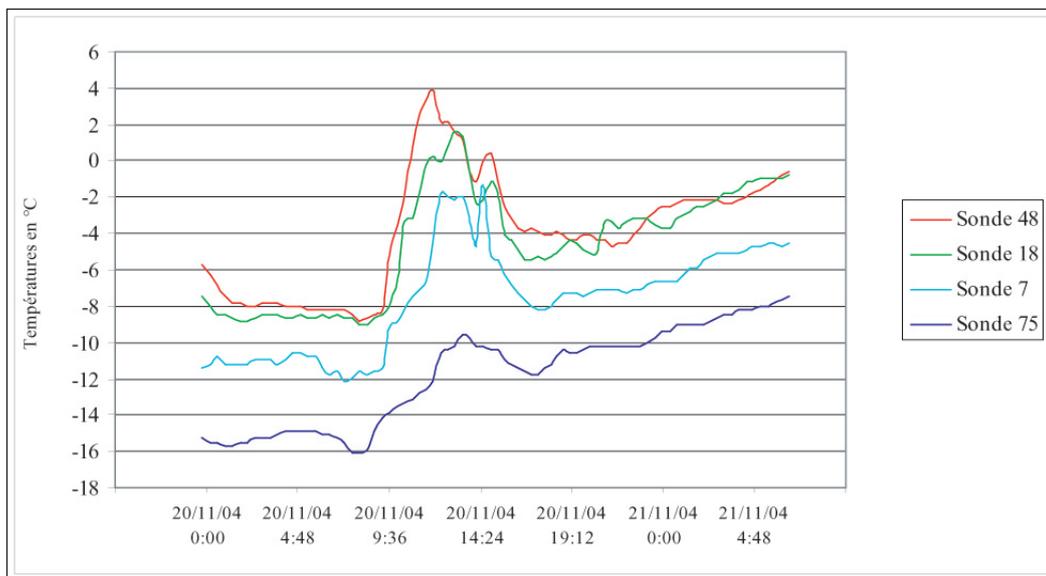


Fig. V.2.6 : Evolution des températures le 20/11/2004 aux Menuires.
 Situation intermédiaire (variable) froide similaire au type C3. L'atmosphère est instable mais la couverture nuageuse n'est pas suffisante pour empêcher le réchauffement diurne. Les brises thermiques catabatiques remplacent très rapidement les vents synoptiques associés à la dépression.

• *Type de temps C7*

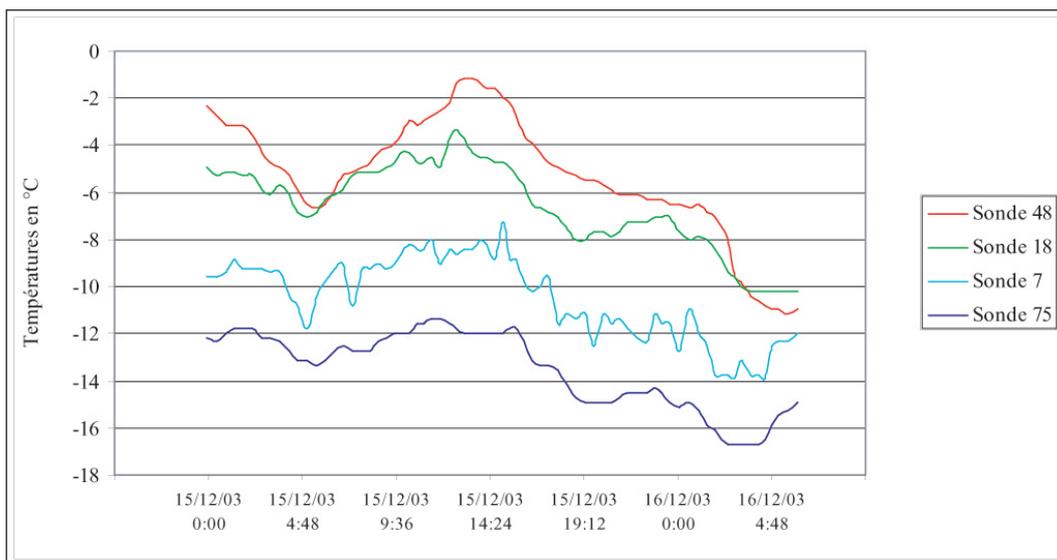


Fig. V.2.7 : Evolution des températures le 15/12/2003 aux Menuires.

Les températures chutent en relation avec des courant de nord et dépassent souvent les -10°C sur l'ensemble du site. Le fond de vallée se refroidit en fin de nuit, créant une légère inversion. Ce type de temps est associé au passage entre des conditions cycloniques de nord et nord-ouest et anticycloniques.

• *Type de temps C8, C9, C10*

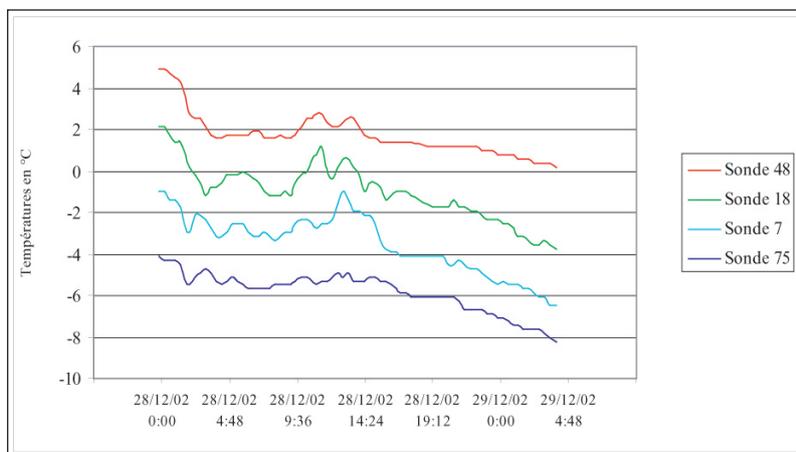


Fig. V.2.8 : Evolution des températures le 28/12/2002 aux Menuires. Type C8.

Atmosphère très instable et températures douces.

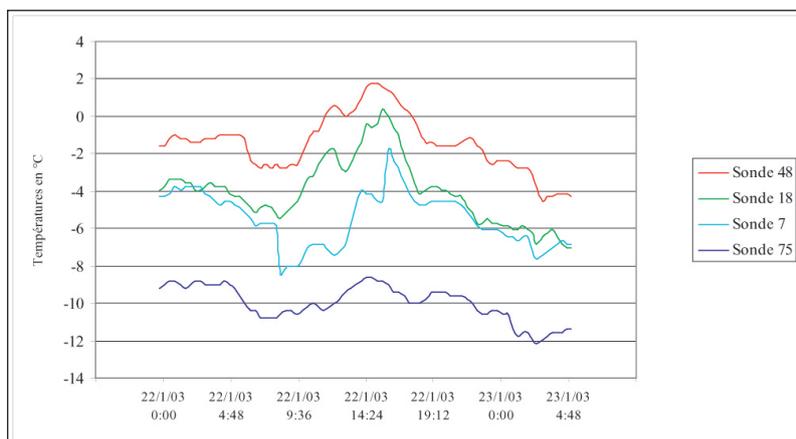


Fig. V.2.9 : Evolution des températures le 22/01/2003 aux Menuires. Type C9.

Idem type C8

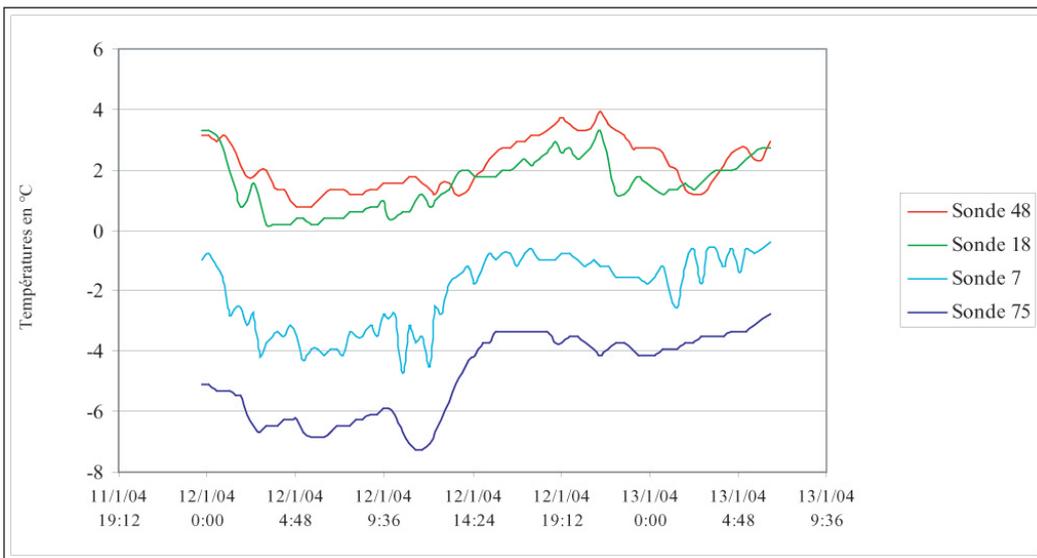


Fig. V.2.10 : Evolution des températures le 16/01/2004 aux Menuires. Type C10.
 Les températures sont négatives au-dessus du milieu de versant (limite pluie-neige vers 2000m), et l’air se réchauffe du haut en bas pendant l’après-midi. Les vents d’ouest, forts pendant la nuit, faiblissent durant la journée, et la brise de montagne souffle dans la moitié inférieure de la vallée, provoquant d’importants effets de cisaillement.

L’humidité relative :

• *Type de temps C1*

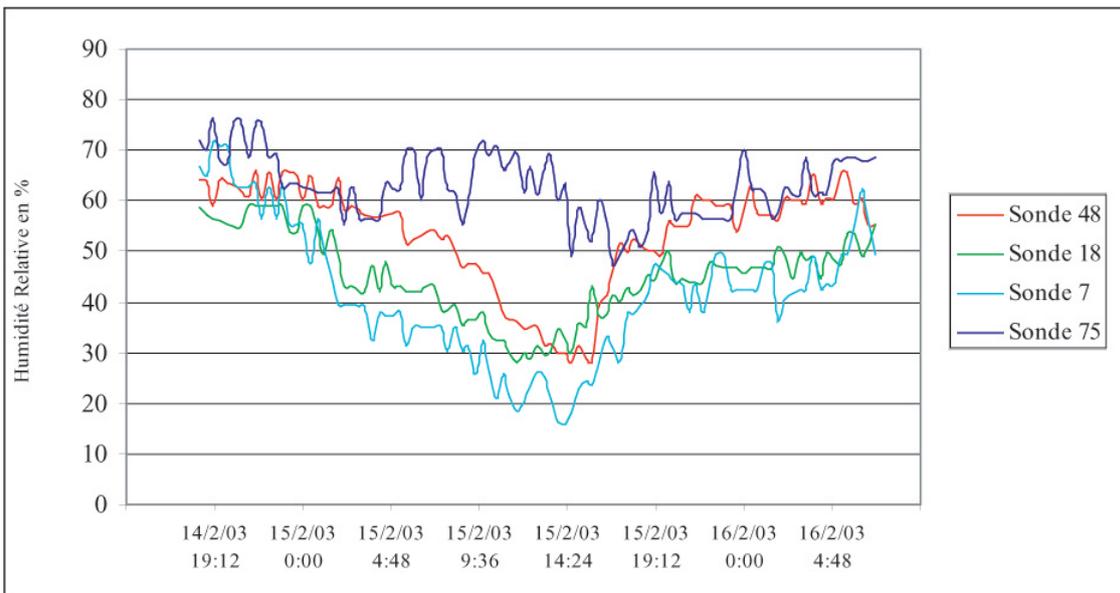


Fig. V.2.11 : Evolution de l’humidité relative le 15/02/2003 aux Menuires.
 L’humidité est plus forte en fond de vallée la nuit (60 à 70%) et en haut de versant le jour (65%), alors que le reste du versant passe de 60% à 30% entre la nuit et le jour. Cet exemple est très représentatif des journées froides, même s’il arrive aussi que le milieu et le haut de versant soient un peu plus secs.

• *Type de temps C2*

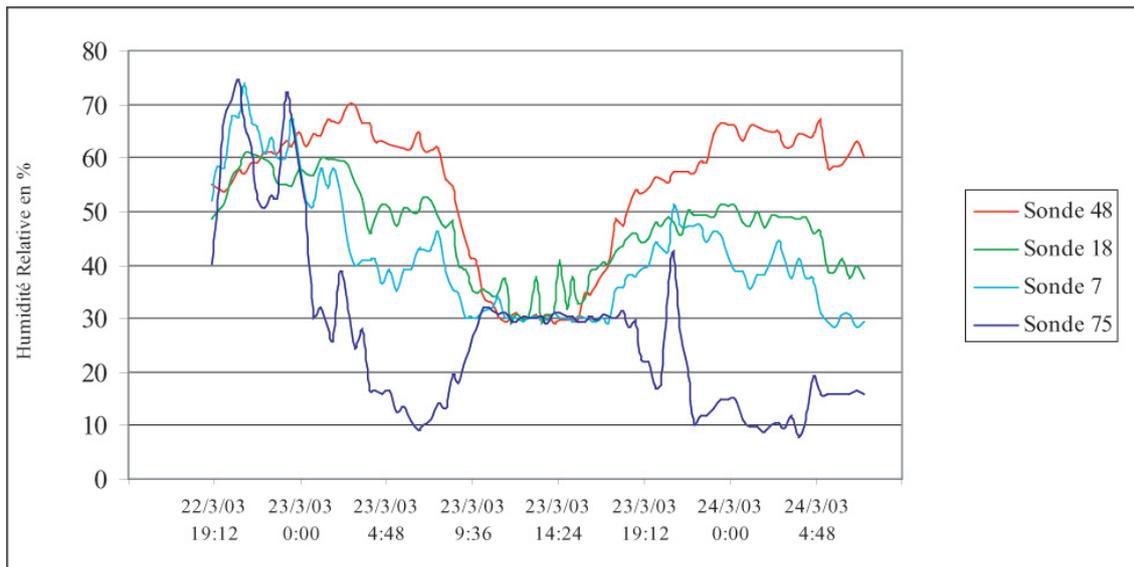


Fig. V.2.12 : Evolution de l'humidité relative le 23/03/2003 aux Menuires.

Contrairement au cas précédent, le haut de versant est beaucoup plus sec que le reste du versant, surtout la nuit. C'est le fond de vallée qui reste le plus humide. Enfin les taux s'égalisent à 30% de 10h à 16h. Cet exemple est lui aussi très représentatif, même si parfois l'humidité en haut de versant est plus proche de celle du milieu de versant. Pour l'enneigement artificiel, il est impossible d'enneiger de 9h à 19h lors de ces journées.

• *Taux moyens par types de temps*

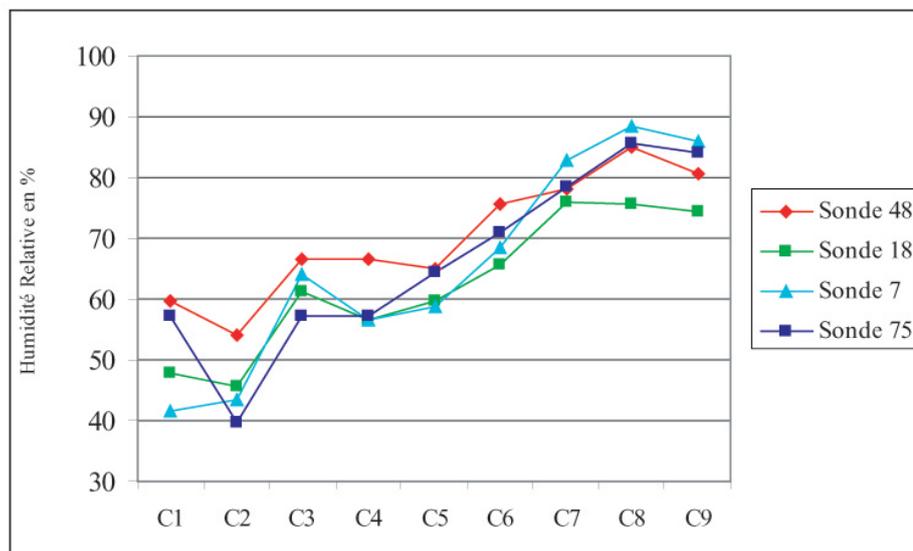


Fig. V.2.13 : Taux moyens d'humidité relative par sonde en fonction des types de temps Savoie (du 04/11/2002 au 17/04/2003).

La valeur élevée du taux d'humidité relative du haut de versant (sonde 75) en C1 est confirmée par les valeurs moyennes. La valeur prise ensuite en C2 est étonnamment inférieure. On observe cette diminution aussi pour le fond de vallée et en moindre mesure pour la sonde 18.

C1 : Le haut de versant et le fond de vallée sont plus humides que le reste du versant.

C2 : Le fond de vallée est plus humide et le haut de versant s'assèche.

Ensuite, avec l'arrivée des temps perturbés, les taux s'égalisent sur le versant. On constate tout de même une valeur plus faible en bas de versant qui n'est pas en rapport avec le gradient thermique lié à l'altitude. La moitié inférieure de la vallée est donc plus humide.

V.2.3. Exemples de régression d'échelle

V.2.3.a. Passage anticyclonique / cyclonique

Lors d'un enchaînement annoncé de type de circulation 6, puis 3ab puis enfin 3cd, nous pouvons grâce au tableau croisé de la classification Perret / Savoie déterminer les probabilités d'enchaînement comme suit :

- Le type 6 (anticyclone sur la Manche) donne 46% de type C1, 28% de type C2.
- Le type 3ab (ouest anticyclonique) donne 44,5% de C1 et 23,5% de C2.
- Le type 3cd (ouest cyclonique) donne 24,5% de C8, 18% de C9, 16% de C6 ou encore 10% de C4. C'est aussi le type de circulation qui provoque le plus de chute de neige (C10)

En fonction de la température annoncée de la masse d'air et des conditions nuageuses, nous pouvons choisir entre les types C1 ou C6 (température froide vers -10°C à 1500m) ou les types C2 et C4 (0°C vers 1500m). Il existe ensuite de fortes probabilités d'avoir, lors du passage en type perturbé, des types C8 ou C9, en passant rapidement par un C6 ou C4. *L'enchaînement le plus probable est donc : C1, C2, C4, C9 ou C10.*

L'analyse de quelques cas isolés grâce à la classification Perret-Savoie nous donne effectivement ce genre d'enchaînement : voici un exemple du 08/02/2005 au 12/02/2005, figures V.2.14 à 16.

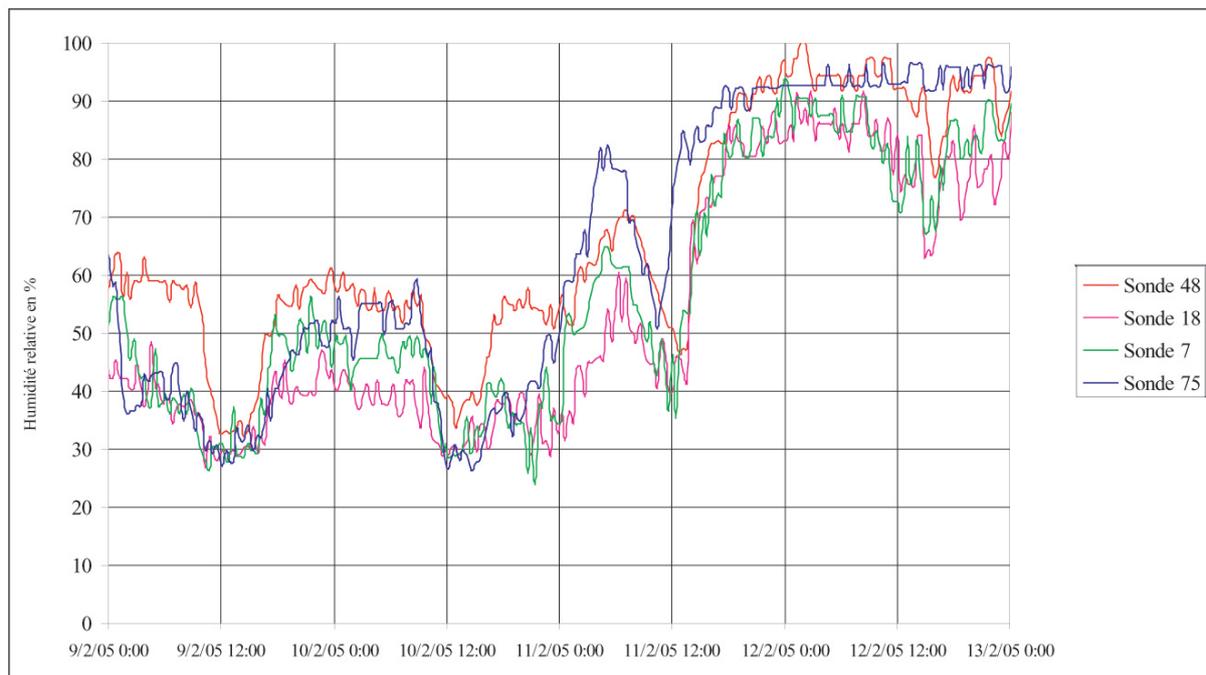


Fig. V.2.14 : Evolution de l'humidité relative sur le versant ouest des Menuires du 09/02/2005 au 12/02/2005.

On se retrouve avec des cas classiques de répartition de l'humidité sur le versant. Les deux premiers jours, elle oscille entre 30% l'après-midi et entre 40% (bas de versant) et 60% (fond de vallée) dans des configurations intermédiaires de celles présentées pour les figures V.V.11 et V.V.12. Le 11, l'humidité augmente surtout en haut de versant (la perturbation arrive) puis retombe quand le vent synoptique laisse sa place aux brises. Enfin l'humidité augmente partout et atteint plus de 80% en fin d'après-midi.

Types de temps :

Le 09/02 : 6/C1 ; le 10/02 : 3ab/C2 ; le 11/02 : 3ab/C4 ; le 12/02 : 3cd/C10.

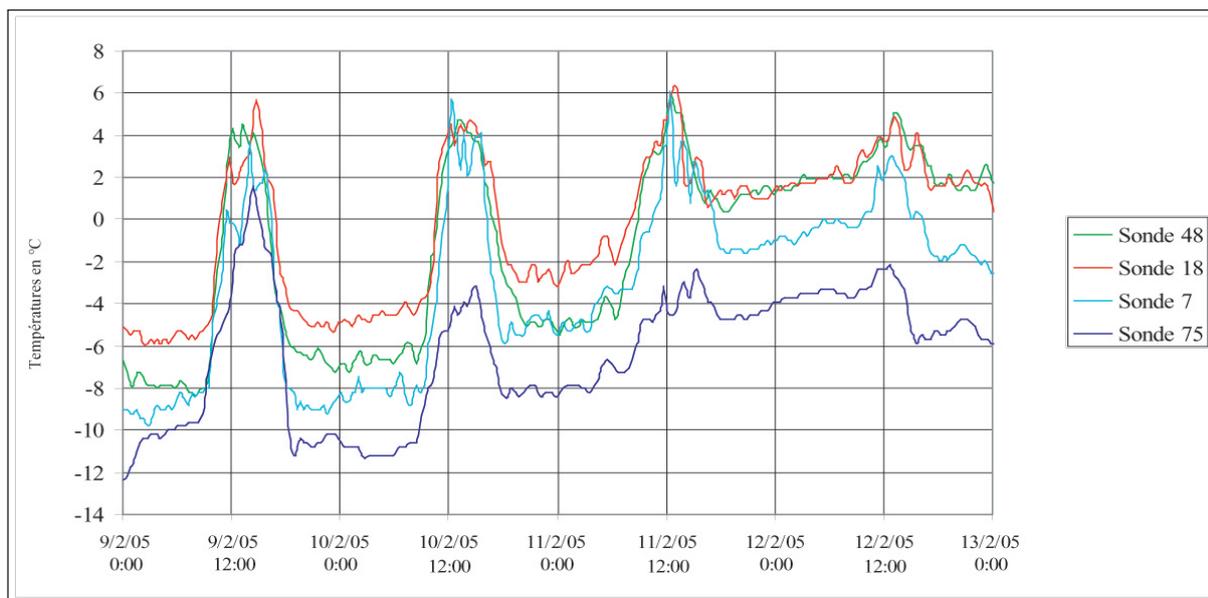


Fig. V.2.15 : Evolution des températures sur le versant ouest des Menuires du 09/02/2005 au 12/02/2005.

Le beau temps s'était installé depuis une quinzaine de jour mais l'arrivée d'une perturbation se manifeste d'abord par la chute des températures diurnes en haut de versant (le 10 à 12h). Puis l'arrivée du front neigeux provoque une remontée des températures surtout dans la moitié inférieure du versant. Enfin, après le 13, on passe en flux de nord-ouest cyclonique 4b provoquant un type de temps C7, et donc une chute des températures et une destruction de l'isothermie de bas de versant (gradient thermique vers $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$).

Types de temps :

Le 09/02 : 6/C1 ; le 10/02 : 3ab/C2 ; le 11/02 : 3ab/C4 ; le 12/02 : 3cd/C10.

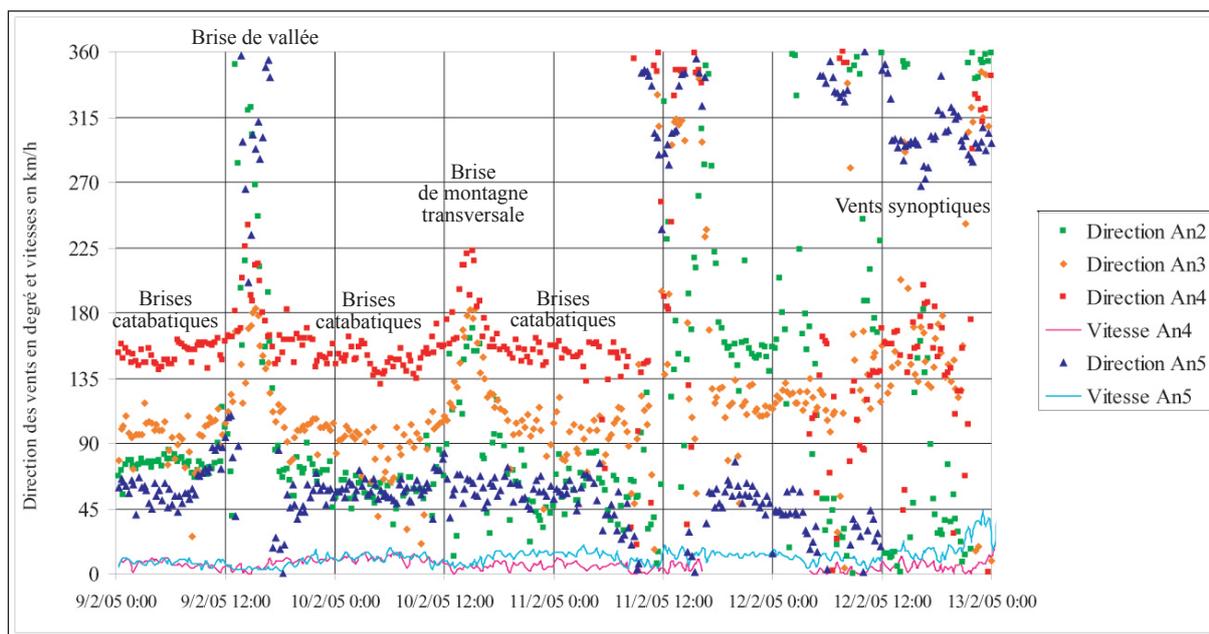


Fig. V.2.16 : Evolution des directions et des vitesses du vent sur le versant ouest des Menuires du 09/02/2005 au 12/02/2005.

Rappel : altitudes anémomètres. An4 : 1750m ; An3 : 1860m ; An2 : 2100m ; An5 : 2800m.

On observe le 09 une brise de vallée (interagissant avec la bise) qui souffle sur la partie haute du versant pendant deux heures l'après-midi alors qu'en bas de versant et fond de vallée on reste en situation de brise de montagne transversale. Cette brise de vallée ne souffle pas le lendemain car on est passé en situation d'ouest anticyclonique (pour un flux de nord le 09). On observe ensuite des directions de nord le 11 qui annoncent l'arrivée du front. Les brises reprennent leur place avant de céder définitivement aux vents synoptiques le 12 au soir. Entre le 11 et le 12, les vents oscillent entre brises catabatiques et vents synoptiques.

Ces observations confirment celles effectuées lors des épisodes précédents et démontrent comment les conditions d'échelle supérieure déterminent celles de l'échelle locale de manière précise.

V.2.3.b. Passage anticyclonique / cyclonique / anticyclonique du 15 au 25 février 2005

Cette fois-ci, dans la continuité de l'épisode précédent, nous nous retrouvons avec un enchaînement 5b/C7 puis 6/C1 favorable aux inversions (tab.V.2). Cet exemple sur une dizaine de jours (anticyclone centré sur la Manche du 15 au 18 qui remonte vers l'Ecosse du 21 au 25, avec intercalage d'une perturbation neigeuse de nord-ouest du 19 au 21) va surtout nous permettre de vérifier que les inversions de températures se forment dans l'enchaînement C7/C1, à la faveur d'une baisse des températures en fond de vallée et d'une remontée en haut de versant, dans un contexte général de réchauffement (fig.V.2.17). Quant aux relations types de temps/ températures sur le versant, elles sont très proches de celles définies au début de cette partie.

15/02/2005	6/C1
16/02/2005	6/C1
17/02/2005	6/C1
18/02/2005	6/C1
19/02/2005	9cd/C7
20/02/2005	9cd/C9
21/02/2005	7b/6b/C9
22/02/2005	7b/6b/C6
23/02/2005	7b/6b/C1
24/02/2005	7b/6b/C1
25/02/2005	7b/6b/C3

Tab. V.2 : Codes Perret-Savoie du 15 au 25 février 2005.

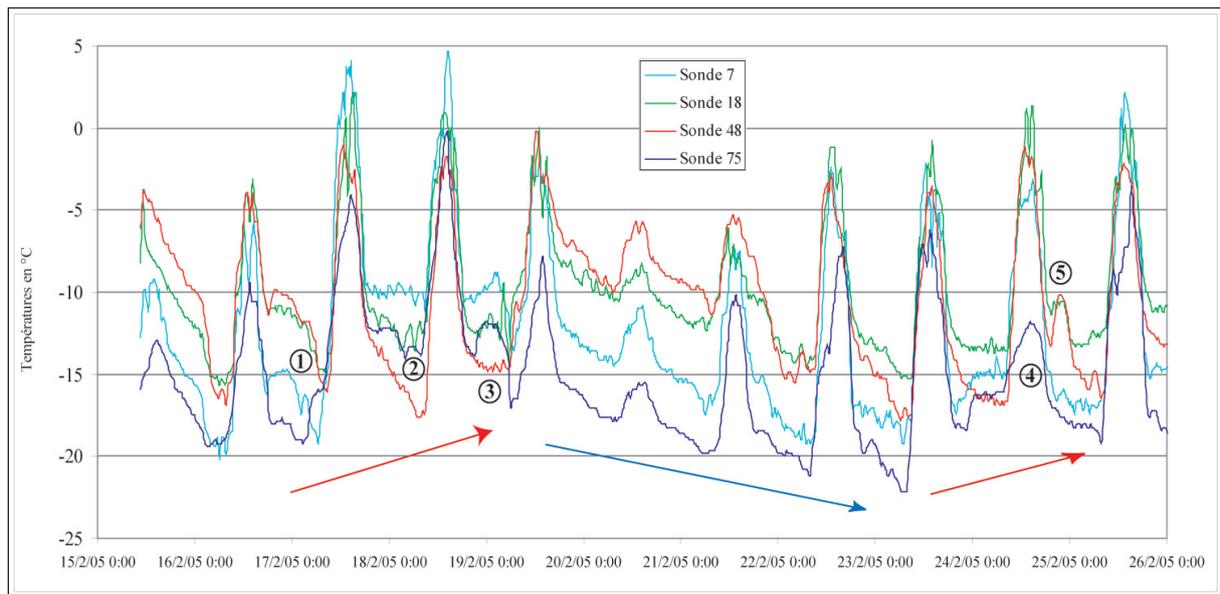


Fig. V.2.17 : Evolution des températures sur le versant ouest des Menuires du 15/02/2005 au 26/02/2005.

Flèche rouge : remontée des températures.

Flèche bleue : baisse des températures.

1 : fin de l'instabilité et inversion juste avant le lever du soleil.

2 : forte inversion apparente.

3 : Réchauffement d'altitude suivi d'un brusque refroidissement. Les vents passent au nord en fond de vallée puis se généralisent sur le versant.

4 : vent fort de sud-ouest.

5 : petite instabilité.

L'utilisation de la classification Perret/Savoie en relation avec les mesures au sol nous offre un outil de prévision très précis qui vient compléter les analyses des paramètres (température, humidité relative, vent) à échelle spatio-temporelle fine.

V.2.4. Relations entre les inversions de températures et la classification Perret-Savoie

La prévision des inversions de températures peut s'avérer très utile pour les producteurs de neige de culture et d'une manière générale pour les domaines skiables. Nous avons dans ce but relié les cas d'inversions aux Menuires (entre la sonde 7, 2400m ; et la sonde 48, 1675m), c'est-à-dire quand la température en fond de vallée est inférieure à celle du milieu de versant, à la classification Perret-Savoie. Cela correspond aux inversions apparentes, plus courantes que les inversions réelles, et en rapport plus direct avec la problématique de la détermination des zones à enneiger prioritairement.

La méthode a consisté à relier les journées avec des mesures d'inversions et celles qui bénéficiaient de codes Perret-Savoie. Au final, de 1997 à 2005, nous avons pu faire ressortir presque 1000 cas d'étude. Puis, pour chaque cas, nous avons sélectionné ceux dont les inversions duraient plus de 3h et plus de 8h, périodes choisies pour des inversions de courtes et de longues durées, afin de se détacher des variations de températures locales liées à l'ensoleillement ou à un changement de temps. Nous avons alors 354 jours avec des inversions de plus de 3h, et 143 jours pour les plus de 8h.

Les résultats sont assez hétérogènes mais cela vient du grand nombre de cas Perret-Savoie possibles. Pourtant, nous distinguons des types de circulations / type de temps vraiment propices à la formation d'inversions de température (pourcentage supérieure à 1%, soit environ cinq cas mesurés, tab. V.3 et V.4).

6/C1	24,29%
3ab/C1	11,30%
6/C2	7,91%
3ab/C2	4,24%
4a/C1	3,95%
2a/C2	2,82%
6/C6	2,54%
5a/C1	2,26%
2a/C1	1,69%
3ab/C6	1,69%
4a/C2	1,69%
8a ² /C1	1,69%
1a/C2	1,41%
3cd/C1	1,41%
6/C3	1,41%
6ef/C1	1,41%
5b/C6	1,13%
7b/6b/C6	1,13%

Tab.V.3 : Pourcentages des types de circulation / type de temps provoquant des inversions de températures de plus de 3h.

6/C1	34,27%
3ab/C1	12,59%
6/C2	4,90%
3ab/C2	3,50%
4a/C1	3,50%
5a/C1	3,50%
3cd/C1	2,80%
2a/C1	2,10%
4a/C2	2,10%
6/C6	2,10%
1a/C1	1,40%
1a/C2	1,40%
1a/C6	1,40%
2a/C6	1,40%
3cd/C2	1,40%
5b/C6	1,40%
6ef/C1	1,40%
8a/C4	1,40%
8a ² /C1	1,40%

Tab. V.4 : Pourcentages des types de circulation / type de temps provoquant des inversions de températures de plus de 8h.

On remarque la prépondérance presque absolue des types 6 et 3ab reliés à des types de temps C1, C2, et C6 (tab.V.2.5 et V.2.6). Toutes les situations anticycloniques peuvent engendrer des inversions, même pour les flux de sud-ouest et de sud, surtout en mars, et cela pour des inversions courtes. Quelques cas de situation d'ouest cyclonique apparaissent, mais reliés à des types de temps C1 ou C2. On rappelle que sur l'ensemble des jours étudiés (comme d'ailleurs sur l'ensemble de la classification PS), les situations 6/C1 représentent 16,5% des cas, 3ab/C1 9,5%, 6/C2 8% et 3ab/C2 3,25%. Les pourcentages pour les inversions de plus de 8h n'augmentent que pour le type 6/C1. **C'est vraiment la situation majoritaire dans la formation d'inversions de température.**

C1	66,43%
C2	16,08%
C6	10,49%
C4	2,80%
C7	2,10%

Tab. V.5 : Pourcentages des types de temps provoquant des inversions de températures de plus de 8h.

6	41,26%
3ab	16,78%
3cd	6,99%
4a	6,99%
1a	4,90%
2a	4,20%
5a	3,50%
8a	3,50%
6ef	2,80%
9cd	1,40%
2b	1,40%
5b	1,40%
7b/6b	1,40%
8a ²	1,40%

Tab. V.6 : Pourcentages des types de circulation provoquant des inversions de températures de plus de 8h.

Mais comment le nombre d'inversions évolue-t-il au cours de la saison ? Nous savons que les types de temps C1 sont fortement présents au milieu de l'hiver et sont remplacés en mars et en novembre par les types C2. Les flux de sud et de sud-ouest y sont aussi moins présents (fig.V.2.18 et V.2.19).

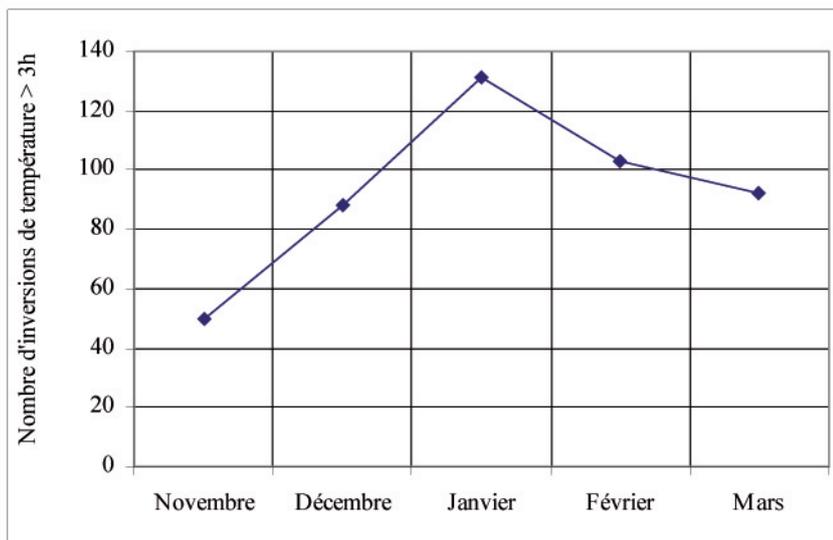


Fig. V.2.18 : Evolution mensuelle du nombre d'inversions de températures de plus de 3h (1997-2005)

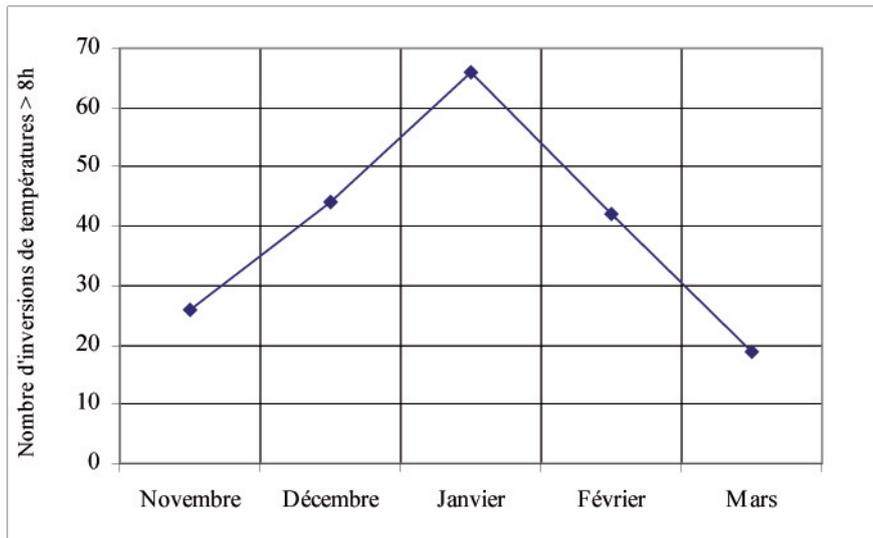


Fig. V.2.19 : Evolution mensuelle du nombre d'inversions de températures de plus de 8h (1997-2005)

Sur les 8 saisons d'étude, la moyenne du nombre de journées à inversion de plus de 8h est de 8 en janvier, 5 en décembre et février, 3 en novembre et 2 en mars.

La diminution observée au mois de mars est en relation avec le passage de type de temps C1 en C2, avec des inversions moins longues et plus rares.

