

53

**Comparaisons de différentes méthodes de calcul de la  
température journalière dans leurs influences sur les  
longues séries d'observations**

par A. de Montmollin

Paraît simultanément comme thèse de l'Université de Zürich.

## TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS . . . . .	7
RESUME . . . . .	9
SUMMARY . . . . .	11
ZUSAMMENFASSUNG . . . . .	13
RIASSUNTO . . . . .	15
1 INTRODUCTION . . . . .	17
2 ENONCE DU PROBLEME . . . . .	19
2.1 Introduction . . . . .	19
2.2 Le réseau climatologique . . . . .	20
2.3 La température journalière moyenne . . . . .	22
2.3.1 La moyenne pondérée . . . . .	22
2.3.2 La moyenne arithmétique . . . . .	23
2.3.3 La moyenne arithmétique corrigée . . . . .	24
2.3.4 La moyenne «autrichienne» . . . . .	25
2.3.5 La moyenne sur 24 heures . . . . .	26
2.3.6 La moyenne des minima et maxima . . . . .	26
2.3.7 Autres moyennes . . . . .	27
2.4 La détermination des extrêmes journaliers de la température . . . . .	27
2.5 Influences des moyennes journalières sur la période 1961 - 1990 . . . . .	29
2.5.1 Introduction . . . . .	29
2.5.2 Approche . . . . .	29
2.5.3 Résultats . . . . .	30
2.6 Considérations générales . . . . .	30
2.7 L'homogénéisation de la période 1901 - 1960 . . . . .	33
2.7.1 Historique . . . . .	33
2.7.2 Méthodes utilisées . . . . .	34
2.7.3 Commentaires . . . . .	34
2.8 Conclusions . . . . .	36
3 BUTS DU TRAVAIL . . . . .	37
4 METHODES, DEROULEMENT DU TRAVAIL . . . . .	39
4.1 Introduction . . . . .	39
4.2 La simulation à l'aide des valeurs à 10 minutes . . . . .	41
4.3 La simulation à l'aide des valeurs horaires . . . . .	42
4.3.1 La qualité de l'interpolation . . . . .	44
4.3.2 Contrôle et qualité des données . . . . .	46
4.4 Représentation graphique . . . . .	48
4.5 La température sous abri . . . . .	49

5	RESULTATS	53
5.1	Introduction	53
5.2	Différences mensuelles moyennes	53
5.2.1	La moyenne pondérée Tmp21 (2.1)	54
5.2.2	La moyenne arithmétique Tma21 (2.2)	56
5.2.3	La moyenne arithmétique TmaK (2.4)	57
5.2.4	La moyenne TmA(2.5)	57
5.2.5	La moyenne sur 24 heures Tm24 (2.6)	58
5.2.6	La moyenne TmMm (2.7)	59
5.2.7	Les moyennes arithmétique Tma19 (2.8) et pondérée Tmp19 (2.9)	59
5.2.8	Discussion des résultats	60
5.2.9	Critique des résultats	62
5.3	Influences locales	65
5.3.1	Approche	65
5.3.1.1	Choix des situations	66
5.3.1.2	Contrôle des données.	67
5.3.1.3	Qualité des données	68
5.3.2	Résultats	69
5.3.3	Discussion	84
5.3.4	Critiques des résultats	86
5.4	Différences journalières	86
5.4.1	Approche	86
5.4.1.1	Démarche générale.	88
5.4.1.2	Choix et définitions des situations météorologiques.	89
5.4.2	Résultats	92
5.4.2.1	La moyenne Tmp21 (2.1)	92
5.4.2.2	La moyenne Tma21 (2.2)	93
5.4.2.3	La moyenne TmaK (2.4)	94
5.4.2.4	La moyenne TmA (2.5)	95
5.4.2.5	La moyenne TmMm (2.7)	95
5.4.3	Discussion et critique des résultats	98
5.5	Conclusions	103



6	APPLICATIONS PRATIQUES . . . . .	105
6.1	Contrôle des facteurs K . . . . .	105
6.1.1	Introduction . . . . .	105
6.1.2	Approche . . . . .	106
6.1.2.1	Données . . . . .	106
6.1.2.2	Méthodes . . . . .	108
6.1.3	Résultats . . . . .	112
6.1.3.1	Calcul et contrôle des groupes . . . . .	112
6.1.3.2	Contrôle des nouveau facteurs K . . . . .	117
6.1.3.3	Application des nouveaux facteurs K pour la période 1961 - 1990 . . . . .	120
6.1.3.4	Conclusions . . . . .	122
6.2	Propositions pour une nouvelle régionalisation des facteurs K . . . . .	124
6.2.1	Problématique . . . . .	124
6.2.2	Résultats . . . . .	124
6.3	Conclusions et critiques des résultats . . . . .	127
7	CONCLUSIONS GENERALES . . . . .	129
7.1	Résumé des conclusions des chapitres précédents . . . . .	129
7.2	Conséquences . . . . .	130
7.3	Perspectives . . . . .	131
8	BIBLIOGRAPHIE . . . . .	133
	EPILOGUE . . . . .	139

## LISTE DES ABREVIATIONS

ANETZ	réseau de stations automatiques de l'ISM
AWS	Alpenwetterstatistik
EPFZ	Ecole Polytechnique Fédérale Zurich
HEC	heure Europe centrale
ISM	Institut Suisse de Météorologie
IQR	intervalle interquartile
Klima-DB	banque de données climatologiques de l'ISM installée au RZETH
RZETH	centre de calcul de l'EPFZ
OMM	Organisation Mondiale de Météorologie
pw	precipitable water (quantité d'eau précipitable)
rsd	durée relative d'insolation
SMA	Schweizerische Meteorologische Anstalt
TU	temps universel
UTC	universal time convention (voir TU)
VHT	température ventilée
WMO	World Meteorological Organisation (OMM)

## RESUME

L'objectif de ce travail est d'étudier l'impact de différentes méthodes de calcul de la température journalière moyenne sur les longues séries de mesures. Cette étude a été motivée initialement par les profondes modifications apportées au réseau climatologique de l'Institut Suisse de Météorologie (ISM), et, plus particulièrement, par les modifications du mode de calcul de la température moyenne survenues en 1971 et en 1981. Elle devrait apporter une contribution à la problématique de l'homogénéisation des séries temporelles de températures et servir de base de connaissance pour le développement de nouvelles méthodes d'homogénéisation.

L'étude porte sur les différentes formules de moyennes journalières utilisées en Suisse, de même que sur une formule en usage en Autriche et sur la moyenne des extrêmes journaliers. Cette dernière, recommandée par l'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM), est largement répandue dans le monde entier. Pour différentes raisons, dont notre volonté d'étendre ce travail à d'autres formules que celles en usage en Suisse, toute l'approche est basée sur la simulation, à l'aide des valeurs horaires du réseau automatique de l'ISM (réseau ANETZ), des différentes heures d'observation qui entrent dans les formules de moyennes journalières. Les moyennes journalières ainsi calculées, sur une période de dix ans (1981 - 1990) et pour cinq stations caractéristiques du réseau climatologique, sont comparées à une moyenne de référence déterminée pour chaque station, la moyenne sur 24 heures. La comparaison s'effectuant ainsi à l'intérieur de la station, il n'est pas nécessaire de recourir à des comparaisons avec des stations voisines comme le nécessite normalement la méthode des différences. Ce collectif de cinq stations comprend une station sommitale (le Säntis, 2500 m/m), deux stations de plaine (Zurich et Genève), une station située dans une vallée alpine (Davos, 1590 m/m) et une station du sud des Alpes (Lugano).

Les résultats sont présentés d'abord sous forme d'écart annuel et mensuel moyens par rapport à la moyenne de référence, ceci afin de permettre la comparaison avec des études antérieures. Les deux moyennes utilisées en Suisse, la moyenne arithmétique pondérée et la moyenne arithmétique corrigée, présentent des écarts annuels faibles ne dépassant pas 0.2 K. La moyenne autrichienne et la moyenne des extrêmes journaliers amènent des différences plus importantes, pouvant atteindre 0.4 K. Les écarts entre les stations sont également sensiblement plus élevés (jusqu'à 0.5 K). Les écarts mensuels moyens, quant à eux, restent faibles, voir insignifiants pour les deux premières formules et pour la moyenne autrichienne. Ils atteignent par contre 1.0 K pour la moyenne recommandée par l'OMM. Les écarts mensuels des trois premières formules varient très peu d'une année à l'autre. Ils sont donc représentatifs, et pourraient être utilisés comme base de réduction pour l'homogénéisation de séries de température. La variation annuelle des écarts de la moyenne des extrêmes journaliers est, en revanche, très importante.

Chaque station présente sa propre courbe de différences mensuelles. L'analyse des écarts journaliers issus d'un collectif de situations caractérisées par une absence de phénomènes advectifs et une insolation importante a mis en évidence certains facteurs locaux pouvant avoir une influence sur le comportement des moyennes journalières. Même si certains signaux locaux, telle la topographie par exemple, sont assez clairs, il n'est pas possible d'expliquer de manière systématique les différences entre les stations, et donc de justifier l'usage des écarts d'une ou de plusieurs stations comme base de réduction pour d'autres stations suisses ou étrangères.

Ces résultats, ainsi que la volonté de développer une approche universelle de l'homogénéisation des séries temporelles de température de l'air, ont conduit à une étude des écarts journaliers entre les formules étudiées et la moyenne sur 24 heures. Cette étude a permis de démontrer l'importante variabilité de ces écarts journaliers et tout particulièrement leur caractère aléatoire. En conséquence, l'analyse se concentre sur les écarts importants, c'est-à-dire dont la valeur absolue dépasse le seuil de 0.8 K. Ce seuil de  $\pm 0.8$  K a été défini de manière semi-empirique. Les autres écarts compris dans la fourchette de  $\pm 0.8$  K sont considérés comme un bruit inhérent à toute approximation.

L'analyse ayant démontré que ces écarts importants apparaissent principalement lors de situations météorologiques particulières, ils ont été répartis selon trois classes, correspondant à trois types de temps (advection froid, advection chaud et convectif). Cette classification, effectuée manuellement selon des critères météorologiques prédéfinis, permet d'expliquer près de 80% des écarts journaliers importants de chaque moyenne. De plus, au niveau de la réaction à un certain type de temps, il est apparu que, mis à part pour les situations de type convectif, il n'y a pas de grandes différences entre les stations. La moyenne arithmétique corrigée, introduite en 1971 par l'ISM, présente, de toutes les moyennes étudiées ici, la plus faible variabilité journalière ainsi que la plus faible réaction aux trois types de temps définis. La moyenne des extrêmes journaliers montre par contre une importante variabilité journalière, ainsi qu'une forte réaction aux situations convectives. La moyenne arithmétique pondérée, utilisée jusqu'en 1970 par l'ISM et toujours en usage dans le réseau climatologique allemand, bien que produisant des écarts mensuels moyens insignifiants, présente quant à elle une importante variabilité journalière.

L'importance de certaines situations météorologiques sur le comportement des moyennes a pour principale conséquence de réduire les possibilités de comparaisons entre des séries temporelles calculées avec des moyennes différentes. Un réchauffement provoqué par une augmentation de la fréquence des situations convectives aura ainsi tendance à être artificiellement accentué par une série temporelle calculée à l'aide de la moyenne des extrêmes journaliers tandis qu'il sera perçu "normalement" par celle déterminée avec la moyenne arithmétique corrigée.

Les facteurs de correction de la moyenne arithmétique, introduite en 1971 pour les stations climatologiques, n'avaient jamais été contrôlés par l'ISM. Cette opération, effectuée sur la base de 34 stations du réseau ANETZ, si elle permet de proposer une régionalisation simplifiée des facteurs de correction, démontre avant tout la robustesse de cette moyenne par rapport à ces mêmes facteurs. L'attribution d'une station à une région plutôt qu'à une autre importe peu et n'a pratiquement aucune répercussion sur les séries temporelles.

En conclusion, la forte relation entre certains types de temps et les écarts journaliers importants permet de jeter les principes d'une méthode d'homogénéisation basée sur une approche déterministe, et non plus sur une approche purement statistique, comme la méthode des différences largement utilisée jusqu'ici. Cette approche déterministe, partiellement explorée, aurait l'avantage d'être universelle et de pouvoir être fortement automatisée.

## SUMMARY

The objective of the present work is to study the impact of different methods to calculate daily mean temperatures of measured long time series. This study has initially been motivated by the major modifications applied to the climatological network of the Swiss Meteorological Institute (SMI), and, in particular, by the modifications introduced to the calculation method of mean temperatures in 1971 and 1981. The investigation is expected to make a contribution to the problem of homogenisation of temperature time series and to serve as a base of knowledge for the development of new homogenisation methods.

In this study the different formulae of calculating daily mean values utilized in Switzerland are investigated. In addition, a formula utilized in Austria and a method, which is based on the mean values of daily extreme temperatures, is considered. The last mentioned formula is recommended by the World Meteorological Organization (WMO) and in wide use over the whole world. For several reasons, one of which is our intention to extend this work to other formulae than those utilized in Switzerland, the present approach is based, by means of the hourly values recorded by the Swiss automatic surface network (ANETZ), on the simulation of values corresponding to different observation times which enter in the formulae for calculating daily mean temperatures. The daily mean values computed this way for a period of ten years (1981 - 1990) and for five stations representative of the climatological network are compared with reference mean values for each station, which are calculated as the average of 24 hourly values. Since this kind of comparison can be carried out for each station independently, there is no need to refer to nearby stations as it is the case for the common difference method. The sample of five stations includes a summit station (Säntis, 2500 m a.s.l.), two stations on the Swiss Plateau (Zurich and Geneva), a station situated in an Alpine valley (Davos, 1590 m a.s.l.) and a station to the south of the Alps (Lugano).

First the results are presented in the form of yearly and monthly deviations from the reference mean value. This allows for comparison with former studies. The two averaging techniques utilized in Switzerland, i.e. the weighted arithmetic mean and the so-called corrected arithmetic mean, give only small yearly deviations not exceeding 0.2K. The Austrian mean value and the mean of daily extreme temperatures lead to more important deviations as large as 0.4K. The differences between the stations are also larger (reaching 0.5K). The monthly mean deviations are small, even insignificant for the first two formulae and for the Austrian mean. In contrast, they reach 1.0K for the method recommended by WMO. The monthly deviations vary very little for the three first-mentioned formulae from one year to the other. Thus they are representative and could be used as a basis for the homogenisation of temperature series. The annual variation of the deviations resulting from the mean of the daily extremes, on the other hand, is very pronounced.

The monthly differences have their proper characteristics for each station. From the analysis of the deviations of daily values, which are taken from a sample of non-advective weather situations with strong insolation, it becomes evident that certain local effects can influence the behaviour of daily mean values. Even if certain local

signals, like topography for instance, are rather clear, it is not possible to explain the differences between stations in a systematic way. Thus it is not justified to utilize the deviations derived from one or several stations as a basis for the reduction of other Swiss or foreign stations.

These results and the intention to develop an universal approach for the homogenisation of air-temperature time series have led to an investigation of the daily deviations between the considered formulae and the mean value over 24 hours. This study allowed to demonstrate the important variability of the daily deviations and in particular their random character. Consequently, the analysis focuses on larger deviations, namely those with an absolute value larger than 0.8 K. This threshold of  $\pm 0.8$  K has been chosen semi-empirically. Smaller deviations within the span of  $\pm 0.8$  K are considered to be background noise inherent to all kind of approximations.

Since the analysis has shown that the important deviations principally occur in particular meteorological situations, they have been stratified into three classes corresponding to three types of weather situations (cold advective, warm advective and convective). This classification, carried out subjectively following predefined meteorological criteria, allows to explain about 80% of the important daily deviations of each mean value. Furthermore, with respect to the reaction to certain weather types, it becomes apparent that, with the exception of the convective situations, there are no big differences between the stations. The corrected arithmetic mean, introduced by SMI in 1971, exhibits the smallest daily variability and the weakest dependency on the three weather types of all mean values investigated here. In contrast, the mean value of daily extreme temperatures shows a pronounced daily variation and a strong dependence on convective situations. The weighted arithmetic mean, utilized by SMI until 1970 and still used in the German climatological network, exhibits an important daily variability, although the monthly deviations are insignificant.

The influence of certain meteorological situations on the behaviour of daily mean temperature calculations leads to a reduction of the possibilities to compare time series computed by different averaging methods. A general warming due to an increased number of convective situations would have a tendency to be artificially overemphasized, if the time series had been calculated by the mean value of the daily extreme temperatures, whereas it would appear as "normal" if determined by the corrected arithmetic mean.

The correction factors for the arithmetic mean, introduced in 1971 for the climatological stations, have never been examined by SMI. If this operation, carried out on the basis of 34 ANETZ stations, allows to propose a simplified regionalisation of the correction factors, it shows primarily the robustness of this mean value with respect to the influence factors mentioned. If one station is transferred from one region to the other, almost no impact on the time series can be found.

In conclusion, the strong relation between certain weather types and the significant daily deviations strongly suggest to base homogenisation methods on a deterministic approach. This is in contrast to the widely used difference method which is based on a purely statistical approach. The deterministic approach, partially explored in this study, has the advantage of being universal and could be highly automated.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Tagesmittelberechnungen auf lange Temperaturmessreihen. Wesentliche Änderungen im klimatologischen Messnetz der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA), insbesondere die in den Jahren 1971 und 1981 erfolgten Umstellungen in der Berechnungsart der mittleren Tagestemperaturen boten ursprünglich Anlass zu dieser Studie. Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Problemlösung bei der Homogenisierung von langen Temperaturzeitreihen leisten und als Grundlage dienen bei der Entwicklung neuer Homogenisierungsmethoden.

In dieser Studie werden die verschiedenen in der Schweiz angewandten Methoden zur Tagesmittelbildung untersucht. Zusätzlich wird auf eine in Oesterreich angewandte Methode, sowie auf eine Methode, die auf den Tagesextremwerten basiert, näher eingegangen. Letztere, empfohlen durch die Meteorologische Weltorganisation (WMO), wird weltweit angewendet. Der Ansatz beruht auf einer Simulation der in diese Formeln eingehenden Beobachtungstermine mit Hilfe des automatischen Messnetzes der SMA (ANETZ). Für die auf diese Weise berechneten Tagesmittel wird eine Zeitspanne von zehn Jahren (1981 bis 1990) zugrunde gelegt und auf fünf charakteristische Klimastationen bezogen. Die unterschiedlich berechneten Tagesmittelwerte werden für jede Station mit einem Referenztageswert, dem 24-Stundenmittel, verglichen. Da dieser Tagesmittelvergleich intern an der einzelnen Station bewerkstelligt werden kann, ist es nicht erforderlich, Vergleiche mit Nachbarstationen, z.B. mit Hilfe der Differenzenmethode, anzustellen. Das Kollektiv dieser fünf Stationen verteilt sich auf eine Gipfelstation (Säntis, 2500 m/M), zwei Flachlandstationen (Zürich und Genf), eine Bergstation (Davos, 1590 m/M) und eine Station südlich der Alpen (Lugano).

Die Ergebnisse werden in einem ersten Schritt in Form von mittleren jährlichen und monatlichen Abweichungen vom Referenzmittel dargestellt. Dies ermöglicht den Vergleich mit früheren Studien. Die beiden in der Schweiz verwendeten Formeln, das gewichtete und das korrigierte arithmetische Mittel, zeigen geringfügige jährliche Abweichungen von höchstens 0.2 K. Das österreichische Mittel und der Tagesmittelwert, gebildet aus den Tagesextremwerten, führen zu grösseren Abweichungen (bis 0.4 K). Die Abweichungen zwischen den Stationen sind ebenfalls grösser (bis 0.5 K). Hingegen bleiben die Abweichungen der Monatsmittel für die beiden schweizerischen Formeln und das österreichische Mittel sehr gering. Sie können somit als Reduktionsbasis für die Homogenisierung von Temperaturzeitreihen angewendet werden. Für die von der WMO empfohlene Tagesmittelformel reichen die Abweichungen der Monatsmittel bis 1.0 K, zudem ist die jährliche Variabilität recht gross.

Jede Station weist für die Monatsabweichungen einen eigenen Jahresgang auf. Die Untersuchung bezüglich der Abweichungen der Tagesmittel liefert ein Kollektiv von synoptischen Wettersituationen, charakterisiert durch das Fehlen von Advektion bei gleichzeitigem Vorhandensein hoher Einstrahlung. Dies zeigt auf, dass lokale Faktoren einen gewissen Einfluss auf das Verhalten von Tagesmittelwerten haben können. Trotz gewisser lokaler Signale, wie zum Beispiel der Topographie, ist es nicht möglich, die Unterschiede zwischen den einzelnen Stationen systematisch zu erklären und die Anwendung der Temperaturabweichung einer oder mehrerer Stationen als Reduktionsbasis für andere schweizerische oder ausländische Stationen zu rechtfertigen.

Diese Resultate, wie auch die Absicht, ein allgemeingültiges Verfahren zur Homogenisierung von Temperaturzeitreihen zu entwickeln, haben dazu geführt, Tagesmit-

telabweichungen zwischen den verschiedenen Tagesmittelformen und dem 24-Stundenmittel zu vergleichen. Diese Untersuchung erlaubt es, die Bedeutung aufzuzeigen, welche der Variabilität der täglichen Temperaturabweichungen beizumessen ist. Deswegen beschränkt sich die Studie auf jene Fälle, wo der Absolutbetrag der Abweichung den Toleranzbereich von 0.8 K übersteigt. Dieser Toleranzwert von  $\pm 0.8$  K ist halb-empirisch definiert worden. Die restlichen Abweichungen, welche innerhalb des Toleranzbereiches von  $\pm 0.8$  K liegen, werden als Grundrauschen betrachtet.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass diese markanten Abweichungen grundsätzlich bei besonderen Wetterlagen auftreten. Das entsprechende Datenmaterial ist in drei Klassen aufgeteilt worden, nämlich nach den drei Wetterlagen advektiv kalt, advektiv warm und konvektiv. Diese Klassifikation des Datenmaterials, welche aufgrund von meteorologischen Kriterien vorgenommen wurde, ermöglicht die Zuordnung von ca. 80% der Fälle mit einer markanten Abweichung der Tagesmittel für die einzelnen Tagesmittelformeln. Zudem zeigt sie, dass bezüglich der Auswirkung einer bestimmten Wetterlage, abgesehen von der konvektiven Wetterlage, die Abweichungen zwischen den Stationen gering bleiben. Das korrigierte arithmetische Mittel, welches im Jahre 1971 von der SMA eingeführt wurde, zeigt von allen hier untersuchten Tagesmittelformeln sowohl die geringste tägliche Variabilität, als auch die kleinste Auswirkung bezüglich den drei definierten Wetterlagen. Das auf den beiden Extremwerten basierende Tagesmittel zeigt im Gegensatz dazu eine markante tägliche Variabilität sowie eine starke Abhängigkeit von den konvektiven Wetterlagen. Das gewichtete arithmetische Mittel, welches bis zum Jahre 1970 an der SMA angewendet wurde und beim Deutschen Wetterdienst für das Klimanetz weiterhin verwendet wird, zeigt für die Abweichungen der Tagesmittel eine markante Variabilität, obwohl es geringe Abweichungen bezüglich dem Monatsmittel aufweist.