Ces résultats sont confortés par d'autres mesures sur le site d'Aussois, pourtant situé au milieu du versant d'une grande vallée alpine, où les inversions sont moins présentes. Pour des inversions d'une heure minimum, nous avons 25% de 6/C1, 12% de 3ab/C1, puis un bon groupe de situations à 5% dans lesquelles C1, C2 et C6 dominent. Pour des inversions plus longues (au moins 3h), on retrouve 6/C1 et 3ab/C1. **La présence de ces situations confirme le fait que les inversions de températures se forment principalement après le passage d'un front froid, avec le retour d'une situation anticyclonique.**

Synthèse

La prévision (approximative) de l'évolution journalière des températures sur le versant des Menuires peut s'effectuer de manière statistique en utilisant les classifications de types de circulations et de types de temps, et cela parce que la contrainte exercée par le relief permet d'effectuer une régression d'échelle simplificatrice qui peut nous donner une confiance raisonnable dans la prévision. Nous pouvons connaître les caractéristiques de la masse d'air (échelle synoptique) grâce à Météo-France, mais une connaissance accrue des phénomènes locaux est indispensable. C'est pourquoi nous allons nous intéresser aux variations spatiales des températures et des brises thermiques lors de deux situations anticycloniques journalières typiques sur les sites des Menuires et de Val Thorens.

V.3 ÉVOLUTIONS JOURNALIÈRES DES TEMPÉRATURES ET DU VENT SUR LES VERSANTS DE MONTAGNE

Nous avons choisi, afin d'observer le comportement nocturne et diurne des températures et des brises et de déterminer les facteurs qui interviennent dans leur répartition, de comparer trois situations anticycloniques typiques aux Menuires et à Val Thorens. La première engendre un type de temps froid après le passage d'un front neigeux en décembre, la deuxième un type de temps doux sans inversion en mars au milieu d'une période anticyclonique. Pour compléter notre analyse des relations entre les brises et les températures, nous étudierons en dernier lieu un cas proche de la deuxième situation, avec le développement d'une belle brise de vallée. Les «micro-climats» et l'influence de la topographie ressortiront de cette analyse.

V.3.1 La journée du 24/12/2003 : rétablissement de l'anticyclone après le passage d'un front froid (Les Menuires et Val Thorens)

V.3.1.a. Situation générale

Dès le 21/12/2003, un front froid issu d'une circulation cyclonique de nord traverse les Alpes (5b/C9) et dépose une dizaine de centimètres de neige, puis les températures diminuent fortement avec une chute de presque de 20°C (5b/C7). L'anticyclone revient le 23 et on passe le 24 en 6/C1, puis le 27 en 3ab/C1, provoquant une hausse des températures qui reviennent vers 0°C dès le 25. La situation du 24 est donc particulière car elle marque la transition entre une atmosphère instable liée à la dépression, qui se stabilise ensuite en provoquant des inversions fortes de températures à la faveur de réchauffements nocturnes. Le fond de vallée commence son inversion le 23 vers 21h, mais celle-ci reste apparente car les hauts de versants sont encore très froids (pas de réchauffement en altitude).

Aux Menuires, l'humidité relative suit les températures, avec en moyenne 75% la nuit et 50% le jour, sauf au-delà de 2500m avec un taux constant de 80%, comme en fond de vallée. Le taux d'humidité reste donc important deux jours après le retour de l'anticyclone, puis il tombe à 30% le 26.

Pour les vents on retrouve encore une situation classique avec des vents synoptiques très constants durant le passage dépressionnaire, de direction nord sur tout le site, de vitesse égale à 25 km/h en moyenne (sauf pour l'anémomètre 3 protégé par les immeubles d'une ventilation de nord, de 10 km/h). Dès le 23, les brises thermiques s'installent, et ne varient presque plus durant la période anticyclonique. Ce sont des brises de pente descendantes, qui subsistent même en journée, avec tout de même une légère brise de montagne en milieu et bas de versant l'après-midi du 24, et des vitesses qui diminuent aussi dans ce cas, passant de 10 km/h à 5 km/h. Cette situation est «classique».

V.3.1.b. Evolution de la répartition des températures et du vent aux Menuires

Voir les figures V.3.1 et V.3.2.

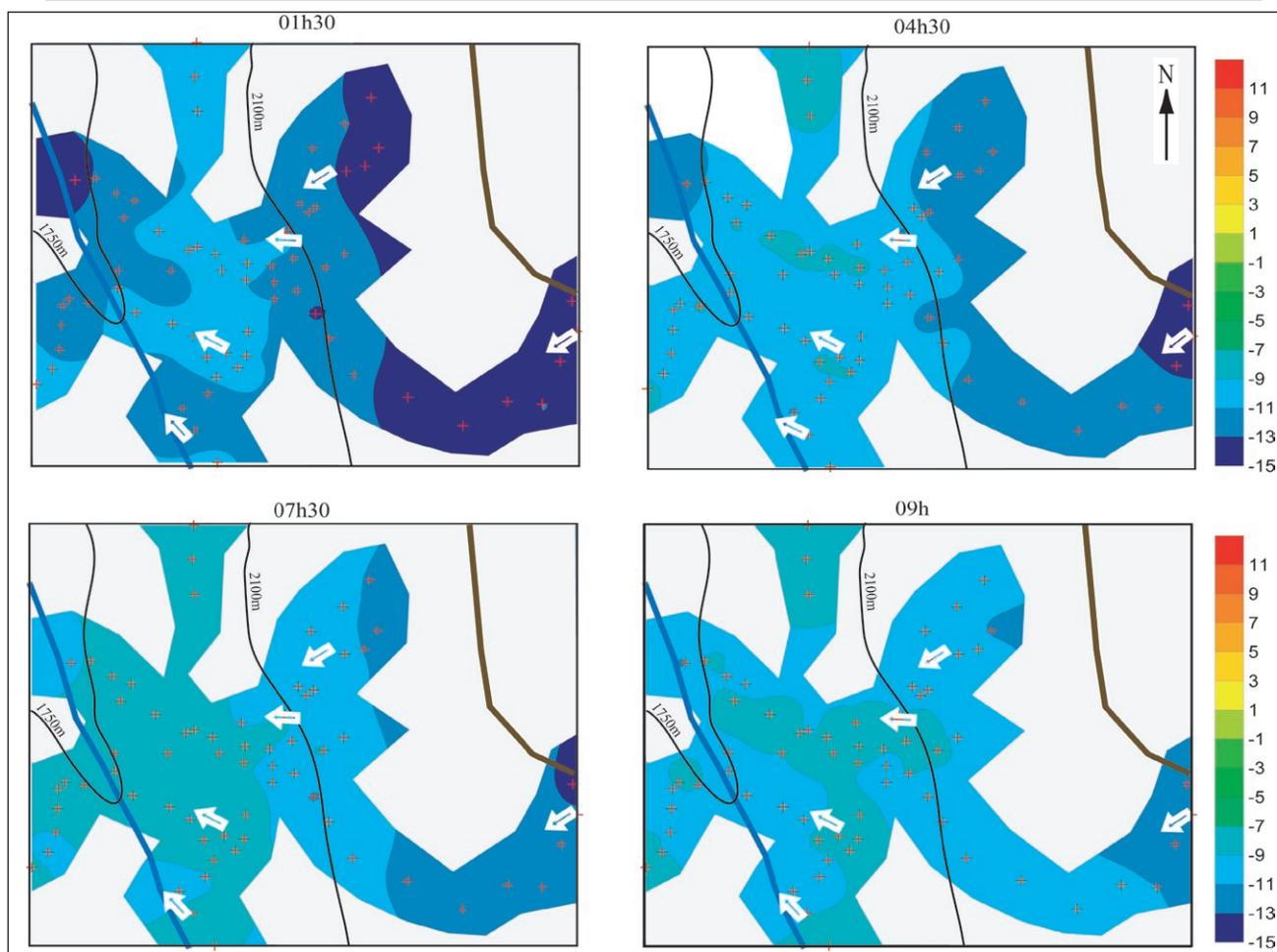


Fig.V.3.1 : Répartition spatiale des températures et du vent aux Menuires le 24/12/2003 de 1h30 à 9h.

Légende :

Echelle des températures en °C, avec un pas de 2°C.

Trait bleu : talweg ; Trait marron : crête.

Flèche blanche : direction du vent.

Méthode d'interpolation : krigeage.

- 01h30 : Inversion apparente de température. Celles-ci s'organisent bien en «bandes» altitudinales, avec une zone «chaude» comprise entre 1800m et 2000m.
- 04h30 - 7h30 - 9h : A la faveur de la remontée nocturne des températures (qui commence vers 1900m), on observe une uniformisation qui perdure jusqu'au lever du soleil. Le haut de versant d'abord très froid se réchauffe au matin alors que le fond de vallée garde sa fraîcheur de par sa protection topographique. La «zone chaude» remonte alors sur le versant (fig.V.2.1)

Page suivante (fig.V.2.2) :

- 10h30 : Le soleil commence à frapper le versant est et les pentes orientées au sud-ouest du versant ouest jusqu'à 2600m. Les bandes ainsi créées se calquent sur l'orientation et le «bombement» du relief. On retrouve des températures similaires entre le versant est et ouest alors qu'il existe des différences d'altitude importantes.
- 12h : Les différences de 10h30 sont exacerbées, avec un versant Est plus chaud, comme le fond de vallée, mais aussi avec des variations locales plus fortes : au sud de Reberty, au départ du télécabine des Bruyères et à son intermédiaire ; vers 2000 et 2100m sur le versant ouest ; sur la piste du Mont de la Chambre à 2600m. Et bien sûr sur la piste du Gros Tougne qui cumule tous les records. Enfin on distingue des zones plus froides comme à l'aval du quartier de Reberty et juste en amont des barres d'immeubles de la Croisette. Ces différences marquent ici l'isotherme 0°C (pour les noms de lieu voir chapitre 2, fig.II.3.5).
- 14h - 15h30 : Trois zones se détachent dans les valeurs maximales : le Gros Tougne, le départ des Bruyères, et dans une moindre mesure le haut de la piste des Menuires (accolée à la piste du stade). Le versant Est est déjà à l'ombre, ainsi que le fond de vallée. La bande chaude tend alors à remonter sur le versant ouest, mais le haut de versant garde des températures équivalentes à celles du bas de versant (2400m-2800m).

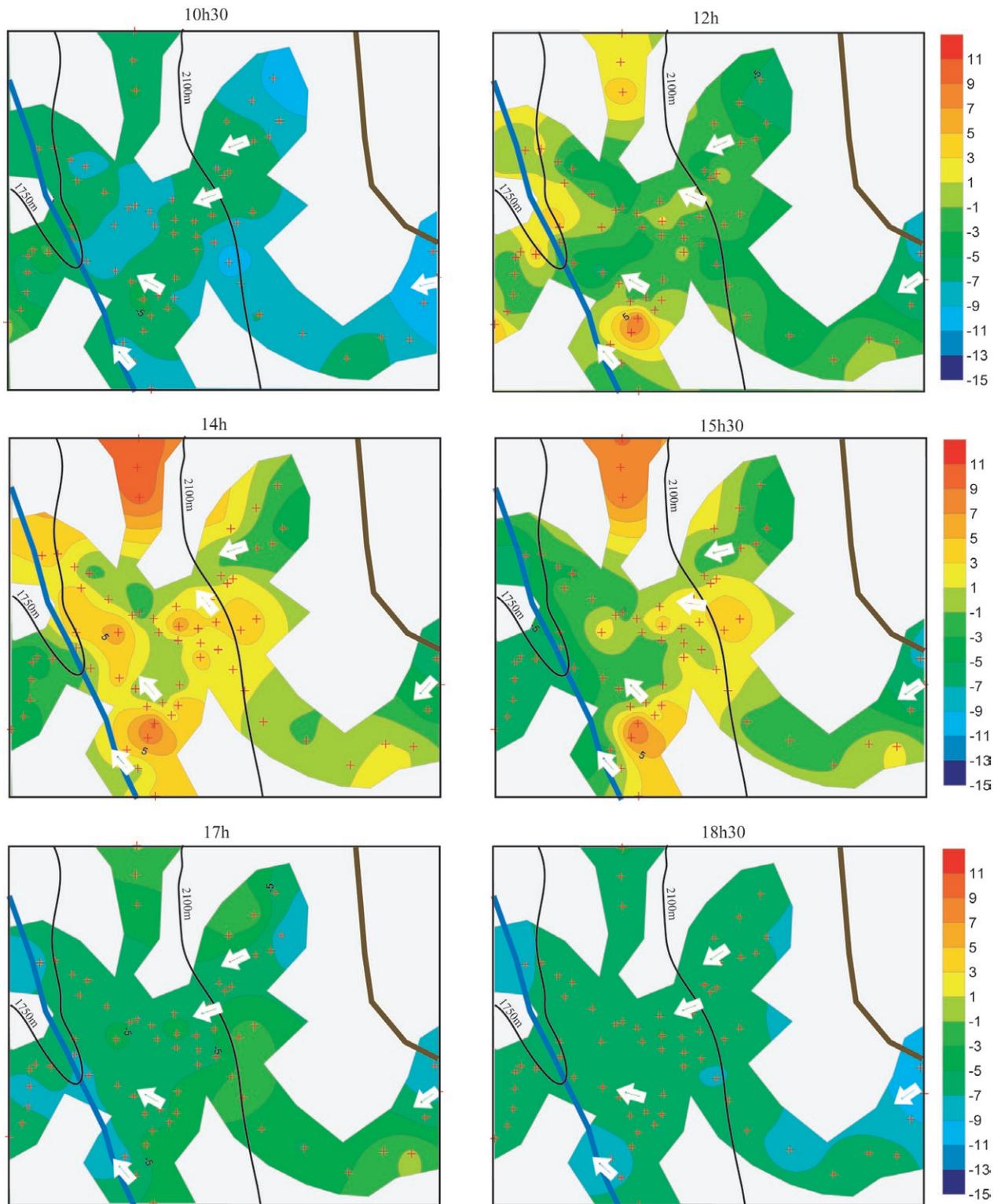


Fig.V.3.2 : Répartition spatiale des températures et du vent aux Menuires le 24/12/2003 de 10h30 à 18h30.

- 17h : L'uniformisation thermique revient, mais une légère inversion de température se développe. Le point le plus chaud est le plus exposé malgré son altitude (2600m) sur le versant ouest.
- 18h30 et ensuite : à cette heure nous avons les températures les plus froides de la future nuit, car elles vont continuer à augmenter à partir de ce moment. Leur répartition sera alors similaire à celle de la veille à 1h30 avec une inversion plus marquée. Pour l'enneigement artificiel, c'est un moment crucial : à partir de 22h, plus aucune température ne sera favorable à la production de neige de culture dans la zone chaude située entre 1900m et 2400m (ceinture chaude), avant l'arrivée de la prochaine perturbation quelques jours plus tard. La prise en compte de cette évolution zonale sera primordiale pour ne pas rater les heures de froids dans un contexte de réchauffement climatique.

L'évolution des températures : deux observations particulières.

- Le réchauffement nocturne des températures en période anticyclonique qui suit le passage d'une perturbation commence dans une bande d'altitude située vers 1900m, alors que le fond de vallée et le haut de versant continuent de se refroidir en soirée. Cette «**mise en inversion**» correspond à l'évolution observée dans le chapitre précédent. Ce réchauffement s'étend ensuite vers le fond de vallée et vers le milieu de versant pour s'arrêter vers 2100m. Les températures sont alors assez uniformes vers le matin (5°C de différence), ne respectant pas le gradient thermique.

- Dès que le soleil se lève, le versant est se réchauffe en même temps que le versant ouest là où l'exposition est plus orientée vers le sud, à altitude égale. Puis le réchauffement gagne rapidement le versant ouest et se décale du fond de vallée vers l'altitude de 2300m. **La course du soleil est donc bien marquée sur les températures.** La progression spatiale des températures supérieures à 0°C et à 9°C (valeur seuil) sur le site dans l'après-midi est visualisée sur la fig.V.3.3.

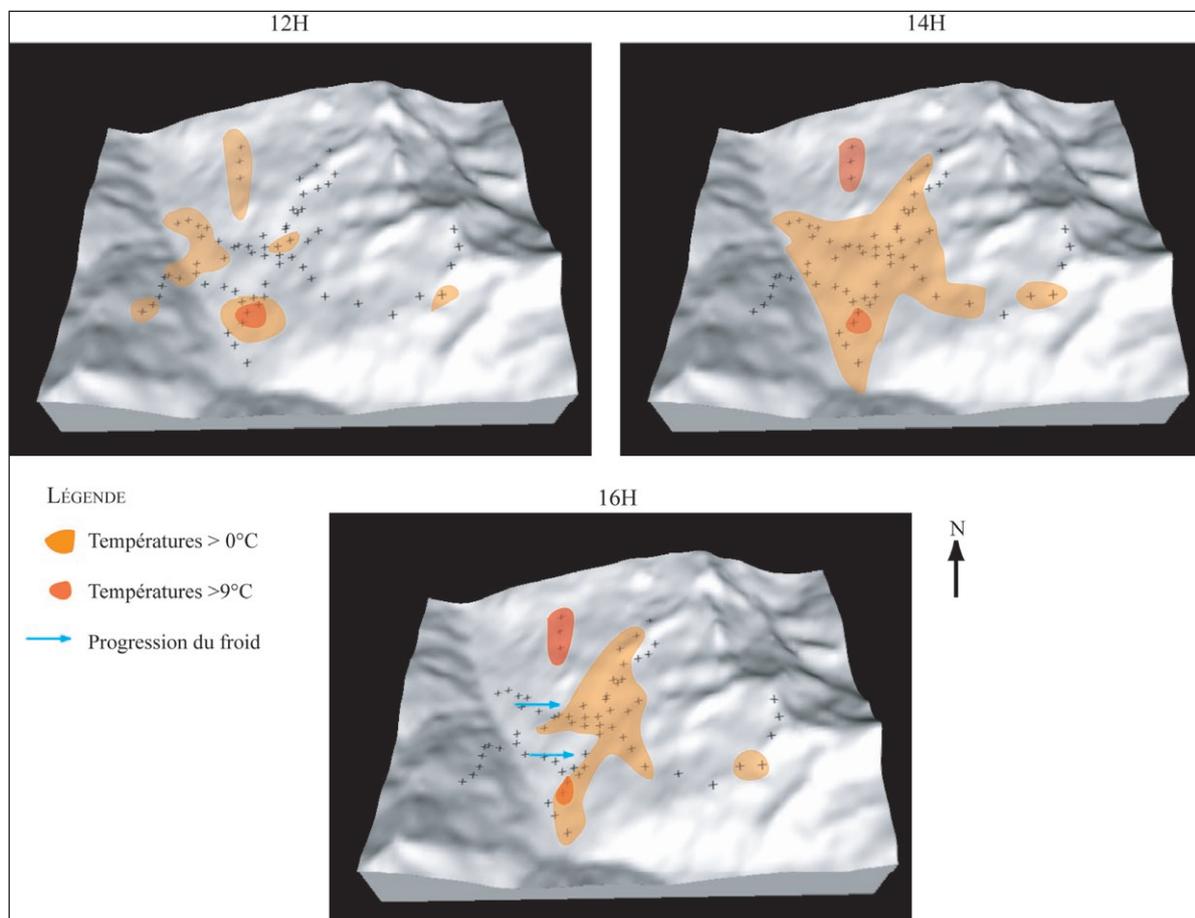


Fig.V.3.3. Evolution spatiale des températures aux Menuires à 12h, 14h et 16h le 24/12/2003.

Les températures ont été regroupé en deux classes afin de limiter la forte variabilité spatiale. La valeur de 0°C correspond à la moyenne des températures enregistrées par les 75 sondes de 12h à 16h.

Fond topo : BD alti IGN.

La dynamique nocturne et matinale des températures :

L'effet de ceinture chaude peut être pris comme point de départ dans ce style de type de temps. L'influence du fond de vallée, en provoquant des inversions, vient s'ajouter à cette progression mais ne résiste pas à l'arrivée du soleil et ne se développe que dans des situations

particulières (fig.V.3.4). L'échauffement du versant ouest est vraiment plus important que son versant opposé. *Pourtant, l'aspect microclimatique est primordial, puisque des différences de plus de 5°C peuvent apparaître sur une même altitude.*

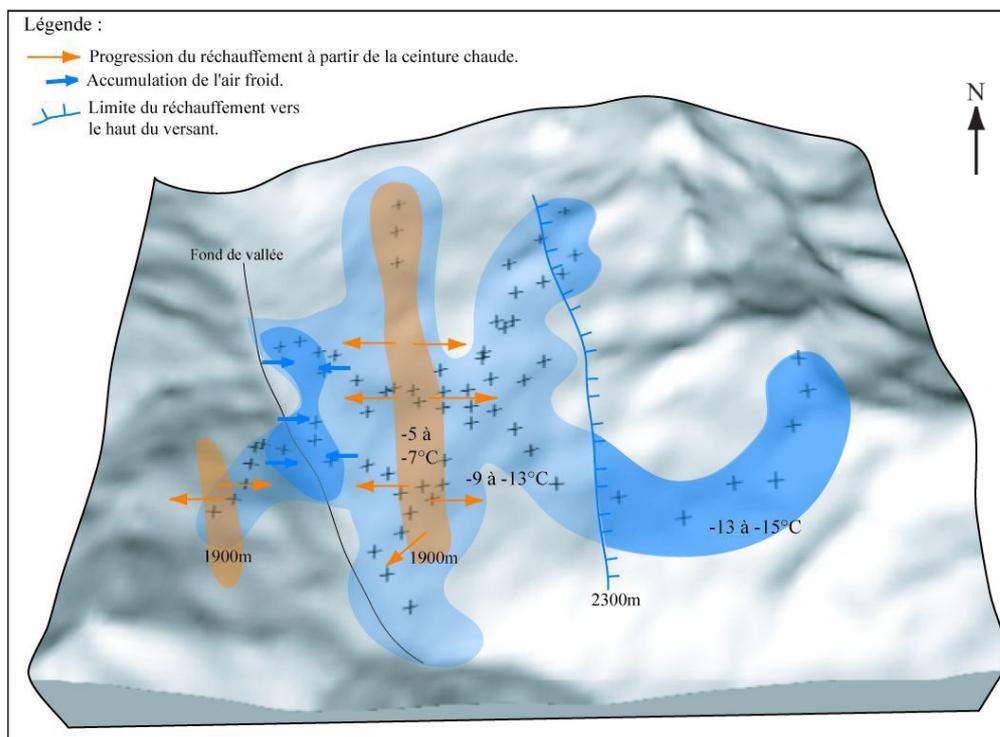


Fig. V.3.4 : Evolution du réchauffement nocturne et de l'inversion thermique la nuit du 24/12/2003 aux Menuires à partir d'une bande thermique «chaude» située vers 1900m.

Les températures indiquées sont celles mesurées vers 1h30 avant le début de l'évolution thermique.

V.3.1.c. Evolution de la répartition des températures à Val Thorens

Au même moment à Val Thorens, les températures nocturnes s'organisent d'une manière originale, peu en rapport avec la topographie et l'altitude. On ne distingue pas vraiment d'inversion. Le vallon de Caron, le versant sud, une petite zone située vers 2800m sur le versant ouest, et la Combe de Thorens (vers les chalets) ont des températures situées vers -14°C. Le versant nord et le versant ouest sont les zones les plus froides, vers -16°C. La vallon de Caron reste la zone la plus protégée (vers -11°C). On a donc une répartition assez uniforme dans le cirque. Puis dans l'après-midi (fig.V.3.5), certaines zones se réchauffent en fonction de l'exposition, fortement au sud, de façon contrastée à l'ouest (comme aux Menuires), et très peu au nord. Et certaines zones deviennent aussi très chaudes : sur la piste de snowboard, la piste Marielle Goitschel en face sud et dans le vallon de Pécelet (face ouest). A ce niveau, les fortes températures mesurées peuvent paraître anormales, et sur place on comprend vite pourquoi : le site est constitué d'un replat et d'une dépression très bien protégés et exposés. Cela confirme en tout cas que *les talwegs assez encaissés des vallums morainiques qui descendent des glaciers peuvent localement provoquer des anomalies thermiques fortes, surtout sur les versants ouest ou est.* Ces vallons, malgré leur altitude, ont une microclimatologie différente des pentes du versant des Menuires par exemple, plus régulières. *La variabilité spatiale des températures est plus forte.* Finalement, cet exemple nous montre qu'il est difficile de comparer les températures entre les sites à cause des différentes formes de relief qui influencent l'exposition.

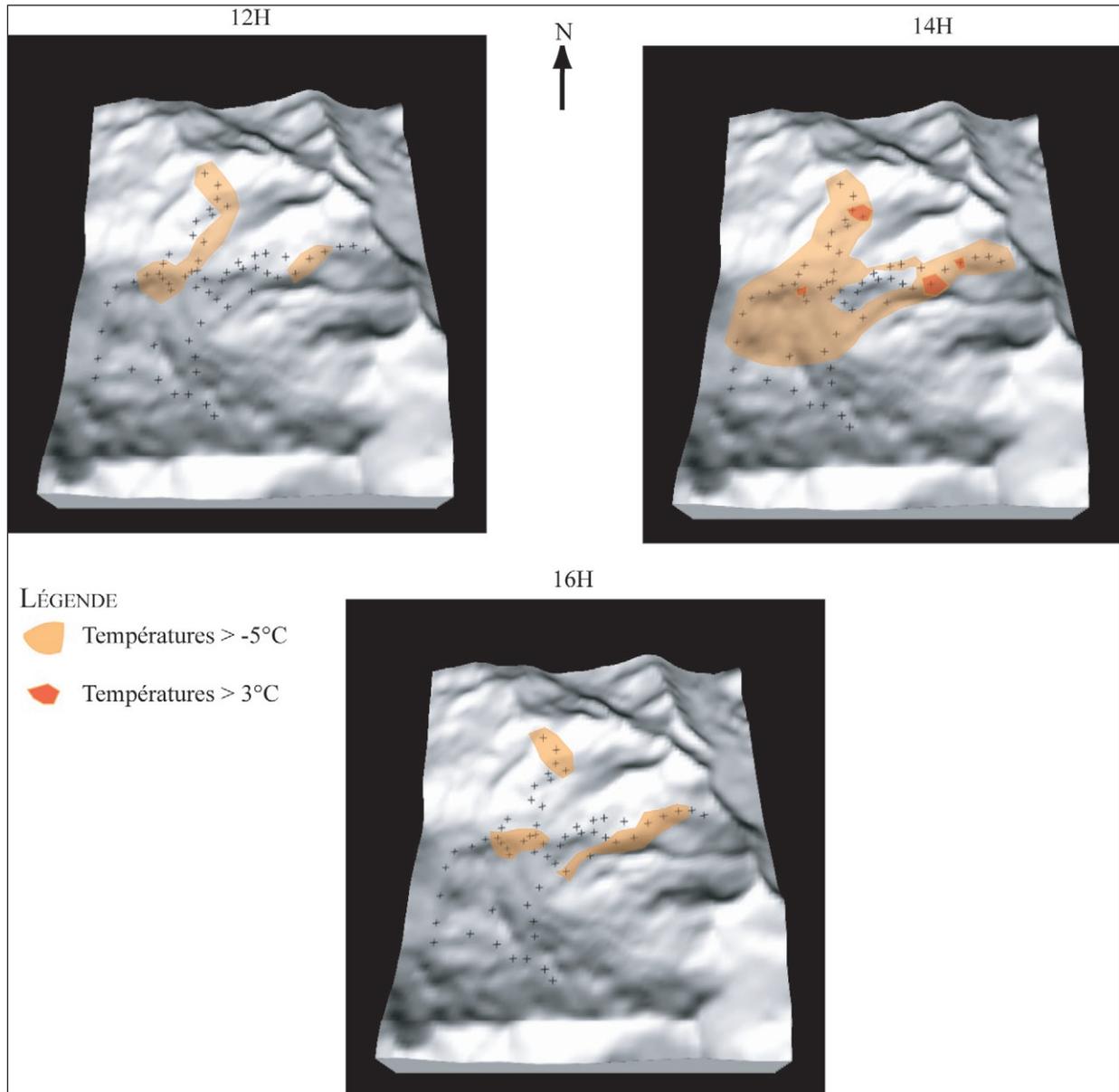


Fig.V.3.5. Evolution spatiale des températures à Val Thorens à 12h, 14h et 16h le 24/12/2003.

Les zones les plus chaudes sont la face sud et le vallon de la face ouest, en rapport avec l'exposition.

Répartition spatiale des températures nocturnes dans la vallée des Bellevilles : on assiste à une petite inversion (apparente) et la figure V.3.6 nous permet d'observer la variation spatiale des températures sur le site des Menuires et de Val Thorens, dans une vue globale. On remarque bien que l'évolution avec l'altitude correspond au profil classique des températures décrit dans le chapitre précédent. La ceinture chaude est bien visible, et semble s'arrêter au niveau de l'intersection entre les deux ruisseaux qui descendent des cirques. L'inversion de fond de vallée varie le long du talweg, en fonction de l'encaissement. **Ceinture chaude et inversion de fond ne sont finalement que le même phénomène décliné dans l'espace.** Enfin à Val Thorens, les températures à la station sont plus froides qu'à la même altitude sur le versant ouest des Menuires, mais par contre on assiste à une légère remontée des températures vers le haut du versant ouest, confirmant l'anomalie thermique de cette zone.

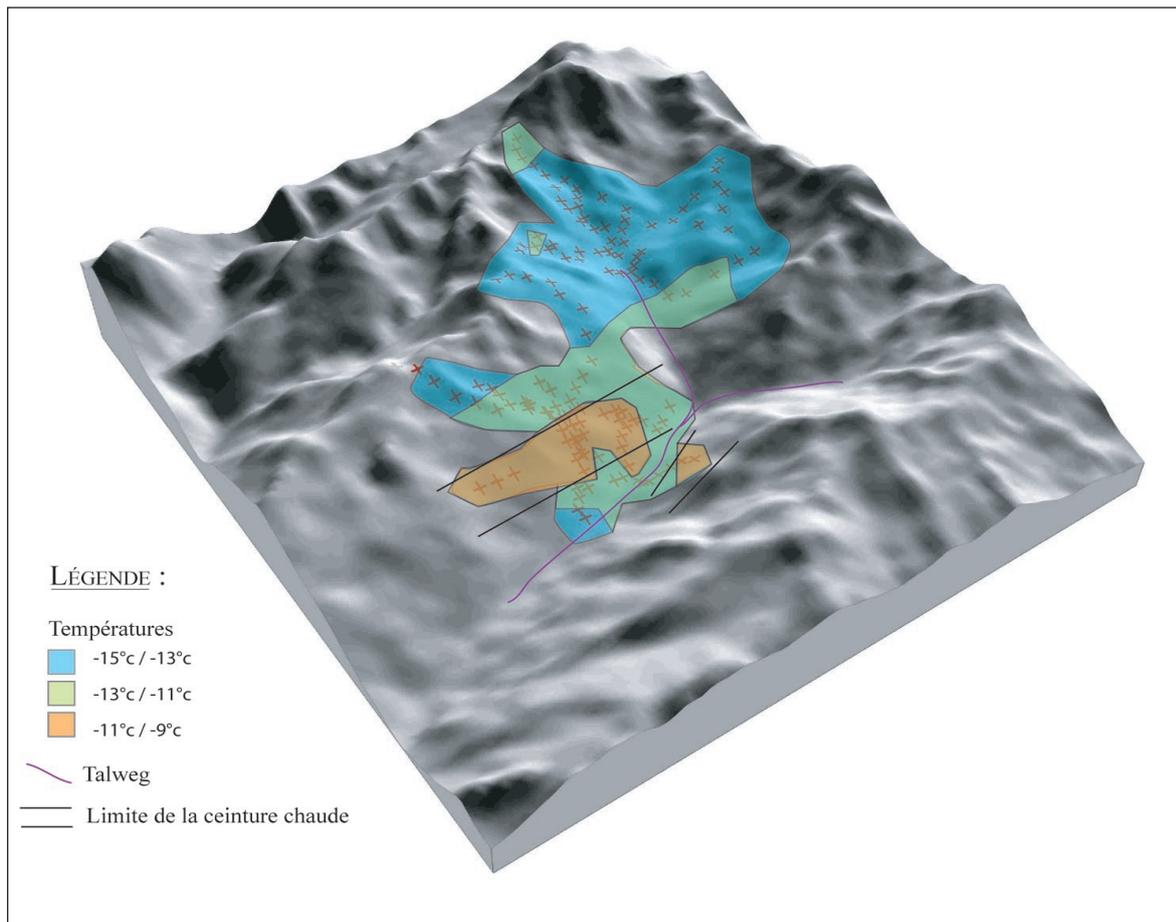


Fig.V.3.6. Répartition spatiale des températures dans la vallée des Belleville le 14/12/2003 vers 1h30.

V.3.2 La journée du 28/03/2004 : une belle journée de mars

V.3.2.a. Situation générale

Un anticyclone de type 6 s'est installé depuis deux jours et les températures sont assez douces (type de temps C2) et se réchauffent. Cette situation est plutôt typique des journées de mars avec peu de changement de temps et pas d'inversion nocturne. La nuit est fraîche (de - 8°C à -12°C sur le site), et la variabilité spatiale des températures diurnes importante (de 6°C à 16°C, soit 10°C d'écart), mais beaucoup moins qu'en décembre (exemple du 24/12/2003, avec 15°C d'écart).

Les mesures effectuées sur le versant des Menuires nous montrent deux comportements de l'humidité relative (fig.V.3.7) : en moyenne, elle diminue de 1% par 100m, alors que les températures diminuent aussi avec l'altitude (Les Menuires, Valloire). Le fond de vallée, le bas de versant sont donc plus humides que le haut de versant. Mais, à l'instar du gradient thermique, sa réalité journalière est différente et se calque beaucoup plus sur l'évolution des températures et sur l'alternance des types de temps.

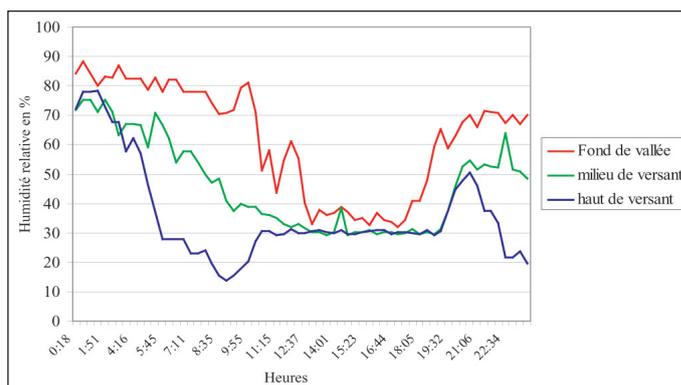


Fig.V.3.7. Evolution de l'humidité relative le 28/03/2003 aux Menuires.

L'humidité relative est plus forte en fond de vallée la nuit mais s'uniformise de 12h à 18h vers un taux de 30%.

V.3.2.b. Evolution de la répartition des températures et du vent aux Menuires.

Voir fig.V.3.8 et fig.V.3.9.

- Comportement des brises thermiques : une brise de vallée vient s'infiltrer sur le haut de versant vers 14h et perturber les écoulements catabatiques. Cette situation étant assez courante, c'est plutôt la présence d'une brise de vallée sur tout le site qui est rare. Généralement, on observe cette brise diurne d'abord sur le bas de versant vers 12h, puis elle remonte sur le versant ouest (il existe de multiples possibilités). Le plus important est de constater que pendant l'après-midi, deux types de brises coexistent : au fond de vallée, *la brise de montagne* tourne au sud-ouest (pendularité), s'écoulant au bas et milieu de versant et remontant sur le haut de versant (anémomètre 5). Vers 18h, c'est devenue une brise transversale. Et sur le milieu du versant ouest, on retrouve *la brise de vallée*. Puis les brises de pente descendantes remplacent rapidement cette «danse», de 19h à 12h le lendemain (croisement brise de pente et brise de montagne). Cela nous donne trois écoulements différents de faible vitesse, vers 5 km/h en diurne, alors que les brises nocturnes atteignent les 10 km/h. Ces vitesses faibles et l'importante radiation de cette journée vont exacerber la variation spatiale des températures maximales.

- Les températures : durant cette journée typique du mois de mars, l'évolution spatiale des températures diffère de l'évolution de l'exemple de la journée de décembre, car on ne rencontre pas vraiment la même dynamique des zones les plus chaudes. Alors qu'en décembre on distingue une «poche» d'air plus chaude qui passe du versant est au versant ouest suivant la course du soleil, elle se retrouve en mars séparée en deux au niveau du milieu de versant ouest (le fond de vallée et la zone au-dessus de 2100m sont supérieures à 10°C). La brise de montagne souffle justement au milieu de versant, alors que la brise de vallée passe au-dessus d'une limite située vers 2000m en remontant le versant (on suppose qu'elle souffle aussi en fond de vallée plus en aval). Le haut de versant est aussi beaucoup plus chaud, les différences liées à l'altitude étant diminuées et celles liées à l'exposition augmentées. On peut évidemment se demander quel rôle joue cette brise de vallée dans la dynamique des températures. **Mais les relations brise de montagne / températures fraîches et brise de vallée / températures douces sont assez explicites pour être notées** (fig.V.3.10).

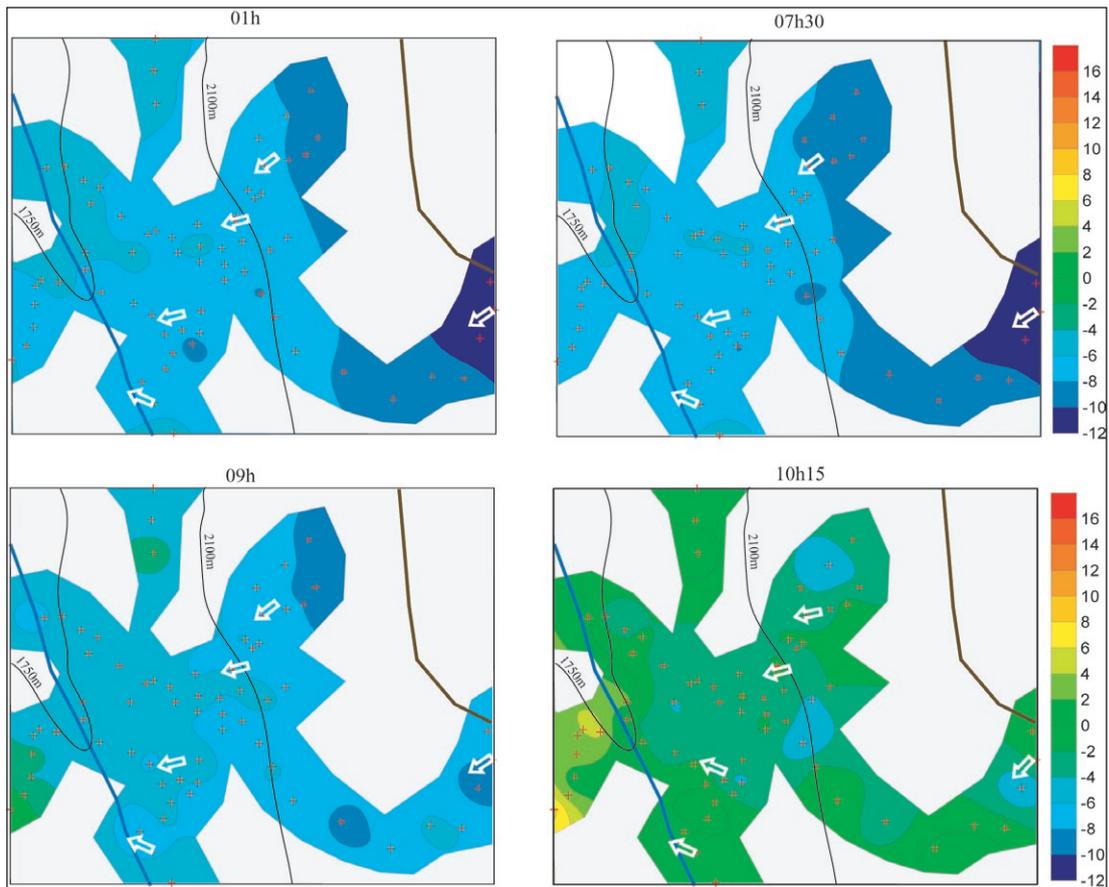


Fig.V.3.8 : Répartition spatiale des températures et du vent aux Menuires le 28/03/2004 de 1h à 10h15h.

Légende :

Echelle des températures en °C, avec un pas de 2°C.
 Trait bleu : talweg ; Trait marron : crête.
 Flèche blanche : direction du vent.
 Méthode d'interpolation : krigeage.

- 01h-7h : Pas d'inversion dans la vallée, avec un gradient de $-0,45^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ toute la nuit.
- 9h : Les températures commencent à remonter, surtout sur le versant est et sur la piste du Gros Tougne. On assiste plutôt à une uniformisation des températures, phénomène courant lors du lever du soleil.