Die Bedeutung einzelner Wetterlagen bezüglich dem Verhalten der Mittelwerte zeigt sich in der Reduktion von Vergleichsmöglichkeiten zwischen den berechneten Zeitreihen mit den verschiedenen Mittelwerten. Eine Erwärmung, hervorgerufen durch eine Erhöhung der Häufigkeit von konvektiven Wetterlagen, wird tendenziell künstlich verstärkt durch eine Zeitreihe, welche auf einer Tagesmittelberechnung mit Hilfe der Tagesextremwerte beruht, wogegen diese Erwärmung durch eine Zeitreihe, welche auf dem korrigierten arithmetischen Mittel basiert, im normalen Ausmass festgehalten wird.

Die im Jahre 1971 für das klimatologische Messnetz eingeführten Korrekturfaktoren, welche die Vorverschiebung des Abendtermins bei der Berechnung des arithmetischen Mittels berücksichtigen, sind von der SMA nie überprüft worden. Die nun anhand von 34 Stationen des automatischen Messnetzes (ANETZ) durchgeführte Ueberprüfung erlaubt einerseits eine vereinfachte Regionalisierung der Korrekturfaktoren, zeigt aber andererseits auch die Robustheit dieser Formel auf. Die Zuordnung einer Station zu dieser oder jener Region hat eine untergeordnete Bedeutung und praktisch keinen Einfluss auf die Zeitreihen.

Dank der starken Abhängigkeit zwischen bestimmten Wetterlagen und den täglichen maximalen Abweichungen können die Grundzüge für eine neue Homogenisierungsmethode festgelegt werden. Im Gegensatz zur häufig angewandten Differenzenmethode, welche auf einem rein statistischen Ansatz beruht, wird die neue Homogenisierungsmethode auf einem deterministischen Ansatz basieren. Ein solcher deterministischer Ansatz wäre universell anwendbar und könnte weitgehend automatisiert werden.



## RIASSUNTO

Lo scopo del presente lavoro è di ricercare l'impatto dei differenti metodi di calcolo delle temperature medie giornaliere sulle lunghe serie di misure. Questo studio è inizialmente stato motivato dalle profonde modifiche apportate alla rete climatologica dell'Istituto Svizzero di Meteorologia (ISM) e, in particolare, dai cambiamenti del metodo di calcolo della temperatura media introdotti nel 1971 e nel 1981. Esso dovrebbe apportare un contributo alla problematica dell'omogeneizzazione delle lunghe serie temporali di dati termometrici e servire da base di conoscenza per lo sviluppo di nuovi metodi di omogeneizzazione.

Lo studio prende in considerazione le differenti formule di calcolo di medie giornaliere utilizzate in Svizzera, come pure un metodo utilizzato in Austria e quello basato sugli estremi giornalieri. Quest'ultimo, pure raccomandato dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM), viene ampiamente applicato nel mondo intero. Per molteplici ragioni, tra l'altro anche per la nostra volontà di applicare i risultati anche a formule non in uso in Svizzera, la valutazione è basata su una simulazione con l'aiuto dei valori orari della rete automatica di misura dell'ISM (ANETZ) dei diversi termini di osservazione che entrano nelle formule delle medie giornaliere. Per le medie giornaliere calcolate in questa maniera viene considerato un periodo di 10 anni (1981-1990) e applicato a 5 stazioni climatologiche caratteristiche. I diversi valori delle medie giornaliere vengono paragonate per ogni stazione con la media sulle 24 ore, ritenuto il valore di riferimento. Dal momento che il paragone delle medie giornaliere avviene all'interno della stazione, non è necessario effettuare confronti con stazioni vicine, con l'aiuto per esempio del metodo delle differenze. L'insieme delle 5 stazioni prese in considerazione comporta una stazione in quota (Säntis a 2500 m/slm), due di pianura (Zurigo e Ginevra), una di montagna (Davos a 1590 m/slm) e una stazione al sud delle Alpi (Lugano).

In un primo passo i risultati vengono presentati sottoforma di scarti medi annuali e mensili dalla media di riferimento, ciò che permette un confronto con ricerche antecedenti. Le due formule utilizzate in Svizzera, la media aritmetica ponderata e la media aritmetica corretta, mostrano solo modeste deviazioni dalla media, non superiori a 0.2 K. La media austriaca e la media giornaliera calcolata con i valori estremi giornalieri mostrano invece scarti più importanti, fino a 0.4 K. Gli scarti tra le stazioni sono pure sensibilmente più elevati (fino a 0.5 K). Per contro, gli scarti delle medie mensili per le due formule svizzere e per il metodo austriaco restano molto contenuti, queste formule possono così essere utilizzate come base di riduzione per l'omogeneizzazione di serie temporali di dati termometrici. Con la formula per il calcolo della media giornaliera raccomandata dall'OMM, gli scarti delle medie mensili giungono invece fino a 1.0 K e inoltre la variabilità annuale risulta piuttosto importante.

Ogni stazione presenta il proprio andamento annuale delle deviazioni mensili. L'analisi degli scarti delle medie giornaliere fornisce un'insieme di situazioni sinottiche caratterizzate dall'assenza di fenomeni avvevivi ma con la presenza di una elevata insolazione. Ciò ha messo in evidenza che fattori locali possono avere un certo influsso sul comportamento dei valori medi giornalieri. Anche se certi segnali locali risultano piuttosto chiari, come per esempio la topografia, non è possibile spiegare in maniera sistematica le differenze tra le singole stazioni e di conseguenza giustificare l'applicazione della deviazione delle temperatura di una o più stazioni come base di riduzione per altre stazioni svizzere o estere.

Questi risultati, così come il proposito di sviluppare un metodo generale per l'omogeneizzazione di serie temporali di dati termometrici, hanno portato a un paragone

degli scarti della temperatura media delle diverse formule di calcolo della temperatura media e della media sulle 24 ore. La ricerca permette di stabilire l'importanza da attribuire alla variabilità delle deviazioni delle temperature giornaliere e soprattutto di rappresentare il suo andamento aleatorio. Per questo motivo lo studio si limita ai casi dove il valore assoluto degli scarti supera la soglia di 0.8 K. La soglia di  $\pm 0.8$  K è stata definita in maniera semi empirica. Gli altri scarti, compresi nella fascia  $\pm 0.8$  K, vengono considerati come rumori di fondo.

L'elaborazione dei dati ha mostrato che deviazioni importanti appaiono principalmente con situazioni meteorologiche particolari. I dati relativi sono stati suddivisi in tre classi, e cioè nelle tre situazioni meteorologiche avveviva fredda, avveviva calda e convettiva. Questa classificazione dei dati, intrapresa in base a criteri strettamente meteorologici, permette di spiegare ca. l'80% dei casi con una significativa deviazione delle medie giornaliere per ogni formula di calcolo della media. Inoltre, essa mostra che, per quanto riguarda le conseguenze di una determinata situazione meteorologica, a parte le situazioni convettive, gli scarti tra le stazioni restano piccoli. La media aritmetica corretta, introdotta dall'ISM nel 1971, tra tutte le formule di calcolo della media prese in considerazione, mostra sia la più debole variabilità giornaliera, sia la minor reazione alle tre situazioni meteorologiche prese in considerazione. Per contro, il metodo di calcolo delle medie basato sui due estremi giornalieri si è dimostrato molto dipendente dalle situazioni convettive e mostra una forte variabilità giornaliera. La media aritmetica ponderata invece, usata dall'ISM fino al 1970 e tuttora applicata dal servizio meteorologico tedesco per la rete climatologica, presenta una marcata variabilità per quanto concerne gli scarti dalla media giornaliera ma una debole deviazione rispetto alla media mensile.

L'importanza di singole situazioni meteorologiche per il comportamento dei valori medi ha per conseguenza una riduzione delle possibilità di paragone tra le serie temporali calcolate e le diverse medie. Per esempio, un riscaldamento provocato da un aumento della frequenza di situazioni meteorologiche convettive sarà così tendenzialmente accentuato artificialmente da una serie temporale che si basa sugli estremi giornalieri per il calcolo della media giornaliera, mentre lo stesso riscaldamento sarà considerato normalmente da una serie temporale determinata in base alla media aritmetica corretta.

I fattori di correzione introdotti nel 1971 per il calcolo della media aritmetica, al fine di compensare l'anticipo del termine dell'osservazione serale nella rete climatologica, non sono mai stati verificati dall'ISM. L'analisi effettuata ora sulla base di 34 stazioni della rete automatica di misura (ANETZ) permette da una parte di effettuare una semplice regionalizzazione dei fattori di correzione e dall'altra mostra pure la robustezza di questa formula. L'attribuzione di una stazione a una regione piuttosto che a un'altra ha un significato secondario e non comporta praticamente nessuna conseguenza sulle serie temporali.

Grazie alla forte dipendenza tra determinate situazioni meteorologiche e la deviazioni massime giornaliere possono essere fissati i parametri per un nuovo metodo domogenizzazione. Contrariamente al metodo delle differenze, spesso applicato e che si basa esclusivamente su criteri prettamente statistici, questo nuovo metodo di omogeneizzazione si basa su presupposti deterministici. Un approccio deterministico al problema, com'è stato in parte analizzato, potrebbe venir applicato in maniera universale e in gran misura automatizzato.

## 1 INTRODUCTION

Le climat et ses variations ont exercé de tout temps une influence marquante sur l'homme et son écosystème. Actuellement, une certaine appréhension générale face au devenir de notre climat et aux conséquences qu'aurait un réchauffement global de l'atmosphère sur notre environnement et sur notre mode de vie suscite un regain d'intérêt du monde politique et mobilise de nombreuses disciplines des sciences naturelles et humaines.

Pour de nombreux scientifiques, les clés de l'avenir du climat de notre planète, ainsi que les réponses aux hypothèses relatives à une influence de l'homme sur notre machine climatique, se trouvent dans le passé. En effet, seule une parfaite connaissance des variations naturelles de notre climat et de leurs implications sur notre écosystème peut nous donner les moyens de dégager les tendances de son évolution future.

La reconstitution du climat historique proche ou lointain et ses relations avec l'environnement a constitué et constitue encore le but de nombreux travaux de recherches. Plusieurs approches sont possibles, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients. Elles dépendent principalement du matériel (des données) à disposition qui déterminent la longueur ainsi que la résolution spatio-temporelle de la période pouvant être étudiée. On distingue généralement les données anthropogènes et les données naturelles recensées sur le terrain. Les données anthropogènes se divisent en «données directes» et «données indirectes». Le premier groupe comprend les observations et les mesures météorologiques, tandis que le deuxième inclut des observations écrites de phénomènes biologiques ou physiques (date de floraison, levée du ban des vendanges, crue d'une rivière) ainsi que d'autres sources matérielles, telles que les iconographies d'un glacier, par exemple, les monuments, les ruines archéologiques.

Les données naturelles, fournies par des disciplines scientifiques, comprennent les moraines, les sédiments, les pollens, les cernes du bois. Elles permettent de reconstituer des périodes beaucoup plus longues qu'avec les données anthropogènes. Leur résolution temporelle est par contre beaucoup plus faible et elles ne permettent pas la représentation d'un cycle annuel complet. Tout comme les données anthropogènes indirectes, elles requièrent une calibration ou l'établissement de correspondances à l'aide de séries de mesures météorologiques.

Les observations indirectes ont l'avantage de permettre une reconstitution du cycle annuel complet. Elles apportent également des renseignements précieux sur l'état de l'environnement. Par contre, la période pouvant être reconstituée est relativement courte et doit être limitée à des régions disposant d'archives complètes. Les données indirectes ainsi que les observations naturelles intègrent plusieurs paramètres météorologiques, qui peuvent difficilement être différenciés.

Les premières observations météorologiques datent du début du 18<sup>ème</sup> siècle. En Suisse, les premières séries continues ont débuté vers 1750 (Genève et Bâle), et il faut attendre la création du premier réseau d'observation en 1864 pour obtenir des données régulières couvrant tout le territoire.

Les séries d'observations climatologiques ont pour atout une haute résolution spatio-temporelle. Elles offrent une description précise de chaque paramètre météorologique. En revanche, la période instrumentale (à partir de 1864) est bien courte en regard de l'échelle des variations climatiques. Néanmoins, elles sont un instrument indispensable pour la surveillance à court terme (monitoring) de ces variations et pour la calibration des données indirectes et naturelles. Tout comme les observations indirectes, elles permettent d'étudier également les événements exceptionnels (fortes pluies, période de grand froid), qui sont souvent les signes avant-coureurs d'une modification climatique, ainsi que les interactions climat - écosystème. Ce dernier point est très important pour la modélisation numérique du climat, et particulièrement pour la compréhension et l'interprétation des renseignements fournis par ces modèles.

Notre propos n'est pas d'établir un palmarès des méthodes utilisées par les historiens du climat. Chaque méthode a sa justification et son champ d'application précis. Nous tenons toutefois à montrer la place qu'occupent les séries d'observations climatologiques parmi ces différentes méthodes.

Les séries d'observations climatologiques sont donc un instrument indispensable pour l'étude de la phase de réchauffement qui a suivi la fin du «Petit Age Glaciaire», aux alentours de 1850, et pour répondre aux hypothèses relatives à une modification climatique induite par l'activité humaine. Pour ce faire, nous devons disposer de longues séries d'observations climatologiques de bonne qualité, c'est-à-dire exemptes de toute influence d'origine non climatique.

Les profondes modifications subies par le réseau d'observations climatologiques de l'Institut Suisse de Météorologie (ISM) durant les vingt dernières années sont un bon exemple des problèmes auxquels sont confrontés les services chargés du contrôle, de l'homogénéisation et de la publication des séries climatologiques. L'analyse de ces modifications et de leurs impacts sur les séries temporelles revêt donc une importance particulière. Puisse le présent travail apporter une contribution à l'établissement de séries climatologiques de bonne qualité.

## 2 ENONCE DU PROBLEME

### 2.1 Introduction

Nous avons vu, au chapitre précédent, que les longues séries de mesures de différents paramètres météorologiques sont un instrument indispensable pour l'étude du climat et de ses variations, passées et futures. Les services météorologiques nationaux ressentirent très tôt le besoin d'uniformiser les périodes servant au calcul des normes climatiques. En 1872, le Comité International de Météorologie décida d'utiliser des périodes communes de 30 ans, afin de permettre une comparaison des différentes normes climatologiques. L'OMM décida par la suite que les Etats membres devaient établir et réviser à intervalles réguliers les normes climatologiques des stations reliées au système de télécommunication global (GTS). La première période se situait entre les années 1901 - 1930. On maintint ce cycle de 30 ans pour les périodes suivantes, c'est-à-dire 1931 - 1960 et 1961 - 1990 (WCDP, 1989:2).

Avant de pouvoir publier et interpréter les séries temporelles ou les normes (mensuelles, annuelles) d'une période climatologique, il convient de s'assurer que les données utilisées sont homogènes. Selon Köppen et Geiger (1936), une série temporelle d'observations météorologiques est homogène si les variations du paramètre observé sont uniquement causées par des phénomènes météorologiques. Selon cette définition, les inhomogénéités d'une série temporelle sont d'origine non climatique et découlent directement du réseau d'observations et de son exploitation. Elles sont généralement causées par les facteurs suivants (Mitchell, 1953; WCDP, 1989):

- Les instruments et leur entretien. Par exemple une lente dérive, la modification, la recalibration ou le remplacement d'un capteur.
- L'installation des instruments. Par exemple l'introduction d'un nouveau type d'abri ou la lente détérioration de l'abri existant.
- Le déplacement vertical ou horizontal de la station, dans un espace restreint ou sur une distance plus importante.
- La modification des alentours par la construction d'immeubles proches, le changement d'affectation du sol ou tout simplement par la croissance de la végétation.
- L'observateur. Le remplacement de l'observateur peut également se répercuter sur les séries temporelles. Ceci concerne généralement les observations visuelles (nébulosité, visibilité), mais peut également affecter les autres paramètres (erreurs de lecture systématiques des instruments, non-respect de l'horaire).
- La modification des heures ou du protocole d'observation.
- Le changement de la méthode de calcul de la température journalière moyenne.

Nous voyons donc que la prudence est de mise face à ces nombreuses possibilités d'inhomogénéités. Même si certaines erreurs provoquées par les cas mentionnés ci-dessus peuvent être rapidement corrigées dès leur apparition, les autres, comme la lente dérive d'un capteur, par exemple, nécessitent souvent de longues périodes de comparaison pour pouvoir être décelées.

Dans le but d'exposer notre problématique et de justifier les options prises, les lignes qui suivent décrivent sommairement l'historique du réseau climatologique, de

sa création jusqu'à nos jours. En effet, comme nous le verrons plus loin, les importantes modifications apportées au réseau climatologique de l'ISM durant les 20 dernières années ont non seulement suscité ce travail, mais elles l'ont également rendu possible!

## 2.2 Le réseau climatologique

Le réseau d'observations climatologiques (ou réseau climatologique), établi en 1864 par le Bureau Météorologique de la Société Helvétique des Sciences Naturelles, repris en 1881 par la "Meteorologische Zentralanstalt" nouvellement créée, s'est développé régulièrement au cours des ans, passant de 88 stations en 1864 à 120 stations en 1980 (ISM, 1981:8). Techniquement extrêmement stable, il n'a subi durant plus d'un siècle, que de modestes transformations, toutes ponctuelles, tels des changements d'observateurs, des déplacements de certaines stations (souvent liés à des changements d'observateurs) ainsi que les modifications de l'installation. Les instruments étaient initialement installés dans une boîte en tôle fixée sur une fenêtre exposée au nord. Ce type d'installation<sup>1</sup> fut d'abord en partie remplacé par des abris météorologiques de type Wild et, par la suite, par un abri de type anglais répondant aux normes internationales (Schüepp, 1980:192). Il est évident que chaque modification de l'installation d'une station se répercute sur le comportement des instruments et se retrouve dans les séries temporelles de température. Ces modifications étaient heureusement rares et surtout isolées, ce qui permettait d'en étudier les conséquences par comparaison avec des stations voisines laissées en l'état. En revanche, la fin des années soixante marque le début de toute une série de remaniements impliquant le réseau dans son ensemble.

Les difficultés croissantes à recruter des observateurs fiables et prêts à effectuer des observations extérieures à 21h30 (en plein feuilleton télévisé!) ont contraint l'ISM à modifier les trois heures d'observation quotidiennes, établies pratiquement dès le début des observations systématiques à 07h30, 13h30 et 21h30 [HEC], selon le modèle défini en 1780 pour le réseau de la «Societa Meteorologica Palatina». Ces heures d'observation sont également dénommées «Mannheimer Stunden» (Lingelbach, 1980:2). Au 1<sup>er</sup> janvier 1971, l'observation du soir fut donc avancée de deux heures (de 21.30h à 19.30h). Cette modification, appliquée simultanément à l'ensemble du réseau, entraîna le remplacement de l'ancienne méthode de calcul de la température journalière moyenne (la moyenne pondérée, également appelée «Kämtzscher Mittel», d'après le nom de son inventeur) par une autre formule, mieux adaptée aux nouvelles heures d'observation. Les moyennes journalières de l'humidité relative subirent une modification semblable. On passa d'une simple moyenne arithmétique des trois heures d'observation à une formule plus complexe. En raison d'un calendrier très chargé, il n'y eut aucune mesure parallèle avec les deux horaires d'observation. De plus, plusieurs stations, rattachées à cette occasion au réseau synoptique international, ont subi un déplacement des trois observations climatologiques quotidiennes de 45 minutes environ (6.45h, 12.45h, 18.45h [HEC]). Ces méthodes de calcul de la température journalière moyenne seront l'objet d'une discussion plus détaillée au chapitre suivant. Le déplacement de l'observation du soir

---

1. *Hausaufstellung* en allemand

entraîna également une modification des heures de lecture des thermomètres à minima et maxima (voir figure 2.1). Nous traiterons plus loin ce point particulier qui affecte également les séries temporelles de température.

La nécessité de disposer d'observations continues transmises en temps réel pour répondre aux besoins des prévisionnistes et de nombreux scientifiques et ingénieurs ainsi que de sérieux problèmes de recrutement des observateurs, ont incité l'ISM à automatiser une partie des stations climatologiques conventionnelles et toutes les stations synoptiques. Cette phase d'automatisation a débuté en 1976, mais le réseau est véritablement devenu opérationnel en 1981, avec l'introduction officielle du traitement automatique des données. Ce nouveau réseau ANETZ (pour "Automatisches Messnetz"), qui comprend actuellement 72 stations, transmet toutes les 10 minutes de nombreux paramètres météorologiques (ou valeurs à 10 minutes) à la centrale de Zurich. Ceux-ci sont ensuite enregistrés, contrôlés, transformés en sommes ou moyennes horaires (appelées valeurs horaires) et transmis aux utilisateurs. L'automatisation a vu le remplacement de toute l'instrumentation de la station. Ainsi le thermomètre à mercure installé dans un abri météorologiques (de type anglais dans la plupart des cas) a été remplacé par un thermomètre ventilé (VHT pour "Ventiliertes geheiztes Thermometer") équipé d'un capteur électronique. Le thermomètre VHT fut lui-même remplacé en 1991 par un thermo-hygromètre (le THYGAN<sup>2</sup>) plus fiable. Certaines stations ont également dû être déplacées lors du passage à l'ANETZ pour répondre, entre autres, à certaines contraintes techniques (alimentation en électricité, raccordement au réseau téléphonique par exemple). Pour une partie des stations, des mesures parallèles, plus ou moins longues, ont été effectuées lors du passage à l'ANETZ. Ces mesures parallèles sont très précieuses pour décrire les changements amenés par la modification des capteurs (Gisler, 1992).

Avec l'automatisation, du point de vue de l'instrumentation, le réseau a passé d'une phase d'extrême stabilité à une phase de constants développements techniques. L'exemple du capteur de température de l'air cité précédemment est révélateur de cette tendance. Par contre, du point de vue de la qualité des observations, l'automatisation a apporté de nombreux avantages. Les erreurs de mesures liées à l'observateur (observations précoces ou tardives, erreurs de lecture des instruments, modification de la température de l'abri lors de l'observation, etc) ont disparu. De plus, la haute résolution temporelle (144 mesures/jour) permet d'appréhender des phénomènes impossibles à décrire avec l'ancien réseau et ses trois observations quotidiennes et autorise un calcul très précis des moyennes ou des sommes journalières. Ces nouveaux modes de calcul, ainsi qu'une modification des périodes de mesures des minima et maxima journaliers (conformément aux prescriptions de l'OMM, voir fig. 2.1), ont été officiellement introduits en 1981 avec l'automatisation du traitement des données (traitement VAMP). Par contre, la véritable avalanche de données provoquée par l'automatisation des capteurs a causé de nombreux problèmes et un surcroît de travail aux services chargés du contrôle et de l'archivage des données.

---

2. Pour une description du THYGAN, voir Ruppert (1991) et Dössegger et al. (1992)

En résumé, nous pouvons dire que, du point de vue du réseau climatologique, la période climatologique 1961-1990 a principalement été marquée par d'importantes modifications de l'instrumentation des stations lors de leur automatisation à partir de 1976, ainsi que par deux changements du mode de calcul des sommes et des moyennes journalières en 1971 et 1981. Ces deux derniers points affectent tout particulièrement les séries temporelles de température de l'air.

Le but initial de notre travail était d'homogénéiser plusieurs paramètres de la période climatologique 1961-1990 pour quelques stations du réseau climatologique. Chronologiquement, le premier obstacle à résoudre était précisément l'introduction des nouvelles heures d'observation le 1<sup>er</sup> janvier 1971 avec un autre mode de calcul de la température journalière moyenne. En conséquence, et en l'absence de mesures parallèles ou d'études spécifiques à l'ISM, nous nous sommes intéressé de plus près à la problématique du calcul de la température journalière moyenne et en avons profité pour y inclure des aspects qui ne concernent pas directement le réseau climatologique de l'ISM.