Page suivante (fig.V.2.8) :

- 10h15 : Des différences importantes apparaissent et le facteur altitude est remplacé par le facteur exposition dans la répartition des températures. Cela donne une zone plus froide centrée sur la Croisette (à l'amont du front de neige) et qui s'étend vers les versants de vallons orientés sur le nord-ouest. Comparée à la situation de décembre, le haut de versant se réchauffe bien plus vite.
- 12h - 14h : Le versant est et le fond de vallée continuent leur réchauffement, sauf près du front de neige de la station. C'est vers 13h que la situation change : le haut de versant se réchauffe lui aussi, ce qui donne l'impression qu'une bande de froid se crée entre le fond de vallée et le haut du versant ouest, à partir de 2100m.
- 16h - 17h - 18h30 : Cette situation perdure l'après-midi et vers 17h le versant est commence à se refroidir. Cette remontée de froid se fait alors que la partie supérieure du versant ouest est bien chaude. Contrairement au 24/12/03, on n'observe pas cette ascension de l'air chaud. Et cela est très sûrement dû à la présence de la brise de vallée, qui amène de l'air plus chaud et une ventilation plus faible. Les zones les plus froides sur le versant ouest correspondent à celles qui étaient les plus chaudes en décembre. Mais cela est relatif : car en mars la présence de la brise de vallée couplée à une exposition plus directe du haut de versant et à la présence d'un anticyclone moins puissant provoque un changement dans la répartition des températures. Ce n'est pas la ceinture chaude qui se refroidit, mais le milieu et le haut de versant qui se réchauffe, d'autant plus que celui-ci est légèrement mieux exposé. Ceci est confirmé par l'évolution des températures sur les autres zones qui gardent leurs caractéristiques décrites en décembre et en moyenne.
- 20h - 21h30 : Après l'uniformisation des températures, le haut de versant se refroidit très vite.

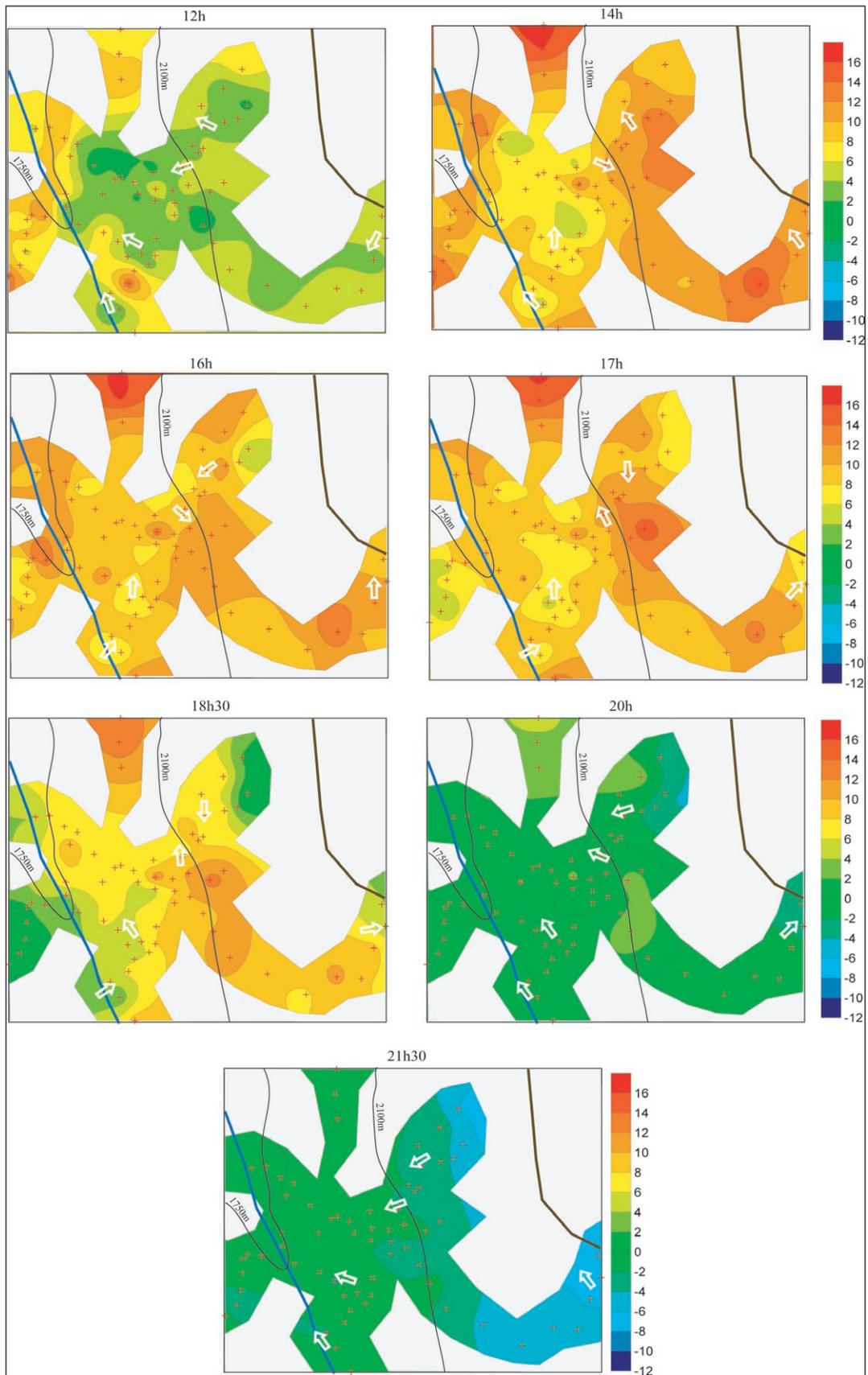


Fig. V.3.9 : Répartition spatiale des températures et du vent aux Menuires le 28/03/2004 de 12h à 21h30h.

La progression de la brise de vallée est visualisable sur la figure V.2.10

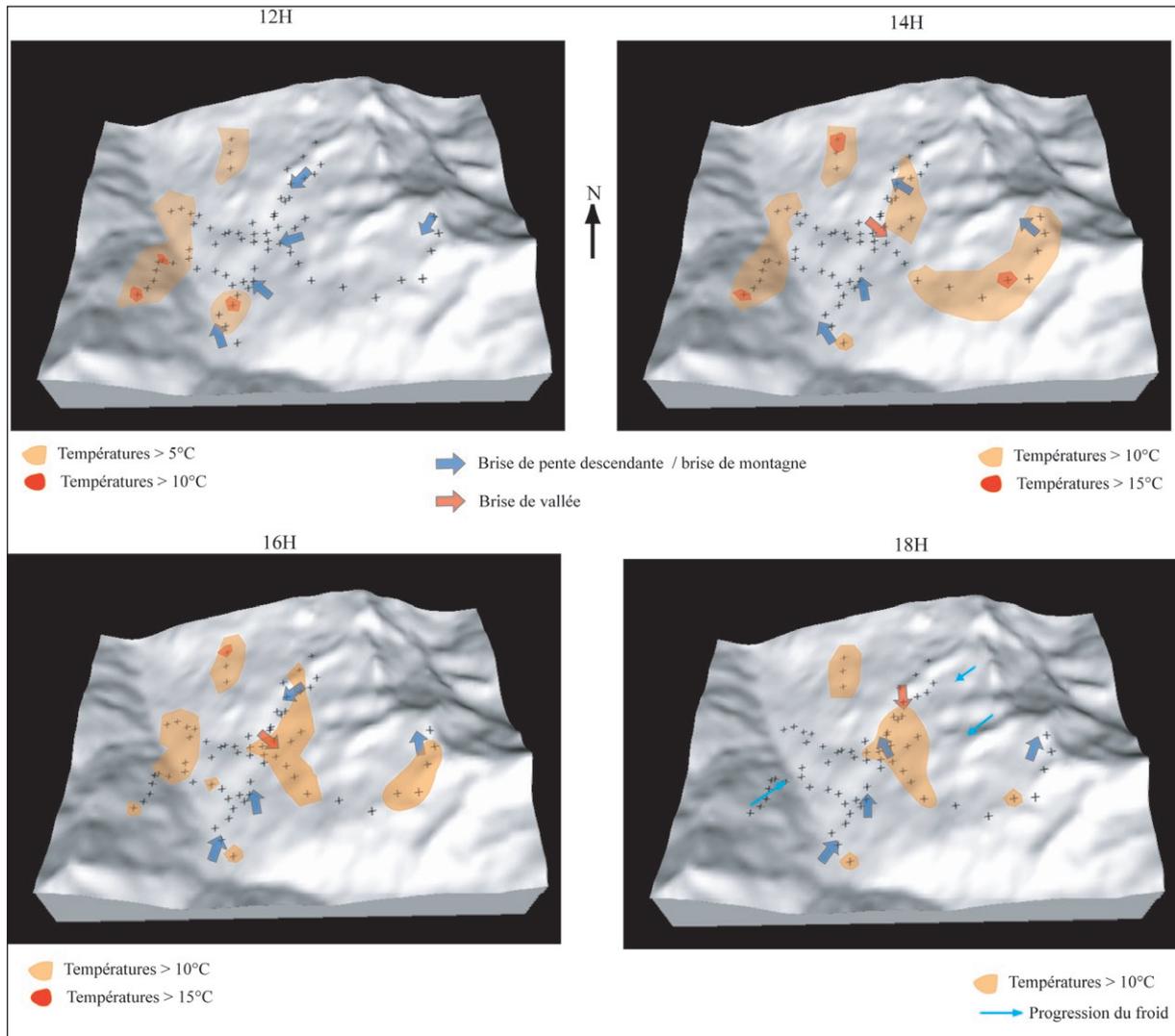


Fig. V.3.10 : Evolution spatiale des températures, nature et directions des brises durant l'après-midi du 28/03/2004.

Durant la période 12h - 18h, la moyenne des températures se situe vers 10°C.

Il est toutefois nécessaire d'observer aussi l'évolution des températures lors d'une journée avec des brises de vallée sur l'ensemble du versant.

V.3.2.c. Comparaison avec la journée du 05/04/2005

Même s'il est rare de trouver un cas comme celui-ci, cette journée du 05/04/2005 (code 6 à 3ab) nous offre l'exemple d'une situation où la brise de montagne matinale évolue en brise transversale, puis en brise de vallée sur la fin de l'après-midi. Le type de temps est C2, les températures sont assez douces la nuit (inférieures à -5°C en dessous de 2400m) et peu contrastées le jour, sauf en haut de versant où elles restent froides (5°C à 12h à 2800m, pour 15°C en bas de versant, mais en évoluant très vite dès lors). Par contre, on observe une petite baisse des températures sur l'ensemble du site dès 16-17h. L'humidité relative est quant à elle identique sur le site, avec 70% la nuit et 30% le jour. Ces deux journées sont donc très semblables d'un point de vue thermique.

Par rapport à l'exemple précédent du 28/03/2004, la répartition spatiale des températures commence à différer seulement après 14h, voir 15h. Alors que le haut du versant ouest tarde à se réchauffer (présence d'une brise de montagne continue), le reste du site s'homogénéise thermiquement. On y note alors la présence d'une belle brise transversale (fig.V.3.11). Vers 18h, l'arrivée de la brise de vallée semble faire perdurer cet effet thermique, le versant est se refroidissant enfin.

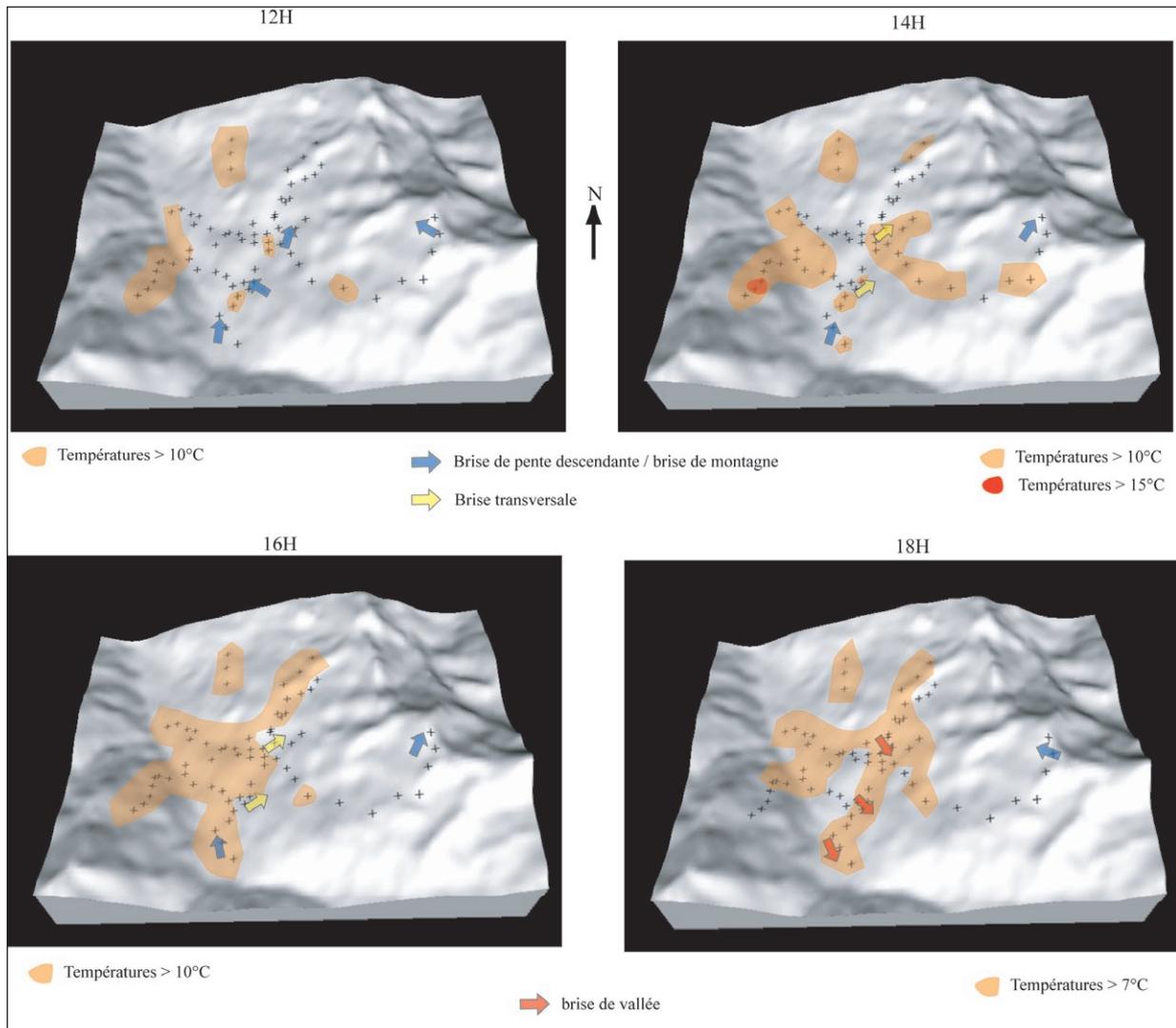


Fig. V.3.11 : Evolution spatiale des températures, nature et directions des brises durant l'après-midi du 05/04/2005.

A 18h, les températures sont séparées en deux classes autour de 7°C qui correspond à la moyenne à cette heure.

Synthèse

Ces trois exemples, choisis pour leur représentativité parmi un grand nombre de cas, nous ont montré qu'il existe **une relation entre l'évolution spatiale des températures diurnes et la nature des brises thermiques.**

En décembre, les effets de l'exposition par rapport à la course du soleil sont primordiaux car les brises catabatiques sont omniprésentes.

Mais en mars, les zones ventilées par les brises catabatiques s'échauffent moins que celles ventilées par les brises de vallée. Les vitesses des brises catabatiques étant un peu moins fortes que celles des brises de vallée, on peut affirmer que ces dernières «réchauffent» les températures.

Ce constat s'applique surtout pour les versants ouest (et dans une moindre mesure est), car pour ceux orientés au sud ou au nord, la présence de soleil ou d'ombre est bien sûr un élément beaucoup plus incident sur les températures que l'effet d'une brise de vallée. Ceci se constate facilement à Aussois et, surtout à Valloire où les différences de températures diurnes entre le bas de versant de la Sétaz (exposé nord) et le fond de vallée de la Valloirette (ouest) sont telles que la brise de vallée qui souffle en même temps sur les deux positions n'a finalement que peu d'influence.

Lors d'inversion thermique, l'évolution spatiale des températures nocturnes est déterminée par la dynamique de la ceinture chaude, effet qui se propage sur le versant durant la nuit en accentuant par là même les différences de températures entre le fond de vallée et le milieu de versant. Mais la dynamique des inversions est extrêmement complexe et dépend de multiples facteurs qui agissent souvent à des échelles supérieures (subsidence...).

Finalement, la variabilité des températures et du vent est fortement liée à la fois :

- aux conditions synoptiques,
- à l'altitude et à l'exposition,
- aux relations qui s'instaurent entre les paramètres climatiques.

L'analyse des cas particuliers que nous venons d'effectuer, en complément des autres observations issues des études antérieures, nous conduisent à **la synthèse des observations sur l'influence des facteurs externes sur les paramètres climatiques aux échelles fines** (micro-climatique), aspect final de notre régression d'échelle. Ces facteurs jouent aussi un rôle important dans la variabilité des températures et du vent.

V.4 LES INFLUENCES AUX ÉCHELLES FINES DES FACTEURS PHYSICO-GÉOGRAPHIQUES

V.4.1 Le rôle des micro-reliefs

- Rappel sur l'orientation des versants :

L'influence des micro-reliefs dépend forcément de l'énergie reçue sur les versants, et celle-ci dépend en partie de l'ensoleillement. Sans rentrer dans les détails, en complément des observations faites dans les chapitres précédents, nous savons qu'à l'équinoxe de printemps, pour une pente de 30° à la latitude de 45°N, l'intégrale journalière du rayonnement solaire direct intercepté par la pente, par ciel clair, varie de 2070 J/cm².jour pour une orientation sud, à 1370 J/cm².jour pour une orientation est ou ouest, et à seulement 550 J/cm².jour pour une

orientation nord (CHOISNEL E., 1987). Le versant nord est aussi plus humide. *Ces différences d'exposition entraînent à Val Thorens sur les différents versants à même altitude des écarts moyens de 2 à 3°C sur les moyennes journalières maximales et beaucoup plus sur des valeurs horaires (plus de 5°C), surtout si la radiation et la température de l'air sont fortes, et que les brises de vallée soufflent.* Pour les orientations est et ouest, la différence intervient du fait que les versants est se réchauffent difficilement le matin (principalement à cause de la persistance des brises catabatiques) et se retrouvent rapidement à l'ombre l'après-midi. Les pentes à l'ouest sont donc favorisées par l'ensoleillement, provoquant des écarts vers 15h supérieurs à 5°C pour une même altitude (exemple pris aux Menuires vers 1900m). *L'énergie radiative solaire est plus utilisée pour évaporer l'humidité sur un versant est, celui-ci est finalement plus humide et plus froid que l'ouest.*

- Effets des micro-reliefs :

Il est complexe de déterminer si telle ou telle forme de micro-reliefs provoque des effets thermiques réchauffant ou refroidissant dans un espace, car beaucoup d'éléments physico-géographiques et météorologiques se combinent à différentes échelles. Mais deux effets principaux sont ressortis des analyses pour les micro-reliefs :

- ils modifient l'exposition par rapport au versant (exposition ou ombrage),
- ils modifient la ventilation locale.

Par exemple, les cuvettes, c'est-à-dire ces formes concaves enfoncées dans la pente créant des replats voire des pentes inversées, produisent des températures maximales plus fortes. *La ventilation dans ces zones est plus ou moins stoppée.* Mais leurs influences sur les minimales sont plus nuancées, car elles dépendent au moins de deux facteurs : *sur un versant pentu bien ventilé par les brises catabatiques, ces «micro-bassins collecteurs d'air froid» (QUENOL, H., 2002) sont vraiment trop petits pour permettre la création de lac d'air froid.* A l'échelle de nos mesures, les différences entre une pente ou un replat sont peu évidentes, d'autant plus que la période hivernale est propice aux écoulements d'air froid par gravité qui homogénéise les températures minimales. Le second facteur est la vitesse des brises catabatiques en surface : *rarement supérieure à 10 km/h, la brise ne restreint pas suffisamment le refroidissement par rayonnement.* Il est donc difficile de comparer l'effet des micro-reliefs à ce niveau. Par contre, l'effet des formes topographiques d'échelle supérieure comme les fonds de vallée est bien plus manifeste.

Il existe pourtant une relation constatée dans cette étude entre les zones moins bien ventilées et des températures minimales plus douces. Il se peut donc qu'avec les faibles vitesses de brises qui descendent les versants, une sonde protégée enregistrent des températures plus douces, soit parce que le capuchon anti-radiation est moins ventilé, soit parce qu'à ce niveau les températures sont effectivement plus douces qu'au centre d'un vallon bien exposé. Ces deux effets s'ajoutent de toute évidence. **On peut conclure que les brises ont une action visible sur les températures en fonction de la protection offerte par les micro-reliefs.** Ce ne sont pas vraiment les formes topographiques comme les cuvettes qui ont des effets, *mais leur capacité à ralentir les écoulements.* Les formes convexes avancées dans la vallée sont bien ventilées et les différences entre les mesures sont très équivoques (exemple à Aussois entre le haut de

versant de l'Eterlou et le versant sud-est des Sétives). Les brises longent les pentes de manière continue, parfois passent par dessus les dépressions du versant et de petits rotors se forment dans la cuvette (fig.V.4.1). Les brises font aussi varier les températures potentielles (fig.V.4.2). L'influence thermique du micro-relief dépend donc aussi du type de brise en place. En mars, la variabilité des températures diurnes devient plus forte à cause de la dynamique instable du front de stagnation entre les brises montantes et descendantes, et de l'augmentation de la vitesse des brises de vallée.

L'influence thermique d'un micro-relief dépend en partie de son impact sur la ventilation locale. Les zones bien ventilées seront plus froides que les zones moins ventilées, surtout la nuit. En journée, la complexité du phénomène augmente avec l'exposition et la présence de brises de vallée, qui peuvent localement réchauffer les températures par rapport aux brises catabatiques.

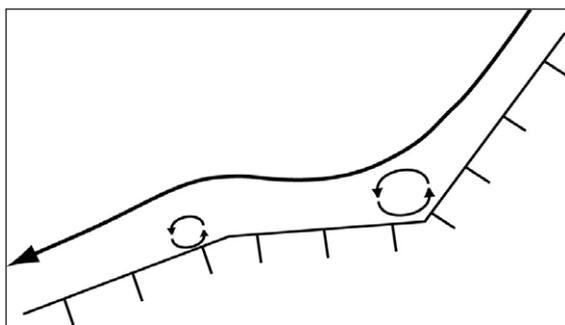


Fig.V.4.1 : Action du relief sur le vent de surface.
La brise de pente descendante est repoussée verticalement lors d'une rupture de pente par des rotors.
D'après G. GUYOT (1999).

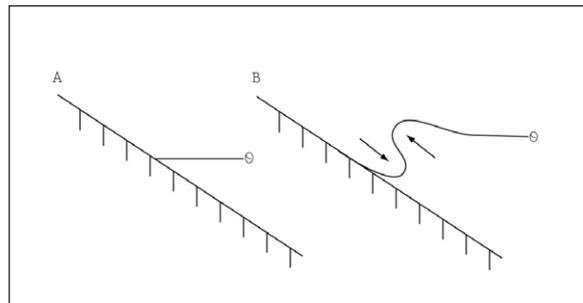


Fig.V.4.2 : Schéma de la déformation de la température potentielle provoquée par les brises descendantes et montantes, ainsi que la destabilisation qui en résulte.
A : Profil initial ; B : après la déformation par les brise de pente.
D'après R. T. MACNIDER (2003).

Exemple d'interaction entre deux phénomènes météorologiques : l'évolution de la couverture neigeuse et des brises de vallée :

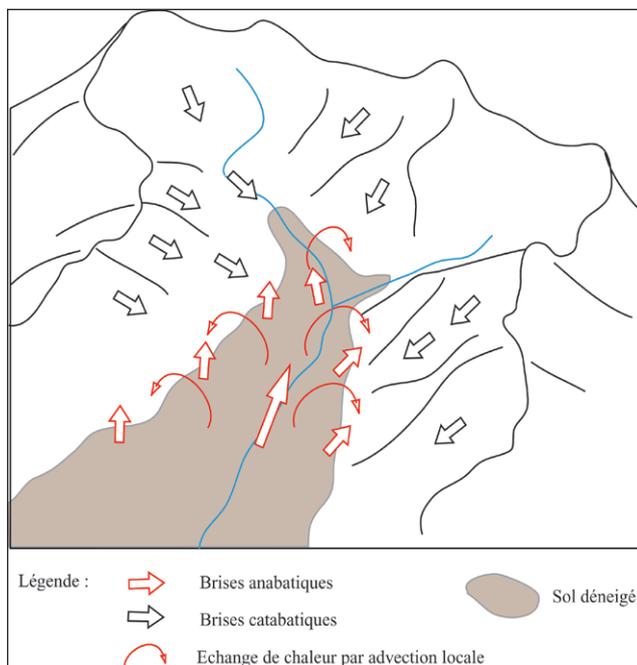


Fig.V.4.3 : Relation entre les brises anabatiques et le sol déneigé.
La couverture neigeuse disparaît en fond de vallée et sur les bas de versants avec l'augmentation des températures, ce qui facilite la mise en place des brises de vallée, qui à leur tour provoquent une accélération de la fonte de la neige (rétroaction positive).

Il se produit un transport de chaleur par advection locale, vers la fin du dégel, entre les portions du sol nu déneigé et les portions de sol encore enneigées. Ce transfert de flux rentre en interaction avec les brises de vallée qui se développe principalement quand le fond de vallée commence à être déneigé. Les brises plus chaudes entraînent alors une fonte plus rapide de la neige en amont et le processus continue, favorisant comme dans la vallée des Belleville une fonte plus rapide sur le versant ouest, car la brise de vallée remonte le versant exposé (fig. V.4.3). Ce transfert existe aussi entre un couvert forestier et une clairière à l'échelle microclimatique (CHOISNEL E., 1987).

V.4.2 L'influence de la forêt

Cette influence est loin d'être évidente à déterminer car elle dépend de plusieurs paramètres : la nature des arbres, la densité et la hauteur du couvert, la rugosité, l'albédo... En journée, l'ombre des arbres va diminuer les températures, et au contraire protéger du froid la nuit. L'humidité y est plus forte. Mais ces constats généraux sont loin d'être généralisables. Et nos mesures dépendent de la position de la sonde sur nos sites... Elles sont souvent disposées le long des pistes en lisière de forêt, parfois à quelques mètres à l'intérieur de celle-ci, et l'orientation du versant joue un rôle capital puisque l'ombre portée par les arbres sera complètement ou pas du tout portée sur les sondes. De plus, des conditions très particulières peuvent se développer en lisière de forêt, à l'interface entre deux milieux différents (forêt / air libre). Lorsque qu'une piste traverse une forêt, on retrouve encore des conditions originales.



Photo V.1 : La sonde 1 à Aussois.

Photo : CHAIX.C, fév 2005

V.4.2.a. Le versant sud d'Aussois

A Aussois, la forêt recouvre la partie supérieure du bas de versant. La sonde 1 est posée le long de la piste, entre deux épicéas (photo V.2), avec une ouverture vers l'aval et une bonne exposition. Cette sonde n'est donc pas réellement en forêt. La sonde 2 est située au sommet de la clairière de l'Ortet plus à l'ouest, en lisière avec la forêt juste en amont, dans une position proche de la sonde 1.

Comme nous l'avons vu dans l'étude des moyennes de températures, la sonde 1 enregistre les températures les plus fortes par rapport à l'altitude, **surtout pour les maximales** (*mais aussi pour les minimales dans une moindre mesure*). Par situation dépressionnaire, les températures restent calquées sur le gradient moyen, mais, comme pour la sonde 2, les températures en journée atteignent des valeurs extrêmes. L'exposition est bien sûr la raison principale, mais il faut rajouter que *ces positions «d'abri» non ventilé favorisent aussi ce réchauffement*. La nuit, la sonde 2 enregistre des températures très froides par rapport à la moyenne locale, et cela contrairement à la sonde 1. Cette différence est difficile à expliquer car la sonde 3 située au centre de la clairière de l'Ortet a des mesures nocturnes similaires à la sonde 1. Enfin, les valeurs

d'humidité relative sont encore plus étonnantes : la moyenne sur 5 saisons donne la valeur la plus faible du site pour la sonde 1, soit 55%, pour 67% pour la sonde 2 et 60% pour la sonde 9 au-dessus de la forêt.

Ainsi, les données enregistrées par la sonde 1 montre que *l'exposition au sud du versant et l'absence d'un ombrage conséquent en forêt provoquent un réchauffement assez conséquent des températures, surtout en plein soleil...* L'humidité relative reste faible mais il est difficile de conclure sur ce phénomène. *Enfin en lisière de forêt, les températures minimales sont abaissées mais les maximales restent fortes. Une piste en forêt plein sud connaît donc un microclimat assez doux, mais la lisière inférieure connaît des amplitudes journalières fortes.*

V.4.2.b. Le versant nord de Valloire

Comme à Aussois les sondes sont disposées près des pistes en forêt, sur tout le versant nord. Les plus intéressantes sont la sonde 25 et celles situées autour, ainsi qu'en lisière, car on peut effectuer une comparaison sur le versant nord-est (voir photo II.23). Les arbres sont ici des épicéas, alors que ce sont des mélèzes sur le versant nord, qui provoquent donc moins d'ombrage. D'une manière générale, les moyennes des températures maximales montrent bien l'influence de la forêt en versant nord, *provoquant un véritable cache au soleil*. Mais au niveau plus local, quelles sont les différences ? La comparaison peut s'effectuer entre les sondes 25, et 24, 26, 27. Les sondes 24 et 25 enregistrent les mêmes températures, avec une petite différence la nuit où la sonde 24, située en lisière inférieure de la forêt, est légèrement plus froide, mais avec des écarts plus faibles qu'à Aussois.

Par contre, les écarts avec les sondes 26 et 27 sont assez flagrants pour les maximales. En moyenne, de -1°C à -3°C , avec des pics très importants lors des journées douces, car les écarts augmentent avec la température, c'est-à-dire la radiation (jusqu'à $+7^{\circ}\text{C}$, mais dans ce cas il faut introduire dans ce chiffre le réchauffement induit par la cloche anti-radiation sans ventilation réelle). La forêt protège donc bien ici, dans ce contexte où l'ombrage est créée par l'orientation du versant. Pour les minimales, les écarts sont beaucoup plus faibles, toujours inférieurs à 1°C , dans la limite des erreurs de mesures.

Finalement, et contrairement au versant sud d'Aussois, *un versant nord forestier a une influence négative sur les températures maximales diurnes, dans des proportions assez importantes* ($+2$ à $+4^{\circ}\text{C}$ sur les moyennes, fig.V.4.4). La différence de température entre la piste découverte et la forêt est tout de même importante pour les maximales, mais peu pour les minimales. La sonde 4 à Valloire, placée devant une grande haie d'arbres sur le versant nord, se singularise par ses mesures bien plus froides que ses voisines.

L'humidité relative ne marque pas de grandes différences avec les sondes alentour, sauf pour la sonde 24 en lisière inférieure de forêt qui comme à Aussois est plus forte, mais de seulement 5%. La forte variabilité spatio-temporelle observée à Aussois ne se retrouve pas ici. En conclusion, les valeurs d'humidité relative ne sont pas bien différenciées sur de si petits espaces, et même sur l'intégralité du versant.

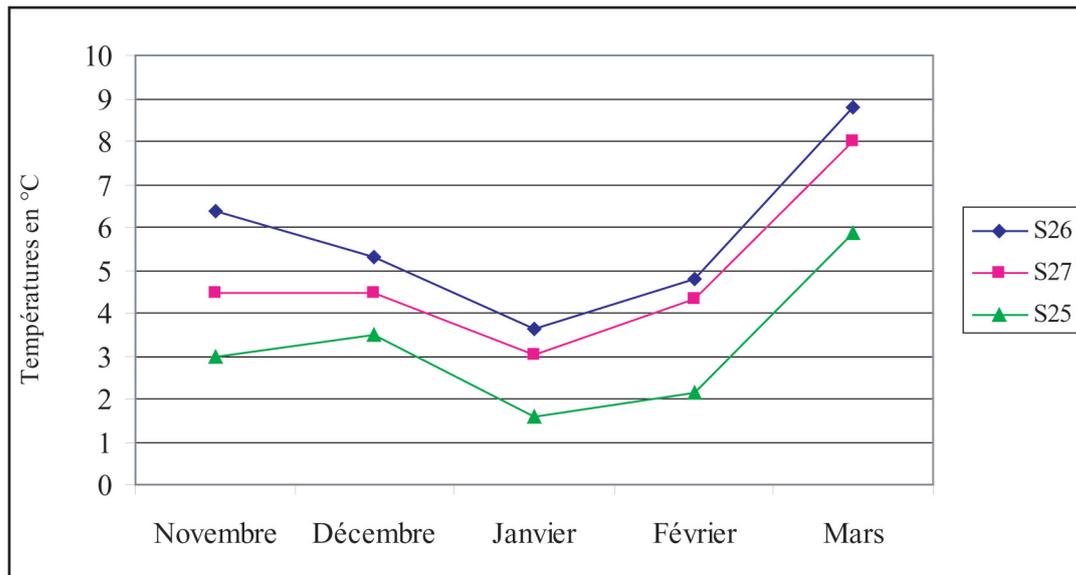


Fig.V.4.4 : Moyennes des températures maximales journalières, saison 2004-2005.
La sonde 25 (S25) est situé en forêt.

V.4.2.c. Influences sur la direction des vents

Plusieurs anémomètres ont été disposés le long des pistes qui traversent les forêts sur les sites d'études. Cette configuration peu naturelle provoque directement une canalisation des brises. Alors qu'à l'échelle du versant la forêt agit comme une barrière aux brises, qui les ralentit fortement en les faisant passer principalement par dessus (mais il n'y a pas de poche d'air froid retenue par la forêt), *on constate qu'elles s'écoulent bien dans les couloirs formés par les pistes*. Ainsi les mesures moyennes des anémomètres d'Aussois (n°4 et 5) montrent des directions qui s'orientent vers le nord-est et le nord-ouest respectivement au lieu de nord, directement dans l'axe des pistes qui les surplombent. A Valloire, l'anémomètre 3 subit le même effet. Il conviendrait donc de placer les anémomètres dans ces axes afin de bien capter les brises et donc de mieux gérer l'écoulement et aussi la ventilation de la sonde.

V.4.3 L'effet du bâti

Le bâti a une influence similaire à la forêt, **en accélérant les processus liés à l'exposition**. Aux Menuires, des sondes sont disposées près des immeubles (à une vingtaine de mètres), mais il est très difficile de constater une influence sur les températures, sauf pour les températures moyennes qui semblent plus élevées, mais dans des écarts assez faibles (1°C). On remarque tout de même que certains phénomènes récurrents permettent simplement de comprendre ces légères différences : *les températures en aval des barres d'immeubles sont plus chaudes qu'en amont (front de neige), et bien plus chaudes que dans le fond de vallée*. Pourtant, cette différence s'explique aussi par la décroissance normale des températures et par l'effet topographique du versant et de la ceinture chaude. Seule la sonde 44 semble anormalement plus chaude, mais pas pour les maximales. Elle est située en aval des bâtiments et de la route, dans un espace bien protégé des brises. Ce sont les sondes 43 et 47, proches du fond de vallée qui ont les maxima-

les les plus fortes. La sonde 46, posée devant une barre d'immeuble plein sud, sur un replat, ne révèle pas des mesures plus chaudes que les autres sondes voisines. Par contre, la sonde 45 située au débouché d'un couloir intra-bâti est plus froide. En conclusion, à échelle fine, la protection offerte par les immeubles existe mais elle est peu significative. Par contre les barrières d'immeubles forment une protection contre les brises descendantes ce qui permet d'avoir des différences de 2°C entre l'amont et l'aval. On pourrait penser que la Croisette, barrières d'immeubles en forme d'arc de cercle, agit comme un réceptacle de l'air froid qui s'écoule le long de la pente. Le même effet se retrouve à l'aval de la barre d'immeuble de Reberly.

Après ces observations, on peut conclure que *pour les maximales l'exposition reste un facteur primordial, que l'on peut ajouter à celui de la protection offerte par les immeubles en créant des remparts face à la ventilation*. Pour les minimales, les sondes proches des immeubles semblent mesurer des températures plus douces, mais en moyenne cela ne provoque pas des différences de températures supérieures à 1°C. Ces multiples facteurs s'ajoutent à la topographie du versant et aux micro-reliefs pour conditionner localement l'évolution des températures en dehors de l'influence des conditions météorologiques.

Synthèse

La mesure de la température en montagne est complexe car elle est soumise à l'influence de multiples facteurs qui agissent à différentes échelles. *Même si les conditions synoptiques, l'altitude et l'exposition des versants sont des facteurs très déterminants, la variabilité spatiale des températures va dépendre aussi de la ventilation, qui elle-même est déterminée par des facteurs cosmiques (radiation solaire...) et topographiques (micro, topo...), auxquelles on peut ajouter la présence de neige, de forêt, l'influence de la nature du sol, etc... Cela constitue un système très complexe dans lequel les paramètres interagissent constamment, d'autant plus qu'à échelle fine ces mêmes facteurs varient fortement*. C'est pourquoi, lorsque l'on pose une station de mesure en montagne, les données collectées seront surtout représentatives du lieu qui l'entoure. Pour qu'elle soit la plus «objective», la mesure des paramètres climatiques en montagne doit donc être effectuée dans un espace qui «moyenne» le plus possible les effets des facteurs externes au climat, sans oublier de prendre en compte les effets possibles des conditions d'échelles supérieures (effet de site, exposition aux fronts...).

Ces multiples constats sur les températures en montagne nous ont aussi permis de déterminer plus précisément quels facteurs pouvaient influencer la mise en place des brises thermiques hivernales. Proposer un modèle de leur régime ne pouvait être possible qu'après l'étude précise et à échelles fines des interactions qui existent entre les différents paramètres climatiques et le relief. C'est pourquoi, fort de ces connaissances, nous allons proposer maintenant un cadre très précis et modélisateur original des brises thermiques hivernales dans la vallée des Bellevilles, grâce aux multiples observations effectuées aux Menuires et à Val Thorens, et aux probabilités calculées dans le chapitre IV.

V.5 MODÉLISATION EMPIRIQUE DES RÉGIMES DE BRISES DANS LA VALLÉE DES BELLEVILLES

On sait que les brises thermiques comme les vents de versants sont causées par la différence de température entre l'air qui monte ou qui descend sur les versants, et l'air à la même altitude au centre de la vallée. Mais en pratique, il faut aussi ajouter l'influence des vents synoptiques et de gradient le long de la vallée, le type de temps (radiation, ...), les changements de topographie et la nature de la couverture de surface (WHITEMAN C.D, 2003). Tous ces paramètres varient fortement en montagne et en fonction de la période de l'année. «Chaque point du versant nous apporte un questionnement différent» (I. VERGEINER, in WHITEMAN, C.D, 2003).

Le système hivernale des brises thermiques est très différent du système estival, parce que les brises catabatiques peuvent perdurer tout au long de la journée, ou alterner avec des brises anabatiques suivant des rythmes variant constamment d'un jour à l'autre. La «mise en rotation» des brises est un phénomène important pour comprendre ces rythmes. Quatre brises de nature différentes se succèdent suivant un ordre précis (*brise de pente descendante - brise de montagne - brise de pente ascendante - brise de vallée*) mais cette rotation visible dans les grandes vallées alpines (comme la Maurienne) résiste mal à la réalité journalière des hautes vallées alpines (comme les Bellevilles ou la Vallée d'Or). Elle indique seulement un sens suivant lequel l'écoulement de l'air va s'orienter. D'autant plus que, loin d'être des entités indépendantes, ces brises s'interpénètrent constamment sur le versant quotidiennement. Le point de mesure du vent prend alors toute sa signification et le fait de disposer d'anémomètres le long du versant va nous permettre de caractériser ces interactions et ces rythmes si particuliers.

Les brises thermiques hivernales varient en fonction de certains facteurs bien déterminés. Lors de périodes anticycloniques puissantes et froides, plutôt en décembre et en janvier, et en fonction du relief à l'échelle du versant et de la vallée, nous avons presque toujours des brises de pente descendantes et des brises de montagne (en fond de vallée) constantes même en pleine journée, avec une légère variation liée à la course du soleil (de l'est à l'ouest). On a alors un système de brises assez évident.

Mais lorsque les beaux jours arrivent en mars, *la complexité atteint son maximum*, car les brises de vallée se lèvent en aval des vallées et remontent plus ou moins vers l'amont. On pourrait alors utiliser comme image de l'évolution journalière, celle d'un ressort circulaire que l'on tendrait dès le lever du soleil, et qui réussirait à finir sa rotation en fin de journée seulement si la conjonction de certains paramètres de différentes échelles est favorable. A partir de là, on peut chaque jour, de mi-février à avril, observer des directions de brises différentes pour un point (pour évidemment des types de temps anticycloniques ou assimilés). Dès le mois de mai et en été, la variabilité diminue (sans atteindre la faible variabilité du plein hiver), même si l'alternance brises catabatique/anabatiques reste un phénomène déterminé surtout par les différences de températures.