### 2.3 La température journalière moyenne

Ce chapitre décrit plusieurs méthodes de calcul de la température journalière moyenne utilisées couramment par différents services météorologiques ou introduites par l'ISM lors des modifications mentionnées précédemment. Ces formules ne sont pas présentées dans l'ordre chronologique de leur invention, mais selon la chronologie des développements du réseau climatologique de l'ISM.

La comparaison de diverses formules de calcul de la température journalière moyenne et la recherche de la meilleure approche de la moyenne sur 24 heures (considérée par de nombreux auteurs comme étant la «moyenne vraie») ont constitué une problématique climatologique importante aux 19<sup>e</sup> et début du 20<sup>e</sup> siècle, occasionnant de nombreuses publications.

#### 2.3.1 La moyenne pondérée

Sur la base des observations horaires faites à Padova (Italie) par Chiminello de 1778 à 1780 et par Brewster à Edimbourg de 1824 à 1825, Schouw (1823) et Kämtz (1831) furent parmi les premiers à tenter d'approcher la moyenne journalière sur 24 heures par une formule arithmétique utilisant un nombre restreint d'observations journalières. Kämtz, qui disposait alors des trois heures d'observation classiques de la Societa Meteorologica Palatina (7h, 14h, 21h), découvrit la moyenne pondérée (ou *Vierer-Mittel* en allemand) et que nous avons appelée  $Tmp21^3$  (Kämtz, 1831:102)

$$Tmp21 = \frac{T7.30 + T13.30 + 2 \times T21.30}{4} \quad (2.1)$$

Le double poids de l'observation du soir est censé remplacer l'observation de la nuit. Cette formule, qui fut utilisée par l'ISM depuis les débuts du réseau climatologique jusqu'en 1970, ainsi que par les services météorologiques allemand et autrichien, a fait l'objet de nombreux travaux. Une grande partie de ceux-ci a été publiée en alle-

---

3.  $Tmp21$ : pour Température moyenné pondérée avec l'observation du soir à 21h



mand. Citons principalement Erk (1883), Schreiber (1888,1906,1916), Köppen (1888), Hellmann (1915), Wehàjosy (1932) et, plus près de nous, Junghans (1968), Siogas (1971), Kramer (1973) et Junge (1989). Cette formule, initialement créée pour le calcul des températures mensuelles, produit d'excellents résultats. Hellmann (1915:(18)) a relevé que la qualité des résultats dépend de l'exposition et du type d'abri utilisé. Il a démontré par exemple qu'elle produit d'importants écarts lorsque la température est mesurée dans un abri de type russe (abri Wild) ouvert du côté nord et vers le bas.

Nous verrons plus loin que la moyenne Tmp21 (2.1) n'est en fait pas du tout adaptée au calcul des moyennes journalières. Les moyennes mensuelles publiées dans les Annales de l'ISM étaient calculées à l'aide de Tmp21 (2.1) alors que les moyennes journalières étaient établies à l'aide de la moyenne arithmétique présentée ci-dessous. Ainsi, l'utilisateur qui calcule une moyenne mensuelle d'après les températures journalières publiées dans les Annales n'obtiendra pas la valeur de cette moyenne mensuelle, également publiée dans les Annales. Cette situation a prévalu jusqu'en 1970.

### 2.3.2 La moyenne arithmétique

Utilisée par la Societa Meteorologica Palatina, la moyenne arithmétique Tma21<sup>4</sup>

$$Tma21 = \frac{T7.30 + T13.30 + T21.30}{3} \quad (2.2)$$

ne convient pas bien au calcul des moyennes mensuelles. On remarqua rapidement qu'elle provoque une surestimation de la moyenne sur 24 heures, durant les mois d'été principalement (Kämtz, 1831:102). De nombreux auteurs ont tenté de remédier à cet état de fait en attribuant un coefficient de correction à la moyenne mensuelle de chaque heure d'observation ou à la moyenne mensuelle elle-même (Schouw, 1823; Kämtz, 1831; Schreiber, 1906; Ekholm, 1916).

Cette approche, assez intéressante en soi, ne s'est jamais vraiment imposée dans la pratique. Elle nécessite en effet des facteurs de correction déterminés individuellement pour chaque station. Ceux-ci sont calculés grâce à des observations horaires ou thermographiques effectuées durant une assez longue période, ce qui est difficilement réalisable pour un réseau d'une certaine ampleur ou pour un pays présentant d'importants contrastes climatiques. A notre connaissance, le service météorologique suédois utilisa cette approche pour le calcul des températures mensuelles moyennes (Ekholm, 1916:7ff) à l'instar de l'ISM durant un certain temps pour quelques stations situées dans des couvents. Dans ces couvents, la journée commençait et se terminait très tôt. Les moines effectuaient donc l'observation du soir juste avant de se coucher (environ 20h) et non à 21.30h.

---

4. Tma21: pour Température moyenne arithmétique avec l'observation du soir à 21h

### 2.3.3 La moyenne arithmétique corrigée

En 1971, l'ISM introduisit une formule développée par Köppen (1888:341ff) pour répondre aux besoins de la météorologie maritime. Pour diverses raisons, liées en partie aux changements de quart sur les navires, les heures d'observation de la météorologie maritime étaient établies à 08h, 14h et 20h. La formule Tmp21 (2.1) n'étant dans ce cas pas utilisable pour de telles heures d'observation, Köppen modifia la formule

$$T_m = \frac{T_{08} + T_{14} + T_{20} + T_{min}}{4} \quad (2.3)$$

préconisée par le Congrès météorologique de Vienne en attribuant un coefficient  $\alpha$  au minimum journalier  $T_{min}$  et un coefficient 1 à chaque heure d'observation. Cette formule a en effet le désavantage de produire des moyennes mensuelles trop basses en hiver. Pour sa nouvelle formule, que nous avons appelée  $T_{maK}^5$ , Köppen (1888:345) posa, si

$$N = \frac{T_{7.30} + T_{13.30} + T_{19.30}}{3}$$

alors nous obtenons

$$\begin{aligned} T_{maK} &= \frac{3N + \alpha T_{min}}{3 + \alpha} = \frac{3N + \alpha N + \alpha T_{min} - \alpha N}{3 + \alpha} = \frac{(3 + \alpha)N - \alpha(N - T_{min})}{3 + \alpha} \\ &= N - \frac{\alpha}{3 + \alpha} \times (N - T_{min}) = N - K \times (N - T_{min}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

si

$$K (\text{facteur de correction}) = \frac{\alpha}{3 + \alpha}$$

En d'autres termes, la correction appliquée à  $N$  pour approcher au mieux la moyenne sur 24 heures, est proportionnelle à l'écart entre  $N$  et  $T_{min}$ .  $T_{min}$  est déterminé selon la période de mesure du minimum en usage à partir de 1971 pour les stations conventionnelles (voir figure 2.1).

A la fin de son étude, Köppen découvrit le travail de Mohn (1884) qui proposait une formule très semblable. Les services météorologiques norvégiens utilisaient à l'époque la formule (2.3) recommandée par le Congrès Météorologique de Vienne et qui avait pour principal défaut de produire des moyennes mensuelles hivernales trop basses. Cette particularité était encore accentuée pour les stations situées au nord du cercle polaire. Durant la nuit polaire, les variations journalières de la température sont

---

5.  $T_{maK}$ : pour Température moyenne arithmétique avec facteur de correction  $K$

très faibles, ce qui confère un poids trop important à  $T_{min}$ . Mohn attribua un coefficient mensuel  $\alpha$  à  $T_{min}$  et posa

$$T_m = \frac{T_{08} + T_{14} + T_{20} + \alpha T_{min}}{3 + \alpha}$$

$\alpha=1$  pour les stations situées au sud de Trondheim (63.5°N). Déterminés mensuellement pour la station de Bossekop (70°N), ces coefficients  $\alpha$  varient proportionnellement à la latitude pour les autres stations polaires (Mohn, 1884:XIII).

Nous n'avons malheureusement que peu de renseignements concernant l'introduction de la moyenne  $T_{maK}$  (2.4) et plus particulièrement concernant le calcul et la régionalisation des facteurs de correction  $K$  par l'ISM. Les facteurs de corrections  $K$  ont été déterminés et régionalisés en un temps record par Max Schüepp et Charlotte Urfer. Ce travail, qui constitua pour une grande part à dépouiller des thermogrammes, fut effectué avec des moyens informatiques très limités. Pressés par le temps, Schüepp et Urfer n'eurent pas la possibilité de contrôler leurs résultats d'une manière approfondie. Ces facteurs  $K$  sont en usage depuis plus de 20 ans et il nous semble judicieux de profiter maintenant des possibilités offertes par le réseau ANETZ pour les contrôler. Nous traiterons du calcul, de la régionalisation et surtout du contrôle des facteurs  $K$  au chapitre 6.

#### 2.3.4 La moyenne «autrichienne»

Les services météorologiques autrichiens, confrontés à la fin des années soixante aux mêmes problèmes de recrutement des observateurs que l'ISM, prirent en même temps, les mêmes mesures que l'ISM (déplacement de l'observation du soir au 1<sup>er</sup> janvier 1971). Ils introduisirent cependant une autre formule de calcul de la température journalière moyenne, que nous avons appelée  $T_{mA}$ <sup>6</sup>.

$$T_{mA} = \frac{T_{7.30} + T_{19.30} + T_{min} + T_{max}}{4} \quad (2.5)$$

Cette formule, uniquement utilisée par le service météorologique autrichien, n'a, à notre connaissance, pas fait l'objet de nombreux travaux. Hann-Süring (1939:144) mentionne une formule similaire, mais avec des heures d'observation légèrement différentes, et la présente comme étant une ancienne formule italienne. Siogas (1972) et Krammer (1976) ont étudié cette formule avec des données provenant d'Innsbruck et de Bâle.

Cette formule n'était alors pas utilisable en Suisse. De nombreuses stations étaient en effet encore installées dans une boîte en tôle fixée sur la façade nord d'un bâtiment. Ce type d'installation n'offre pas une protection absolue contre le rayonnement direct et ne permet donc pas la mesure du maximum journalier de la température.  $T_{mA}$  (2.5) aurait eu l'avantage, par rapport à  $T_{maK}$  (2.4), de ne pas contenir de facteurs de correction, toujours sujets à caution et surtout fastidieux à déterminer sans moyens informatiques. Il n'y eut, à l'époque, aucun contact entre Suisses et Autrichiens au

---

6.  $T_{mA}$ : pour Température moyenne Autrichienne

sujet des problèmes soulevés par la modification des heures d'observation, les deux services n'ayant pas même eu connaissance des intentions de leurs voisins.

### 2.3.5 La moyenne sur 24 heures

Comme nous l'avons vu précédemment (voir chapitre 2.3.1), les premières moyennes journalières sur 24 heures datent de 1778 et de 1824. Par la suite, l'introduction des thermographes ainsi que le développement des réseaux d'observations synoptiques effectuant 8 observations quotidiennes (pour les besoins de la navigation aérienne) a répandu l'usage de cette moyenne pour des applications climatologiques.

Utilisée à partir de 1981 comme moyenne journalière officielle des stations automatiques ANETZ et publiée comme telle dans les Annales de l'ISM, la moyenne sur 24 heures  $T_{m24}$ <sup>7</sup>

$$T_{m24} = \frac{1}{144} \sum_{i=1}^{144} T_{10} \quad (2.6)$$

$T_{10}$  = valeurs à 10 minutes

est en fait non pas la moyenne de 24 observations horaires, mais la moyenne de 144 mesures ponctuelles (valeurs à 10 minutes). La période de mesure d'une moyenne horaire débute à HH.50 et se termine à HH.40 de l'heure suivante. La haute résolution temporelle de  $T_{m24}$  (2.6) permet d'appréhender des phénomènes ne pouvant être décelés avec les trois heures d'observation habituelles. Comme elle permet la meilleure approche des variations diurnes de la température et comme l'usage toujours plus répandu des capteurs automatiques va en favoriser l'utilisation dans les années à venir, elle nous sert de référence absolue pour comparer toutes les autres moyennes.