Enfin, *les brises sont de différente nature en fonction de la topographie*. Il faut intégrer dans les modèles la distance qui existe à la fois entre le fond de vallée et le haut de versant, mais aussi entre le bas de la vallée et le haut de la vallée. Dans un premier cas, les brises catabatiques,

glissant le long de la pente du versant, rencontrent vers le bas une brise qui elle descend du haut de la vallée. *Le tout forme un écoulement «tournant» car les brises forment un vecteur commun.* Dans un second cas, qui s'applique aux brises de vallée, on sait que celles-ci remontent le fond de vallée et rencontrent les brises de montagne, à une interface ou front de stagnation, qui bouge chaque jour en fonction des conditions météorologiques ou cosmiques (les températures jouent un rôle important). La brise de vallée remonte aussi le versant, créant un front de stagnation avec les brises de pente. Le comportement des brises thermiques en un point dépend donc aussi de sa position dans la vallée. Les observations effectuées sur de longues séries de mesures, en rapport avec de multiples facteurs, nous ont permis de caractériser l'évolution des brises en hiver. Les mois de janvier et mars seront les deux seuls mois étudiés car janvier reflète la situation hivernale (mi-novembre à fin-février) pour le premier et mars-avril pour le second. **Pour établir notre modèle, nous nous sommes basés sur les probabilités horaires calculées dans le chapitre IV (fréquences des types de brises). Ce n'est donc pas une synthèse de certaines journées «types», mais de toutes les mesures enregistrées par les anémomètres, complétée par l'observation du comportement journalier des brises sur un grand nombre de cas.**

V.5.1 Mécanismes des brises thermiques en janvier et mars

V.5.1.a. En nocturne

En hiver, les brises catabatiques sont bien évidemment omniprésentes. Mais on a pu constater une différence entre les mois «froids» et les mois plus «doux» comme mars : lorsque le froid est intense et la radiation nocturne forte, les brises de pente sont plus puissantes car l'air froid est plus lourd et s'écoule vraiment le long des pentes. Même si la direction en fond de vallée des brises est alors différente de celle des versants, on peut tout même parler de brise de pente descendantes de fond de vallée. *Mais en mars, on remarque une légère tendance des brises de pente descendante à se diriger plus vers le sud même en haut de versant, donc dans le sens de la vallée.* Ainsi en haut du versant ouest des Menuires, cette brise nocturne passe d'une direction de nord-est à est. L'écoulement à l'échelle de la vallée a donc plus d'importance, et influe sur la direction des brises de pente (fig.V.5.1). La notion de brise de montagne ne commence donc qu'à partir du lever du soleil après la renverse (qui reste peu visible en hiver).

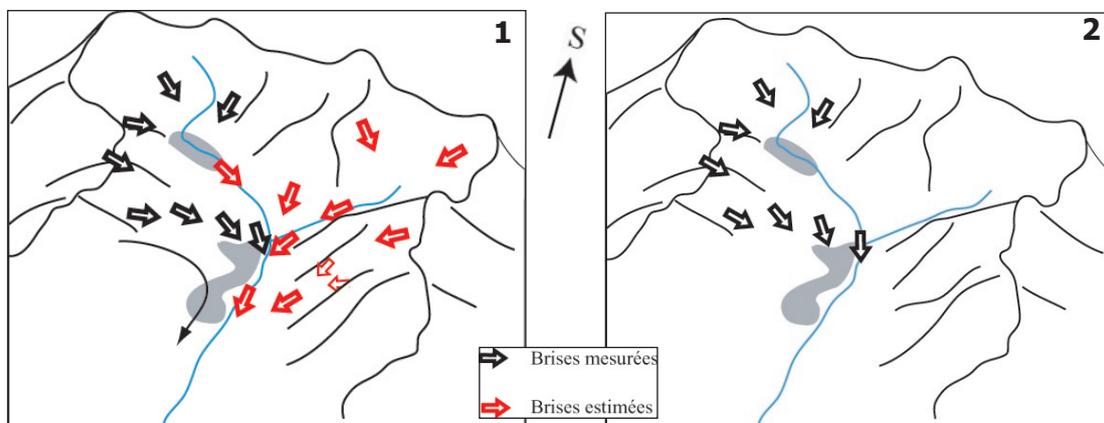


Fig.V.5.1. Directions des brises catabatiques en janvier (1) et en mars (2).

1 : entre 17h et 10h.

2 : entre 18h et 9h.

Les brises estimées sont positionnées par rapport à la symétrie de la vallée.

Cela nous amène à une réflexion sur les changements d'échelle provoqués par le relief particulier de la montagne et des vallées : *les brises catabatiques s'écoulent de la même manière entre une vallée et un vallon de versant* (comportement fractal). Car sur les versants d'un vallon, les brises s'écoulent aussi le long de la pente et rejoignent la brise de pente qui s'écoule elle au centre du vallon. Mais il semblerait donc qu'en mars, avec des vents de gravité moins puissants, ces brises de versants de vallon faiblissent fortement. L'effet gravitaire est moins important, et les données enregistrées par l'anémomètre 1 des Menuires montrent bien ce comportement.

L'utilisation d'un logiciel (comme Surfer®, BRIDIER S., 2001) pour modéliser les écoulements catabatiques par l'intégration de la pente et de l'orientation du relief ne peut ainsi pas s'appliquer à ces formes de vallées, sauf en haut du versant. En effet, les brises de montagne se couplent avec les brises de versant, donnant des vecteurs de brises complexes. Par contre, le site d'Aussois avec son versant assez haut par rapport au fond de la Maurienne donne des résultats beaucoup plus satisfaisants.

V.5.1.b. Evolution journalière en janvier

A cette époque de l'année il est rare de voir apparaître des brises montantes au niveau des Menuires et encore moins à Val Thorens. Les probabilités calculées dans le chapitre IV ne nous donnent que 10 à 20% des cas, et surtout en bas de versant. La probabilité diminue en effet avec l'altitude. On observe plutôt une évolution vers une brise transversale l'après-midi après une brise de montagne le matin, suivant la course du soleil. Les hauts du versant ouest voient quant à eux plutôt s'écouler des brises de pente descendantes, formant un front entre les deux brises qui se situent en moyenne vers 2000m, soit un peu en dessous du milieu de versant (plutôt vers 2200m). Mais cette limite est floue et son comportement trop complexe pour que l'on puisse remarquer des facteurs déterminants de cette évolution journalières. Par contre, certains facteurs favorisent la mise en place de la brise transversale ou de vallée : des températures douces, des vents synoptiques bien orientés, et les brises se mettent à tourner et proviennent alors dans l'ordre du sud, du sud-ouest, de l'ouest, et parfois la brise de vallée s'impose enfin de façon plutôt éphémère entre 15, 16h et 17h en venant du nord. Puis les brises catabatiques reprennent leur écoulement (fig.V.5.2). Les changements s'opèrent donc surtout en dessous de 2000m, avec une brise de montagne qui tourne vers le sud-ouest.

Nous constatons avec intérêt que les modèles de brises thermiques qui ont déjà été élaborés (DEFANT F., 1949) ne peuvent pas s'appliquer ici. Car nous n'avons pas l'alternance classique brises catabatiques / anabatiques, mais seulement des brises catabatiques à la fois nocturnes et diurnes. Seules leur direction et leur vitesse changent (mais très peu), avec cet effet de brise transversale (les brises diurnes ont une faible vitesse d'environ 5 km/h). La figure V.5.3 montre un modèle de changement de direction dans la vallée des Bellevilles pour des conditions météorologiques typiques des mois de décembre, janvier et février. *Deux brises nouvelles apparaissent donc : la brise de pente descendante diurne, et la brise de montagne diurne. Celle-ci se transforme quelquefois en brise transversale, qui n'est pas une brise de pente ascendante, mais bien une brise de montagne qui tourne dans le sens de la course du soleil.*

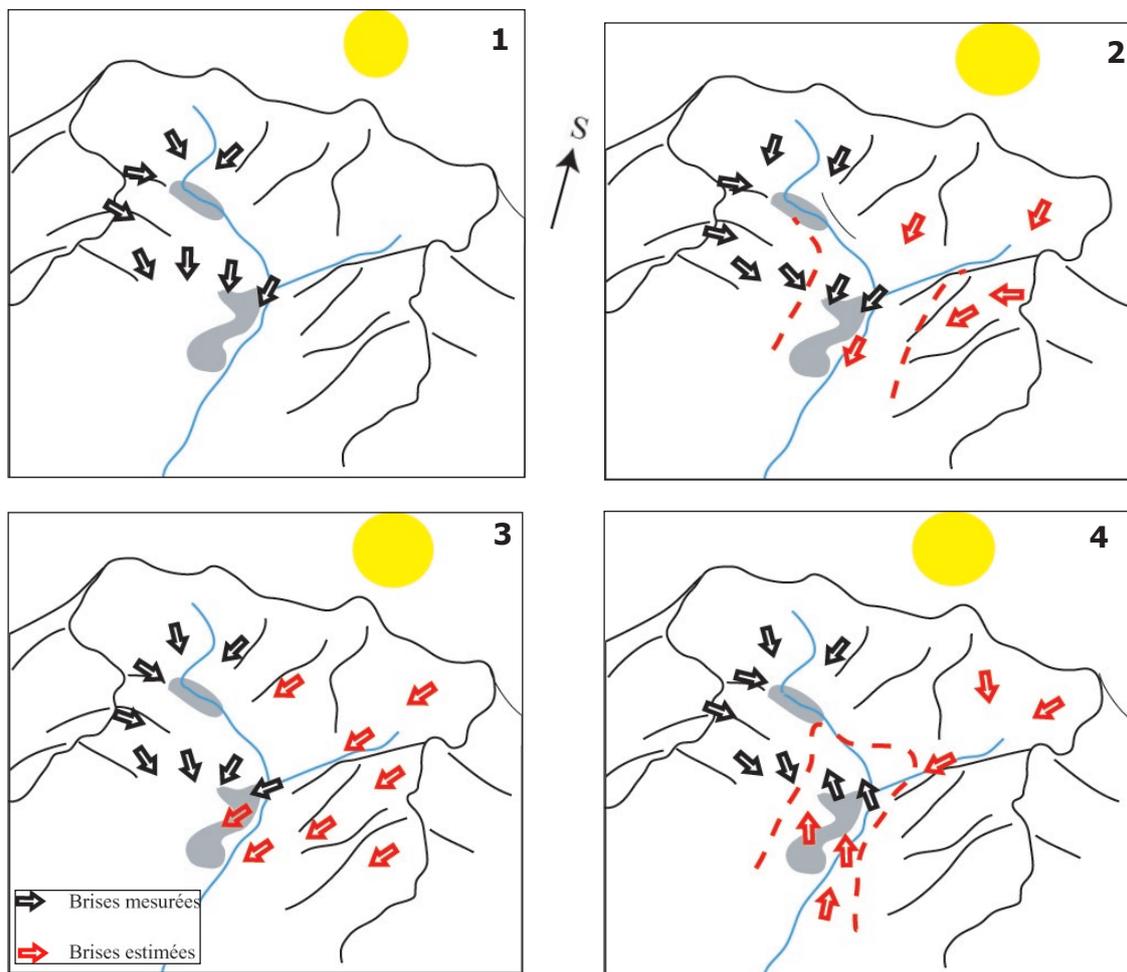


Fig.V.5.2. Directions privilégiées des brises thermiques diurnes en janvier.

1 : Cas le plus courant avec des brises de pente sur les versants et une brise de montagne en fond de vallée qui restent constantes au long de la journée. On observe juste une légère rotation due à la brise de montagne qui remonte le long des versants, à partir de 12h environ. Ce cas rassemble 50 % des cas en fond de vallée et 75% en haut de versant.

2 : La brise de montagne est assez bien installée en fond de vallée, et les brises de pente sont bien différenciées (trait rouge pointillé : interface entre les deux brises). 50% des cas.

3 : La brise de montagne devient transversale et provient clairement du sud-ouest. Le haut du versant ouest reste en brise de pente dans 75% des cas. On assiste aussi parfois à la création de brise de pente ascendante sur le versant ouest et descendante sur le versant est, en fin d'après-midi, sans pour autant qu'une brise de vallée survienne. Ce phénomène est lié à l'exposition différentielle des deux versants.

4 : Une brise de vallée arrive parfois sur le site, mais seulement en bas de versant et en fond de vallée. Cas plutôt rare (10 à 20%).

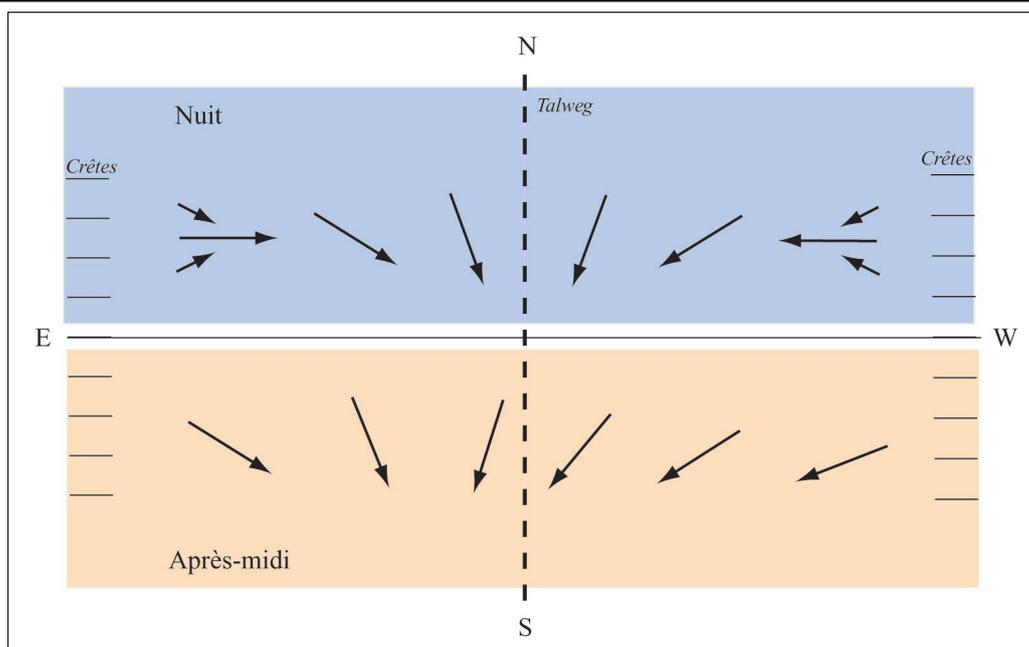


Fig.V.5.3. Evolutions nocturnes et d'après-midi des directions des brises au niveau des Menuires dans la vallée des Bellevilles.

V.5.1.c. Evolution journalière en mars

La variabilité du système de brise en mars augmente considérablement par rapport à janvier. On assiste soit à des évolutions journalières sans brise anabatique, c'est-à-dire surtout sans brise de vallée, mais avec des brises transversales importantes, ou soit à une évolution avec brises de vallée, qui alors se déplacent en fond de vallée et remontent sur les versants en venant butter contre les brises de pente ou de montagne ou en soufflant sur tout le site. Pourtant, les brises de vallée en mars sont loin d'être majoritaires (30% en fond de vallée), il faut attendre mai pour qu'elles se développent bien. Voyons les possibilités d'évolution.

- Sans brises anabatiques :

La rotation des brises par le sud et l'ouest ne se termine pas en fin d'après-midi par des brises de vallée. On se doute que dans des conditions de températures douces, sans mer de nuage en plaine, cette brise doit quand même remonter le long de la vallée sans arriver aux Menuires.

Le lever du soleil se faisant plus tôt, la brise de montagne s'impose plus vite dans la matinée, et tourne aussi rapidement vers la brise transversale, dès 14h. A partir de là, cette brise remplace les brises de pente en haut des versants ouest. Elle s'impose partout. Mais ce cas reste particulier ! En effet, les probabilités montrent que la moitié des brises de montagne passent en brise transversale en fond de vallée, et que 15% de celles-ci (les brises transversales) atteignent le haut de versant.

La figure V.5.4 montre *les directions privilégiées mais la réalité quotidienne est toujours complexe car plusieurs brises interagissent et coexistent, et leurs interfaces évoluent chaque jour différemment.* Mais certains facteurs externes peuvent nous aider à déterminer si telle ou

telle évolution va être privilégiée, *comme la connaissance de la direction des vents synoptiques qui vont forcément orienter les brises, ou la température générale de l'air qui peut défavoriser les écoulements gravitaires au profit des brises de montagne ou transversales.*

• Avec brises anabatiques :

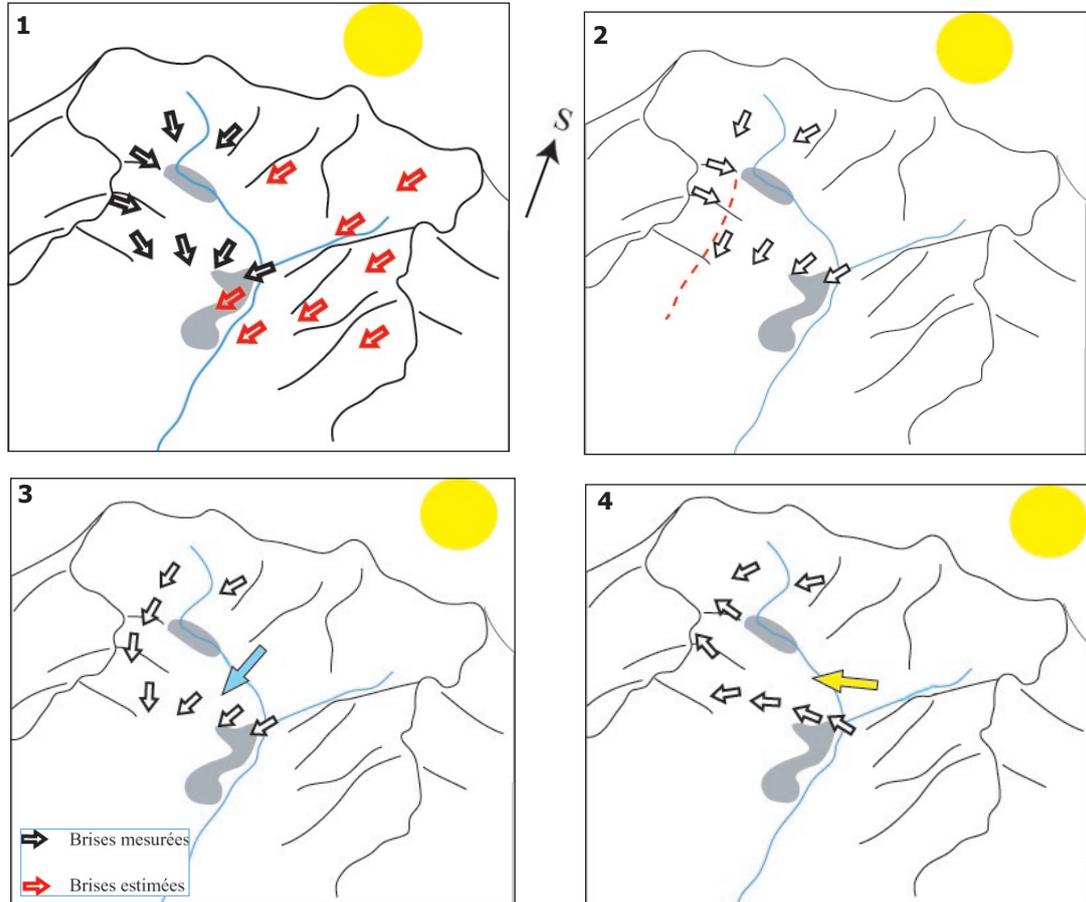


Fig.V.5.4. Directions privilégiées des brises thermiques diurnes en mars sans brise de vallée.

1 : Brises de montagne matinales avec maintien des brises de pente descendantes en haut de versant ouest. C'est la majorité des situations.

2 : La brise de montagne s'écoule de plus en plus vers les hauts de versant (dès 14h).

3 : La brise de montagne s'impose partout même à Val thorens (les vents de gradient ou synoptiques de sud favorisent cette situation). 25% des cas. Flèche bleue : direction principale.

4 : La brise transversale de fin d'après-midi remonte sur les hauts de versants (15% des cas). Flèche jaune : direction principale.

Certaines journées de mars et surtout d'avril, vers 14-15h, une brise de vallée provenant du nord est enregistrée par les anémomètres du bas de versant. Elle touche soit d'abord le fond de vallée et se déclenche après un passage par une brise de pente ascendante d'ouest, soit commence parfois par toucher le milieu de versant, mais cela est surtout dû au fait que les points de mesures des anémomètres 1 et 2 sont plus en aval dans la vallée. **La brise de vallée commence donc par souffler en fond de vallée puis remonte le versant ouest** (au final 30% des brises sur le versant ouest sont des brises de vallée, et ce chiffre tombe à 15% en fond de vallée pour la durée de l'après-midi). Parfois, elle se généralise sur le site, mais difficilement sur les crêtes. Enfin, cette brise peut souffler tard dans la soirée, même si le soleil est couché, jusqu'à 21h environ.

Cette remontée sur le versant ouest est directement liée à l'exposition asymétrique des versants, et cela pour deux raisons : l'échauffement du versant ouest ; la présence d'une brise de montagne (puis transversale) soufflant du cirque du Lou, «propulsée» par le soleil, qui vient pousser la brise de vallée (fig.V.5.5).

Le rôle de la couverture neigeuse n'est pas à négliger non plus, car la neige fond en bas et en fond de vallée, ce qui favorise la montée de la brise. Avec un flux de nord, des températures douces et l'absence d'inversion, il est alors fort probable d'observer la venue d'une brise de vallée.

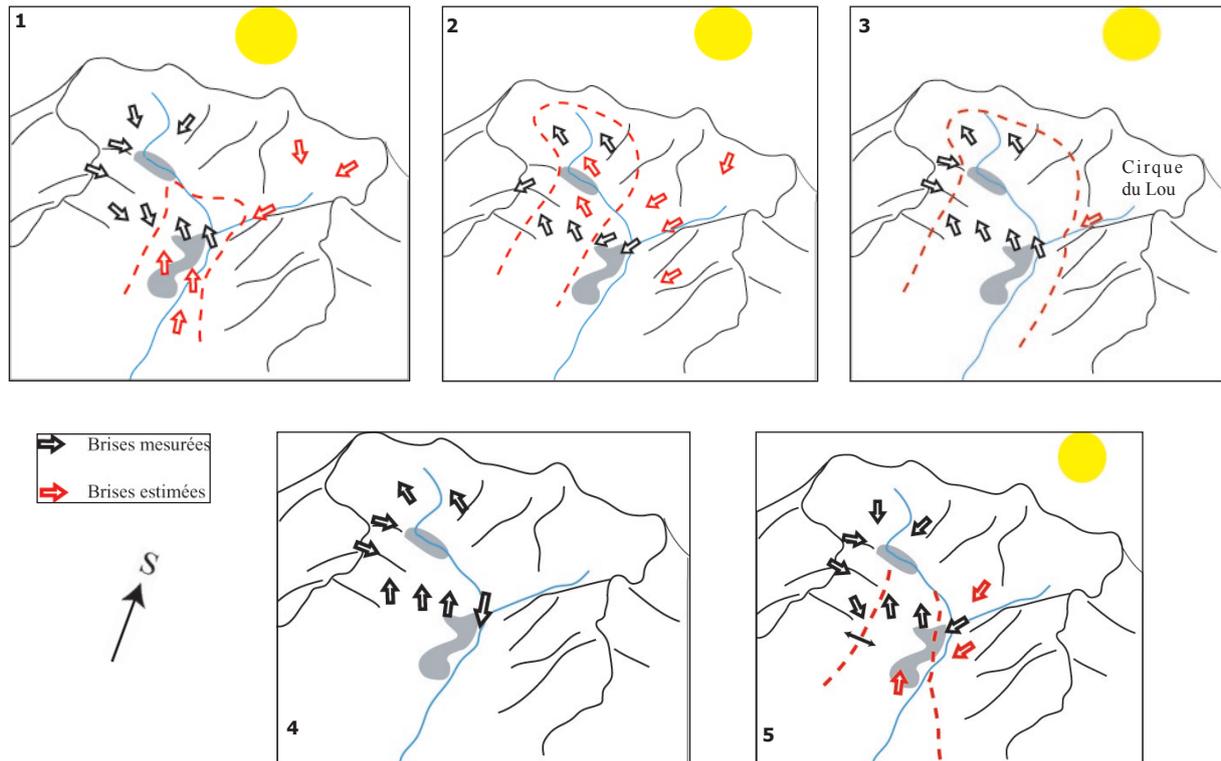


Fig.V.5.5. Directions privilégiées des brises thermiques diurnes en mars, avec brise de vallée.

Avant midi, on est en situation de brise de montagne. Puis dans l'après-midi on distingue les cas suivants :

1 : La brise de vallée reste en fond de vallée et bas de versant. Cela représente 50% des cas.

2 : La brise de vallée remonte sur le versant ouest.

3 : La brise de vallée s'impose partout sauf sur les hauts de versants (dans 5% des cas elle arrive en haut).

4 : Le soir, la brise de vallée continue de souffler presque dans tous les cas (si elle s'est formée dans l'après-midi).

5 : Pour résumer, ce cas moyen indique que c'est surtout la limite entre la brise de vallée, les brises de pente et de montagne sur le versant qui évolue de manière complexe. Trois types de brises pour quatre directions...

La double flèche indique la variation journalière de cette interface.

Finalement, la variabilité devient très forte en milieu d'après-midi en mars, car plusieurs types de brises interagissent. Il est donc très difficile de prévoir comment celles-ci vont évoluer, mais comme on l'a vu certains cas sont plus courants que d'autres. Afin d'affiner notre compréhension du système de brises thermiques hivernales, nous allons essayer de définir un maximum de facteurs qui ont une influence sur leur comportement. Ils vont permettre d'établir un modèle empirique basé sur les observations et les probabilités, qui ne retient que les facteurs vraiment déterminants. Ceux-ci vont nous extraire de la complexité du phénomène sans en réduire trop les mécanismes.

V.5.2 Les facteurs de contrôle sur le mécanisme des brises thermiques hivernales

V.5.2.a. Les facteurs cosmiques et météorologiques

Des facteurs sont complètement déterminants : l'alternance nycthémérale, les heures de la journée, le type de temps et de situations, les différences dans les températures locales et régionales. Nous ne prendrons pas en compte des facteurs qui ne pourront pas être mesurés de manière simple, comme les différences de températures dans la vallée. En hiver, les facteurs cosmiques suffisent à déterminer les rythmes des brises.

*Des facteurs de second ordre vont influencer dans une moindre mesure sur le système des brises : la direction du flux synoptique, l'importance ou l'absence de la couverture neigeuse, certains paramètres météorologiques qui agissent à des échelles légèrement supérieures ou inférieures (avec des phases de rétroaction), et la présence d'inversion de température entre les grandes vallées alpines et les hautes vallées alpines. **Les inversions sont importantes car il y a souvent création de mer de nuage. Or ce chapeau d'air lourd, couplé à un flux de nord, provoque l'apparition d'une brise de vallée au-dessus de celui-ci. Cela donne une sorte de brise montante localisée dans les hautes vallées qui surplombe les inversions.*** Or avec un flux d'ouest ou de sud, les brises de vallée seront repoussées. Différents facteurs sont donc en relation et il est important de les intégrer pour déterminer les évolutions journalières. La figure V.5.6 montre les facteurs qui favorisent les brises catabatiques ou l'apparition de brises de vallée. Mais par expérience, en hiver, et même en mars, le forçage thermique doit être important pour que la brise de vallée s'impose vraiment.

V.5.2.b. Les facteurs topographiques

La forme de la vallée et des versants est primordiale car elle détermine en grande partie la direction des brises. Il faut distinguer les fonds de vallées, les bas, les milieux, les hauts de versants et les crêtes. Ce découpage est pratique, mais il doit aussi s'intégrer dans celui de la vallée qui est particulière avec sa forme en Y dont les branches se finissent en cirque, et la distance entre le bas et le haut de la vallée. Le modèle proposé ci-dessous intègre la notion d'altitude sur le versant ouest, mais pas dans le sens de la vallée, faute de données. Nous pouvons toutefois facilement extrapoler pour le bas de vallée où la brise de vallée doit être bien plus présente.

V.5.2.c. Autres facteurs et questionnements

Nous avons étudié les relations qui pourraient exister entre les variations de températures mesurées sur le site et le comportement des brises thermiques. L'influence des brises sur les températures semblait manifeste, mais l'inverse n'a jamais pu être constaté. L'échelle de mesure des températures est sûrement trop imbriquée dans le système de brises. Alors nous avons pris les mesures de températures à une échelle supérieure, entre les stations Météo-France de Bourg-Saint-Maurice (vallée de la Tarentaise) et de la Masse (crête du versant est de la vallée des Bellevilles, 2800m). Mais là aussi l'étude du gradient thermique ne donne pas de résultats satisfaisants. L'analyse ultérieure des données météorologiques de l'installation d'enneigement

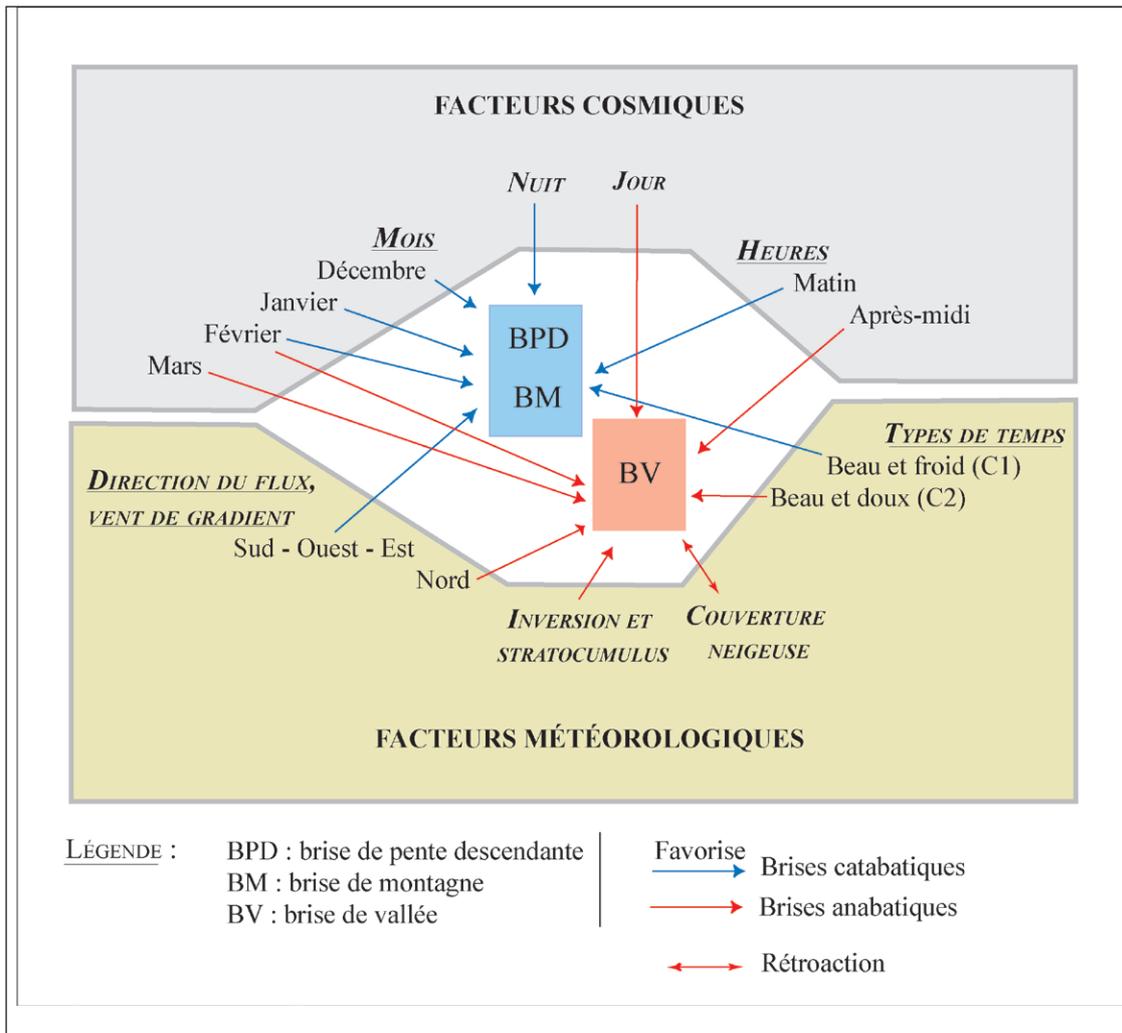


Fig.V.5.6 : Influences des facteurs cosmiques et météorologiques sur la présence de brises catabatiques ou anabatiques dans la vallée des Bellevilles (vallée orientée sud-nord)

Les facteurs topographiques ne sont pas pris en compte.

La couverture neigeuse peut interagir avec les brises de vallée.

artificiel de St-Martin-de-Belleville pourrait nous apporter des éléments de réponse quant à cette relation entre les températures et les brises.

D'autres facteurs pourraient intervenir en complément : la forte variabilité des bilans d'énergie de surface, dont l'étude demanderait des moyens considérables ; *les effets des pentes*, même si leur variation dans la vallée des Bellevilles n'est pas importante ; *le passage de nuages qui provoquent des zones d'ombre et peuvent rétablir des brises catabatiques* ; et enfin *la présence de la forêt*, bien sûr inexistante dans la vallée des Bellevilles, mais qui comme à Aussois ou Valloire influence par son rôle d'obstacle la progression des brises. Dans des forêts clairsemées, par aussi l'ombre provoquée, on peut observer des brises de pente descendantes dans la forêt, surmontées par des brises montantes qui passent au-dessus de la forêt (WHITEMAN C.D., 2000). A Aussois, il n'est pas rare d'observer des brises montantes en aval de la forêt, et descendantes en amont.

Certains de ces facteurs sont impossibles à intégrer dans la modélisation. Il faut simplement en avoir conscience et bien sûr connaître parfaitement la topographie du site.

V.5.3 Modèle empirique de l'évolution journalière des brises thermiques dans la vallée des Bellevilles en janvier et en mars

Pour mettre au point ce modèle, nous avons utilisé les fréquences calculées dans le chapitre IV sur les directions des vents et intégré les facteurs de contrôle les plus pertinents et les plus faciles à déterminer. En abscisse de nos tableaux (fig.V.5.7 et fig.V.5.8), nous avons posé les différents moments (et les heures correspondantes) de la journée pour avoir la dynamique classique des brises. Celles-ci sont découpées de manière à représenter l'enchaînement entre les brises de pente et de montagne, puis de vallée. En ordonnée, nous retrouvons l'altitude qui correspond ici au découpage du relief du fond de vallée aux crêtes, ce qui nous permet de comparer et de voir évoluer les probabilités d'apparition des brises en fonction de la position sur le versant. Enfin, des flèches nous indiquent, en fonction des types de temps, des flux et des inversions, quels passages préférentiels les brises vont emprunter pour changer (ou pas). Si nous n'avons retenu que ces paramètres, c'est par souci de simplification, mais aussi parce que les autres facteurs sont vraiment moins déterminants, ou plus difficile à intégrer.

Les vitesses des brises ne sont pas indiquées, il suffit de se reporter aux analyses effectuées dans le chapitre IV.

Ce modèle nous montre bien comment la variabilité, symbolisée par le nombre de possibilités croissantes, augmente en mars par rapport à janvier. Par exemple, en milieu de versant, *on a presque autant de chances d'avoir les quatre types de brises l'après-midi en mars, alors qu'en janvier, dans 85% des cas, ce sont des brises catabatiques, qui tournent légèrement avec le soleil...* La situation sur les crêtes est par contre difficilement modélisable. On y capte des vents d'altitude, synoptique, de gradient, des anti-brises... Autant de types de vents qui interagissent avec les brises catabatiques qui se forment juste à ce niveau. Mais nous avons pu observer que, classiquement, les vents d'ouest peuvent prendre le pas sur les brises catabatiques en janvier, et qu'en fin d'après-midi en mars les antivents (de sud) sont bien marqués alors que la brise de vallée souffle sur le versant. La frontière entre les vents synoptiques captés par exemple par la station de la Masse sur une perche de 10m et les vents qui s'écoulent juste sur une crête est vraiment mal définie et demanderait des recherches ultérieures pour définir cette limite.

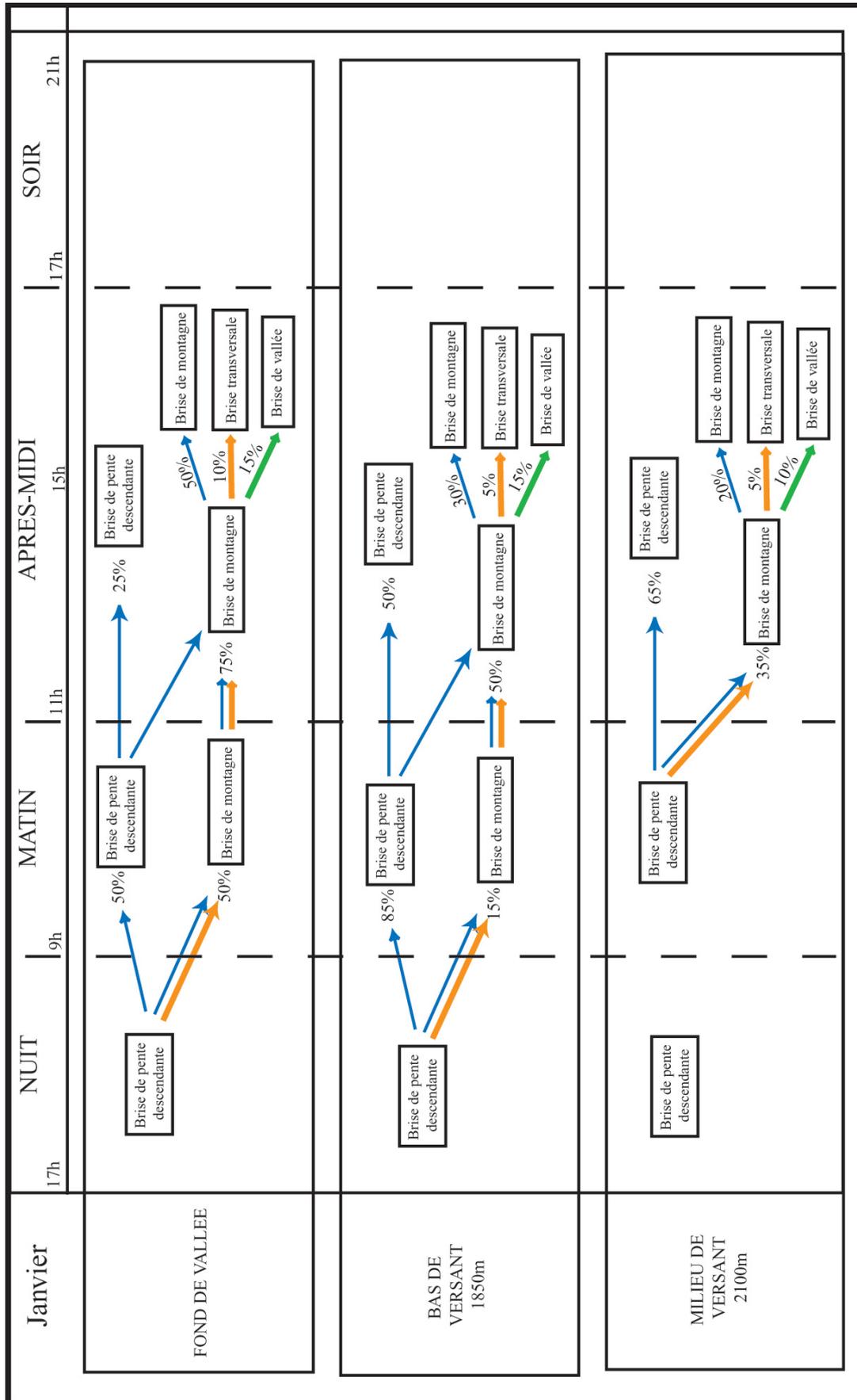
Note sur lecture des figures V.5.7 et V.5.8 sur les modèles d'évolution journalière des brises thermiques : le schéma se lit sur les deux pages comme un format A3 en mode paysage.