### 2.3.6 La moyenne des minima et maxima

Connue depuis fort longtemps (elle est déjà mentionnée par Schouw et Kämtz), l'approche de la moyenne sur 24 heures à l'aide de la moyenne des extrêmes journaliers, que nous avons baptisée  $T_{mMm}$ <sup>8</sup>,

$$T_{mMm} = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} \quad (2.7)$$

n'a jamais été utilisée en Suisse. La formule  $T_{mMm}$  est en revanche largement répandue dans les pays latins et anglo-saxons. Contrairement aux autres formules, elle ne requiert pas absolument des heures d'observation précises. Le choix et le respect de l'heure de lecture quotidienne des thermomètres à minima et maxima n'a pas une aussi grande importance que pour les autres moyennes.  $T_{mMm}$  (2.7) a été l'objet de nombreuses publications, principalement en anglais, qui traitent, pour la plupart, plus particulièrement des écarts causés par les différentes heures de lecture des thermomètres à minima et maxima. On peut citer notamment Ellis (1890), Hart-

---

7.  $T_{m24}$ : pour Température moyenne sur 24 heures

8.  $T_{mMm}$ : pour Température moyenne des Maximas et minimas

zell (1919), Nichols (1934), Rumbaugh (1934), etc. Ces études sont malheureusement fondées généralement sur des périodes très courtes (1-2 année) et peuvent difficilement être comparées entre elles ou utilisées comme base de réduction pour d'autres séries de températures. Les publications de Mitchell (1958), Backer (1975) et de Schaal et Dale (1977) considèrent le problème du déplacement de l'heure d'observation dans l'optique du calcul des jours de chauffage ou de climatisation, ou encore de la prévision de certaines phases phénologiques. Pour ces cas précis, du fait de la sommation des températures journalières, et donc du cumul des erreurs, les effets de tels déplacements sont bien plus importants que dans le cas de la température moyenne. Pour notre part, selon les conventions de l'OMM et du réseau ANETZ, nous avons calculé  $T_{mMm}$  (2.7) avec des extrêmes journaliers relevés à minuit (voir figure 2.1).

Bien que cette moyenne n'ait jamais été utilisée en Suisse, elle nous intéresse tout particulièrement. Elle est probablement une de celles qui ont été le plus utilisées dans le monde entier. De plus, elle était, à l'origine, vivement recommandée par l'OMM pour la publication de la période climatologique 1961-1990 (WCDP, 1989:6). Par la suite, l'OMM a étendu le choix des moyennes journalières pouvant être utilisées à cet effet en y incluant la moyenne  $T_{mp21}$  (2.1) (WCDP, 1991:19).

#### 2.3.7 Autres moyennes

En plus des formules citées ci-dessus, nous pouvons encore mentionner la moyenne arithmétique  $T_{ma19}$ <sup>9</sup>

$$T_{ma19} = \frac{T_{7.30} + T_{13.30} + T_{19.30}}{3} \quad (2.8)$$

ainsi que la moyenne pondérée  $T_{mp19}$ <sup>10</sup>

$$T_{mp19} = \frac{T_{7.30} + T_{13.30} + 2 \times T_{19.30}}{4} \quad (2.9)$$

Ces deux formules n'ont jamais été utilisées par l'ISM pour le calcul des moyennes journalières ou mensuelles.  $T_{ma19}$  (2.8) met en évidence l'importance du terme correcteur  $K(N - T_{min})$  dans la formule  $T_{maK}$  (2.4).  $T_{mp19}$  (2.9) permet de simuler ce qui se serait passé lors du déplacement de l'heure d'observation du soir en 1971 si l'ISM n'avait pas introduit la nouvelle moyenne  $T_{maK}$  (2.4).

#### 2.4 La détermination des extrêmes journaliers de la température

Comme nous l'avons vu au chapitre 2.2, le réseau climatologique de l'ISM a connu deux modifications des heures de lecture des thermomètres à minima et maxima. Les différentes périodes de mesure des extrêmes journaliers de la température sont représentées à la figure 2.1. Ces modifications de la période de mesure des extrêmes provoquent des inhomogénéités dans les séries temporelles de minima et maxima. Cette problématique concerne principalement les réseaux thermométriques qui calculent la

9.  $T_{ma19}$ : pour Température moyenne arithmétique avec observation du soir à 19.30

10.  $T_{mp19}$ : pour Température moyenne pondérée avec observation du soir à 19.30

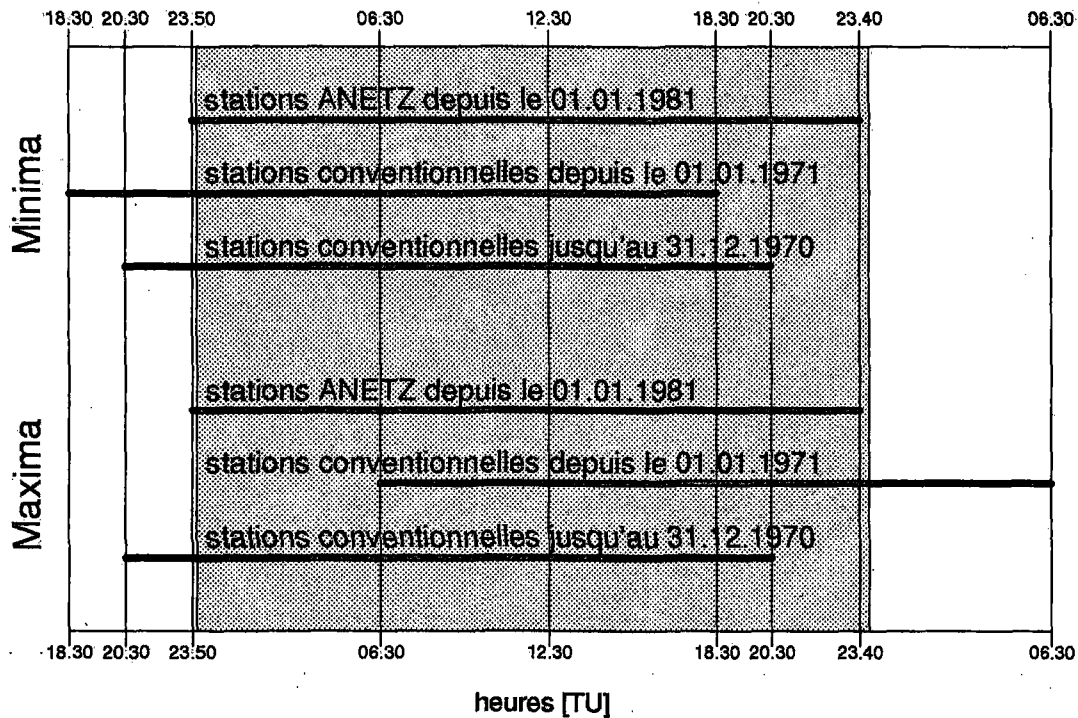


fig. 2.1 Périodes de mesure des minima et maxima journaliers de la température

moyenne journalière avec  $T_mMm$  (2.7). Les USA ont été particulièrement confrontés à ce genre de problème. Le réseau américain recouvre plusieurs fuseaux horaires et une grande partie des stations secondaires effectuent les observations selon l'heure légale du lieu et non selon une heure unifiée ou selon l'heure universelle (Nichols, 1934:337ff). Une bonne partie des publications qui traitent de cette problématique sont le fait d'auteurs américains et anglais et ont fréquemment été publiées dans la «Monthly Weather Review».

Pour l'ISM, seule la moyenne  $T_{maK}$  (2.4), qui contient  $T_{min}$ , est concernée par cette problématique. Afin de comparer les minima mesurés selon les protocoles «jusqu'au 31.12.1970» et «depuis le 01.01.1971», nous avons relevé, durant la période 1981-1985, tous les jours présentant une différence entre les deux minima. Les constatations suivantes peuvent être tirées de l'étude de ces cas :

1. Les minima déterminés d'après la méthode «jusqu'au 31.12.1970» sont, dans plus de la moitié des cas, inférieurs à ceux qui l'ont été selon «depuis le 01.01.1971». Les moyennes mensuelles des différences sont faibles (env. 0.1 K).
2. Les différences sont plus fréquentes en hiver (novembre - février) où elles représentent près de 40% des jours.

Cette dernière constatation recoupe une étude de Collison et Tabony (1984). Selon les auteurs, les écarts entre les différents minima peuvent être mis en relation avec des passages frontaux, qui sont, sous nos latitudes, plus fréquents en hiver qu'en été.

Considérant le faible poids (<10%) de  $T_{min}$  dans  $T_{maK}$  (2.4), nous pouvons admettre que les différences citées ci-dessus n'influencent pas de manière notable le

calcul de cette moyenne journalière et que nous ne devons pas absolument accorder une trop grande importance à cette problématique.

## 2.5 Influences des moyennes journalières sur la période 1961 - 1990

### 2.5.1 Introduction

Ce chapitre montre les conséquences, réelles et simulées, d'un changement de la méthode de calcul de la température journalière moyenne sur les séries temporelles de deux stations du réseau climatologique, en l'occurrence Bâle - Binningen et Lugano. Chaque station est présentée selon deux critères: en tenant compte des modifications du calcul de la moyenne ayant eu lieu entre 1961 et 1990 (en 1971 et en 1981). D'autre part sur la base d'une série simulée, c'est-à-dire calculée à partir de 1971 à l'aide de Tmp19 (2.9). Cette deuxième série montre ce qui se serait passé si l'ISM avait avancé de deux heures l'observation du soir en 1971 sans modifier la méthode de calcul de la moyenne journalière. Les deux stations ont été choisies en raison de la proximité d'une station synoptique pouvant servir de référence. Les stations synoptiques effectuent 8 observations quotidiennes et n'ont pas subi de modification du calcul de la moyenne en 1971. Dans le premier cas il s'agit de Bâle - Mulhouse, située à 17 kilomètres au nord de Bâle, alors que pour Lugano, il s'agit de Locarno - Magadino, qui se trouve 19 kilomètres plus au nord. Pour Bâle - Mulhouse, nous disposons uniquement de la période 1961 - 1980, au lieu de 1961 - 1990 pour Locarno - Magadino.

### 2.5.2 Approche

Nous avons tenté de détecter les inhomogénéités provoquées par les modifications dans le mode de calcul des moyennes journalières à l'aide de la méthode des différences (Allisow et al., 1956), appliquée aux moyennes mensuelles ( $m$ ), et qui se présente comme suit:

Soit une série de référence, supposée homogène  $y_i$ . De la différence entre la série à contrôler  $x_i$  et  $y_i$

$$Z_{m,i} = x_{m,i} - y_{m,i} \quad (2.10)$$

nous calculons les écarts mensuels moyens

$$\bar{Z}_m = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n (x_{m,l} - y_{m,l}) \quad (2.11)$$

ainsi que les différences mensuelles par rapport à l'écart moyen, soit

$$d_i = Z_{m,i} - \bar{Z}_m \quad (2.12)$$

Si la série  $x_i$  est homogène, les  $d_i$  sont alors distribués de manière aléatoire autour de  $\bar{Z}_m$ . Dans le cas contraire, les changements de pente de la courbe des sommes cumulées (sc) de  $d_i$ , soit

$$sc_j = \sum_{i=1}^j d_i \quad (2.13)$$

nous permettent de localiser les inhomogénéités de la série  $x_i$ . Cette méthode, très simple mais particulièrement efficace, suppose une ou plusieurs séries de référence homogènes, ce qui n'est malheureusement pas le cas ici. Nous ne disposons d'aucun renseignement sur la série de Bâle - Mulhouse, que nous considérons donc comme homogène. Par contre, la série de Locarno - Magadino comporte au moins deux inhomogénéités produites par l'automatisation de la station en 1979, ainsi que par le passage en 1981 d'une moyenne journalière calculée à l'aide de 8 observations à la moyenne  $Tm_{24}$  (2.6) basée sur 144 mesures ponctuelles. Notre propos n'est pas d'homogénéiser ces séries, mais de montrer les conséquences possibles d'un changement de la méthode de calcul des moyennes journalières. La qualité des deux séries de référence est absolument suffisante pour cet usage précis.