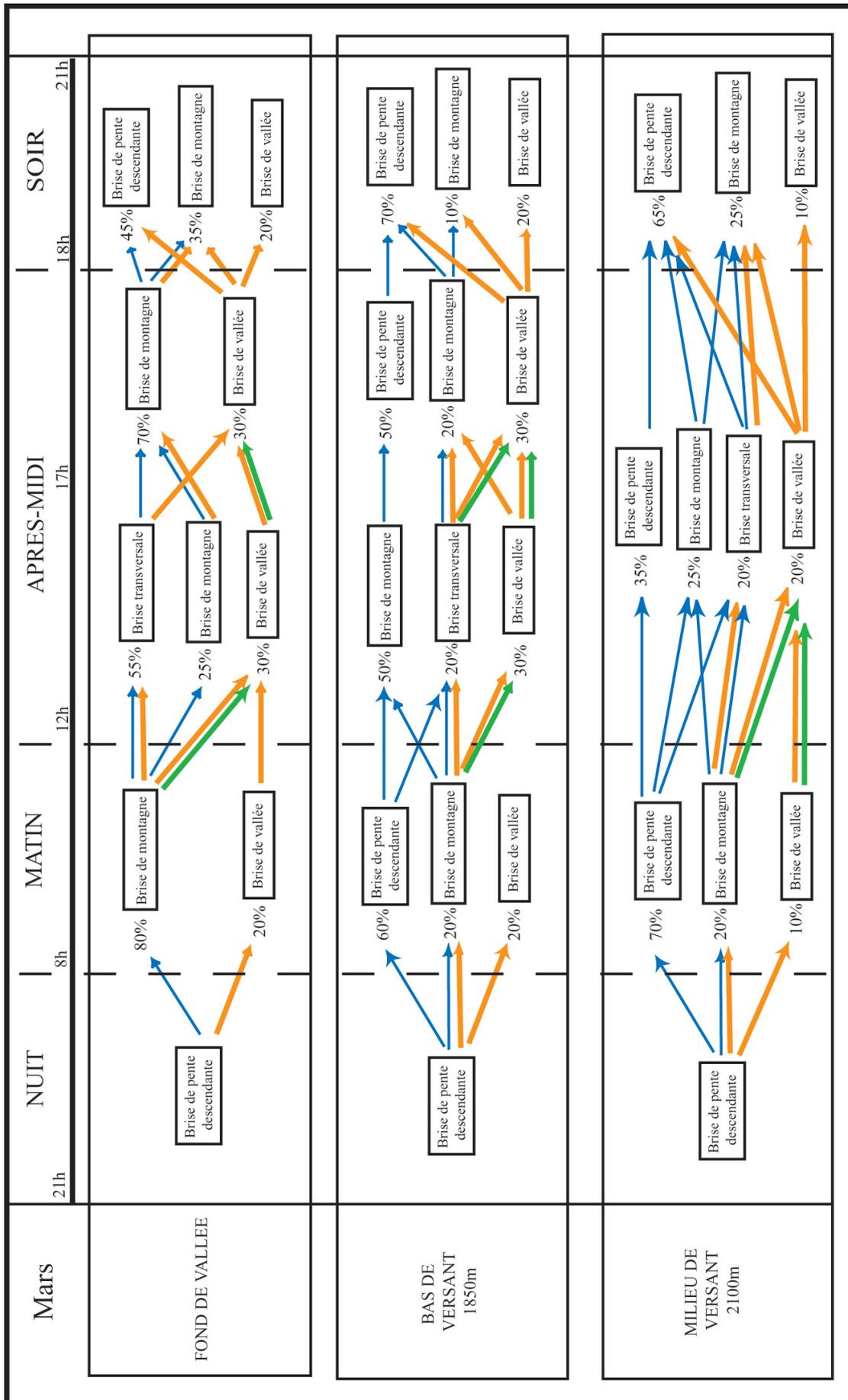
Synthèse

Les anémomètres disposés le long des versants enneigés des domaines skiables sont des outils de connaissance uniques dans l'étude des vents de surface, parce qu'ils sont placés dans un milieu où l'instrumentation est très difficile. Notre méthode basée sur l'analyse des fréquences moyennes et des observations à échelles fines par rapport à des facteurs cosmiques et météorologiques nous a permis de mettre en évidence **le mécanisme des brises thermiques hivernales**, ce qui en soit répond aux objectifs de l'étude sur la découverte et la compréhension

de phénomènes météorologiques peu connus dans ce milieu complexe.

La modélisation empirique basée sur les probabilités d'évolution journalière des brises a montré, en dehors des rythmes étudiés dans le chapitre IV, que **la variabilité journalière des directions correspondant aux types de brises augmente à partir du moment où les brises anabatiques (de versant ou de vallée) arrivent au niveau de la tranche de la vallée étudiée. Dans les grandes vallées alpines comme à Aussois, on retrouve la même probabilité d'avoir vers 15h en bas de versant une brise de montagne ou une brise de pente ascendante pendant les mois froids. Mais vers mars, la brise de vallée remplace rapidement la brise de pente et on assiste au système de rotation décrit dans le chapitre IV. Aux Menuires, les brises catabatiques sont omniprésentes pendant les mois froids, les brises de pente ascendantes étant remplacées par un système de brises de pente descendantes / brises de montagne / brises transversales qui suit la course du soleil. C'est aussi vers mars que la brise de vallée vient souffler le long du versant ouest majoritairement et se combine avec les trois autres brises.** Cette mise en place dépend de multiples facteurs qui agissent sur les températures à l'échelle de la vallée, et cette relation relief / températures (plus d'autres facteurs autant locaux que globaux) très complexe apporte une très forte variabilité. C'est en cela que l'étude des données météorologiques de l'enneigement artificiel est novateur. On connaissait le mécanisme des brises estivales, celui des brises hivernales était supposé (des brises catabatiques omniprésentes, même si on a vu qu'à Aussois les brises de pente ascendantes pouvaient être bien présentes) mais la transition printanière était peu envisagée. **Cette transition se manifeste en réalité par une évolution complexe de l'interface entre les brises catabatiques et anabatiques, interface dont l'altitude varie chaque jour.**





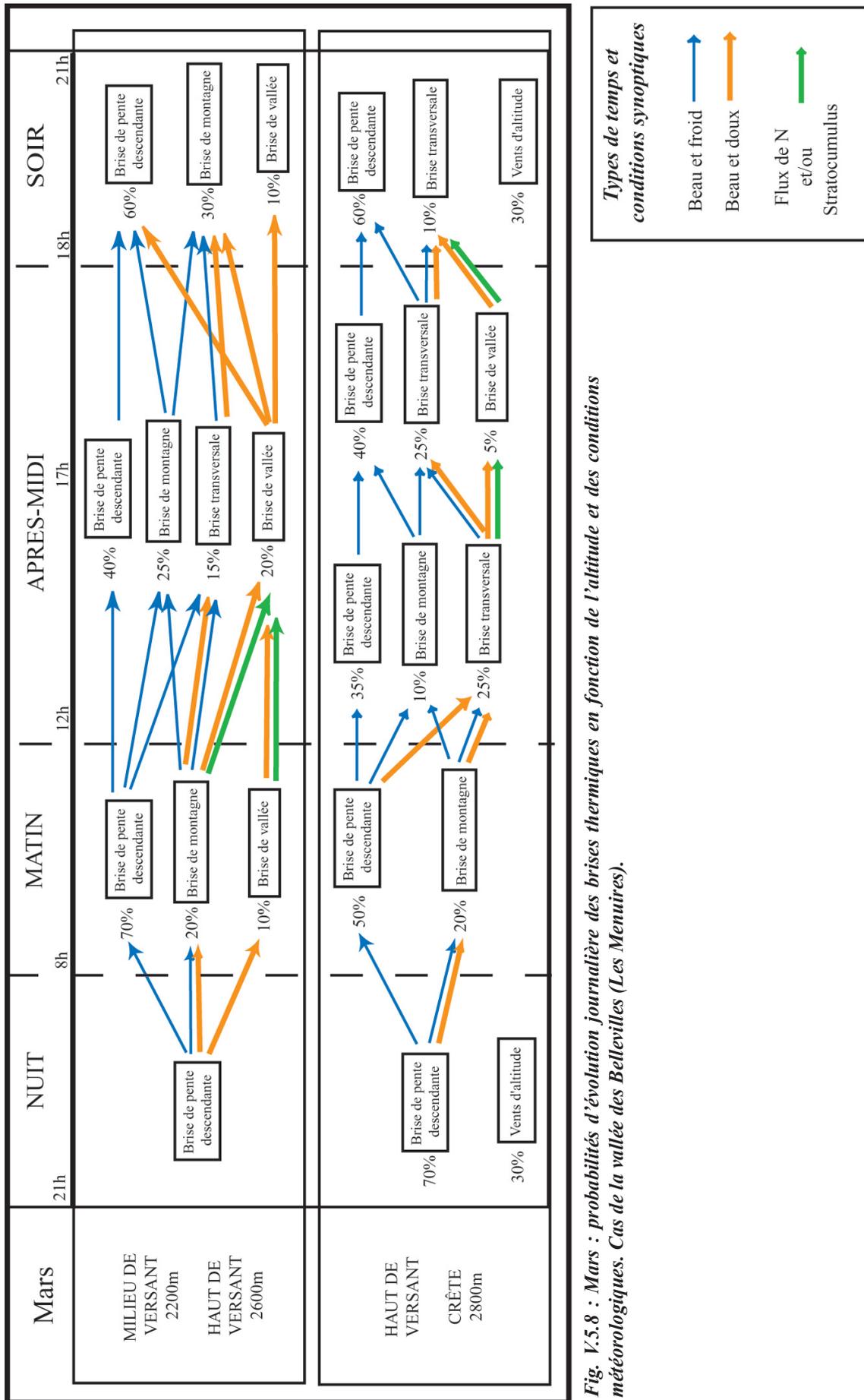


Fig. V.5.8 : Mars : probabilités d'évolution journalière des brises thermiques en fonction de l'altitude et des conditions météorologiques. Cas de la vallée des Bellevilles (Les Menuires).

Conclusion

Ce dernier chapitre nous a permis de faire le point sur les connaissances de la climatologie hivernale des versants de montagne, en rapport avec les données enregistrées sur les températures, l'humidité relative et le vent, et leur échelle de mesure. La démarche utilisée a mis en évidence un certain nombre de phénomènes et de mécanismes qui n'avaient jamais réellement pu être étudiés jusqu'ici, en rapport avec les problématiques énoncées au début de ce travail :

- Nous avons pu observer la dynamique des **inversions thermiques** dans les vallées et sur les versants et déterminer les conditions synoptiques qui les déclenchent. Grâce aux réseaux de mesures de l'enneigement artificiel, l'évolution des températures et leur répartition spatiale ont été analysées à une échelle fine, confirmant ou infirmant nos connaissances sur ce phénomène.

- En prenant des situations météorologiques particulières (périodes anticycloniques ou cycloniques, effet de foehn, tempêtes...), nous avons observé **la réaction des paramètres locaux et établi des correspondances entre leur comportement et les types de temps**. L'important réseau de mesure nous a offert une grille de lecture des plus précises, et la spatialisation des températures dans la vallée des Bellevilles apporte des connaissances importantes sur les effets de la topographie locale.

- Nous avons aussi pu mieux mesurer **le rôle de l'altitude et de l'exposition**. Bien que ceux-ci soient des facteurs déterminants, d'autres facteurs se surimposent pour expliquer les variations spatiales de nos paramètres atmosphériques. **A échelle fine, le couple ventilation / micro-relief a beaucoup d'influence. A plus grande échelle, la forme des vallées, des versants ou encore des amphithéâtres modifie aussi considérablement l'influence de l'altitude et de l'exposition.**

- Enfin nous nous sommes concentrés sur l'étude **des brises thermiques**, dont le comportement est si particulier en hiver, et notre modèle statistique apporte des connaissances nouvelles sur les mécanismes de ce phénomène.

Finalement, cette étude a montré que s'il est possible de déterminer comment les variables telles que la température ou le vent sur un versant sont conditionnées à échelle fine par les échelles supérieures de l'atmosphère - en partie grâce à la contrainte exercée par le relief - il est par contre très complexe d'appliquer les mesures et les observations effectuées d'un site à un autre, non pas à cause des microclimats, mais des topoclimats. Le relief agit à plusieurs échelles sur le climat, et cette échelle-ci a un rôle particulier que cette étude a particulièrement mis en évidence.

Les sondes des installations d'enneigement artificiel disposées sur d'autres domaines skiables pourraient nous permettre de continuer cette recherche pour mesurer plus en détail les facteurs de la variation spatiale du climat hivernal en zone de montagne, afin de tenter, malgré la complexité du système, de généraliser certaines observations.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude s'est déroulée en deux temps :

- La découverte du réseau de mesures des domaines skiables et l'analyse de ses potentialités climatologiques.

- L'exploitation des données à des fins climatologiques et géographiques en réponse à des questionnements sur un milieu peu instrumenté et peu étudié.

Parallèlement, nous nous sommes constamment questionnés sur les futures orientations d'une telle recherche, car les méthodes choisies pour développer les connaissances théoriques sont envisagées en fonction des buts poursuivis. Bien sûr, nous aurions pu travailler avec d'autres méthodes scientifiques pour étudier la banque de données, mais notre approche et nos analyses climatologiques devaient rester accessibles aux gestionnaires économiques et adaptées à l'objectif des synthèses climatiques des domaines skiables.

1) Un nouveau réseau de mesures météorologiques en montagne et en hiver

Certains milieux de la haute montagne hivernale sont, grâce aux données de l'enneigement artificiel, passés d'un niveau d'instrumentation quasi-nul à un niveau très dense. Cette «opulence» de données aux échelles fines rentre parfaitement dans le cadre de la recherche, en complétant les mesures des stations Météo-France dont le but est plutôt de renseigner des modèles d'échelles synoptiques, sans possibilité de spatialiser les variables en zone de montagne.

Cette étude a donc mis en lumière un réseau unique de mesure de données climatologiques, tout en montrant qu'il pouvait être exploité pour compléter les connaissances sur un milieu délaissé par la recherche. L'analyse préalable des données et du système particulier de mesure a constitué une partie importante du travail exploratoire de ce milieu nouvellement instrumenté. Aujourd'hui, la méthode d'approche a bien été définie et les études futures seront probablement facilitées par ce travail, en simplifiant les procédures et la manière d'explorer et d'utiliser les mesures pour des objectifs définis.

Les atouts de ce réseau résident avant tout dans la période de mise en marche du matériel de mesure et dans sa densité. L'hiver est une saison très contraignante pour tout instrument. Pour un chercheur, l'investissement pour développer une campagne de mesure avec une seule station est déjà lourd : le matériel doit être très fiable car les sites instrumentés sont peu accessibles. Or le réseau de l'enneigement répond parfaitement à ces attentes, même s'il existe de nombreux problèmes techniques ou propres à la climatologie qu'il faudra rectifier en collaborant activement avec les domaines skiables et les fabricants de matériels.

2) Les connaissances sur les mécanismes et les paramètres climatiques de la montagne hivernale

L'un des objectifs de cette étude était de se servir de ces données pour mieux comprendre certains processus climatiques de la montagne hivernale. Après avoir analysé les réseaux de mesures et leur potentialité d'information, nous avons essayé de répondre à des questionnements qui n'avaient pu être éclaircis auparavant par d'autres méthodes ou par manque de moyen. **La méthodologie choisie consistait à établir des liens de cause à effet entre le comportement spatio-temporel moyen ou instantané des paramètres mesurés sur les versants et l'influence à la fois des échelles supérieures du climat mais aussi du relief à topoéchelle ou microéchelle.** Cette démarche a l'avantage de faire ressortir une multitude d'informations sur les phénomènes observés tout en conservant une ligne directrice modélisatrice, car les constantes interactions entre nos variables en font un système tout-à-fait complexe et statistiquement variable. Ces informations et ces observations sont synthétisées dans les conclusions partielles, mais revenons sur les points importants mis en évidence pendant cette recherche ainsi que les éléments découverts et les outils développés. C'est l'étude des vents qui nous a apporté le plus de résultats.

a) L'étude des vents en montagne :

- Le comportement des brises thermiques hivernales en haute montagne a bien été défini, avec **la découverte de système de pendularité des brises catabatiques en fonction de la course du soleil, provoquant l'apparition des brises de pente descendantes diurnes et des brises transversales...** L'arrivée de la brise de vallée et de ses conditions de mise en place vers mars, ainsi que les interactions entre les différents types de brises ont été éclaircies. Puis les observations faites sur les différents sites nous ont amené à modéliser le mécanisme des brises thermiques hivernales dans la vallée des Bellevilles, modèle qui peut s'appliquer dans tout secteur topographiquement similaire. Cependant, d'autres analyses effectuées dans des vallées différemment orientées devront compléter cette étude.

- Nous avons caractérisé **l'influence du relief sur les brises thermiques**, et donc l'importance du point de mesure dans la compréhension de la ventilation locale. Des vallons plus ou moins encaissés conservent des brises de pente descendantes alors que la brise de montagne souffle quelques dizaines de mètres plus loin sur une butte. A plus grande échelle, les hautes vallées alpines n'ont pas du tout la même ventilation diurne que les grandes, car les brises de vallée y sont plus fréquentes.

- Nous avons pu observer comment le relief canalisait les vents synoptiques en surface. **Le foehn** est le vent le plus véloce (en vitesse constante) sur les versants et nous avons remarqué qu'il était beaucoup plus fréquent que prévu, avec les conséquences sur le manteau neigeux que l'on connaît.

b) L'étude des températures :

- L'évolution spatiale des températures en fonction des types de temps a été mise en évi-

dence par les techniques de spatialisation (krigeage) qui ont un fort pouvoir de représentation. L'intérêt du système de mesure utilisé se situe dans le suivi de ces évolutions. On a pu alors montrer **le mécanisme journalier de l'évolution des températures** par temps anticyclonique ou cyclonique, en rapport avec d'autres paramètres climatiques. Ainsi, par temps perturbé, la variation des températures dépend surtout de l'altitude et de la température de la masse d'air. Mais par temps anticyclonique, la variabilité devient beaucoup plus importante, d'autres paramètres s'ajoutant : **les inversions de température et la ceinture chaude qui en découle la nuit** (en fonction de la topographie locale), **et l'orientation et les interactions température / brises le jour**. Mais bien d'autres facteurs viennent encore s'ajouter à cette variabilité, et c'est un nouveau cadre d'étude qui pourrait venir se greffer sur les systèmes de mesures déjà en place.

- L'étude de **la dynamique des inversions de températures** et du contexte climatique de leur développement, avec en particulier le passage front froid / anticyclone. Dans les hautes vallées alpines, les inversions sont courtes et dépendent souvent d'un réchauffement intense en altitude. On y rencontre le plus souvent des inversions apparentes, l'air froid s'écoulant rapidement vers les grandes vallées. Cependant, de fortes inversions ont pu être observées.

- **Les micro-formes de relief modifient la ventilation des brises thermiques sur les températures à échelle fine**. En effet la topographie de versant ne permet pas vraiment l'accumulation d'air froid, donc les zones les moins ventilées sont soumises à un réchauffement plus important. Notons que cette observation a été confirmée malgré les problèmes météorologiques induits par la cloche anti-radiation sur la mesure de la température.

- **Les effets de site**, liés à la topographie de topoéchelle, semblent avoir une influence importante sur les températures moyennes. Le cas le plus frappant de cette étude se situe à Val Thorens avec un relief en amphithéâtre qui empêche la formation de vraies inversions. Les températures minimales sont donc affectées.

c) Déterminisme, complexité et variabilité :

Les nombreux exemples étudiés, de manière complémentaire, nous ont permis d'observer et parfois de modéliser certains phénomènes météorologiques hivernaux qui n'avaient jamais réellement pu être étudiés in situ. En soi, ces observations ont permis d'infirmer ou de confirmer nos connaissances sur le milieu alpin. De plus, les relations entre les types des temps et les paramètres locaux ont caractérisé précisément le déterminisme des échelles supérieures sur le comportement journalier des températures et du vent à différentes altitudes le long des versants, et cela en fonction des mois de l'hiver.

Cette étude a aussi permis de comprendre plus précisément comment agissent les facteurs externes sur la variation spatiale des températures et du vent en montagne. Les positions variées des sondes nous ont offert un panel intéressant de mesures sur des espaces différents. A partir de là, cette expérience peut nous servir à placer des stations de mesures sur les versants de montagne, en cherchant les positions correspondant davantage aux objectifs des recherches poursuivies.

d) Les outils et méthodes développés :

- La découverte et l'exploration des données météorologiques durant la thèse ont permis la mise en place d'une **méthode de travail** adaptée à la spécificité du réseau de mesure. Les acteurs à contacter, l'extraction des données, la reconnaissance du terrain définissent le premier temps de la méthode. La mise en forme pour l'étude statistique, connaissant les lacunes du système et la particularité de la climatologie hivernale de montagne, constituent le second temps. Et c'est alors que nos actions de recherche doivent se faire en fonction des objectifs définis.

- **La classification bi-scalaire** est un outil de connaissance synthétique des principales caractéristiques du temps journalier, illustré sous forme de codes, ce qui permet aussi de faire des croisements avec les paramètres locaux. La classification Savoie, avec sa méthode intégrant la diversité climatique provoquée par le relief des massifs savoyards, est une nouveauté en soi. Cet outil pourrait être applicable dans de nombreux massifs, à condition que le réseau de mesure de Météo-France soit suffisant.

- **La méthode d'étude des fréquences moyennes des brises thermiques** a été conçue pour analyser rapidement la ventilation mesurée par un anémomètre, en séparant les vents locaux (les brises thermiques) des vents synoptiques. Elle a été mise au point pour répondre aux nombreuses et fastidieuses analyses des mesures du vent, qui ne sont jamais réellement faciles à interpréter.

Les méthodes et les outils développés durant la thèse, ainsi que la nature des résultats sur la climatologie locale, sont issus d'un réseau de mesure qui n'avait jamais encore été étudié. Notre approche nous a permis d'englober des aspects aussi bien théoriques que pratiques, en proposant une vision analytique et systémique de l'objet d'étude. Cette universalité, toute relative, est en tout cas un moyen approprié pour présenter ces nouvelles données à la communauté scientifique.

3) Des perspectives de recherche

L'existence de ces réseaux de mesures nous amène à réfléchir sur un grand nombre d'applications possibles, que ce soit dans le domaine de la recherche ou de l'innovation. Cette thèse vise d'ailleurs à matérialiser les possibilités et les potentialités d'une telle banque de données. Nous savons aussi que l'étude du climat est une priorité aujourd'hui, car les inquiétudes sur les bouleversements climatiques sont grandes chez les politiques comme chez les entrepreneurs, et que l'expertise climatique est devenue une nécessité. Il est donc primordial d'assurer à ce réseau de mesure un rôle dans le développement des connaissances sur le milieu de montagne et dans la gestion des activités économiques. Pour cela, des concertations avec les gestionnaires des domaines skiables et les fabricants de matériels d'enneigement sont dans un premier temps indispensables. Cette collaboration viserait à pérenniser le système de mesure et à le développer de manière pertinente, c'est-à-dire en intégrant les objectifs de connaissances climatiques et de gestion des domaines skiables. Le système étant déjà en place, l'investissement serait minime. Les efforts se porteront alors sur le stockage et la centralisation des données, et sur le suivi des

saisons de mesures (panne, lacune, etc...). Une transmission directe des données dans une unité centrale et leur visualisation par SIG deviendrait un outil indispensable pour de multiples applications. Voyons les différentes pistes développées durant cette thèse.

Une telle banque de données offre d'importantes perspectives et quelques pistes de recherche nous ont paru pertinentes :

- Continuer l'étude des données sur d'autres domaines skiables. A l'échelle des massifs ou même à plus grande échelle, le suivi de l'évolution du vent et des températures fournirait un espace de travail sans commune mesure, en observant par exemple comment ces paramètres varient en fonction des conditions synoptiques sur l'ensemble de la Savoie. Le grand nombre de sites permettrait aussi de mieux systématiser les effets des formes de relief, l'orientation des vallées, des formes de versants, etc. Les problématiques développées dans cette thèse trouvent là une continuité logique.

- Intégrer les données dans un système de prévision du temps : les données météorologiques de l'enneigement artificiel pourraient être reliées aux modèles de Météo-France de meso-échelle, pour affiner le plus possible les prévisions, ou même calibrer les modèles qui intègrent mal les zones de relief. Les prévisions deviendraient alors localisées pour chaque station de ski, et celles-ci pourraient les utiliser pour leur propre gestion.

- Relier les observations avec des phénomènes propres à la montagne : avec un tel réseau, la prévision des risques liée aux avalanches devrait trouver des informations de premier ordre quant aux conditions de leur déclenchement. Une vision localisée des changements de températures et de vents seraient à même d'affiner les prévisions au niveau des domaines skiables, ou même de mieux comprendre les processus. Le suivi du manteau neigeux serait aussi grandement facilité grâce au réseau de mesure, en relation avec des stations d'étude de la neige. Les données pourraient aussi être reliées aux images satellites qui sont aujourd'hui utilisées pour l'étude du manteau neigeux.

Il faudrait bien sûr pour ces recherches un suivi en temps réel, d'où l'importance de la centralisation directe des données.

- Utiliser les mesures pour améliorer la conception des méthodes d'interpolation en milieu complexe : en géostatistique comme dans la conception des stations virtuelles, les facteurs de la variation spatiale des températures et du vent aux échelles fines et à topoéchelle seraient plus facilement modélisables, car leurs effets seraient mieux quantifiables.

4) Dans le domaine appliqué : la gestion climatique de l'enneigement artificiel et des domaines skiables

Le rôle principal de l'enneigement artificiel est de limiter les aléas de l'enneigement naturel mais aussi de l'améliorer en début de saison et de maintenir une couverture neigeuse dans les secteurs défavorisés. Comme on le voit, les conditions limites sont très importantes, dans

des zones et à des moments où les températures ne sont pas adéquates pour la fabrication de neige de culture. **Il convient de ne manquer les heures de froid...**

La connaissance de la climatologie locale peut aider les nivoculteurs à gérer ces situations. Car il est impossible d'enneiger entièrement au même moment tout un domaine skiable pour plusieurs raisons : les réseaux d'eau sont scindés en plusieurs parties, les débits sont limités par le diamètre des tuyaux et la capacité des pompes. C'est pourquoi, lorsqu'en novembre ou en décembre, avec des températures rarement idéales, **il est important de choisir les endroits les plus sensibles à enneiger en fonction des conditions météorologiques et de la climatologie locale.**

1) Un enchaînement particulier de situations météorologiques peut engendrer des variations altitudinales de la température très fortes en quelques heures, d'autant plus si la topographie se prête à ces variations. L'exemple de l'enchaînement front froid / anticyclone avec inversion de température est le plus flagrant : **c'est durant deux à trois jours que dans ces conditions les températures en bas de versant et fond de vallée sont les plus froides.** Le système de prévision statistique par régression d'échelle développé dans cette étude pourrait constituer un outil adapté à ces problématiques. Car il ne faut pas attendre que les températures se réchauffent durant l'anticyclone. Il est donc important de programmer l'enneigement pour les zones les plus sensibles durant ces moments là. Cela est d'autant plus important si le domaine skiable est situé à basse altitude, ou du moins une partie de celui-ci (fig.1).



Fig. 1 : Evolution des températures humides à Aussois à 1545m et 2215m du 16 au 31/12/2003. Une limite a été placée à -4°C (seuil de déclenchement des canons à neige).

On observe que les températures en bas de versant qui dépassent ce seuil ont eu lieu lors de passages perturbés, ou le lendemain en relation avec une inversion de température. Sur 15 jours, cela représente 20% des heures, idem pour tout le mois de décembre. En tout, **on obtient 150h propices pour l'enneigement**, soit une quantité juste suffisante pour avoir un manteau neigeux assez stable. La vulnérabilité des bas de versant exposés au sud vers 1500m est donc très forte face aux températures adaptées à l'enneigement artificiel, car ce mois de décembre 2003, légèrement plus chaud que la moyenne, fera référence en cas de réchauffement climatique.

2) Les cartes des températures moyennes et de la répartition des températures en fonction des conditions synoptiques, ainsi que l'analyse des vitesses des vents mesurées par les anémomètres peuvent aussi permettre aux nivoculteurs de se familiariser avec **la climatologie du domaine skiable** et deviennent des outils dans **la gestion de la production**. Les températures humides pourront tout autant être intégrées dans l'analyse. Même si les nivoculteurs ont une connaissance empirique de leur espace de travail, les analyses des données climatologiques peuvent apporter des compléments indispensables ou même permettre aux nouveaux nivoculteurs de repérer tout de suite les zones problématiques.

3) Dans le cadre du réchauffement climatique hivernal en montagne, certaines parties des domaines skiables vont encore plus être soumis à des conditions limites pour l'enneigement artificiel. En extrapolant la montée des températures sur le domaine, il est possible de fournir des cartes de risque «d'enneigement». Les gestionnaires pourront ainsi prévoir si des pistes habituellement suffisamment enneigées par de la neige naturelle devront être équipées. Les zones déjà soumises à une forte fonte pourront être «reconverties» à d'autres activités si les projections montrent que les conditions de températures ne seront plus adaptées à l'enneigement artificiel.

4) En montagne, à altitude égale, les versants sont défavorisés par rapport aux fonds de vallée et aux grandes cuvettes naturelles, qui emmagasinent plus de froid. Mais sur les versants d'un domaine skiable, la topographie accidentée, pentue et variée ne met pas en évidence ces unités. Il est souvent difficile de repérer des variations spatiales de températures de cet ordre. Or, cette étude a montré que **de fortes variations de températures moyennes ou journalières peuvent avoir lieu en fonction de faibles différences d'orientation ou de ventilation**. Une meilleure connaissance des effets de la topographie locale, qui a un fort impact sur la variabilité, pourrait permettre aux gestionnaires de prévoir sur quelles zones il faut concentrer l'action d'enneigement. De même, **les nouvelles sondes pourraient être posées de manière plus judicieuse**. Il faut en effet que la sonde soit installée dans un endroit suffisamment ventilé pour provoquer un renouvellement suffisant de l'air dans la cloche anti-radiation.

5) L'étude a montré que les sondes de températures ont des enregistrements plus élevés de 1°C à 2°C par rapport à la température réelle. Puisque les canons à neige se déclenche à -4°C humide, un rapide calcul en décembre 2003 montre que **5 à 10% des températures inférieures à -4°C ont été «oubliées» par le système**. Aux Menuires, une bonne partie des températures moyennes hivernales sont situées entre 0 et -2°C dans la partie inférieure du domaine. Ces valeurs sont d'ailleurs celles comprises en Savoie entre 1500m et 2000m, soit les zones soumises à une difficulté d'enneigement et de fonte. **Or, en maximisant les températures, des heures de froids sont perdues dans les moments cruciaux.**

6) En général, il faut environ 100 à 200h pour assurer un enneigement artificiel satisfaisant, c'est-à-dire un manteau neigeux qui puisse tenir et faire son rôle de couche protectrice. Nous avons dans un premier temps calculé les probabilités d'avoir un nombre précis d'heures où les conditions thermiques sont réunies pour lancer les canons à neige (fig.2). On remarque déjà que les conditions à 1500m sont limites, mais encore juste satisfaisantes. **Par contre, en simulant une augmentation des températures de 2°C pour 2050 (GIEC, 2007), les conditions à 1500m ne sont plus viables pour l'enneigement artificiel (une saison sur deux où les conditions mi-**

nimales sont réunies). On remarquera aussi que le bas de versant de Valloire, exposé au nord et sujet aux inversions, n'est pas mieux protégé que le versant sud d'Aussois. En fait, on peut définir une limite à partir de laquelle les conditions sont bien réunies toute l'année : **vers 2250m à 2350m, toutes expositions confondues** (en effet les températures très basses sont souvent apportées par des situations dépressionnaires). A la lumière de ces statistiques, on peut en déduire que dans l'état des technologies actuelles, **l'important pour assurer un enneigement artificiel suffisant est de ne pas manquer les heures de froid. Et pour cela, la prévision météorologique associée à l'étude de la climatologie des domaines skiables est indispensable.**

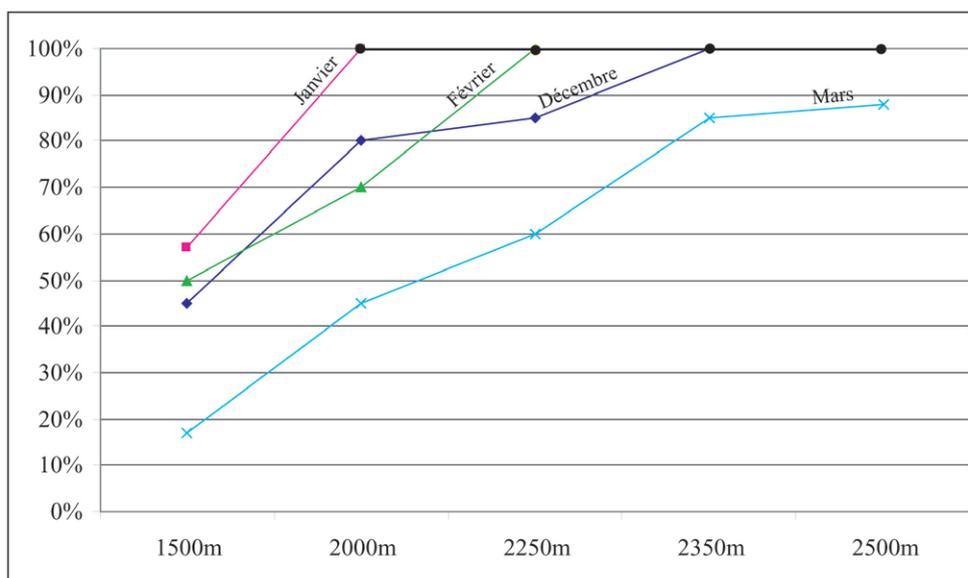


Fig. 2 : Probabilités moyennes mensuelles d'avoir au moins 100h de températures inférieures à -5°C par rapport à l'altitude (Stations des Menuires, Val Thorens, Aussois, Valloire).

Le seuil de -5°C a été choisi pour simuler une augmentation des températures de 2°C pour 2050, et celui des 100h pour se situer dans une plage moyenne de nombre d'heures juste suffisante pour permettre la mise en place d'un manteau neigeux.

Il n'y a guère qu'au dessus de 2350m que les conditions thermiques sont réunies au début de la saison. Pour le mois de mars, l'enneigement naturel semble indispensable.

Finalement, ces mesures pourraient à terme, en améliorant la productivité, arriver à des économies d'énergie et de ressource en eau.

Nous n'avons sûrement pas été exhaustif dans cette présentation des perspectives de la thèse, mais nous avons pu constater que la découverte du réseau de mesure de l'enneigement artificiel offre de multiples pistes de recherche. Cette thèse ayant mis en lumière ces possibilités, il ne reste maintenant qu'à poursuivre nos efforts pour que les connaissances sur la climatologie et la météorologie de montagne se développent encore plus. Car ces connaissances sont utiles dans de nombreux domaines, et en particulier pour la vie des populations montagnardes. Il reste surtout à espérer que les stations de ski survivront aux bouleversements climatiques, au moins quelques... centaines d'années !

BIBLIOGRAPHIE

AGRAWALA, S. (2007) Changements climatiques dans les Alpes européennes, adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels, OCDE Editions, 136 pages.

ANCEY, P. (1996) *Guide Neige et Avalanches : connaissances, pratiques, sécurité*, Cemagref, Anena, Edisud, 317 pages.

ATUNES, C., DUMAS, D. (2003) Evolution des températures minimales dans les Alpes du Nord depuis 1960, *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, vol.15, pp. 413-419.

BADER, S., KUNZ, P. (1998) *Climats et risques naturels, la Suisse en mouvement*, Georg Editeur, VDF, 290 pages.

BAILLY, A. (2002) Pour un développement durable des stations de sports d'hiver, *Revue de Géographie Alpine*, n° 4, tome 90, pp. 116-120.

BAILLY, C., COMTE-BELLOT G. (2003) *Turbulence*, Collection Sciences et Techniques de l'Ingénieur, CNRS Edition, 362 pages.

BARRY, R.G. (1981) *Mountain Weather and climate*, Methuen, London, 313 pages.

BELLIARD, E. et al (1973) *Météorologie et aérologie élémentaires*, Ministère des transports, Service de la formation aéronautique, Paris, 189 pages.

BENICHOU, P. (1991) *Analyse I*, Collection Demengel, Dunod, Paris, 360 pages.

BENICHOU, P. (1995) *Classification automatique de configurations météorologiques sur l'Europe occidentale*, Monographie n°8, Météo-France, 94 pages.

BENISTON, M. (1997) *From turbulence to climate*, Springer, Berlin, 328 pages.

BENISTON, M. (2000) *Environmental Change in Mountains and Uplands*, Arnold/Hodder and Stoughton/ Chapman and Hall Publishers, Londres, 172 pages.

BENISTON, M. (2005) Changement climatique et impacts possibles dans la région alpine, *Revue de Géographie Alpine*, tome 93 n°2, pp. 13-25.

BERROIR, A. (1991) *La météorologie*, Que sais-je, PUF, 127 pages.

BERTHELOT, M. (2004) : *Classification des ambiances climatiques à Tours (Parçay-Meslay) et interprétations des situations météorologiques moyennes*. Note d'étude dans le cadre d'une thèse de doctorat, Université François Rabelais de Tours, 29 pages.

BESSEMOULIN, P., CERON, J.P., MOISSELIN, J.M. (2003) Nouvelles connaissances sur l'évolution du climat, *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, vol.15, pp. 31-40.

BESSEMOULIN, P., OLIVIERY, J. (2000) Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, *La Météorologie*, série 8, n°31, pp. 42 - 59.

BLANCHET, A. (2003) Neige et avalanche dans les Alpes françaises en Janvier-Février 1999, *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, vol.15, pp. 164-170.

BOQUET, G. (2001) Quelques indications sur les caractéristiques météorologiques dans le vallon du Plan de l'Alpe (Hte-Romanche) au cours de ces dernières années, *Revue de Géographie Alpine*, n° 3, tome 89, pp. 80-89.

BOCQUET, G., THOMAS A. (1989) Mesures hydrologiques et climatologiques en haute montagne : les handicaps du milieu, *Revue de Géographie Alpine*, tome LXXVI, 1-2-3, pp. 95-104.

BOUTOT, A. (1993) *L'invention des formes*, Edition Odile Jacob, Paris, 375 pages.

BRIDIER, S. (2001) *Modélisation de la répartition des brises et des températures en situation radiative*, thèse de doctorat de l'Université de Paris VII, Paris, 189 pages.

BROWN, R.A. (1991) *Fluid mechanics of the atmosphere*, Academic Press, San Diego, 489 pages.

BUCHOT, C. (1978) *Le foehn en Haute-Tarentaise, contribution à l'étude d'un foehn alpin français*, Monographie n°8 de la Météorologie Nationale, Ministère des Transports, 70 pages.

CADIOU, H. (1996) *La mesure du vent : sa perturbation par les obstacles*, Note technique n°33, Météo-France, 8 pages.

CANTAT, O. (2004) L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps, *Norois*, n°191, pp. 75-102.

CARLO, C., WANNER, H., LUTERBACHER, J., *et al.* (2005) Temperature and precipitation variability in the european alps since 1500, *International Journal of Climatology*, n°25, pp. 1855-1880.

CARREGA, P. (1992) *Topoclimat et habitat*, thèse de doctorat de l'Université de Nice, Nice, 408 pages.

CARREGA, P. (2003) Le climat aux échelles fines, *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, vol.15, pp. 13-18.

CHAIX, C. (2001) *Approche d'un climat local : la station des Menuires en hiver*, Mémoire de Maîtrise, Université de Savoie section Géographie, 166 pages.

CHAIX, C. (2002) *Etude des microclimats et des phénomènes atmosphériques hivernaux de montagne. Un enjeu pour l'enneigement artificiel*, Mémoire de DEA, Université de Savoie section Géographie, 33 pages.

CHEDIN, A. (1994) *Les grands systèmes de la science et de la technologie, l'observation spatiale du climat*, RMA, Masson, Paris, pp. 197-213.

CHEVASSUS AU LOUIS, N. (2003) Enquête sur les experts du climat, *La Recherche*, n°370, pp. 59-63.

CHOISNEL, E. (1996) Les échelles d'espace et de temps en climatologie, *La Météorologie*, 8^e série, n°13, pp 29-38.

CHOISNEL, E. (1987) Aspect topoclimatique : une méthode d'étude en région de moyenne montagne, *Agrométéorologie des régions de moyenne montagne, les colloques de l'INRA*, n° 39, pp. 177-195.

CHOISNEL, E (1986) Problèmes d'échelle et de réseaux météorologiques en zone de moyenne montagne, *Agrométéorologie des régions de moyenne montagne, les colloques de l'INRA*, n° 39, pp. 37-49.

CHOISNEL, E. et PAYEN, D. (1988) Les climats de la France, *supplément La Recherche*, n° 201, pp. 32-41.

CLEMENTS, W.E., ARCHULETA, J.A., HOARD, D.E. (1989) Mean structure of the nocturnal drainage flow in a deep valley, *Journal of Applied Meteorology*, volume 28, pp. 457-462.

COURAULT, D., BOURG, O., CAUTENET, G. (2002) Analyse de l'influence du paysage agricole sur la variabilité spatiale des conditions météorologiques et des flux à l'aide du modèle 3D de transferts atmosphériques RAMS, Unité Climat Sol Environnement, INRA, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 8 pages.

DEBARBIEUX, B. (2001) La montagne dans la recherche scientifique : statuts, paradigmes et perspectives, *Revue de Géographie Alpine*, n°2, tome 89, pp. 100-121.