### 2.5.3 Résultats

La série originale 1961 - 1990 (1961 - 1980 pour Bâle) présente une inhomogénéité à chaque changement de moyenne (représenté par un trait vertical). Les cassures ne semblent pas trop importantes et d'autres facteurs jouent probablement également un rôle. L'inhomogénéité de la série de Lugano (figure 2.2) entre 1979 et 1980 peut s'expliquer par l'automatisation de la station de Locarno - Magadino en 1979. L'aplatissement de la série de Bâle à partir de 1978 trouve également sa justification dans l'automatisation de cette station. Les moyennes mensuelles déterminées avec  $Tm_{aK}$  (2.4) sont légèrement plus élevées que celles calculées avec  $Tmp_{21}$  (2.1) ou  $Tm_{24}$  (2.6).

La série simulée, calculée entre 1971 et 1980 avec la moyenne  $Tmp_{19}$  (2.9), au lieu de  $Tm_{aK}$ , montre une profonde cassure à chaque changement de moyenne.  $Tmp_{19}$  produit des moyennes mensuelles plus élevées que  $Tmp_{21}$  et  $Tm_{24}$ . Ce dernier résultat correspond évidemment à notre attente. Il démontre les conséquences d'un déplacement d'une heure d'observation sans modification de la méthode de calcul des moyennes journalières. Ce résultat peut sembler caricatural, mais correspond néanmoins au «danger» auquel s'expose l'utilisateur qui calcule des moyennes journalières ou mensuelles sans tenir compte, par ignorance ou par négligence, du déplacement de l'heure d'observation du soir survenu en 1971.

### 2.6 Considérations générales

Presque toutes les publications mentionnées ici sont fondées sur les écarts mensuels moyens entre les différentes méthodes de calcul de la moyenne journalière et ne tiennent pas compte des variations journalières des différences. De plus, elles sont malheureusement souvent établies sur des périodes très courtes (une année), des époques différentes et sur un nombre restreint de stations. Il est très difficile de tirer des conclusions générales de ces travaux et de les appliquer à une autre période ou à une autre région, car chaque cas étudié présente des caractéristiques propres dont il n'est pas possible de déterminer l'origine exacte. Elles peuvent être aussi bien causées par le choix de la période de comparaison que par des influences liées au climat de la région étudiée, ou aux caractéristiques techniques du réseau.

A notre connaissance, de l'époque «préinformatique», seuls Schreiber (1906) et Hartzell (1919) ont effectué leurs comparaisons d'après les différences journalières, afin de mieux en cerner la distribution et le comportement. Relevons au passage la



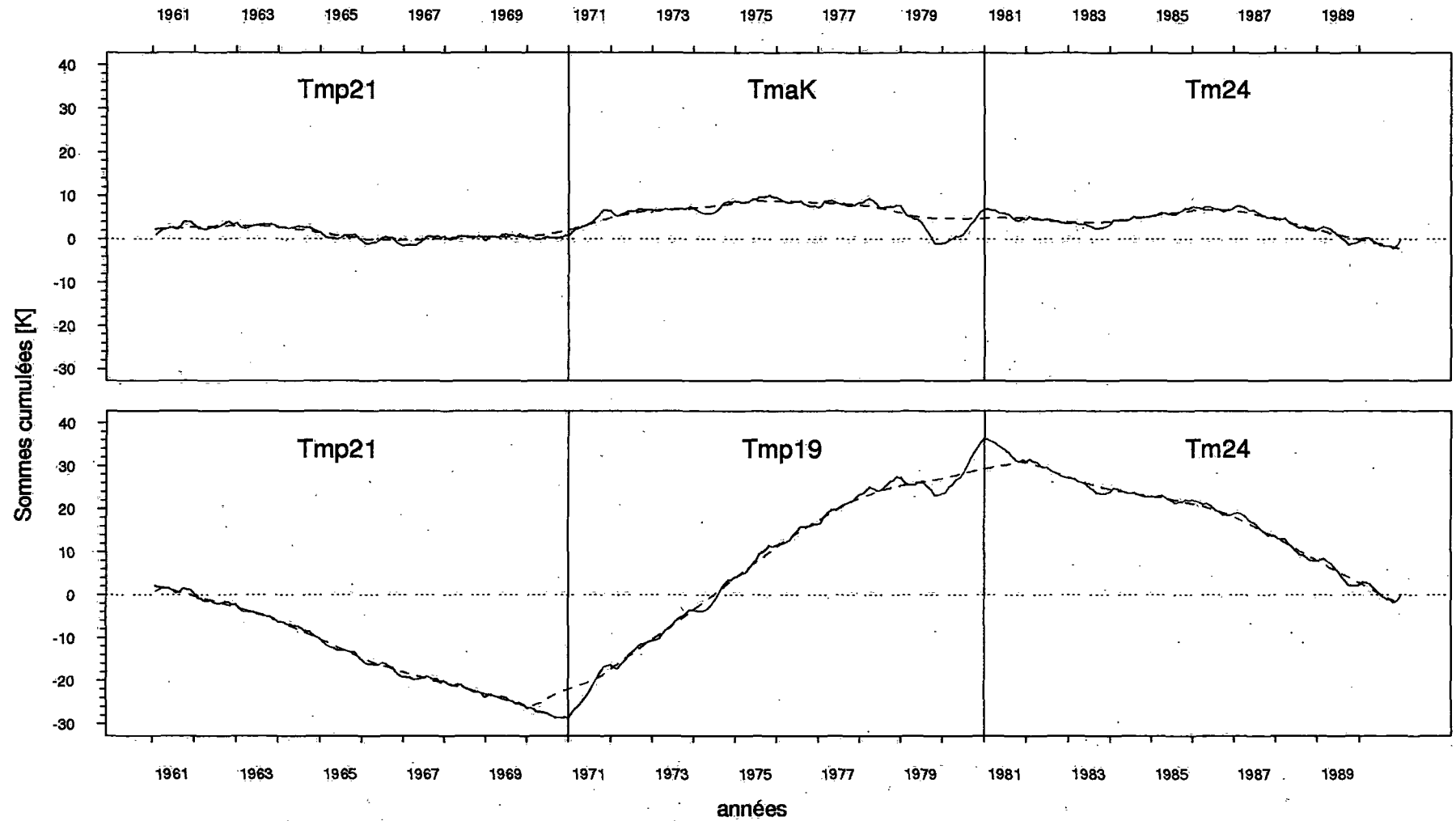


fig. 2.2 Lugano moins Locarno - Magadino. Sommes cumulées  $sc$  (2.13) des écarts  $d_i$  (2.12) de la série originale (en haut). Sommes cumulées de la série simulée avec les moyennes journalières calculées selon Tmp19 (2.9) entre 1971 et 1980 (en bas). Période de référence: 1961 - 1990.

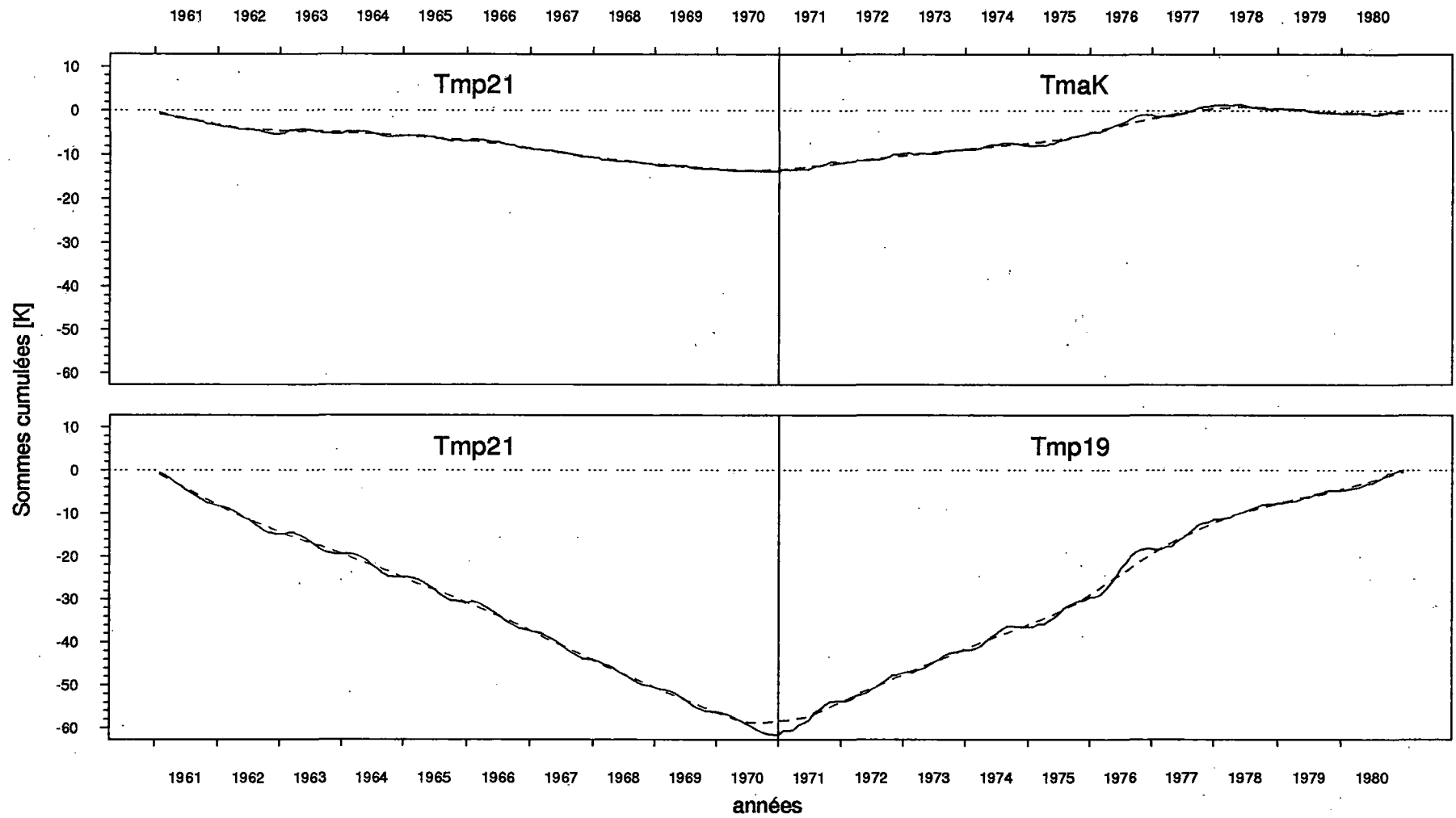


fig. 2.3 Bâle moins Bâle - Mulhouse. Sommes cumulées sc (2.13) des écarts  $d_i$  (2.12) de la série originale (en haut). Sommes cumulées de la série simulée avec les moyennes journalières calculées selon Tmp19 (2.9) entre 1971 et 1980 (en bas). Période de référence: 1961 - 1980.

performance de Schreiber qui, sans aucun moyen informatique, a fondé son étude sur 17 années d'observations journalières (!). Ces deux études mettent en évidence l'importante variabilité des différences quotidiennes entre une moyenne journalière et la moyenne sur 24 heures. Collison et Tabony (1984) pour TmMm (2.7) ainsi que Siogas (1972) pour TmA (2.5) ont tenté de mettre en relation les différences journalières entre ces moyennes et Tm24 (2.6) avec des événements météorologiques ou avec certains types de temps. Ils ont démontré que certaines moyennes journalières réagissent plus ou moins fortement à un type de temps déterminé.