DEFANT, F. (1949) Zur theorie der Hangwinde, nebst Bemerkungen zur Theorie der Berg- und Talwinde, *Arch. Meteor. Geophys. Bioklim.*, Series A, 1, pp. 421-450.

DELINÉ, P. (2006) Réchauffement climatique actuel et dynamique des versants de haute montagne, *Actes du Colloque Géologie et risques naturels : la gestion des risques au Pays du Mont-Blanc*, 18 novembre 2006, Sallanches, pp.40-45.

DENEUX, M. (2002) *L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, tome I, Paris, 295 pages.

DE ROSNAY, J. (1975) *Le microscope, vers une vision globale*, Points Essais, Seuil, 305 pages.

DESMARAIS, D., RITCHOT, G. (1998) La modélisation dynamique en géographie humaine, *Cahiers de Géographie du Québec*, vol. 42, n° 117, pp. 329-332.

DESTRUEL, J.M., LEROY, M. (1994) *Caractérisation de la fonction de transfert d'un abri météorologique de mesure de température et d'humidité relative*, Note Technique n°28, Météo-France, 16 pages.

- DEVUYST, P. (1972) *La météorologie*, Albert de Visscher, Bruxelles, 164 pages.
- DOBRINSKI, P. (2005) *Dynamique de la couche limite atmosphérique. De la turbulence aux systèmes de méso-échelle*, Synthèse d'activité scientifique proposée pour une thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université Paris VI, Service aéronomie CNRS, 139 pages.
- DOUGUEDROIT, A. (1980) Les topoclimats de la Haute-Vésubie, *Revue Géographique des Pays Méditerranéens*, tome 4, pp. 3-11.
- DOUGUEDROIT, A., SAINTIGNON DE M.F. (1970) Méthode d'étude de la décroissance des températures en montagne de latitude moyenne : exemple des Alpes françaises du Sud, *Revue de Géographie Alpine*, tome LVII, pp. 454-472.
- DOUGUEDROIT, A., SAINTIGNON DE M.F. (1974) Un nouveau mode de représentation des températures moyennes en montagne : l'orothermogramme, *Revue de Géographie Alpine*, tome LXII, pp. 205-217.
- DOUGUEDROIT, A., SAINTIGNON DE M.F. (1984) Les gradients de température en montagne, *Revue de Géographie Alpine*, tome LXXII, pp. 224-231.
- DOUGUEDROIT, A. (2004) Quelle « exception française » en matière de « types de temps » ? *Norais*, n°191, pp. 33-39.
- DUGLEUX, E. (2002) Impact de la production de neige de culture sur la ressource en eau, Actes du colloque « *L'eau en montagne : gestion intégrée des hauts bassins versants* », Megève, disponible sur www.riob.org/divers/megeve/eau_montagne_2002/Pdf/dugleux.pdf
- DURAND, F. (1995) *Climats et société*, Documents photos, bimestriel 7031, La Documentation Française, 15 pages.
- DURAND-DASTES, F. (2001) Le temps, la géographie et ses modèles, *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 40, 1, pp. 5-13.
- DURAND-DASTES, F. (2004) A propos des notions de types de temps et de types de circulation, *Norais*, n°191, pp. 29-32.
- ERPICUM, M. (2004) Discrimination des effets radiatifs et des effets advectifs à partir des observations de températures du réseau météo-routier de Wallonie, *Norais*, n°191, pp. 105-110.
- ESCOUROU, G. (1978) *Climatologie pratique*, MASSON, Collection Géographique, 172 pages.
- ESCOUROU, G. (1986) *Climat et environnement, les facteurs locaux du climat*, MASSON, Collection Géographique, 182 pages.
- ESTIENNE, P., GODART, A. (1970) *Climatologie*, Armand Colin, Paris, 365 pages.

ETCHEVERS, P., MARTIN E. (2002) Impacts d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne, *Colloque International « L'eau en montagne »*, Mégève, septembre 2002, 8 pages. Disponible sur : http://www.riob.org/divers/megeve/eau_montagne_2002/Pdf/Etchevers.pdf. Consulté le 10/06/2007.

EUGENE, J. (1981) *Aspect de la théorie générale des systèmes*, Recherches interdisciplinaires, 248 pages.

FALLOT, J.M. (1992) *Etude de la ventilation d'une grande vallée préalpine : la vallée de la Sarine en Gruyère*, Thèse de doctorat de l'Université de Fribourg, Fribourg, 472 pages.

FIVAZ, R. (1998) Temps et interactions dans les systèmes complexes, *Revue Internationale de Systémique*, vol. 12, n°2, pp. 137-160.

FRANKHAUSER, P. (1997) L'approche fractale, *Population*, 4, pp. 1005-1040.

FURY, R., JOLY, D. (2003) Analyse micro-climatologique des variations du vent en fonction des températures au Spitsberg, *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, vol.15, pp. 200-206

GARRETT, A. (1983) Drainage flow prediction with a one-dimensional model including canopy, soil and land radiation parameterizations, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol.22, pp.79-91.

GELEYN, J.F., JARRAUD, M. (1988) La prévision du temps, *supplément La Recherche*, n° 201, pp.14-24.

GEOPOINT (1990) *Histoire, temps et espace*, Groupe Dupont, Avignon, 368 pages.

GEOPOINT (1998) *Décision et analyse spatiale*, Groupe Dupont, Avignon, 373 pages.

GIEC (1996) *Forum pour le climat et le changement global*, chapitre 5 du deuxième rapport d'évaluation du GIEC, ASSN, 36 pages.

GIEC (2000) *Résumé à l'intention des décideurs : aspects socioéconomiques de l'évolution du climat*, OMM/PNUE, Genève, 27 pages.

GUILLEMOT, H. (2002) Les prévisions météo sortent du brouillard, *Science et Vie*, n° 1013, pp.64-71.

GUYOT, G. (1999) *Climatologie de l'environnement*, Dunod, 2^e édition, Paris, 525 pages.

HALLOT, H., LABIT, D., TOMASINI, M. (2003) *Météorologie générale*, Météo-France, ENAC, 325 pages.

HERTIG, J.A. (1999) *Etude d'impact sur l'environnement*, Traité de Génie Civil, EPFL, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, vol.23, 453 pages.

HESS, P., BREZOWSKY, H (1999) : *Katalog der Grosswetterlagen Europas, verbesserte und ergänzte Auflage (1881-1998)*, Offenbach, Main, Germany, 138 pages.

HUFTY, A. (2001) *Introduction à la climatologie*, De Boeck Université, Bruxelles, 542 pages.

HUSSERL, E. (1980) *Méditations cartésiennes*, Librairie J. Vrin, 136 pages.

JAIL, M. (1966) Recherches sur les variations thermique le long d'un adret, *Revue de Géographie Alpine*, tome LIV, pp. 233-253.

JAIL, M. (1966) Températures et types de temps le long d'un adret, *Revue de Géographie Alpine*, tome LIV, pp. 442-457.

JOLY, D. (1994) *Ambiances Climatiques Instantanées au Spitsberg*, Annales littéraires de l'université de Franche-Comté, Paris, 400 pages.

JOLY, D. (1994) Interpolation des températures à grande échelle, *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 4, n° 1, pp. 55-85.

JOLY, D. (2004) Ambiances climatiques instantanées : application à la microclimatologie du Spitsberg, *Norois*, n°191, pp. 43-57.

JOUSSAUME, S. (1999) *Climat d'hier à demain*, CNRS Edition, 141 pages.

KANDEL, R. (1990) *Le devenir des climats*, Hachette, Paris, 124 pages.

KASTENDEUCH, P. (1996) *Analyse à plusieurs échelles et modélisation des régimes de vents d'été dans le Fossé Rhénan méridional*, Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 175 pages.

KERBIRIOU, M.A. (2004) *Dynamique d'une inversion thermique, transport et mélange en vallée encaissée : une étude numérique tridimensionnelle*, Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I, 171 pages.

KOHLER, P. (1981) *Comprendre la météorologie*, Hachette, Paris, 128 pages

KOPROV, B.M., KOPROV, V.M., MAKAROVA, T.I. *et al* (2004) Coherent structures in the atmospheric surface layer under stable and unstable conditions, *Boundary-Layer Meteorology*, 111, pp. 19-32.

-
- LABORDE J-P., 2002, «Méthodes de détection des anomalies et de comblement des lacunes dans les séries de données, à l'usage des climatologues ... et de quelques autres», *Actes des journées de climatologie de la Commission Climat et Société du Comité National Français de Géographie*, Strasbourg, 22 pages.
- LEBEAU, A. (1994) *Les prévisions Météo de A à Z*, Association des Amis de l'Aigoual, Stock, Météo-France, 213 pages.
- LE BRUN, M. (2002) *La météo de montagne*, Arthaud, Paris, 141 pages.
- LE MOIGNE, J.L. (1999) *La modélisation des systèmes complexes*, Éd. Dunod, 178 pages.
- LE ROUX, M. (1996) *La dynamique du temps et du climat*, Masson, Paris, 306 pages.
- LE ROY, M. (2002) La mesure au sol de la température et des précipitations, *La Météorologie*, n° 39, pp. 52-56.
- LE ROY, M., LAFAYSSSE, C. (1993) *Recommandations pour l'implantation et l'aménagement des parcs météorologiques*, Notes Technique n°31, Météo-France, 10 pages.
- LESIEUR, M. (1994) *La turbulence*, Presse Universitaire de Grenoble, 261 pages.
- LE TREUT, H. (2003) Les scénarios globaux de changement climatique et leurs incertitudes, *C.R. Geoscience*, 335, pp. 525-533.
- LIU, M. (1997) La construction de représentations de situations complexes, *Revue Internationale de Systémique*, vol. 11, n°3, pp. 285-307.
- LOTHON, M. (2002) *Etude phénoménologique du foehn dans la vallée du Rhin dans le cadre de l'expérience MAP*, Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 205 pages.
- LOUBIER, J.C. (2004) *Perception et simulation des effets du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité*, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 246 pages.
- LOUP, J. (1979) *Les climats de montagne*, Institut de Géographie Alpine, Grenoble, 65 pages.
- MACNIDER, R.T. (2003) Modeling slope and mountain/valley flows, *Summer School of Mountain Meteorology*, 18-22 août, Trento (I), disponible sur : www.unitn.it/convegna/ssmm_lecture.htm.
- MACKEE, T.B., O'NEAL, R.D. (1989) The role of valley geometry and energy budget in the formation of nocturnal valley winds, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 28, pp. 445-456.
- MAINGUY, J. (1990) Potentialités thermiques de l'enneigement artificiel (Vercors), *Revue de Géographie Alpine*, tome LXXVII, pp. 23-28.
- MALARDEL, S. (2005) *Fondamentaux de Météorologie, à l'école du temps*, Cépaduès-Edition, Météo-France, Paris, 708 pages.

- MANDELBROT, B. (1984) *Les objets fractals*, Flammarion, Paris, 203 pages.
- MANNSTEIN, H. (1985) The interpretation of albedo measurements on a snowcovered slope, *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, ser. B36, pp.73-81.
- MARNEZY, A., RAMPNOUX, J.P. (2006) Retenues d'altitude et neige de culture dans les Alpes françaises : caractéristiques, répartition, alimentation en eau, impacts. Actes du colloque «*Gestion intégrée des Hauts Bassins versants*», Megève, 20-22 septembre 2006.
- MARTIN, E. (2002) *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle*, Météo-France / C.N.R.M, M.I.E.S.
- MARTH, L. (1986) *Nocturnal topoclimatology*, Rapport WMO, 117 (TD n°132), 76 pages.
- MENEGOZ, P.P., GOUESLAIN, Y. (2003), *Le Parapente*, Amphora Sports, Paris, 303 pages.
- MONTI, P., FERNANDO, H.J.S, PRINCEVAC, M. *et al* (2002) Observations of flow and turbulence in the nocturnal boundary layer over a slope, *Journal of Atmospheric Sciences*, vol.59, n°17, pp. 2513-2534.
- MORAES, O.L.L., ACEVEDO, O.C., DA SILVA, R. *et al* (2004) Nocturnal surface-layer characteristics at the bottom of a valley, *Boundary-Layer meteorology*, 112, pp.159-177.
- MORIN, E. (1994) *La complexité humaine*, Flammarion, Paris, 380 pages.
- OKE, T.R. (1987) *Boundary layer climates*, second edition, Methuen, London, 435 pages.
- ORLANSKI, I. (1975) A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 56, pp. 527-530.
- PAGELS, H. (1990) *Les Rêves de la Raison. L'ordinateur et les sciences de la Complexité*, InterEditions, Paris, 366 pages.
- PAGNEY, P. (1993) *La climatologie*, Que sais-je, PUF, 127 pages.
- PAHAUT, E., SERGENT, C. (1990) *La neige, formation et évolution*, Météo-France, CNRM/CEN, 25 pages.
- PAL ARYA, S. (2001) *Introduction to micrometeorology*, second edition, Academic Press, San Diego, 415 pages.
- PEDELABORDE, P. (1982) *Introduction à l'étude scientifique du climat*, SEDES, Paris, 347 pages.
- PERRET, R. (1987) : *Une classification des situations météorologiques à l'usage de la prévision*, Publications de l'Institut Suisse de Météorologie, 128 pages.

PIELKE, R.A. (2002) *Mesoscale Meteorological Modeling*, Academic Press, San Diego, 675 pages.

POIRIER, H. (2003) Une théorie explique l'intelligence de la nature, *Science & Vie*, n°1034, pp.45-59.

PONCET, A. (1981) Interactions forêts et climats, *Mélanges offerts en hommages à Charles-Pierre Péguy : « Eaux et Climats »*, CNRS, Grenoble, pp. 445-462.

POGGI, A. (1977) *Introduction à la micrométéorologie, transfert d'énergie atmosphère-sol*, Masson, Paris, 146 pages.

PRIGOGINE, I. (1996) *La fin des certitudes*, Edition Odile Jacob, Paris, 224 pages.

PROTASSOV, K. (2002) *Analyse des données expérimentales*, EDP Sciences, 140 pages.

PUMAIN, D. (1998) Les modèles d'auto-organisation et le changement urbain, *Cahiers de Géographie du Québec*, volume 42, n° 117, pp. 349-366.

QUENEY, P. (1974) *Eléments de météorologie*, Masson, Paris, 300 pages.

QUENOL, H. (2002) *Modifications climatiques aux échelles fines générées par un ouvrage linéaire en remblai*, thèse de doctorat de l'Université de Lille I, Lille, 313 pages.

RAMPANELLI, G., ZARDI, D., ROTTUNO, R. (2004) Mechanisms of Up-Valley Winds, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol.61, pp.3097-3111.

REYNARD E. (2000) *Gestion patrimoniale et intégrée des ressources en eau dans les stations touristiques de montagne, le cas de Crans-Montana et Nendaz (Valais)*, thèse de doctorat de l'Université de Lausanne (IGUL), 369 pages.

REYNARD, E. (2001) Aménagement du territoire et gestion de l'eau dans les stations touristiques alpines. Le cas de Crans-Montana-Aminona (Valais, Suisse), *Revue de Géographie Alpine*, n° 3, tome 89, pp. 6-19.

ROBERT, R. (2003) La météorologie : un système complexe ?, *Pour la Science*, n° 314, pp. 140-142.

ROCHAS, R., JAVELLE, J.P. (1993) *La météorologie, la prévision numérique du temps et du climat*, SYROS, Paris, 261 pages.

ROQUEPLO, P. (1993) *Climats sous surveillances, limites et conditions de l'expertise scientifique*, Economica, 385 pages.

ROTH, G.D., GILLOT-PETRE, A. (1984) *Guide de la météorologie*, Delachaux et Niestlé, Munich, 248 pages.

RUELLE, D. (1991) *Hasard et chaos*, Edition Odile Jacob, Paris, 247 pages.

SAINTIGNON de M.F. (1976) Méthode d'étude de la décroissance des températures en montagne de latitude moyenne : exemple des alpes françaises du Nord, *Revue de Géographie Alpine*, tome LXIV, pp. 482-494.

SCHLATHER, D. (1986) *De l'analyse à la prévision*, Ellipses, Paris, 303 pages.

SEATM, (1996) *Neige de culture, guide d'aide à la décision*, AFIT, 121 pages.

SERGENT, C. (1993) *Propriétés physiques de la neige*, Météo-France, CNRM/CEN, 26 pages.

SMITH, C., SKYLLINGSTAD, E. A modeling study of katabatic flows over slopes with changing slope angle. IN : *11th Conf. On Mountain Meteorology, 21-25 June 2004, Barlett NH, USA* (en ligne). American Meteorological Society. Disponible sur : <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/77034.pdf> (consulté le 05/01/2005).

SOUHAITE, P. (1993) *Recueil de fiches d'aide à la prévision montagne en Savoie pour les situations d'hiver*, Monographie n°7, Météo-France, 59 pages.

SPIRE, A. (1999) *La pensée-Prigogine*, Desclée de Brouwer, 206 pages.

TABEAUD, M. (2000) *La climatologie*, Armand Colin, Paris, 173 pages.

THEURILLAT, J.P., GUIBAN, A. (2001) Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps : a review, *Climatic Change*, n° 50, pp. 77-109.

THILLET, J.J. (1997) *La météo de montagne*, Edition du Seuil, CAF, 188 pages.

TRIPLET, J.P., ROCHE, G. (1986) *Météorologie générale*, Ecole Nationale de la Météorologie, 303 pages.

VERGEINER, I., DREISEITL, E. (1987) Valley winds and slope winds – Observations and elementary thoughts, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 36, pp. 264-286.

VIERS, G. (1987) Observations sur les effets thermiques du foehn en Pays Basque, *Mélanges géographiques offerts à Estienne P. : « Le climat, la montagne, l'homme »*, pp. 58-74.

VIGNEAU, J. P. (2000) *Géoclimatologie*, Université Géographie, Ellipses, Paris.

VIGNEAU, J.P. (2004) Un siècle de « types de temps » : épistémologie d'un concept ambigu, *Norois*, n°191, pp. 17-27.

VINCENT, J.P. (2000) *La production artificielle de neige dans les stations de sports d'hiver de Savoie et de Haute-Savoie*, Mémoire de Maîtrise, Université de Savoie section Géographie, 90 pages.

WHITEMAN C.D. (1982) Breakup of temperature inversions in deep mountain valleys : Part 1, observations, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 21, pp. 270-288.

WHITEMAN, C.D., DORAN, J.C. (1993) The relationship between overlying synoptic-scale flows and winds within a valley, *Journal of Applied Meteorology*, Vol.32, pp.1673-1682.

WHITEMAN, C.D. (2000) *Mountain Meteorology, fundamentals and applications*, Oxford University Press, New-York, 355 pages.

WHITEMAN, C.D., HUBBE, J. M., SHAW, W. J. (2000) Evaluation of an inexpensive temperature datalogger for meteorological applications, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Notes and Correspondance, Vol.17, pp. 77-81.

WHITEMAN, C.D. (2003) (1) General principles and observations of diurnal wind systems in mountainous terrain, *Summer School of Mountain Meteorology*, 18-22 août, Trento (I), disponible sur : www.unitn.it/convegni/ssmm_lecture.htm.

WHITEMAN, C.D. (2003) (2) The slope wind system, *Summer School of Mountain Meteorology*, 18-22 août, Trento (I), disponible sur : www.unitn.it/convegni/ssmm_lecture.htm.

ZAWAR-REZA, P., MCGOWAN, H., A. STURMAN, A. et al (2004) Numerical simulations of wind and temperature structure within an Alpine lake basin, Lake Tekapo, New Zealand, *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 86, pp.245-260.

ANNEXES

- Annexe 1 : numéros, altitudes et coordonnées Lambert II des sondes et des anémomètres des domaines skiabiles
- Annexe 2 : la classification Perret/Savoie
- Annexes 3 : stations de mesures et métrologie

Annexe 1 : numéros, altitudes et coordonnées Lambert II des sondes et des anémomètres des domaines skiables

AUSOIS

Sondes T°/HR

N°	Altitude (m)	X	Y
1	1900	945432,954	2036400,577
2	1855	944990,583	2036444,624
3	1795	944992,024	2036224,912
4	1740	945099,601	2036032,209
5	1715	945280,157	2035974,139
6	1665	945375,721	2035840,651
7	1600	945553,268	2035711,058
8	1545	945735,18	2035529,633
9	1950	945583,258	2036642,103
10	1970	945630,416	2036761,513
11	2035	945458,681	2036893,603
12	2110	945337,339	2037059,047
13	2130	945172,21	2036957,807
14	2150	945223,921	2037094,665
15	2195	945170,02	2037269,805
16	2215	944979,465	2037363,168
17	2260	945016,456	2037519,865

Anémomètres

N°	Altitude (m)	X	Y
5	1580	945546,68	2035646,259
4	1820	944895,969	2036352,335
3	2035	945458,681	2036893,603
1	2195	945250,241	2037294,631
2	2245	944953,431	2037493,476

LES MENUIRES

Sondes T°/HR

N°	Altitude (m)	X	Y
1	2108	930424,23	2044515,66
2	2161	930371,519	2044731,784
3	2208	930530,853	2044884,967
4	2240	930584,064	2044927,961
5	2279	930613,231	2045168,636
6	2335	930814,483	2045221,241
7	2378	930960,056	2045262,809
8	2417	931060,602	2045411,949
9	2146	930358,94	2044693,749
10	2218	930470,208	2044958,547
11	2055	930277,23	2044316,252
12	2014	930063,861	2044339,446
13	1965	929880,682	2044417,379
14	1871	929630,664	2044580,487
15	1823	929405,385	2044732,999
16	2056	930254,143	2044453,58
17	2008	930071,715	2044473,849
18	1938	929832,088	2044548,975
19	1882	929694,664	2044606,487
20	2054	930200,143	2044550,58
21	1976	929904,889	2044572,034
22	2082	930241,484	2044670,902
23	2021	930046,592	2044663,507
24	1946	929884,75	2044682,296
25	1857	929608,385	2044717,999
26	2092	930443,41	2044253,179
27	2041	930275,939	2044180,664
28	1970	930078,1733	2043916,817
29	1948	930065,909	2043722,634
30	1897	929917,531	2043747,977
31	1850	929662,351	2043880,992
32	1792	929508,078	2043982,609
33	1743	929236,654	2044075,471
34	1717	929100,252	2044270,919
35	1924	930001,11	2043628,887
36	1863	929769,373	2043711,903
37	1852	929840,804	2043549,919
38	1996	928662,85	2043776,93
39	1933	928675,1933	2043970,303
40	1863	928683,012	2044130,577
41	1817	928730,58	2044182,917
42	1757	928875,469	2044160,742
43	1732	929100,252	2044417,919
44	1765	929147,102	2044840,103
45	1761	929224,862	2044979,516
46	1738	929085,186	2045042,334
47	1715	928925,221	2045165,858
48	1668	928775,58	2045150
49	1756	929580,801	2043300,254
50	1773	929683,2	2043122,757
51	1786	929847,77	2042859,44
52	2099	930584,23	2044064,93

53	1833	929497,351	2044417,919
54	1946	929698,186	2045706,004
55	1964	929677,293	2045990,82
56	1988	929691,659	2046265,01
58	1817	929777,623	2043414,208
59	2124	930670,63	2043982,647
60	2217	930872,2333	2043567,1
61	2327	931279,5467	2043386,07
62	2426	931695,95	2043154,813
63	2309	930563,66	2045406,193
64	2379	930802,29	2045603,68
65	2417	931004,633	2045819,503
69	2060	928605,25	2043616,473
70	2102	927967,5333	2043377,843
71	2538	932028,35	2043353,157
72	2595	932292,961	2043330,394
73	2682	932427,44	2043678,187
74	2768	932550,8667	2043920,93
75	2813	932515,04	2044167,446
76	2195	930658,29	2044439,333
77	2281	930806,4033	2044546,303

Anémomètres

N°	Altitude (m)	X	Y
1	2278	930613,231	2045168,636
2	2095	930434,23	2044385,66
3	1885	929769,373	2043811,903
4	1760	929521,801	2043400,254
5	2800	932579,6667	2044126,647

VAL THORENS

Sondes T°/HR

N°	Altitude (m)	X	Y
1	2333	933098,184	2041612,493
2	2395	933377,47	2041543,059
3	2440	933711,355	2041730,667
4	2532	933916,875	2041701,23
5	2563	934097,905	2041594,26
6	2591	934262,4783	2041499,63
7	2632	934538,135	2041549
8	2686	934768,535	2041779,403
9	2762	934998,9383	2041861,69
10	2793	935237,5683	2041935,747
11	2844	935443,2817	2041927,517
12	2906	935607,855	2041799,973
13	2673	934385,468	2041831,391
14	2610	934080,532	2041924,132
15	2563	933905,826	2041901,59
16	2463	933636,758	2041834,141
17	2389	933449,55	2041705,496
18	2302	932974,7017	2041779,403
19	2321	932978,815	2041952,203
20	2382	933064,409	2042265,871
21	2390	932879,085	2042393,102
22	2447	932940,755	2042620,791
23	2536	933159,845	2042799,75
24	2541	933210,903	2042675,249
25	2600	933457,505	2042808,56
26	2576	933283,2717	2042964,323
27	2634	933292,584	2043188,839
28	2720	933078,026	2043369,394
29	2282	932875,9583	2041771,173
30	2274	932781,3283	2041693,003
31	2274	932415,155	2041651,86
32	2321	932513,8983	2041524,317
33	2349	932559,155	2041405
34	2289	932497,4417	2042083,86
35	2243	932345,2117	2041750,603
36	2221	932143,6117	2041738,26
37	2199	931929,6683	2041614,83
38	2138	931637,5517	2041561,343
39	2142	931518,2383	2041277,457
40	2269	931501,7817	2040730,257
41	2324	932961,895	2041462,25
42	2393	933168,0717	2041343,287
43	2451	933299,7317	2041195,17
44	2482	933475,779	2041045,382
45	2404	932885,6817	2040508,83
46	2568	933847,582	2041271,451
47	2359	933054,435	2040830,627
49	2480	932367,2817	2040393,63
50	2454	932989,134	2040222,833
51	2553	933027,044	2039959,44
52	2600	932922,7117	2039574,883
53	2730	933189,696	2039396,489

54	2763	933310,939	2039218,371
55	2635	932717,134	2039578,118
56	2551	932465,399	2039823,287
57	2476	932050,724	2040023,031
59	2361	931484,869	2039927,578
60	2322	931483,428	2040260,21

Anémomètres

N°	Altitude (m)	X	Y
1	2481	933514,779	2041039,382
2	2273	932773,498	2041647,84
4	2740	933090,514	2043310,737
6	2472	932688,744	2040598,267

VALLOIRE

Sondes T°/HR

N°	Altitude (m)	X	Y
1	1730	921916,5242	2025584,766
2	1787	921948,2038	2025446,526
3	1844	921997,1642	2025305,404
4	1923	922103,7252	2025092,284
5	1752	922062,2858	2025563,117
6	1618	921904,0017	2025884,798
7	1512	921788,8017	2026139,885
8	1440	921710,63	2026320,915
9	1589	921686,1227	2025901,568
10	1540	921455,7223	2025887,167
11	1519	921550,7625	2026016,768
12	1482	921657,3235	2026169,409
13	1935	922221,8058	2025046,204
14	1918	922409,0156	2025049,776
15	2012	922362,9258	2024715,002
16	1987	922285,1652	2024838,843
17	1834	922109,7167	2025325,253
19	1620	922072,0443	2025939,007
20	1655	922276,526	2025846,847
21	1659	922495,4067	2025723,007
22	1692	922645,167	2025579,006
23	1727	922826,6082	2025432,125
24	1776	922673,9673	2025285,244
25	1817	922564,527	2025221,884
26	1850	922711,4068	2025063,483
27	1875	922590,4468	2025037,563
28	1730	921619,8828	2025314,045
29	1670	921499,4146	2025112,818
30	1613	921292,2771	2024964,22
31	1592	921173,4812	2024617,082
32	1620	921441,3222	2025478,205
33	1617	921517,2567	2025666,74
34	1517	921271,4018	2025841,088
35	1811	923195,2492	2025253,565
36	1850	923376,6903	2024974,203
37	1933	923681,9708	2024864,763
38	2059	923984,3732	2024689,082
39	2135	924122,6127	2024867,643
40	2146	924113,9735	2025354,365
41	2195	924177,3328	2025627,966
42	2265	924030,453	2025987,967
43	1850	923442,9302	2024758,203
44	2312	924283,8938	2026129,089
45	2255	924223,4138	2025875,647
46	2289	924396,2147	2026422,849
47	2271	924399,094	2026618,691
48	2245	924281,0133	2026788,611
49	2181	923955,5728	2026834,691

Anémomètres

N°	Altitude (m)	X	Y
1	1844	922031,7243	2025293,885
2	2020	922400,3665	2024789,882
3	1515	921815,7242	2026175,168
4	1770	922740,2072	2025028,923
5	1850	922789,1675	2025319,805
6	1600	921228,2013	2024755,322
7	2125	924171,573	2024576,762
9	2300	924257,974	2026068,607

Annexe 2 : la classification Perret/Savoie

DATES	P/S	27/12/1995	4a/C6	10/04/1996	5a/C2	22/11/1996	3cd/C7
15/10/1995	2a/C3	28/12/1995	7ac/C9	11/04/1996	4a/C4	24/11/1996	9cd/C1
16/10/1995	6/C3	29/12/1995	7ac/C8	12/04/1996	5a/C2	25/11/1996	3cd/C10
17/10/1995	6/C3	31/12/1995	7ac/C6	13/04/1996	5a/C4	27/11/1996	9cd/C9
19/10/1995	3ab/C2	01/01/1996	7ac/C6	14/04/1996	4a/C4	28/11/1996	8d/C6
22/10/1995	6/C2	02/01/1996	7ac/C6	15/04/1996	6/C2	29/11/1996	9cd/C10
23/10/1995	6/C3	03/01/1996	5a/C6	16/04/1996	6/C2	30/11/1996	8b/C9
24/10/1995	1a/C2	05/01/1996	8a/C6	17/04/1996	8a/C4	01/12/1996	4b/C6
25/10/1995	1a/C4	06/01/1996	1a/C5	18/04/1996	8a/C2	02/12/1996	3cd/C6
26/10/1995	2a/C2	08/01/1996	1b/C1	19/04/1996	2a/C3	03/12/1996	3cd/C6
28/10/1995	2b/C3	09/01/1996	1a/C4	20/04/1996	2a/C2	05/12/1996	1a/C4
29/10/1995	2b/C8	10/01/1996	1a/C5	22/04/1996	1a/C5	07/12/1996	6/C6
30/10/1995	2a/C3	11/01/1996	1a/C5	24/04/1996	1b/C3	09/12/1996	3ab/C5
31/10/1995	6/C2	12/01/1996	1a/C5	26/04/1996	3ab/C4	10/12/1996	6/C4
01/11/1995	6/C2	22/01/1996	8a/C5	27/04/1996	3ab/C3	11/12/1996	7ac/C1
02/11/1995	4b/C7	23/01/1996	8a/C5	28/04/1996	8a ² /C4	12/12/1996	6/C6
03/11/1995	5b/C3	29/01/1996	7ac/C2	29/04/1996	8a ² /C7	13/12/1996	9ab/C8
04/11/1995	5a/C3	01/02/1996	7ac/C5	30/04/1996	9ab/C8	14/12/1996	8a ² /C6
05/11/1995	6/C1	02/02/1996	7ac/C5	01/10/1996	9ab/C5	15/12/1996	6/C1
06/11/1995	6/C1	08/02/1996	9cd/C6	02/10/1996	8a ² /C4	16/12/1996	6/C1
09/11/1995	6/C1	09/02/1996	6ef/C1	04/10/1996	3ab/C4	17/12/1996	8a/C1
10/11/1995	8a/C4	12/02/1996	8a/C10	05/10/1996	8a ² /C6	18/12/1996	8a/C1
11/11/1995	8a/C5	13/02/1996	8d/C9	06/10/1996	7b/6b/C4	19/12/1996	7ac/C6
13/11/1995	7ac/C6	18/02/1996	4b/C9	07/10/1996	3ab/C4	20/12/1996	7ac/C6
16/11/1995	2b/C8	19/02/1996	9ab/C7	08/10/1996	3ab/C6	21/12/1996	7ac/C6
17/11/1995	9ab/C8	25/02/1996	8a/C2	10/10/1996	3ab/C6	23/12/1996	7ac/C8
20/11/1995	5a/C1	26/02/1996	1a/C5	14/10/1996	1a/C5	24/12/1996	7b/6b/C6
21/11/1995	6/C1	01/03/1996	6/C1	15/10/1996	8a/C8	25/12/1996	7b/6b/C6
22/11/1995	6/C6	02/03/1996	5a/C7	16/10/1996	9cd/C8	26/12/1996	6/C6
23/11/1995	2a/C1	03/03/1996	6/C3	17/10/1996	9cd/C7	29/12/1996	6/C1
24/11/1995	2a/C1	04/03/1996	6/C1	18/10/1996	3cd/C2	30/12/1996	5b/C6
25/11/1995	2a/C2	07/03/1996	6/C2	19/10/1996	3cd/C6	31/12/1996	8d/C6
26/11/1995	8a/C5	08/03/1996	6ef/C2	20/10/1996	4a/C2	02/01/1997	7b/6b/C6
27/11/1995	8a/C8	09/03/1996	6ef/C3	22/10/1996	4a/C2	03/01/1997	7ac/C5
28/11/1995	7ac/C7	10/03/1996	6ef/C3	23/10/1996	5a/C2	04/01/1997	7ac/C6
30/11/1995	6/C1	11/03/1996	6ef/C2	24/10/1996	6/C3	05/01/1997	6/C6
01/12/1995	6/C1	12/03/1996	6ef/C3	25/10/1996	1a/C4	06/01/1997	6/C6
02/12/1995	1a/C1	13/03/1996	6ef/C4	26/10/1996	1a/C4	07/01/1997	7ac/C6
04/12/1995	6ef/C1	15/03/1996	9cd/C5	27/10/1996	1a/C4	08/01/1997	7ac/C4
05/12/1995	6ef/C1	16/03/1996	9cd/C4	28/10/1996	2a/C4	09/01/1997	7ac/C5
06/12/1995	6ef/C1	19/03/1996	7ac/C3	30/10/1996	4a/C2	10/01/1997	6ef/C7
07/12/1995	6ef/C4	20/03/1996	7ac/C4	01/11/1996	3cd/C1	11/01/1997	6/C1
08/12/1995	6ef/C4	21/03/1996	7ac/C7	03/11/1996	3ab/C3	12/01/1997	6/C1
09/12/1995	7b/6b/C2	23/03/1996	7ac/C2	04/11/1996	2a/C3	13/01/1997	6/C1
10/12/1995	3ab/C1	24/03/1996	7ac/C2	06/11/1996	3ab/C1	14/01/1997	6/C1
12/12/1995	7b/6b/C1	26/03/1996	7ac/C4	07/11/1996	3cd/C8	15/01/1997	6/C1
13/12/1995	7b/6b/C7	27/03/1996	9ab/C6	08/11/1996	3cd/C1	16/01/1997	6/C1
15/12/1995	7b/6b/C5	29/03/1996	5b/C3	11/11/1996	8a/C5	17/01/1997	6/C2
16/12/1995	7ac/C5	30/03/1996	5b/C3	12/11/1996	8a/C5	18/01/1997	2a/C1
17/12/1995	7ac/C4	02/04/1996	9ab/C6	14/11/1996	9ab/C6	19/01/1997	8a/C4
19/12/1995	6/C1	05/04/1996	6ef/C2	17/11/1996	7b/6b/C9	20/01/1997	9ab/C6
20/12/1995	4b/C6	06/04/1996	6ef/C4	18/11/1996	9cd/C8	21/01/1997	7b/6b/C4
23/12/1995	8a/C9	07/04/1996	6ef/C3	19/11/1996	9cd/C9	22/01/1997	6/C5
24/12/1995	3cd/C8	08/04/1996	6ef/C4	20/11/1996	8b/C9	23/01/1997	1a/C4
25/12/1995	3cd/C8	09/04/1996	5a/C2	21/11/1996	9cd/C9	24/01/1997	6/C2

26/01/1997	6/C1	30/03/1997	6/C3	19/11/1997	6ef/C7	25/01/1998	6/C6
27/01/1997	3ab/C1	31/03/1997	6/C2	20/11/1997	6ef/C8	26/01/1998	6/C1
28/01/1997	3ab/C1	01/04/1997	3ab/C2	21/11/1997	6ef/C6	27/01/1998	6/C1
29/01/1997	6/C1	02/04/1997	3ab/C2	22/11/1997	6ef/C4	29/01/1998	6/C1
30/01/1997	6/C1	03/04/1997	3ab/C4	23/11/1997	6ef/C1	30/01/1998	6/C1
31/01/1997	5a/C1	04/04/1997	4a/C4	24/11/1997	1a/C6	31/01/1998	6/C1
01/02/1997	5a/C1	08/04/1997	6/C3	25/11/1997	1a/C2	01/02/1998	6/C1
02/02/1997	5a/C1	10/04/1997	6/C2	26/11/1997	1a/C5	02/02/1998	3ab/C1
03/02/1997	3ab/C1	11/04/1997	6/C3	27/11/1997	1b/C4	03/02/1998	3ab/C1
04/02/1997	3ab/C1	12/04/1997	5b/C3	28/11/1997	3cd/C4	04/02/1998	3ab/C1
05/02/1997	3cd/C8	13/04/1997	6/C2	30/11/1997	9cd/C7	06/02/1998	3ab/C1
06/02/1997	4a/C1	14/04/1997	6/C2	01/12/1997	9cd/C7	07/02/1998	3ab/C1
07/02/1997	6/C1	15/04/1997	5a/C3	05/12/1997	6/C1	08/02/1998	6/C1
08/02/1997	3ab/C1	01/10/1997	6/C3	06/12/1997	6/C1	09/02/1998	6/C1
09/02/1997	3ab/C2	02/10/1997	4a/C3	07/12/1997	6/C1	10/02/1998	6/C1
10/02/1997	3ab/C2	03/10/1997	4a/C3	08/12/1997	3ab/C6	11/02/1998	6/C1
11/02/1997	3cd/C4	04/10/1997	6/C2	09/12/1997	3ab/C6	12/02/1998	6/C2
12/02/1997	3cd/C6	06/10/1997	8a/C4	10/12/1997	3ab/C6	14/02/1998	6/C2
14/02/1997	3cd/C9	07/10/1997	8a/C8	11/12/1997	3cd/C9	15/02/1998	6/C2
15/02/1997	3cd/C8	08/10/1997	2b/C4	12/12/1997	4b/C8	16/02/1998	3cd/C4
16/02/1997	5a/C1	09/10/1997	2b/C4	16/12/1997	6ef/C5	17/02/1998	6/C3
17/02/1997	5a/C1	10/10/1997	3cd/C8	17/12/1997	1a/C5	18/02/1998	6/C2
18/02/1997	8a/C8	11/10/1997	8a/C8	18/12/1997	1b/C5	19/02/1998	6/C2
20/02/1997	3cd/C3	12/10/1997	8a/C8	19/12/1997	1b/C5	20/02/1998	1a/C2
21/02/1997	3ab/C2	13/10/1997	9cd/C7	20/12/1997	1b/C8	21/02/1998	1a/C2
22/02/1997	3ab/C2	15/10/1997	4b/C6	21/12/1997	8d/C6	22/02/1998	9cd/C9
23/02/1997	2a/C2	16/10/1997	4b/C6	22/12/1997	1a/C6	24/02/1998	6/C1
24/02/1997	3cd/C8	17/10/1997	6/C2	23/12/1997	2a/C6	25/02/1998	6/C1
25/02/1997	3cd/C8	18/10/1997	1a/C2	25/12/1997	2b/C8	26/02/1998	6/C2
26/02/1997	3cd/C9	19/10/1997	1a/C2	26/12/1997	3cd/C8	28/02/1998	3cd/C2
27/02/1997	4a/C1	20/10/1997	6/C4	28/12/1997	9cd/C6	01/03/1998	3ab/C3
28/02/1997	6/C1	21/10/1997	7ad/C7	29/12/1997	4a/C1	03/03/1998	2a/C3
01/03/1997	2a/C2	22/10/1997	7ad/C3	30/12/1997	1a/C6	04/03/1998	3cd/C5
02/03/1997	2a/C2	24/10/1997	6/C3	01/01/1998	1a/C4	06/03/1998	3cd/C4
03/03/1997	2a/C2	25/10/1997	5a/C4	02/01/1998	3cd/C9	09/03/1998	4b/C7
05/03/1997	6/C2	26/10/1997	5a/C3	03/01/1998	3cd/C9	10/03/1998	5a/C1
06/03/1997	3ab/C2	27/10/1997	5a/C1	04/01/1998	3cd/C7	11/03/1998	8a/C8
08/03/1997	6/C2	28/10/1997	5a/C3	05/01/1998	3cd/C9	12/03/1998	6/C6
09/03/1997	6/C2	29/10/1997	6/C3	06/01/1998	3cd/C7	13/03/1998	6/C6
10/03/1997	6/C2	30/10/1997	6/C1	07/01/1998	3ab/C1	14/03/1998	6/C1
11/03/1997	6/C2	31/10/1997	3ab/C1	08/01/1998	2a/C1	15/03/1998	6/C2
12/03/1997	6/C2	03/11/1997	7ad/C3	09/01/1998	6/C1	16/03/1998	6/C4
13/03/1997	6/C2	04/11/1997	6/C4	10/01/1998	6/C2	17/03/1998	6/C2
14/03/1997	3ab/C2	05/11/1997	8a/C5	11/01/1998	1a/C2	18/03/1998	6/C2
15/03/1997	4a/C2	06/11/1997	8a/C5	12/01/1998	1a/C4	19/03/1998	6/C3
17/03/1997	4a/C2	07/11/1997	3cd/C5	13/01/1998	8a/C5	21/03/1998	5a/C3
18/03/1997	4a/C3	09/11/1997	3cd/C8	14/01/1998	8b/C8	22/03/1998	6/C2
20/03/1997	5b/C4	10/11/1997	8a/C8	15/01/1998	2a/C6	23/03/1998	6ef/C3
21/03/1997	4a/C2	11/11/1997	8a/C5	16/01/1998	8a/C9	25/03/1998	3ab/C1
23/03/1997	3cd/C3	12/11/1997	8a/C8	18/01/1998	3cd/C10	26/03/1998	3ab/C2
24/03/1997	3cd/C4	13/11/1997	9cd/C1	19/01/1998	8b/C9	27/03/1998	3ab/C4
25/03/1997	6ef/C4	14/11/1997	4a/C1	20/01/1998	5b/C7	29/03/1998	6/C2
27/03/1997	3ab/C2	15/11/1997	4a/C1	22/01/1998	6/C1	31/03/1998	1a/C2
28/03/1997	3cd/C7	17/11/1997	6ef/C1	23/01/1998	6/C1	01/04/1998	8a/C4
29/03/1997	6/C2	18/11/1997	6ef/C1	24/01/1998	6/C1	04/04/1998	8a/C8

06/04/1998	8a/C4	01/02/1999	6/C1	06/10/1999	4a/C1	14/12/1999	3cd/C9
07/04/1998	8b/C8	02/02/1999	6/C1	08/10/1999	3ab/C2	15/12/1999	8b/C7
10/04/1998	8c/C9	04/02/1999	3ab/C1	09/10/1999	3ab/C2	16/12/1999	5b/C7
12/04/1998	8b/C7	05/02/1999	4b/C7	11/10/1999	3ab/C2	17/12/1999	3ab/C1
13/04/1998	8b/C7	06/02/1999	4b/C9	12/10/1999	6/C2	18/12/1999	5b/C8
14/04/1998	8b/C4	07/02/1999	4b/C9	13/10/1999	6/C6	19/12/1999	8a/C7
15/04/1998	8b/C5	08/02/1999	9cd/C10	14/10/1999	6/C4	20/12/1999	8a/C3
04/12/1998	5b/C7	10/02/1999	5b/C7	15/10/1999	6ef/C6	21/12/1999	5a/C1
08/12/1998	5a/C1	11/02/1999	7b/6b/C7	16/10/1999	6ef/C4	22/12/1999	1a/C1
09/12/1998	2a/C6	13/02/1999	3ab/C1	17/10/1999	6/C4	23/12/1999	1a/C1
10/12/1998	2a/C6	16/02/1999	8a/C6	18/10/1999	7a/C4	24/12/1999	3cd/C6
11/12/1998	4a/C6	19/02/1999	4b/C6	19/10/1999	7a/C8	25/12/1999	3cd/C9
12/12/1998	4a/C6	20/02/1999	3cd/C8	20/10/1999	7a/C5	26/12/1999	3cd/C9
13/12/1998	4a/C6	21/02/1999	3cd/C10	21/10/1999	1a/C5	27/12/1999	3cd/C10
14/12/1998	6/C1	23/02/1999	4b/C9	22/10/1999	1b/C5	28/12/1999	8d/C9
16/12/1998	6/C1	24/02/1999	4b/C6	23/10/1999	1b/C8	01/01/2000	3ab/C1
17/12/1998	6/C1	25/02/1999	3ab/C1	24/10/1999	8a/C5	02/01/2000	6/C1
18/12/1998	6/C1	26/02/1999	3ab/C1	26/10/1999	2a/C4	03/01/2000	6/C1
19/12/1998	3cd/C1	01/03/1999	3ab/C2	30/10/1999	8a/C5	04/01/2000	3ab/C1
20/12/1998	8c/C6	03/03/1999	8a/C5	31/10/1999	2a/C3	05/01/2000	6/C1
21/12/1998	5a/C7	05/03/1999	8c/C8	01/11/1999	2a/C2	07/01/2000	3ab/C1
22/12/1998	6/C1	06/03/1999	8c/C6	02/11/1999	8a/C6	09/01/2000	5b/C6
23/12/1998	6/C1	07/03/1999	8c/C6	03/11/1999	6/C6	10/01/2000	3ab/C1
24/12/1998	3ab/C6	08/03/1999	7a/C7	04/11/1999	6/C6	11/01/2000	6/C1
25/12/1998	3ab/C1	09/03/1999	2b/C4	05/11/1999	8a/C4	13/01/2000	1a/C1
26/12/1998	3ab/C6	13/03/1999	1a/C2	06/11/1999	8b/C7	14/01/2000	7b/6b/C1
27/12/1998	2a/C6	14/03/1999	1a/C4	07/11/1999	6/C7	15/01/2000	6/C1
28/12/1998	2b/C1	15/03/1999	3ab/C2	08/11/1999	6/C1	16/01/2000	6/C6
29/12/1998	1a/C2	16/03/1999	6/C2	11/11/1999	7b/6b/C6	17/01/2000	6/C6
02/01/1999	8a/C4	18/03/1999	6/C3	12/11/1999	6/C4	18/01/2000	6/C1
03/01/1999	3cd/C8	19/03/1999	6/C3	13/11/1999	6/C2	19/01/2000	6/C1
04/01/1999	2a/C6	21/03/1999	8a/C4	14/11/1999	6/C6	20/01/2000	6/C1
05/01/1999	6/C1	22/03/1999	8a/C7	15/11/1999	6/C6	22/01/2000	5b/C6
06/01/1999	6/C2	23/03/1999	4a/C6	17/11/1999	8a/C7	23/01/2000	5b/C7
07/01/1999	3cd/C2	24/03/1999	6/C2	19/11/1999	8d/C7	24/01/2000	6/C7
08/01/1999	3cd/C8	25/03/1999	8a/C5	20/11/1999	7a/C6	25/01/2000	6/C1
09/01/1999	9ab/C7	26/03/1999	8a/C5	21/11/1999	7a/C6	26/01/2000	6/C1
10/01/1999	9ab/C5	28/03/1999	7b/6b/C6	22/11/1999	5b/C6	28/01/2000	3ab/C1
11/01/1999	8d/C8	30/03/1999	2a/C2	23/11/1999	5b/C6	29/01/2000	3cd/C8
12/01/1999	3cd/C8	01/04/1999	8a/C2	26/11/1999	6/C1	30/01/2000	4b/C6
14/01/1999	3cd/C6	02/04/1999	8a/C3	27/11/1999	2a/C1	01/02/2000	6/C1
15/01/1999	3ab/C1	03/04/1999	8a/C4	28/11/1999	2a/C1	03/02/2000	4a/C1
16/01/1999	2a/C6	04/04/1999	5a/C4	29/11/1999	6/C1	04/02/2000	6/C1
17/01/1999	2a/C2	05/04/1999	3ab/C2	30/11/1999	6/C1	06/02/2000	3ab/C1
18/01/1999	3ab/C1	06/04/1999	3ab/C2	01/12/1999	3ab/C1	07/02/2000	3cd/C6
19/01/1999	2a/C1	07/04/1999	8a/C8	02/12/1999	3cd/C1	08/02/2000	3cd/C8
20/01/1999	2a/C1	08/04/1999	6/C7	04/12/1999	3cd/C6	09/02/2000	4a/C7
22/01/1999	3ab/C1	10/04/1999	3ab/C3	05/12/1999	4b/C7	10/02/2000	3ab/C1
23/01/1999	3ab/C1	11/04/1999	3ab/C7	06/12/1999	3ab/C1	11/02/2000	3ab/C6
24/01/1999	3ab/C1	13/04/1999	9cd/C7	07/12/1999	3ab/C1	12/02/2000	3ab/C6
25/01/1999	3ab/C1	14/04/1999	8b/C5	08/12/1999	3cd/C1	13/02/2000	3cd/C6
27/01/1999	4b/C9	01/10/1999	3cd/C4	09/12/1999	8b/C6	14/02/2000	4a/C1
28/01/1999	9cd/C10	02/10/1999	8b/C5	11/12/1999	3cd/C9	15/02/2000	3cd/C8
29/01/1999	5b/C7	03/10/1999	8a/C8	12/12/1999	3cd/C9	16/02/2000	8b/C9
30/01/1999	6/C1	04/10/1999	8a/C4	13/12/1999	3cd/C9	17/02/2000	9cd/C9

18/02/2000	4b/C10	13/10/2000	9cd/C8	07/01/2001	8a²/C6	14/03/2001	3cd/C7
19/02/2000	4b/C9	14/10/2000	1b/C9	08/01/2001	8d/C7	16/03/2001	7ac/C5
20/02/2000	5a/C7	17/10/2000	1b/C4	10/01/2001	7ac/C6	17/03/2001	3cd/C8
23/02/2000	3ab/C1	19/10/2000	1a/C4	12/01/2001	7ac/C7	18/03/2001	3cd/C4
24/02/2000	3ab/C1	20/10/2000	1a/C4	14/01/2001	6/C1	19/03/2001	3cd/C4
25/02/2000	3cd/C1	21/10/2000	1a/C2	16/01/2001	7ac/C1	21/03/2001	3cd/C9
26/02/2000	6/C1	22/10/2000	1a/C2	17/01/2001	7ac/C6	22/03/2001	3cd/C5
27/02/2000	6/C2	23/10/2000	1a/C3	18/01/2001	7ac/C1	23/03/2001	2a/C5
28/02/2000	3cd/C2	24/10/2000	3cd/C4	19/01/2001	7b/6b/C6	24/03/2001	7ac/C5
29/02/2000	3cd/C9	25/10/2000	3cd/C2	20/01/2001	7b/6b/C6	25/03/2001	2b/C7
01/03/2000	8a²/C10	26/10/2000	3cd/C6	22/01/2001	1a/C4	26/03/2001	3cd/C4
02/03/2000	8a²/C7	27/10/2000	4a/C4	23/01/2001	3cd/C8	29/03/2001	8b/C8
03/03/2000	8a²/C1	28/10/2000	8a/C3	24/01/2001	1a/C8	30/03/2001	9cd/C7
05/03/2000	6/C1	30/10/2000	8b/C5	25/01/2001	1b/C8	31/03/2001	2a/C2
06/03/2000	3ab/C1	31/10/2000	8b/C8	26/01/2001	3cd/C4	01/04/2001	6/C2
07/03/2000	4b/C2	01/11/2000	8b/C4	27/01/2001	3cd/C4	02/04/2001	8a/C2
08/03/2000	4b/C2	02/11/2000	8b/C5	28/01/2001	8b/C5	03/04/2001	3cd/C4
09/03/2000	4a/C2	04/11/2000	3cd/C7	29/01/2001	4a/C4	04/04/2001	3cd/C8
10/03/2000	4a/C2	08/11/2000	8b/C4	30/01/2001	4a/C7	05/04/2001	3cd/C3
11/03/2000	4a/C2	09/11/2000	8a²/C6	31/01/2001	6/C1	06/04/2001	3cd/C8
12/03/2000	3ab/C2	10/11/2000	3cd/C7	01/02/2001	5a/C6	07/04/2001	8b/C8
13/03/2000	3ab/C2	11/11/2000	8a/C1	02/02/2001	4a/C1	08/04/2001	4b/C7
14/03/2000	8a²/C3	13/11/2000	9ab/C5	03/02/2001	3cd/C9	09/04/2001	4b/C6
17/03/2000	5b/C2	14/11/2000	9ab/C8	04/02/2001	3cd/C6	10/04/2001	8b/C7
18/03/2000	5b/C6	15/11/2000	9cd/C6	05/02/2001	2b/C6	12/04/2001	5a/C4
19/03/2000	6/C3	16/11/2000	9cd/C8	06/02/2001	2b/C4	13/04/2001	5a/C3
20/03/2000	6/C2	17/11/2000	9cd/C9	07/02/2001	2b/C5	14/04/2001	5a/C3
23/03/2000	8a/C4	18/11/2000	8a/C1	09/02/2001	4a/C7	15/04/2001	8a²/C8
27/03/2000	8c/C7	19/11/2000	8b/C6	10/02/2001	4a/C1	01/10/2001	2a/C4
28/03/2000	7b/6b/C4	20/11/2000	8b/C8	11/02/2001	6/C1	03/10/2001	2b/C3
29/03/2000	7b/6b/C7	21/11/2000	8b/C6	12/02/2001	3ab/C2	05/10/2001	8a/C4
30/03/2000	7b/6b/C6	23/11/2000	9cd/C5	13/02/2001	6/C4	07/10/2001	8a/C8
31/03/2000	8b/C4	24/11/2000	9cd/C6	14/02/2001	6/C2	09/10/2001	8b/C4
01/04/2000	2b/C7	25/11/2000	3cd/C9	15/02/2001	6/C2	12/10/2001	6/C2
02/04/2000	8a/C5	26/11/2000	3cd/C9	16/02/2001	6/C2	13/10/2001	6/C2
03/04/2000	8a/C5	28/11/2000	2a/C6	17/02/2001	6/C6	14/10/2001	1a/C4
04/04/2000	8c/C5	30/11/2000	2a/C2	19/02/2001	6/C1	15/10/2001	1a/C2
05/04/2000	8a²/C6	01/12/2000	8a/C4	21/02/2001	6/C1	17/10/2001	1a/C2
07/04/2000	6/C2	02/12/2000	8a/C4	22/02/2001	4b/C4	18/10/2001	1a/C4
08/04/2000	6/C2	03/12/2000	1b/C6	24/02/2001	5b/C4	19/10/2001	1a/C2
10/04/2000	7b/6b/C5	04/12/2000	2a/C1	25/02/2001	5b/C7	20/10/2001	8a/C5
11/04/2000	8a/C5	05/12/2000	1a/C2	26/02/2001	9cd/C3	22/10/2001	7ac/C4
12/04/2000	8b/C5	07/12/2000	8a/C5	28/02/2001	8c/C5	23/10/2001	7ac/C6
13/04/2000	9ab/C8	08/12/2000	8a/C5	01/03/2001	8b/C7	24/10/2001	7ac/C4
14/04/2000	2b/C5	09/12/2000	2b/C6	02/03/2001	8a/C8	25/10/2001	3ab/C3
15/04/2000	2b/C5	10/12/2000	3cd/C6	03/03/2001	2b/C5	26/10/2001	2a/C2
01/10/2000	1b/C7	11/12/2000	2a/C1	04/03/2001	2b/C9	28/10/2001	3ab/C3
02/10/2000	1b/C7	12/12/2000	2a/C4	05/03/2001	2a/C4	29/10/2001	3ab/C2
04/10/2000	3ab/C2	14/12/2000	8a²/C8	06/03/2001	1a/C4	01/11/2001	6/C4
06/10/2000	6ef/C7	31/12/2000	4a/C1	07/03/2001	1a/C4	03/11/2001	6/C1
07/10/2000	6ef/C3	01/01/2001	8a/C6	08/03/2001	1b/C8	04/11/2001	3ab/C2
09/10/2000	3cd/C8	03/01/2001	3cd/C6	09/03/2001	3cd/C7	05/11/2001	3ab/C6
10/10/2000	3cd/C8	04/01/2001	3cd/C8	11/03/2001	3cd/C8	06/11/2001	4b/C6
11/10/2000	8b/C8	05/01/2001	2b/C9	12/03/2001	3cd/C9	07/11/2001	4b/C6
12/10/2000	9ab/C8	06/01/2001	8b/C9	13/03/2001	3cd/C8	08/11/2001	8a²/C9

09/11/2001	7b/6b/C7	14/01/2002	3ab/C1	23/03/2002	5a/C3	14/11/2002	8a/C5
10/11/2001	6/C1	15/01/2002	3ab/C1	24/03/2002	5a/C3	15/11/2002	9ab/C5
11/11/2001	3ab/C6	16/01/2002	3ab/C6	25/03/2002	5a/C2	17/11/2002	9ab/C4
12/11/2001	5b/C6	17/01/2002	3ab/C1	26/03/2002	6/C3	18/11/2002	9ab/C6
13/11/2001	5b/C6	18/01/2002	3ab/C1	27/03/2002	6/C3	19/11/2002	6ef/C6
14/11/2001	6/C6	19/01/2002	3cd/C6	28/03/2002	6/C2	20/11/2002	1a/C5
15/11/2001	6/C2	20/01/2002	3ab/C1	30/03/2002	6/C4	21/11/2002	8a/C5
16/11/2001	6/C1	21/01/2002	8a/C1	31/03/2002	6/C2	22/11/2002	8a/C6
17/11/2001	6/C1	22/01/2002	2a/C6	02/04/2002	1a/C2	23/11/2002	8a/C4
18/11/2001	3ab/C6	25/01/2002	4a/C1	03/04/2002	1a/C5	24/11/2002	1b/C5
19/11/2001	3ab/C6	27/01/2002	3cd/C8	04/04/2002	6ef/C3	26/11/2002	1b/C6
21/11/2001	3ab/C1	28/01/2002	3ab/C1	05/04/2002	6ef/C3	27/11/2002	8a/C6
23/11/2001	5a/C7	29/01/2002	3ab/C1	06/04/2002	7b/6b/C4	29/11/2002	8c/C6
24/11/2001	4a/C1	30/01/2002	2a/C2	07/04/2002	7b/6b/C4	01/12/2002	3cd/C6
25/11/2001	5a/C1	31/01/2002	3ab/C6	08/04/2002	7b/6b/C6	02/12/2002	9cd/C6
26/11/2001	3cd/C6	01/02/2002	8a/C2	09/04/2002	7b/6b/C7	03/12/2002	9cd/C7
29/11/2001	3ab/C3	02/02/2002	1a/C2	10/04/2002	7b/6b/C5	04/12/2002	9cd/C1
30/11/2001	1a/C7	05/02/2002	2b/C8	11/04/2002	6ef/C5	05/12/2002	7b/6b/C6
02/12/2001	1a/C6	06/02/2002	9cd/C9	13/04/2002	8d/C8	06/12/2002	7b/6b/C6
03/12/2001	1a/C6	07/02/2002	3ab/C7	14/04/2002	8d/C7	07/12/2002	7b/6b/C6
05/12/2001	3cd/C6	08/02/2002	3ab/C6	15/04/2002	8d/C3	10/12/2002	7ac/C4
06/12/2001	4a/C6	09/02/2002	3cd/C7	01/10/2002	6/C2	11/12/2002	7ac/C4
08/12/2001	6/C1	10/02/2002	4b/C7	02/10/2002	6/C4	12/12/2002	7ac/C4
09/12/2001	6/C1	11/02/2002	2a/C2	03/10/2002	3ab/C3	13/12/2002	7ac/C1
10/12/2001	6/C1	12/02/2002	3ab/C2	05/10/2002	4a/C3	14/12/2002	7ac/C4
11/12/2001	6/C1	13/02/2002	9ab/C2	07/10/2002	5a/C4	15/12/2002	7ac/C8
12/12/2001	6/C1	16/02/2002	3ab/C6	08/10/2002	8a/C3	17/12/2002	7b/6b/C8
13/12/2001	6/C6	19/02/2002	8a²/C4	09/10/2002	7ac/C5	18/12/2002	6/C6
14/12/2001	6/C5	20/02/2002	4b/C10	11/10/2002	7ac/C7	19/12/2002	6/C1
16/12/2001	6/C6	21/02/2002	4b/C7	12/10/2002	9cd/C4	20/12/2002	8a/C6
17/12/2001	6/C1	22/02/2002	5b/C1	13/10/2002	9cd/C4	21/12/2002	8a/C7
18/12/2001	6/C1	24/02/2002	4b/C9	14/10/2002	2b/C8	22/12/2002	8a/C8
19/12/2001	6/C1	25/02/2002	3cd/C6	16/10/2002	9ab/C5	23/12/2002	1a/C6
20/12/2001	6/C6	26/02/2002	3cd/C8	17/10/2002	9ab/C9	24/12/2002	1a/C6
21/12/2001	8a²/C1	27/02/2002	3cd/C8	18/10/2002	9cd/C8	25/12/2002	1a/C6
22/12/2001	8a²/C7	28/02/2002	9ab/C7	19/10/2002	4b/C6	26/12/2002	2b/C6
23/12/2001	6/C7	01/03/2002	9ab/C8	20/10/2002	8a/C2	27/12/2002	8a/C5
24/12/2001	8a²/C1	02/03/2002	9ab/C9	21/10/2002	8a/C8	28/12/2002	9cd/C8
25/12/2001	8a²/C1	03/03/2002	6/C6	22/10/2002	8a/C8	29/12/2002	3cd/C6
26/12/2001	9cd/C7	04/03/2002	3ab/C1	24/10/2002	3cd/C4	30/12/2002	3cd/C8
27/12/2001	9cd/C7	05/03/2002	3ab/C5	25/10/2002	3cd/C8	31/12/2002	4a/C6
28/12/2001	3cd/C8	06/03/2002	3ab/C7	26/10/2002	3cd/C3	01/01/2003	2b/C8
31/12/2001	6/C1	07/03/2002	4a/C4	29/10/2002	6/C2	02/01/2003	3cd/C9
01/01/2002	6/C1	08/03/2002	6/C2	31/10/2002	8a/C2	03/01/2003	3cd/C9
03/01/2002	5a/C1	09/03/2002	3ab/C2	01/11/2002	3ab/C2	04/01/2003	3ab/C9
04/01/2002	6/C1	10/03/2002	6/C3	02/11/2002	3cd/C8	05/01/2003	5b/C7
05/01/2002	6/C1	11/03/2002	2a/C2	03/11/2002	3cd/C9	06/01/2003	7b/6b/C6
06/01/2002	6/C1	12/03/2002	2a/C2	04/11/2002	9cd/C7	08/01/2003	7ac/C6
07/01/2002	6/C1	14/03/2002	7ac/C5	05/11/2002	7b/6b/C7	09/01/2003	7b/6b/C1
08/01/2002	6/C1	15/03/2002	7ac/C5	07/11/2002	8b/C7	10/01/2003	7b/6b/C6
09/01/2002	6/C1	16/03/2002	1a/C4	08/11/2002	4a/C3	11/01/2003	6/C1
10/01/2002	6/C1	17/03/2002	1a/C2	09/11/2002	4b/C9	12/01/2003	6/C1
11/01/2002	6/C1	18/03/2002	3cd/C4	10/11/2002	4b/C8	14/01/2003	3ab/C1
12/01/2002	6/C1	19/03/2002	3cd/C9	11/11/2002	3cd/C8	16/01/2003	3ab/C1
13/01/2002	6/C1	20/03/2002	4a/C7	12/11/2002	2a/C1	17/01/2003	3ab/C1

19/01/2003	8a/C4	28/03/2003	7ac/C4	19/11/2003	3cd/C2	07/02/2004	3cd/C7
20/01/2003	8a/C4	29/03/2003	7b/6b/C3	20/11/2003	2a/C2	08/02/2004	8a²/C6
21/01/2003	1b/C9	31/03/2003	6/C3	21/11/2003	2a/C4	09/02/2004	4a/C1
22/01/2003	8b/C9	01/04/2003	3ab/C2	22/11/2003	1a/C5	10/02/2004	6/C1
23/01/2003	5b/C7	02/04/2003	8a²/C7	23/11/2003	1a/C5	11/02/2004	5b/C6
24/01/2003	3ab/C6	03/04/2003	9cd/C3	24/11/2003	8a/C5	12/02/2004	5a/C1
25/01/2003	3ab/C1	04/04/2003	6/C2	25/11/2003	2b/C4	14/02/2004	6/C1
26/01/2003	3ab/C6	06/04/2003	5a/C7	27/11/2003	9cd/C9	17/02/2004	6/C1
27/01/2003	3ab/C1	07/04/2003	5a/C3	28/11/2003	8d/C7	18/02/2004	7b/6b/C7
28/01/2003	4b/C7	08/04/2003	5a/C3	29/11/2003	8d/C1	19/02/2004	7b/6b/C6
29/01/2003	5b/C7	09/04/2003	7b/6b/C9	30/11/2003	1b/C6	20/02/2004	7b/6b/C5
30/01/2003	5b/C7	11/04/2003	8b/C5	01/12/2003	8a/C5	21/02/2004	7ac/C5
31/01/2003	5a/C7	12/04/2003	8a/C7	02/12/2003	8a/C5	22/02/2004	8a²/C4
01/02/2003	3cd/C1	13/04/2003	1a/C2	03/12/2003	8a/C5	23/02/2004	8a²/C7
02/02/2003	8a²/C6	14/04/2003	1a/C4	05/12/2003	6/C1	24/02/2004	8a²/C1
04/02/2003	8b/C9	15/04/2003	6ef/C2	06/12/2003	6/C1	25/02/2004	8a²/C1
06/02/2003	3cd/C7	01/10/2003	8a/C5	07/12/2003	6/C1	26/02/2004	9cd/C6
07/02/2003	4a/C1	02/10/2003	8a/C4	08/12/2003	6/C1	27/02/2004	9cd/C6
08/02/2003	6/C6	03/10/2003	9ab/C8	09/12/2003	6/C2	06/03/2004	9ab/C7
09/02/2003	3ab/C6	04/10/2003	8a²/C8	10/12/2003	3ab/C4	07/03/2004	9ab/C7
11/02/2003	3ab/C1	05/10/2003	9cd/C7	11/12/2003	3ab/C1	08/03/2004	6ef/C7
12/02/2003	3ab/C1	06/10/2003	3cd/C2	12/12/2003	3ab/C2	09/03/2004	6ef/C3
13/02/2003	6ef/C1	07/10/2003	4b/C9	14/12/2003	4b/C7	10/03/2004	6ef/C3
14/02/2003	6ef/C1	09/10/2003	4b/C7	15/12/2003	4b/C7	12/03/2004	1a/C4
16/02/2003	6ef/C1	10/10/2003	3ab/C2	17/12/2003	4a/C6	14/03/2004	3ab/C4
17/02/2003	6ef/C1	11/10/2003	4a/C2	18/12/2003	6/C1	15/03/2004	2a/C2
18/02/2003	6ef/C1	12/10/2003	5a/C2	19/12/2003	3ab/C6	17/03/2004	6/C2
19/02/2003	6ef/C1	13/10/2003	5a/C2	21/12/2003	5b/C9	18/03/2004	3ab/C2
22/02/2003	1a/C1	14/10/2003	5a/C7	22/12/2003	5b/C7	19/03/2004	3cd/C3
23/02/2003	1a/C1	15/10/2003	5a/C3	23/12/2003	5b/C1	20/03/2004	3cd/C6
24/02/2003	1a/C2	16/10/2003	6/C2	24/12/2003	6/C1	21/03/2004	3cd/C3
25/02/2003	1a/C2	19/10/2003	7b/6b/C4	25/12/2003	3ab/C1	22/03/2004	8a²/C7
27/02/2003	8a/C5	20/10/2003	9ab/C8	27/12/2003	3cd/C6	23/03/2004	5b/C7
28/02/2003	8a/C4	22/10/2003	9ab/C1	29/12/2003	9cd/C6	24/03/2004	7b/6b/C7
01/03/2003	8a/C4	23/10/2003	8c/C7	30/12/2003	9cd/C6	25/03/2004	7b/6b/C7
02/03/2003	3cd/C9	26/10/2003	6/C4	31/12/2003	6ef/C6	26/03/2004	6/C6
03/03/2003	4b/C1	27/10/2003	6/C6	01/01/2004	5b/C6	27/03/2004	6/C2
04/03/2003	4a/C2	28/10/2003	3ab/C4	04/01/2004	4b/C1	29/03/2004	6/C2
05/03/2003	8a/C2	29/10/2003	3cd/C9	07/01/2004	4a/C1	30/03/2004	6/C5
06/03/2003	3cd/C7	30/10/2003	3cd/C7	08/01/2004	9ab/C9	31/03/2004	7ac/C4
07/03/2003	3ab/C2	02/11/2003	2a/C4	09/01/2004	3cd/C9	01/04/2004	7ac/C2
08/03/2003	3ab/C2	04/11/2003	4a/C1	11/01/2004	9ab/C9	02/04/2004	1b/C5
09/03/2003	6/C2	05/11/2003	6/C2	12/01/2004	3cd/C10	03/04/2004	8a/C7
10/03/2003	2a/C2	06/11/2003	6ef/C2	23/01/2004	4a/C1	05/04/2004	9cd/C4
11/03/2003	2a/C2	07/11/2003	6ef/C4	24/01/2004	4a/C7	07/04/2004	8d/C7
14/03/2003	6/C2	08/11/2003	8c/C4	25/01/2004	4a/C7	08/04/2004	7b/6b/C3
15/03/2003	6/C2	10/11/2003	1a/C4	26/01/2004	8c/C9	09/04/2004	8a²/C8
17/03/2003	6/C2	11/11/2003	6/C2	29/01/2004	4b/C7	10/04/2004	8a²/C7
18/03/2003	6/C2	12/11/2003	7ac/C3	30/01/2004	3ab/C1	11/04/2004	6/C3
19/03/2003	6/C2	13/11/2003	7ac/C2	31/01/2004	3cd/C1	12/04/2004	3ab/C3
20/03/2003	6/C3	14/11/2003	2b/C6	02/02/2004	2a/C1	13/04/2004	3ab/C7
22/03/2003	6/C2	15/11/2003	2b/C4	03/02/2004	2a/C1	14/04/2004	3ab/C2
23/03/2003	6/C2	16/11/2003	9ab/C4	04/02/2004	2a/C2	15/04/2004	1a/C4
24/03/2003	6/C2	17/11/2003	3cd/C6	05/02/2004	2a/C2	26/10/2004	1b/C8
27/03/2003	7b/6b/C3	18/11/2003	3cd/C1	06/02/2004	2a/C2	27/10/2004	8a/C5

28/10/2004	8a/C5	13/03/2005	4a/C2
29/10/2004	8a/C5	16/03/2005	2a/C2
30/10/2004	9ab/C4	17/03/2005	6/C2
31/10/2004	7b/6b/C4	18/03/2005	6/C2
01/11/2004	7ac/C6	19/03/2005	5a/C3
02/11/2004	7ac/C8	21/03/2005	6/C2
03/11/2004	6/C4	22/03/2005	1a/C4
04/11/2004	9ab/C4	24/03/2005	1b/C4
05/11/2004	8a²/C3	25/03/2005	1a/C4
08/11/2004	5a/C3	26/03/2005	7ac/C4
09/11/2004	8d/C7	27/03/2005	7ac/C6
10/11/2004	8c/C1	29/03/2005	7ac/C4
12/11/2004	3ab/C6	30/03/2005	7ac/C8
13/11/2004	6/C6	31/03/2005	6ef/C6
14/11/2004	6/C3		
15/11/2004	6/C1		
16/11/2004	4a/C1		
17/11/2004	4a/C1		
19/11/2004	5b/C7		
20/11/2004	4a/C6		
21/11/2004	4a/C6		
22/11/2004	3ab/C1		
24/11/2004	6/C1		
25/11/2004	6/C1		
27/11/2004	3ab/C1		
28/11/2004	9ab/C4		
30/11/2004	8c/C6		
01/02/2005	5b/C7		
03/02/2005	4a/C1		
04/02/2005	3ab/C1		
06/02/2005	6/C1		
08/02/2005	6/C1		
09/02/2005	3ab/C1		
10/02/2005	3ab/C1		
14/02/2005	5b/C7		
17/02/2005	6/C1		
18/02/2005	6/C1		
19/02/2005	9cd/C7		
22/02/2005	7b/6b/C6		
23/02/2005	7b/6b/C1		
24/02/2005	7b/6b/C1		
26/02/2005	7b/6b/C3		
27/02/2005	6/C7		
28/02/2005	6/C1		
01/03/2005	9ab/C1		
02/03/2005	9ab/C1		
03/03/2005	9ab/C4		
04/03/2005	9ab/C7		
05/03/2005	7b/6b/C7		
06/03/2005	5b/C7		
07/03/2005	5b/C1		
08/03/2005	6/C1		
10/03/2005	6/C1		
11/03/2005	8a²/C1		
12/03/2005	8a²/C4		

Annexe 3 : stations de mesures et métrologie

Fiche d'étalonnage température		
Méthode : essais avec enregistrement des mesures	N° U12-2	
Date: 25/09/2005		
Capteur		
identification:	U12-T2	
type:	-	
plage de mesure :	-30 à +70	
Chaîne de mesure :	U12 Onset	
identification:	-	
résolution de la chaîne :	0.1	
ETM:	0.8	
Etalon		
identification :	Tréfi+correction	
type:	K	
Chaîne de mesure :	Thermologger Voltcraft K204	
identification:	50103060	
résolution de la chaîne:	0.1	
exactitude de la chaîne :	0.3	
Synthèse des résultats		
moyenne	étalon	capteur
14.9	14.9	15.4
écart-type	0.1	0.1
Max-Min	0.2	0.2
nombre de mesures	47	47
pas de mesure (s)	00:00:10	00:00:10
Correction et calculs d'incertitudes		
C : étalon-capteur (°C) = -0.43		
U (+/- °C) = 0.30		
Incertitude (+/- °C) = 0.6		
ETM (°C) = 0.8		
vérification:		
non conforme		
CORRECTION = -0.43°C		

Fiche d'étalonnage température		
Méthode : essais avec enregistrement des mesures	N° U12-2c	
Date: 25/09/2005		
CORRECTION = -0.43°C		
Capteur		
identification:	U12-T2	
type:	-	
plage de mesure :	-30 à +70	
Chaîne de mesure :	U12 Onset	
identification:	-	
résolution de la chaîne :	0.1	
ETM:	0.8	
Etalon		
identification :	Tréfi+correction	
type:	K	
Chaîne de mesure :	Thermologger Voltcraft K204	
identification:	50103060	
résolution de la chaîne:	0.1	
exactitude de la chaîne :	0.3	
Synthèse des résultats		
moyenne	étalon	capteur
14.9	14.9	14.9
écart-type	0.1	0.1
Max-Min	0.2	0.2
nombre de mesures	47	47
pas de mesure (s)	00:00:10	00:00:10
Correction et calculs d'incertitudes		
C : étalon-capteur (°C) = 0.00		
U (+/- °C) = 0.30		
Incertitude (+/- °C) = 0.6		
ETM (°C) = 0.8		
vérification:		
conforme		

Fig. A1 : Fiches d'étalonnage de la sonde Hobo TMC6-H par rapport au thermocouple

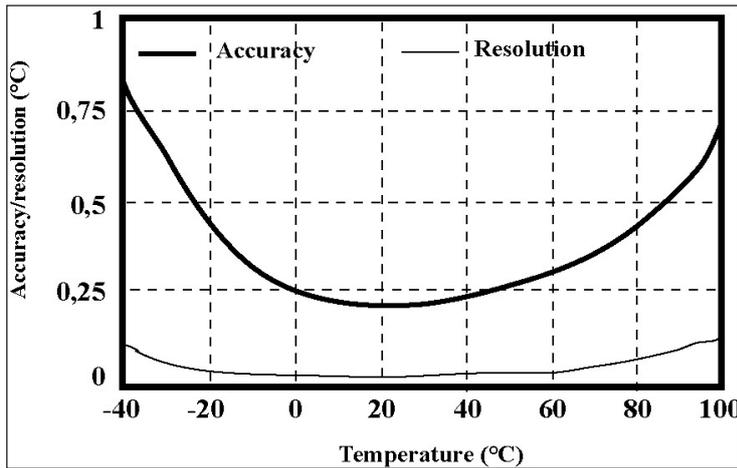


Fig. A2 : Précision et résolution de la sonde Hobo TMC6-H en fonction de la température.



TRANSMICOR série T220

TRANSMETTEUR D'HUMIDITE RELATIVE HVAC



Caracteristiques principales

- Gamme de mesure: 0 ... 98 %HR, -30 ... +70 °C
- Précision: ± 2 %HR, ± 0,2 °C
- Signal de sortie: 4 ... 20mA (2 fils), 0 ... 1V, 0 ... 5V, 0 ... 10V, 0 ... 20mA (3 fils), Pt100 Ω 1/3 DIN
- Tension d'alimentation: 8...33VDC
- Module de mesure S6000 interchangeable
- Mesure d'humidité compensée en température et linéarisée
- Capteur d'humidité capacitif à couche mince
- Temps de réponse du capteur: < 10 secondes
- Conformité CE

Les transmetteurs T220 sont équipés du capteur-convertisseur d'humidité relative HUMICOR S6000, élément innovateur dans le domaine de la mesure d'humidité. Son concept est basé sur l'interchangeabilité, ne nécessitant pas de recalibrage grâce à son électronique miniaturisée.

DONNEES TECHNIQUES		
	Humidité	Température
Technique de raccordement	2 ou 3 fils	2 ou 3 fils
Précision @ 23 °C	Hystérésis et non-linéarité incluses ± 2 %HR (5, 95 %HR) ± 2,5 %HR (< 5 %HR, > 95 %HR)	Pt100 Ω 1/3 DIN directe: ± 0,2 °C Sortie 4/20mA: ± 0,3 °C
Dérive de la carte température	/	< 0,02 °C / °C
Gamme de mesure	0 ... 98 %HR (*)	-30...+70 °C
Temps de réponse du capteur	(90% de l'échelon de 11% à 75 %HR)	/
Signal de sortie	T220.1 4...20mA T220.2 0...10V, 0...5V, 0...1V, 0...20mA	4...20mA, Pt100 Ω 1/3 DIN (3 fils) Pt100 Ω 1/3 DIN (3 fils)
Echelle de température	/	0...50 °C, -30...70 °C -30...20 °C
Alimentation: E	Sortie 4/20mA: E=9...33 VDC Sortie 0...10V: E=14...33 VDC Sortie 0...5V: E=10...33 VDC Sortie 0...1V: E=8...33VDC Sortie 0...20mA: E=15...33VDC	
Résistance de charge: R	Sortie 4/20mA: R < ((E - 9) / 0.02) Ω Sortie 0...10V: R > 1KΩ Sortie 0...5V: R > 500 Sortie 0...1V: R > 100... Sortie 0/20mA: R < 600Ω	
Plage admissible	Tête de mesure 0 ... 100 %HR Boîtier 0 ... 98 %HR (*) Stockage 0 ... 98 %HR (*)	-30 ... +85 °C -30 ... +70 °C -40 ... +70 °C
Boîtier	L = 200mm, ø maxi. = 34,5mm	
Dimension	ABS	
Matière	IP54	
Indice de protection		
Connexions électriques	Bornes à vis, capacité de serrage 1mm ³ maxi.	

(*) Sans condensation

DIMENSIONS

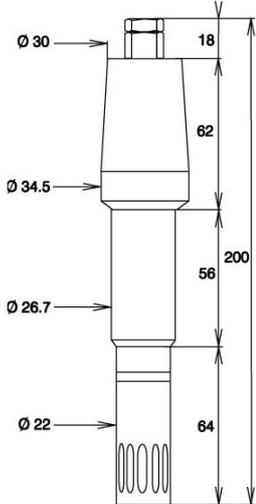
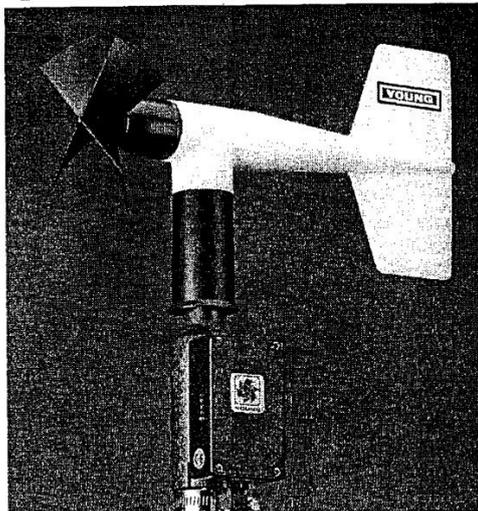


Fig. A3 : Fiche technique des sondes de température et d'humidité relative T220 utilisées par York dans les installations d'enneigement artificiel.



**MODEL 04101L
WIND MONITOR,
4-20mA OUTPUTS**



GENERAL

Power Requirement: 8 - 30 VDC
Operating Temperature: -50 to 50°C (-58 to 122°F)

INTRODUCTION

The Wind Monitor measures horizontal wind speed and direction. It is rugged and corrosion resistant, yet accurate and lightweight. The housing, nose cone, propeller, and other components are injection molded U.V. stabilized plastic. Both the propeller and vertical shafts use stainless steel precision grade ball bearings.

Propeller rotation produces an AC sine wave signal with frequency proportional to wind speed. Internal circuitry converts the raw signal to 4 to 20 mA current output over specified wind speed range.

Vane position is sensed by a 10K ohm precision conductive plastic potentiometer. This signal is also converted to 4 to 20mA output.

The instrument mounts directly on a standard one inch pipe, outside diameter 34 mm (1.34"). An orientation ring is provided so the instrument can be removed for maintenance and re-installed without loss of wind direction reference. Both the sensor and the orientation ring are secured to the mounting pipe by stainless steel band clamps. Electrical connections are made in a junction box at the base.

INITIAL CHECKOUT

When the Wind Monitor is unpacked it should be checked carefully for any signs of shipping damage. The instrument is aligned, balanced and fully calibrated before shipment; however, it should be checked both mechanically and electrically before installation. The vane and propeller should easily rotate 360° without friction. Check vane balance by holding the instrument base so the vane surface is horizontal. It should have near neutral torque without any particular tendency to rotate. A slight imbalance will not degrade performance.

INSTALLATION

Proper placement of the instrument is very important. Eddies from trees, buildings, or other structures can greatly influence wind speed and wind direction observations. To get meaningful data for most applications, locate the instrument well above or upwind from obstructions. As a general rule, the air flow around a structure is disturbed to twice the height of the structure upwind, six times the height downwind, and up to twice the height of the structure above ground. For some applications it may not be practical or necessary to meet these requirements.

**FAILURE TO PROPERLY GROUND THE WIND MONITOR
MAY RESULT IN ERRONEOUS SIGNALS
OR TRANSDUCER DAMAGE.**

Grounding the Wind Monitor is vitally important. Without proper grounding, static electrical charge can build up during certain atmospheric conditions and discharge through the transducers. This discharge may cause erroneous signals or transducer failure. To direct the discharge away from the transducers, the mounting post assembly in which the transducers are mounted is made with a special anti-static plastic. It is important that the mounting post be connected to a good earth ground. There are two ways this may be accomplished. First, the Wind Monitor may be mounted on a metal pipe which is connected to earth ground. The mounting pipe should

WIND SPEED SPECIFICATION SUMMARY

Range	0 to 60 m/s (134 mph), gust survival 100 m/s (220 mph)
Sensor	13 cm diameter 4-blade helicoid polypropylene propeller, 29.4 cm air passage per revolution
Distance Constant	2.0 m (6.6 ft.) for 63% recovery
Threshold Sensitivity	1.0 m/s (2.2 mph)
Transducer	Centrally mounted stationary coil, 2K Ohm nominal DC resistance
Output Signal	4 to 20 mA over specified wind speed range
Model No. Suffix	Range
M	0 to 50 M/S
P	0 to 100 MPH
N	0 to 100 KNOTS
K	0 to 200 KILOMETERS/HOUR

WIND DIRECTION (AZIMUTH) SPECIFICATION SUMMARY

Range	360° mechanical, 352° electrical (8° open)
Sensor	Balanced vane, 21 cm (8 in) turning radius.
Damping Ratio	0.3
Delay Distance	0.8 m (2.6 ft) for 50% recovery
Threshold Sensitivity	1.7 m/s (3.8 mph) at 10° displacement
Transducer	Precision conductive plastic potentiometer, 10K ohm resistance (±20%), 0.25% linearity, life expectancy 50 million revolutions, rated 1 watt at 40°C, 0 watts at 125°C
Output Signal	4 to 20 mA for 0 to 360°

Fig. A4 : Fiche technique des anémomètres utilisés par York dans les installations d'enneigement artificiel



Table des figures

Introduction générale

Fig. 1 : Les stations de ski en Savoie et leurs réseaux de mesures comparées aux stations météorologiques de Météo-France.	14
Fig. 2 : Influences des conditions météorologiques et topographiques à différentes échelles (du global ou local) sur les températures mesurées par un réseau de sondes en montagne et en hiver.	16
Fig. 3 : Variation de la température par rapport à la normale 1961-1990 entre les moyennes globales et les moyennes alpines de 1900 à 2000.	17
Fig. 4 : Localisation générale du domaine d'étude.	19

Chapitre I

Fig. I.1.1 : Les échelles spatio-temporelles utilisées en climatologie.	28
Fig. I.2.2 : Perturbation du gradient par l'état thermique du sol.	31

Chapitre II

Fig. II.1.1 : La Savoie et son relief.	44
Fig. II.1.2 : La vallée de la Maurienne et la station d'Aussois.	46
Fig. II.1.3 : Plan des pistes d'Aussois.	47
Fig. II.1.4 : Vue d'ensemble sur la vallée des Bellevilles avec les stations des Menuires et de Val Thorens.	48
Fig. II.1.5 : Plan des pistes des Menuires.	50
Fig. II.1.6 : Plan des pistes de Val Thorens.	51
Fig. II.1.7 : Le domaine skiable de Valloire.	52
Fig. II.1.8 : Plan des pistes de Valloire.	53
Fig. II.2.1 : Abaque de la température sèche en température humide à partir de l'hygrométrie.	56
Fig. II.2.2 : Schéma d'une sonde de température et d'humidité relative.	59
Fig. II.2.3 : Schéma d'un anémomètre.	59
Fig. II.2.4 : Interface du logiciel de gestion de l'installation de neige de culture.	61
Fig. II.3.1 : Position des sondes et noms des principaux lieux sur le versant sud d'Aussois.	63
Fig. II.3.2 : Positions et numéros des sondes à Aussois.	64
Fig. II.3.3 : Visualisation d'ensemble des sondes et des anémomètres aux Menuires et à Val Thorens en 2006 dans la vallée des Bellevilles.	66
Fig. II.3.4 : Positions et numéros des sondes aux Menuires en 2004-2005.	67
Fig. II.3.5 : Positions des sondes et unités climato-topographiques aux Menuires (désignation et localisation des lieux).	68
Fig. II.3.6 : Positions et numéros des sondes à Val Thorens en 2004-2005.	72
Fig. II.3.7 : Positions des sondes et unités climato-topographiques à Val Thorens (désignation et localisation des lieux).	72
Fig. II.3.8 : Position des sondes et noms des principaux lieux à Valloire.	74
Fig. II.3.9 : Positions et numéros des sondes à Valloire.	75

Chapitre III

Fig. III.2.1 : Localisation des stations de mesures Météo-France utilisées (flèches) et des domaines d'étude.	84
Fig. III.2.2 : Projection des variables sur le premier plan factoriel.	89
Fig. III.2.3 : Illustration des individus par une partition en 10 classes sur le premier plan factoriel.	89

Fig.III.2.4 : Répartition et évolution des pourcentages d'occurrence des classes par mois (1995-2005).	92
Fig.III.2.5 : Parangon de la classe C1.	93
Fig.III.2.6 : Parangon de la classe C2.	93
Fig.III.2.7 : Parangon de la classe C3.	93
Fig.III.2.8 : Parangon de la classe C4.	93
Fig.III.2.9 : Parangon de la classe C5.	94
Fig.III.2.10 : Parangon de la classe C6.	94
Fig.III.2.11 : Parangon de la classe C7.	94
Fig.III.2.12 : Parangon de la classe C8.	94
Fig.III.2.13 : Parangon de la classe C9.	94
Fig.III.2.14 : Parangon de la classe C10.	94
Fig.III.3.1 : Analyse factorielle des correspondances des types de circulations (carré bleu) et des types de temps (carré violet).	97
Fig.III.3.2 : Relations entre les types de circulations et les types de temps dans la classification Perret-Savoie (>10 cas).	98

Chapitre IV

Fig. IV.1.1 : Graphique (nuage de point) des températures moyennes horaires de la sonde York et de la sonde Hobo entre le 25/11/2004 au 27/01/2005.	107
Fig. IV.1.2 : Pourcentage des écarts de températures entre la sonde York et la sonde Hobo.	108
Fig. IV.1.3 : Comparaison des moyennes mobiles de la température mesurée par la sonde York et les écarts de températures sondeYork/sonde Hobo.	108
Fig. IV.1.4 : Relation entre les températures minimales journalières de la sonde Hobo et de la sonde York.	109
Fig. IV.1.5 : Moyennes mensuelles des températures minimales en °C des mois de janvier et février à Chambéry-Voglans (235m, courbe bleue, de 1989 à 2005) et à Bourg-Saint-Maurice (865m, courbe rouge, de 1989 à 2006).	110
Fig. IV.1.6 : Moyennes mensuelles des températures minimales en °C des mois de décembre, janvier, février et mars aux Menuires à 2420m (sonde 8, versant ouest, courbe bleue, de 1988 à 2006) et à 1675m (sonde 48, fond de vallée, courbe rouge, de 1991 à 2005).	112
Fig. IV.1.7 : Moyennes mensuelles des températures potentielles minimales journalières des mois de janvier de 1989 à 2006.	113
Fig. IV.1.8 : Moyennes mensuelles des températures minimales des mois de janvier en °C (1) et en températures potentielles (2) de 1989 à 2006 à Valloire, Aussois, les Menuires et Val Thorens.	114
Fig. IV.2.1 : Evolution des moyennes mensuelles des températures moyennes journalières à Aussois de 1998 à 2005 pour 17 altitudes différentes (correspondant aux 17 sondes).	116
Fig. IV.2.2 : Répartition spatiale des moyennes hivernales (de décembre à mars) des températures moyennes (1), minimales (2) et maximales (3) journalières à Aussois (1998/2005).	117
Fig. IV.2.3 : Position des sondes sur le MNT d'Aussois (équidistance des courbes de niveau : 100m).	117
Fig. IV.2.4 : Position des sondes sur le MNT de Valloire (équidistance des courbes de niveau : 100m).	119
Fig. IV.2.5 : Répartition spatiale des moyennes hivernales (de décembre à mars) des températures moyennes (1), minimales (2) et maximales (3) journalières à Valloire (2003/2005).	120
Fig. IV.2.6 : Position des sondes sur le MNT des Menuires (équidistance des courbes de niveau : 50m).	121
Fig. IV.2.7 : Répartition spatiale des moyennes hivernales (de décembre à mars) des températures moyennes (1), minimales (2) et maximales (3) journalières aux Menuires avec 51 sondes de 1994 à 2004 (a) et avec 75 sondes de 2003 à 2005 (b).	122
Fig. IV.2.8 : Position des sondes sur le MNT de Val Thorens (équidistance des courbes de niveau : 50m).	124
Fig. IV.2.9 : Répartition spatiale des moyennes hivernales (de décembre à mars) des températures	

moyennes (1), minimales (2) et maximales (3) journalières à Val Thorens avec 49 sondes de 1999 à 2005 (a) et avec 61 sondes de 2003 à 2005 (b).....	125
Fig. IV.2.10 : Coupes topographiques A, B et C aux Menuires.	129
Fig. IV.2.11 : Répartition des moyennes de températures minimales hivernales (2002-2005) le long d'une coupe (A) effectuée sur le versant ouest des Menuires.....	129
Fig. IV.2.12 : Répartition des moyennes de températures minimales hivernales (2002-2005) le long d'une coupe (B) effectuée sur le versant est des Menuires.....	130
Fig. IV.2.13 : Répartition des moyennes de températures minimales hivernales (2002-2005) le long d'une coupe (C) effectuée sur le versant ouest des Menuires.....	130
Fig. IV.3.1 : Cycle diurne des vents de vallée.....	133
Fig. IV.3.2 : Profils typiques du vent et de la température en fonction de la hauteur au-dessus d'une pente durant la nuit (a) et le jour (b).	133
Fig. IV.3.3 : Rose des vents moyens à Aussois (anémomètre 5).....	135
Fig. IV.3.4 : Evolution des fréquences des directions des vents (en points cardinaux) par mois/heures à Aussois (anémomètre 5).	136
Fig. IV.3.5 : Evolution des fréquences des directions des vents horaires à Aussois (anémomètre 5).	137
Fig. IV.3.6 : Evolution des fréquences des directions des vents en fonction des vitesses en km/h à Aussois (anémomètre 5).	138
Fig. IV.3.7 : Evolution des fréquences des directions des vents par heure à Aussois (anémomètre 1).	140
Fig. IV.3.8 : Evolution des fréquences des directions des vents en fonction des vitesses en km/h à Aussois (anémomètre 1).	141
Fig. IV.3.9 : Evolution des fréquences des directions des vents par heure aux Menuires (anémomètre 1).	143
Fig. IV.3.10 : Evolution des fréquences des directions des vents en fonction des vitesses en km/h aux Menuires (anémomètre 1).....	144
Fig. IV.3.11 : Directions des brises de pente descendantes et leur évolution diurne à Val Thorens, en plein hiver.....	145
Fig. IV.3.12 : Evolution des fréquences des directions des vents par heure aux Menuires (anémomètre 5)	146
Fig. IV.3.13 : Evolution des fréquences des directions des vents en fonction des vitesses en km/h aux Menuires (anémomètre 5).	147
Fig. IV.3.14 : Evolution des fréquences des directions des vents par heure au mois de janvier aux Menuires (anémomètre 4).	149
Fig. IV.3.15 : Evolution des fréquences des directions des vents par heure au mois de mars aux Menuires (anémomètre 4).	149
Fig. IV.3.16 : Evolution des vitesses moyennes des vents inférieurs à 20 km/h par mois (de décembre à mars) et par heure à Aussois en haut de versant (anémomètre 1).	152
Fig. IV.3.17 : Evolution des vitesses moyennes des vents inférieurs à 15 km/h par mois (de décembre à mars) et par heure à Aussois en bas de versant (anémomètre 5).	153
Fig. IV.3.18: Evolution des vitesses moyennes des vents inférieurs à 15 km/h par heure aux Menuires au milieu du versant ouest (anémomètre 1).	154
Fig. IV.3.19 : Evolution des vitesses moyennes des vents inférieurs à 15 km/h par mois et par heure aux Menuires en fond de vallée (anémomètre 4).	154
Fig. IV.3.20 : Système d'aller-retour de la brise de montagne en fonction de la course du soleil dans une vallée fermée au sud au mois de janvier.	158
Fig. IV.3.21 : Système d'aller-retour de la brise de montagne en fonction de la course du soleil dans une vallée fermée au sud en mars.....	159
Fig. IV.3.22 : Système similaire d'aller-retour de la brise de montagne en fonction de la course du soleil, mais dans deux vallées adjacentes.	159
Fig. IV.3.23 : Système de rotation des brises thermiques en mars ou lors de belles journées ensoleillées en fonction de la course du soleil dans une grande vallée alpine orientée d'est en ouest.	160
Fig. IV.3.24 : Persistance des brises de pente descendantes diurnes dans des vallons encaissés lorsque la brise de montagne souffle dans l'axe de la vallée.....	160

Fig. IV.3.25 : Directions des vents mesurés aux Menuires et à Val Thorens dans la vallée des Bellevilles (orientée sud-nord).....	161
---	-----

Chapitre V

Fig.V.1.1 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 25/01/2005 au 31/01/2005, et les codes Perret/Savoie associés.	168
Fig.V.1.2 : Représentations graphiques de gradients thermiques communs sur le versant ouest des Menuires, lors d'anticyclones puissants et froids, la nuit (graphiques de 1 à 5) et le jour (graphique 6).	169
Fig.V.1.3 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 11/02/2004 au 17/02/2004, et les codes Perret/Savoie associés.	170
Fig.V.1.4 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 02/01/2004 au 06/02/2004.	172
Fig.V.1.5 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 02/02/2005 au 04/02/2005.	172
Fig.V.1.6 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 03/01/2004 à 16h au 04/01/2004 à 10h. Inversion de température apparente.....	175
Fig.V.1.7 : Evolution des températures le long du versant ouest des Menuires du 26/01/2005 à 14h au 27/01/2005 à 10h. Inversion de température réelle.	176
Fig.V.1.8 : Formation de brises de vallée lorsque le flux synoptique est orienté au nord dans la vallée des Bellevilles (6/C1), mais pas quand il est orienté à l'ouest.	179
Fig.V.1.9 : Evolution des directions et des vitesses du vent maximal et moyen horaire mesurées à la station Météo-France de La Masse (2800m) du 24/01 au 02/02/1999.	182
Fig.V.1.10 : Evolution des températures et de l'humidité relative horaires mesurées à la station Météo-France de La Masse (2800m) et à Bourg-Saint-Maurice (865m) du 24/01 au 02/02/1999. Codes de la classification Perret/Savoie pour chaque jour.	182
Fig.V.1.11 : Evolution des températures en bas et au milieu du versant ouest des Menuires du 24/01/1999 au 02/02/1999.	183
Fig.V.1.12 : Evolution de la direction et de la vitesse du vent au bas et au milieu du versant ouest des Menuires.	183
Fig.V.1.13 : Evolution des températures en bas, au milieu et en haut du versant sud d'Aussois du 24/01/1999 au 02/02/1999.	185
Fig.V.1.14 : Evolution de la direction et de la vitesse du vent en bas et en haut du versant sud d'Aussois.	185
Fig.V.1.15 : Evolution des directions moyennes horaires et des vitesses moyennes horaires et maximales instantanées du vent à la station Météo-France de La Masse du 24 au 29 décembre 1999 (2800m, sur crête).	187
Fig.V.1.16 : Evolution des directions et des vitesses à Val Thorens sur les versants ouest et nord du 25 au 30 décembre 1999.....	187
Fig.V.1.17 : Vitesses maximales du vent enregistrées à Aussois le 28/12/1999 à 13h.	188
Fig.V.1.18 : Evolution des températures à Aussois du 25 au 28 décembre 1999 sur le versant sud d'Aussois.....	189
Fig.V.1.19 : Evolution des directions et des vitesses du vent du 24 au 29 décembre 1999 en haut du versant d'Aussois (2200m).	189
Fig.V.1.20 : Schéma directeur bi-dimensionnel du phénomène du foehn.	190
Fig.V.1.21 : Fréquence des situations Perret entraînant des types de temps C5 (foehn).	191
Fig.V.1.22 : Evolution des températures à sept points de mesure sur le versant ouest des Menuires lors d'une période de foehn du 01/12/2003 au 04/12/2003.	193
Fig.V.1.23 : Evolution de la direction et de la vitesse du vent en trois points de mesures sur le versant ouest des Menuires du 01/12/2003 au 04/12/2003.	193
Fig.V.1.24 : Directions et vitesses moyennes du vent dans la vallée des Bellevilles lors de l'épisode de foehn du 01 au 04/12/2003.	194

Fig.V.1.25 : Directions et vitesses du foehn ainsi que du vent de compensation (flèche bleue) et de la chute des températures associée en fond de vallée (symbolisée par les traits pointillés) le 02/12/2003 au soir.	194
Fig.V.1.26 : Directions et vitesses moyennes du foehn sur le versant sud d'Aussois du 01 au 04/12/2003.	194
Fig.V.1.27 : Directions et vitesses moyenne du foehn à Valloire du 01 au 04/12/2003.....	195
Fig.V.1.28 : Spatialisation des températures moyennes (de décembre à mars, saison 2003-2004) dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens.	197
Fig.V.1.29 : Spatialisation des températures le 14/12/2003 à 14h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situations météorologiques : code Perret 4b/C7.	198
Fig.V.1.30 : Spatialisation des températures le 05/01/2004 à 4h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situations météorologiques : passage 5b/C7 à 6/C1.	198
Fig.V.1.31 : Spatialisation des températures le 05/01/2004 à 4h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situations météorologiques : code Perret 4a/C1.....	199
Fig.V.1.32 : Spatialisation des températures le 02/12/2003 à 3h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situations météorologiques : code Perret 8a'/C5	199
Fig.V.1.33 : Spatialisation des températures le 12/02/2004 à 8h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situations météorologiques : code Perret 5a/C1.....	200
Fig.V.1.34 : Spatialisation des températures le 12/02/2004 à 20h dans la vallée des Bellevilles, sur les sites des Menuires et de Val Thorens. Situations météorologiques : code Perret 5a/C1.....	200
Fig. V.2.1 : Evolution des températures le 15/02/2003 aux Menuires.	204
Fig. V.2.2 : Evolution des températures le 17/02/2005 aux Menuires.	204
Fig. V.2.3 : Evolution des températures le 23/03/2003 aux Menuires.	205
Fig. V.2.4 : Evolution des températures le 28/02/2003 aux Menuires.	205
Fig. V.2.5 : Evolution des températures le 01/12/2003 aux Menuires.	206
Fig. V.2.6 : Evolution des températures le 20/11/2004 aux Menuires.	206
Fig. V.2.7 : Evolution des températures le 15/12/2003 aux Menuires.	207
Fig. V.2.8 : Evolution des températures le 28/12/2002 aux Menuires. Type C8.	207
Fig. V.2.9 : Evolution des températures le 22/01/2003 aux Menuires. Type C9.	207
Fig. V.2.10 : Evolution des températures le 16/01/2004 aux Menuires. Type C10.	208
Fig. V.2.11 : Evolution de l'humidité relative le 15/02/2003 aux Menuires. Type C1.	208
Fig. V.2.12 : Evolution de l'humidité relative le 23/03/2003 aux Menuires. Type C2.	209
Fig. V.2.13 : Taux moyens d'humidité relative par sonde en fonction des types de temps Savoie (du 04/11/2002 au 17/04/2003).	209
Fig. V.2.14 : Evolution de l'humidité relative sur le versant ouest des Menuires du 09/02/2005 au 12/02/2005.	210
Fig. V.2.15 : Evolution des températures sur le versant ouest des Menuires du 09/02/2005 au 12/02/2005.	211
Fig. V.2.16 : Evolution des directions et des vitesses du vent sur le versant ouest des Menuires du 09/02/2005 au 12/02/2005.	211
Fig. V.2.17 : Evolution des températures sur le versant ouest des Menuires du 15/02/2005 au 26/02/2005.	212
Fig. V.2.18 : Evolution mensuelle du nombre d'inversions de températures de plus de 3h (1997-2005)	214
Fig. V.2.19 : Evolution mensuelle du nombre d'inversions de températures de plus de 8h (1997-2005)	215
Fig.V.3.1 : Répartition spatiale des températures et du vent aux Menuires le 24/12/2003 de 1h30 à 9h.	217
Fig.V.3.2 : Répartition spatiale des températures et du vent aux Menuires le 24/12/2003 de 10h30 à 18h30.....	218
Fig.V.3.3. Evolution spatiale des températures aux Menuires à 12h, 14h et 16h le 24/12/2003.	219
Fig. V.3.4 : Evolution du réchauffement nocturne et de l'inversion thermique la nuit du 24/12/2003 aux Menuires à partir d'une bande thermique «chaude» située vers 1900m.....	220
Fig.V.3.5. Evolution spatiale des températures à Val Thorens à 12h, 14h et 16h le 24/12/2003.....	221

Fig.V.3.6. Répartition spatiale des températures dans la vallée des Belleville le 14/12/2003 vers 1h30.	222
Fig.V.3.7. Evolution de l'humidité relative le 28/03/2003 aux Menuires.....	223
Fig.V.3.8 : Répartition spatiale des températures et du vent aux Menuires le 28/03/2004 de 1h à 10h15h.	224
Fig. V.3.9 : Répartition spatiale des températures et du vent aux Menuires le 28/03/2004 de 12h à 21h30h.	225
Fig. V.3.10 : Evolution spatiale des températures, nature et directions des brises durant l'après-midi du 28/03/2004.	226
Fig. V.3.11 : Evolution spatiale des températures, nature et directions des brises durant l'après-midi du 05/04/2005.	227
Fig.V.4.1 : Action du relief sur le vent de surface.	230
Fig.V.4.2 : Schéma de la déformation de la température potentielle provoquée par les brises descendantes et montantes, ainsi que la destabilisation qui en résulte.	230
Fig.V.4.3 : Relation entre les brises anabatiques et le sol déneigé.....	230
Fig.V.4.4 : Températures moyennes des températures maximales journalières, saison 2004-2005. ...	233
Fig.V.5.1. Directions des brises catabatiques en janvier (1) et en mars (2).	236
Fig.V.5.2. Directions privilégiées des brises thermiques diurnes en janvier.....	238
Fig.V.5.3. Evolutions nocturnes et d'après-midi des directions des brises au niveau des Menuires dans la vallée des Bellevilles.	239
Fig.V.5.4. Directions privilégiées des brises thermiques diurnes en mars sans brise de vallée.....	240
Fig.V.5.5. Directions privilégiées des brises thermiques diurnes en mars, avec brise de vallée.	241
Fig.V.5.6 : Influences des facteurs cosmiques et météorologiques sur la présence de brises catabatiques ou anabatiques dans la vallée des Bellevilles	243
Fig. V.5.7 : Janvier : probabilités d'évolution journalière des brises thermiques en fonction de l'altitude et des conditions météorologiques.Cas de la vallée des Bellevilles (Les Menuires).....	247
Fig. V.5.8 : Mars : probabilités d'évolution journalière des brises thermiques en fonction de l'altitude et des conditions météorologiques. Cas de la vallée des Bellevilles (Les Menuires).....	249

Conclusion générale

Fig. 1 : Evolution des températures humides à Aussois à 1545m et 2215m du 16 au 31/12/2003.....	254
Fig. 2 : Probabilités moyennes mensuelles d'avoir au moins 100h de températures inférieures à -5°C par rapport à l'altitude (Stations des Menuires, Val Thorens, Aussois et Valloire).....	255

Annexes

Fig. A1 : Fiches d'étalonnage de la sonde Hobo TMC6-H par rapport au thermocouple	289
Fig. A2 : Précision et résolution de la sonde Hobo TMC6-H en fonction de la température.	290
Fig. A3 : Fiche technique des sondes de température et d'humidité relative T220 utilisées par York dans les installations d'enneigement artificiel.....	290
Fig. A4 : Fiche technique des anémomètres utilisés par York dans les installations d'enneigement artificiel	291

Table des tableaux

Tab. III.1 : Les situations météorologiques de la classification H.B.P, simplifiée pour l'étude, et leur fréquence pour la période 1995-2005 (du 15/10 au 15/04).....	82
Tab. III.2 : Les paramètres atmosphériques utilisés dans la classification Savoie.....	85
Tab. III.3 : Caractéristiques des variables de la classification Savoie.....	87
Tab. III.4 : Matrice des corrélations.....	88
Tab. III.5 : Contributions relatives des critères pour les deux premiers axes.	88
Tab. III.6 : Caractéristiques des classes en fonction des moyennes de chaque variable.....	90
Tab. III.7 : Description des classes Savoie et fréquence d'apparition en %.	91
Tab. III.8 : Tableau croisé classification Savoie/classification Perret effectué sur 1388 observations.....	96
Tab. III.9 : Types de situations Perret-Savoie les plus courantes (>1%), avec leur nombre et le pourcentage par rapport aux 1388 situations.	97
Tab. III.10 : Les types de circulation de la classification Perret réunis en groupe et la description du temps qu'ils provoquent en Savoie.	100
Tab. IV.1 : Tableau des moyennes mensuelles des températures minimales journalières pour les mois d'hiver à Valloire, Aussois, Les Menuires et Val Thorens.	113
Tab. IV.2 : Rythme des différents types de brises à Aussois en bas de versant (anémomètre 5) en février et mars.	138
Tab. IV.3 : Rythme des différents types de brises à Aussois en haut de versant (anémomètre 1) en mars.	141
Tab. IV.4 : Rythme des différents types de brises aux Menuires (anémomètre 1).	144
Tab.V.1 : Code Perret/Savoie du 24/01 au 02/02/1999.....	180
Tab.V.2 : Codes Perret-Savoie du 15 au 25 février 2005.....	212
Tab.V.3 : Pourcentages des types de circulation / type de temps provoquant des inversions de températures de plus de 3h.....	213
Tab. V.4 : Pourcentages des types de circulation / type de temps provoquant des inversions de températures de plus de 8h.....	213
Tab. V.5 : Pourcentages des types de circulation provoquant des inversions de températures de plus de 8h.....	214
Tab. V.6 : Pourcentages des types de temps provoquant des inversions de températures de plus de 8h.	214

Table des photographies

Photo 1 : Sonde de températures et d'humidité relative (à droite) et anémomètre (à gauche) sur une piste à Aussois.....	12
Photo II.1. : La vallée de la Maurienne depuis St-Jean de Maurienne (vue vers l'est).....	44
Photo II.2. : La haute-Maurienne vue depuis Aussois (vue vers l'est).....	44
Photo II.3. : La vallée des Bellevilles depuis Val Thorens (vue vers le nord).....	45
Photo II.4 : Le col du Télégraphe vu depuis le Mont de la Sétaz (vue vers le Nord).....	45
Photo II.5 : Le versant sud d'Aussois.....	46
Photo II.6. : Le versant ouest des Menuires (vue vers l'est).....	48
Photo II.7 : Le cirque de Val Thorens (vue vers l'est).....	49
Photo II.8 : La station de Valloire, le versant nord du Mont Setaz (à droite), et le versant ouest du Crey du Quart (à gauche).....	52
Photo II.9 : La Combe de l'Aiguille Noire.....	52
Photo. II.10 : Enneigreur bi-fluide.....	58
Photo. II.11 : Enneigreur mono-fluide.....	58
Photo. II.12 : Anémomètre (à gauche) et sonde de température et d'humidité (à droite) sur une piste à Aussois.....	59
Photo. II.13 : L'abri anti-radiation et la sonde T220 de York.....	59
Photo. II.14 : Le versant sud d'Aussois au bas des pistes, positions et numéros des sondes.....	64
Photo. II.15. : La pente sud-est des Sétives.....	65
Photo. II.16 : La pente sud de l'Eterlou.....	65
Photo. II.17 : Le fond de vallée en amont des Menuires.....	66
Photo. II.18 : Le versant est des Menuires.....	68
Photo. II.19 : Le versant ouest des Menuires avec les positions des sondes.....	69
Photo II.20 : Le versant Nord et positions des sondes et anémomètres.....	70
Photo. II.21 : La combe de Pécelet et positions des sondes 1 à 12.....	71
Photo. II.22 : Le domaine de Val Thorens et la position des sondes.....	71
Photo. II.23 : Le versant nord-est de la Setaz à Valloire.....	75
Photo IV.1 : Sondes de température Hobo (position basse) et sonde n°7 York (position haute) en bas des pistes d'Aussois (1600m).....	106
Photo IV.2 : Position de l'anémomètre 1 aux Menuires sur le versant ouest et directions des brises catabatiques, vallon de la Becca. En encadré, zoom sur les sondes.....	142
Photo V.1 : La sonde 1 à Aussois.....	231

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1 - La climatologie hivernale de montagne	9
2 - Les données météorologiques des installations d'enneigement artificiel	12
3 - Méthodes et objectifs	15
4 - Pour une climatologie appliquée.....	17
5 - Choix des sites de l'étude	18
6 - Organisation de l'étude.....	20

CHAPITRE I

CONCEPTS ET MÉTHODOLOGIE

I.1 Climatologie et échelles spatio-temporelles.....	26
I.1.1 Climat et champs thermiques	26
I.1.2 Du macroclimat au microclimat.....	27
I.1.3 Les méthodes de recherche en climatologie et en météorologie.....	28
I.2 Température et humidité : les facteurs de leur variation en hiver.....	29
I.2.1 Température et humidité relative	30
I.2.1.a. La température	30
I.2.1.b. L'humidité.....	31
I.2.2 Les facteurs de la variation spatiale du climat	31
I.3 Système climatique et systémique	33
I.3.1 Les systèmes dynamiques complexes	33
I.3.2 L'irréversibilité climatique.....	34
I.3.3 De la turbulence au chaos : une aide à la compréhension du climat.....	36
I.3.4 Application en météorologie.....	37
I.3.5 Statistiques et climatologie	38

CHAPITRE II

ESPACE D'ÉTUDE, NEIGE DE CULTURE ET RÉSEAUX DE MESURES

II.1 Présentation géographique.....	44
II.1.1 Localisation générale	44
II.1.2 Aussois	46
II.1.3 Les Menuires - Val Thorens.....	47
II.1.4 Valloire.....	52
II.2 L'enneigement artificiel	54
II.2.1 Potentialités et impacts des installations d'enneigement artificiel.....	54
II.2.2 Principes de fabrication de la neige de culture	55

II.2.2.a. Les conditions physiques de fabrication.....	55
II.2.2.b. Propriétés de la neige de culture	57
II.2.2.c. Les systèmes de production.....	57
II.2.5 Description des sondes et données météorologiques enregistrées.....	58
II.2.5.a. Constitution des sondes	58
II.2.5.b. Pas de temps de mesures	60
II.2.5.c. Acquisition des données	60
II.2.5.d. Méthodologie critique	61
II.3 Les réseaux de mesures des domaines skiables étudiés	62
II.3.1 Le réseau d'Aussois	62
II.3.1.a. Sondes de température et d'humidité	63
II.3.1.b. Anémomètres.....	64
II.3.2 Le réseau des Menuires et de Val Thorens	65
II.3.2.a. Sondes de température et d'humidité aux Menuires	66
II.3.2.b. Les anémomètres aux Menuires.....	69
II.3.2.c. Sondes de température et d'humidité à Val Thorens	70
II.3.2.d. Les anémomètres à Val Thorens	73
II.3.3 Le réseau de Valloire.....	73
II.3.3.a. Sondes de température et d'humidité à Valloire.....	73
II.3.3.b. Les anémomètres à Valloire	74
CHAPITRE III	
CLASSIFICATION BI-SCALAIRE DES TYPES DE TEMPS HIVERNAUX SUR LA SAVOIE	
III.1 Choix de la classification des types de circulation.....	80
III.1.1 Notions de types de temps et de circulations.....	80
III.1.2 Les classifications des types de circulations existantes.....	81
III.1.3 La classification Hess-Brezowsky-Perret simplifiée	81
III.2 La classification Savoie	83
III.2.1 Les données météorologiques.....	83
III.2.2 Analyse statistique	85
III.2.2.a. Choix de l'algorithme de classification.....	86
III.2.2.b. La méthode de classification	86
III.2.2.c. La complémentarité entre l'analyse factorielle et la classification	86
III.2.2.d. Les résultats de l'analyse statistique	87
III.2.3 Description des classes.....	90
III.3 La classification Perret-Savoie	95
III.3.1 Analyse des correspondances	95
III.3.2 Description des types de situations Perret-Savoie.....	95

CHAPITRE IV
COMPORTEMENTS ET SPATIALISATION DES TEMPÉRATURES MOYENNES
ET DU VENT

IV.1 Evolution des températures moyennes mensuelles depuis 1989	106
IV.1.1 Validation des mesures : expériences de comparaison	106
IV.1.1.a. Description de la station HOBO et campagne de mesure	106
IV.1.1.b. Analyse des résultats	107
IV.1.2 Evolution des températures sur les différents sites	110
IV.1.2.a. Moyennes mensuelles des températures minimales en Savoie depuis 1988 en janvier et février (données Météo-France).....	110
IV.1.2.b. Moyennes mensuelles des températures minimales aux Menuires depuis 1989 : une tendance à la baisse	111
IV.1.2.c. Moyennes mensuelles des températures minimales journalières sur différents versants alpins.....	113
IV.1.2.d. Comparaison des moyennes mensuelles des températures minimales de janvier sur les différents sites : le rôle du fond de vallée	114
IV.2 Répartition des températures moyennes sur chaque site : une première approche locale.....	116
IV.2.1 Aussois : un versant bien exposé	116
IV.2.1.a. Les températures moyennes	116
IV.2.1.b. Particularités locales des moyennes de températures.....	117
IV.2.2 Valloire : un site varié topographiquement	118
IV.2.2.a. Les températures moyennes	118
IV.2.2.b. Particularités locales des moyennes de températures.....	119
IV.2.3 Les Menuires : un versant de haute vallée alpine	120
IV.2.3.a : Les températures moyennes	121
IV.2.3.b. Particularités locales des moyennes de températures.....	121
IV.2.4 Val Thorens : un amphithéâtre naturel thermiquement contrasté	123
IV.2.4.a Les températures moyennes	124
IV.2.3.b. Particularités locales des moyennes de températures.....	126
IV.2.5 Les Menuires et Val Thorens : des topoclimats différents	126
IV.3 Les vents sur les versants de montagne.....	131
IV.3.1 Rappel sur les brises thermiques.....	131
IV.3.2 Les vents moyens sur les sites de l'étude	134
IV.3.2.a. Les bas de versants : un comportement bien déterminé	135
IV.3.2.b. Les milieux de versant : des différences de ventilation en fonction de la topographie des vallées et des versants.....	140
IV.3.2.c. Les hauts de versants : vents catabatiques et synoptiques.....	146
IV.3.2.d. Les fonds de vallée : le règne des brises de montagne.....	147
IV.3.2.e. Un cas particulier : l'anémomètre 2 de Valloire	151

IV.3.3 Quelques vitesses moyennes de brises.....	151
IV.3.3.a. Sur le versant d'Aussois	151
IV.3.3.b. Aux Menuires	153

CHAPITRE V

CLIMATOLOGIE HIVERNALE À ÉCHELLE FINE DES VERSANTS ET DES HAUTES VALLÉES ALPINES

V.1 Réactions des paramètres locaux lors d'épisodes atmosphériques particuliers 166

V.1.1 Conditions anticycloniques et inversions thermiques	167
V.1.1.a. Situations anticycloniques puissantes et froides de type 6/C1	167
V.1.1.b. La mise en place de fortes inversions de températures	171
V.1.1.c. Dynamique de deux inversions thermiques	173
V.1.1.d. Influence du flux synoptique dans la création de vent de vallée	178
V.1.1.e. Situations anticycloniques plus douces de début et fin de saison	180
V.1.2 Conditions dépressionnaires et perturbations	180
V.1.2.a. L'arrivée de fronts neigeux sur la Savoie du 26 au 29 janvier 1998.....	180
V.1.2.b. Les tempêtes de décembre 1999.....	185
V.1.2.c. Types de circulations entraînant des chutes de neige.....	189
V.1.3 Périodes de foehn	190
V.1.3.a. Rappel sur le foehn	190
V.1.3.b. Un exemple de foehn fort.....	191
V.1.3.c. Remarques sur les retours d'est	196
V.1.4 Spatialisation des températures dans la vallée des Bellevilles.....	196

V.2 Regression d'échelle entre les types de temps et les paramètres atmosphériques mesurés aux Menuires 203

V.2.1 Méthodologie	203
V.2.2 Les correspondances types de temps / températures.....	204
V.2.3 Exemples de régression d'échelle	210
V.2.3.a. Passage anticyclonique / cyclonique.....	210
V.2.3.b. Passage anticyclonique / cyclonique / anticyclonique du 15 au 25 février 2005	212
V.2.4. Relations entre les inversions de températures et la classification Perret-Savoie....	213

V.3 Evolutions journalières des températures et du vent sur les versants de montagne 216

V.3.1 La journée du 24/12/2003 : rétablissement de l'anticyclone après le passage d'un front froid (Les Menuires et Val Thorens).....	216
V.3.1.a. Situation générale	216
V.3.1.b. Evolution de la répartition des températures et du vent aux Menuires	216
V.3.2 La journée du 28/03/2004 : une belle journée de mars	222
V.3.2.a. Situation générale	222
V.3.2.b. Evolution de la répartition des températures et du vent aux Menuires.	223
V.3.2.c. Comparaison avec la journée du 05/04/2005.....	226

V.4 Les influences aux échelles fines des facteurs physico-géographiques.....	228
V.4.1 Le rôle des micro-reliefs	228
V.4.2 L'influence de la forêt	231
V.4.2.a. Le versant sud d'Aussois	231
V.4.2.b. Le versant nord de Valloire.....	232
V.4.2.c. Influences sur la direction des vents	233
V.4.3 L'effet du bâti	233
V.5 Modélisation empirique des régimes de brises dans la vallée des bellevilles. .	235
V.5.1 Mécanismes des brises thermiques en janvier et mars.....	236
V.5.1.a. En nocturne	236
V.5.1.b. Evolution journalière en janvier	237
V.5.1.c. Evolution journalière en mars.....	239
V.5.2 Les facteurs de contrôle sur le mécanisme des brises thermiques hivernales.....	242
V.5.2.a. Les facteurs cosmiques et météorologiques.....	242
V.5.2.b. Les facteurs topographiques	242
V.5.2.c. Autres facteurs et questionnements.....	242
V.5.3 Modèle empirique de l'évolution journalière des brises thermiques dans la vallée des Bellevilles en janvier et en mars	244

CONCLUSION GÉNÉRALE

1) Un nouveau réseau de mesures météorologiques en montagne et en hiver.....	253
2) Les connaissances sur les mécanismes et les paramètres climatiques de la montagne hivernale	253
3) Des perspectives de recherche.....	256
4) Dans le domaine appliqué : la gestion climatique de l'enneigement artificiel et des domaines skiabiles	257

BIBLIOGRAPHIE.....	263
---------------------------	------------

ANNEXES

Annexe 1 : numéros, altitudes et coordonnées Lambert II des sondes et des anémomètres des domaines skiabiles.....	276
Annexe 2 : la classification Perret/Savoie.....	280
Annexe 3 : stations de mesures et métrologie.....	287

Table des figures	291
Table des tableaux.....	297
Table des photographies	298

TABLE DES MATIÈRES.....	299
--------------------------------	------------