Cette approche nous semble intéressante pour tenter d'isoler et d'étudier les différents signaux qui déterminent le comportement général d'une moyenne journalière. Elle devrait permettre une description «universelle» des caractéristiques d'une moyenne journalière, c'est-à-dire détachée des influences locales ou liées à la période de comparaison.

## 2.7 L'homogénéisation de la période 1901 - 1960

Ce chapitre ne traite pas des méthodes permettant de localiser des inhomogénéités dans les séries de mesures météorologiques. A ce sujet, on consultera par exemple Allisow et al. (1956), Paesler (1983), Schönwiese (1985), Craddock (1979). Il trace uniquement un petit historique des homogénéisations de séries temporelles de températures effectuées jusqu'à ce jour par l'ISM, des enseignements que l'on peut en tirer et des modifications que l'on pourrait apporter pour l'homogénéisation de la période climatologique 1961 - 1990 par exemple.

Nous ne disposons malheureusement d'aucune littérature concernant l'homogénéisation de la période 1901 - 1960. Les seuls renseignements dont nous disposons nous ont été communiqués oralement par Max Schüepp qui a effectué et dirigé ce travail considérable.

### 2.7.1 Historique

Selon les prescriptions internationales, l'ISM aurait tout d'abord dû publier la période climatologique 1901 - 1930. Retardés par la crise économique des années 1930, puis par la Seconde guerre mondiale, les travaux débutèrent seulement vers 1945. A cause de ce retard, et parce qu'une période de 30 ans peut se révéler trop courte pour homogénéiser certains paramètres, on décida d'homogénéiser la période 1901 - 1940. Les deux principaux paramètres, la température et les précipitations furent en majeure partie homogénéisés par Schüepp et Uttinger, et les résultats publiés à partir de 1960 par l'ISM dans la série «Klimatologie der Schweiz». Cette série a été initialement publiée comme supplément aux Annales de l'ISM. A partir de 1960, la période fut naturellement prolongée à 1901 - 1960. L'homogénéisation de la température et des précipitations de cette période fut conclue vers 1965.

La création de la banque de données climatologiques de l'ISM (Klima-DB), installée au RZETH au début des années 1970, nécessita une deuxième homogénéisation de la période 1901 - 1960, prolongée à 1970 pour quelques stations. En effet, contrairement aux publications de «Klimatologie der Schweiz», la Klima-DB ne contient pas de moyennes mensuelles mais les heures d'observation individuelles. Il fallut donc répartir les corrections mensuelles sur toutes les heures d'observation du

mois afin que l'utilisateur désirent des moyennes mensuelles obtienne la valeur mensuelle corrigée. Dans les faits, l'opération fut un peu plus compliquée qu'elle n'apparaît au premier abord. Pour éviter des cassures provoquées par les corrections mensuelles à chaque changement de mois, la distribution discrète des corrections appliquées à chaque heure d'observation fut lissée à l'aide d'une transformation de Fourier. L'utilisateur de la Klima-DB n'a ainsi plus accès aux valeurs originales qui ont bien entendu été archivées, et qui pourraient être reconstruites grâce à une abondante documentation. L'opération débuta vers le milieu des années 1970 pour se terminer au début des années 1980.

### 2.7.2 Méthodes utilisées

Presque tous les travaux de la première phase d'homogénéisation (jusqu'en 1965) ont été effectués sans aucun moyen informatique et selon la méthode des différences ou des quotients dans le cas des précipitations. Cette méthode, largement utilisée en climatologie, est décrite par Allisow et al. (1956). Elle repose sur une comparaison entre deux ou plusieurs stations relativement proches, ou présentant les mêmes caractéristiques climatologiques. Si l'on admet que les conditions atmosphériques moyennes de stations assez proches sont semblables et fortement corrélatives, alors les différences entre ces stations doivent être constantes et ne présenter aucun trend ou saut significatif. Les inhomogénéités de la période 1901 - 1960 ont été tout d'abord localisées d'après les modifications documentées dans l'historique de la station. En l'absence de tels renseignements, elles l'ont été par la méthode des différences, qui permet également de déterminer l'ampleur de la correction devant être appliquée à chaque mois de la période à corriger pour obtenir une série homogène.

On se base au départ sur une ou plusieurs stations de références homogènes, et l'on forme des paires avec les stations voisines ou semblables. Après avoir contrôlé et éventuellement corrigé ces stations, ce groupe homogène peut servir de référence pour le contrôle d'autres stations plus éloignées. On procède ainsi par cercles concentriques, jusqu'à ce que tout le réseau soit homogène. Dans la pratique, et surtout pour un territoire comme la Suisse, l'opération est bien plus compliquée et requiert souvent la formation de plusieurs groupes de stations qui doivent finalement être combinés entre eux pour former un réseau homogène. On le voit, le travail est considérable et, en regard des moyens à disposition, on ne peut qu'être admiratif devant le résultat obtenu.

### 2.7.3 Commentaires

Cette méthode, parfaitement adaptée à l'âge «préinformatique», présente plusieurs défauts qui peuvent éventuellement être évités ou corrigés grâce aux possibilités offertes par l'informatique.

Cette approche requiert d'excellentes connaissances du réseau et un «flair» climatologique bien développé. Le climatologue est souvent contraint de prendre une décision partielle. Les résultats peuvent donc varier d'une personne à l'autre et il est souvent difficile pour une tierce personne de refaire tout le cheminement logique qui a conduit aux résultats. Des méthodes plus récentes, basées par exemple sur des paramètres statistiques bien définis pourraient résoudre ce problème. Karl et Williams (1987) ont développé une approche fondée sur la corrélation entre les stations. Cette

$$T_{mp21} = \frac{T_{7.30} + T_{13.30} + 2 \times T_{21.30}}{4} \quad (2.1)$$

$$T_{ma21} = \frac{T_{7.30} + T_{13.30} + T_{21.30}}{3} \quad (2.2)$$

$$T_m = \frac{T_{08} + T_{14} + T_{20} + T_{min}}{4} \quad (2.3)$$

$$T_{maK} = N - K \times (N - T_{min}) \quad (2.4)$$

$$T_{mA} = \frac{T_{7.30} + T_{19.30} + T_{min} + T_{max}}{4} \quad (2.5)$$

$$T_{m24} = \frac{1}{144} \sum_{i=1}^{144} T_{10} \quad (2.6)$$

T<sub>10</sub> = valeurs à 10 minutes

$$T_{mMm} = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} \quad (2.7)$$

$$T_{ma19} = \frac{T_{7.30} + T_{13.30} + T_{19.30}}{3} \quad (2.8)$$

$$T_{mp19} = \frac{T_{7.30} + T_{13.30} + 2 \times T_{19.30}}{4} \quad (2.9)$$

fig. 2.4 Présentation synoptique des formules de calcul de la température journalière moyenne.

méthode nécessite un grand nombre de stations «proches» (dans le cas des USA, jusqu'à 750 km!) et est donc difficilement applicable telle quelle en Suisse. De plus, elle est limitée à l'homogénéisation des valeurs mensuelles, ce qui nous semble être un défaut important.

La méthode des différences (ou des quotients) est avant tout conçue pour l'homogénéisation de valeurs mensuelles (moyennes de températures, sommes de précipitations). Le postulat des conditions atmosphériques semblables pour deux stations proches ne peut pas être appliqué sur une base journalière. Les différences ou les

quotients journaliers entre les stations présentent en effet une variabilité beaucoup plus importante que les différences mensuelles ou annuelles. Si cette variabilité dépasse l'écart produit par une inhomogénéité, il devient très difficile de justifier l'homogénéisation des valeurs journalières d'une série selon des facteurs de correction déterminés sur une base mensuelle (Päsler, 1983:5). Une approche purement statistique, comme la méthode des différences, n'est donc pas à même de remplir cette tâche. Seule une approche déterministe, c'est-à-dire basée sur des événements météorologiques précis, pourrait permettre l'homogénéisation des valeurs mensuelles par une correction des valeurs journalières. Certains auteurs plaident pour une telle approche. Päsler (1983:6) suggère d'utiliser la nébulosité ou l'amplitude journalière de la température, tout en insistant bien sur le but visé soit l'homogénéisation des moyennes ou sommes mensuelles, et non celle des valeurs journalières. Schüepp (1980:196) propose d'étudier les écarts moyens en fonction d'un choix de situations météorologiques bien définies.

## 2.8 Conclusions

Nous avons vu tout au long des chapitres ci-dessus que les récents développements du réseau climatologique de l'ISM sont autant d'inhomogénéités potentielles. Une des modifications majeures, la modification de l'heure d'observation du soir, a entraîné l'introduction d'une nouvelle formule de calcul de la température journalière moyenne, et a eu lieu simultanément pour toutes les stations. Il n'est pas possible d'utiliser, pour ce problème précis, des méthodes d'homogénéisation classiques basées sur la comparaison entre stations voisines. L'idéal serait une méthode permettant la correction intrinsèque, de chaque série et, si possible, établie sur une approche déterministe afin que son application puissent être systématique et ne dépende pas des connaissances et de l'expérience de la personne chargée du travail d'homogénéisation.

Une telle méthode nécessite des connaissances sur le comportement des différents modes de calcul de la moyenne journalière, en fonction de certains phénomènes ou situations météorologiques. Malheureusement, les études à ce sujet sont rares, et leurs résultats sont difficilement utilisables pour la problématique spécifique à l'ISM.

### 3 BUTS DU TRAVAIL

Conformément à la problématique décrite au chapitre précédent, et considérant les inhomogénéités potentielles provoquées par les profonds bouleversements subis par le réseau climatologique durant les 20 dernières années, ce travail tend principalement aux trois buts suivants:

1. Tenter tout d'abord de décrire les conséquences d'une modification du mode de calcul de la température journalière moyenne sur les séries temporelles de ce même paramètre. Cette approche, basée sur les températures mensuelles moyennes, devrait, d'une part, amener les informations nécessaires à l'homogénéisation des principales stations du réseau climatologique et, d'autre part, faciliter la comparaison de séries de température provenant d'autres réseaux. Par «informations nécessaires à l'homogénéisation» nous entendons non seulement les écarts mensuels moyens résultant du changement de méthode et utilisés comme bases de réduction, mais également la variabilité annuelle, c'est-à-dire la représentativité, de ces écarts.
2. Tenter ensuite de décrire le comportement des principales méthodes de calcul de la température journalière moyenne en fonction de certaines situations météorologiques. Cette description, faite au niveau des moyennes journalières individuelles, devrait, d'une part, fournir les bases nécessaires au développement d'une approche déterministe de l'homogénéisation des séries temporelles de température de l'air, et, d'autre part, mettre en évidence l'influence des paramètres spécifiques à la station. Cette approche déterministe, établie non plus sur le postulat de constance des écarts moyens entre deux stations, mais sur des différences journalières dépendant des conditions atmosphériques, devrait permettre une homogénéisation plus transparente et plus universelle des séries temporelles de température. De plus, une bonne connaissance du comportement des moyennes journalières utilisées par les principaux services météorologiques européens ne pourrait que faciliter la comparaison et l'interprétation des différentes séries de température publiées par ces offices météorologiques.
3. Procéder enfin au contrôle des facteurs de correction K de la formule  $T_{maK}$  (2.4) et de leur régionalisation. Ces facteurs, déterminés il y a plus de 20 ans d'après un petit nombre de stations et avec des moyens réduits, n'ont jamais été contrôlés. Cette opération devrait permettre de qualifier les séries de température des stations conventionnelles du réseau climatologique.

Le chapitre suivant traite des méthodes utilisées pour cette étude, du choix des stations, de la période de référence et des paramètres. Une explication du principe du *box plot*, représentation graphique couramment utilisée pour la présentation des résultats, figure également dans ce chapitre.

Le chapitre 5 présente les résultats selon un schéma correspondant aux buts fixés ci-dessus. Un premier sous-chapitre traite des écarts mensuels moyens et de leurs variabilité et compare les résultats avec des travaux plus anciens. Le sous-chapitre suivant décrit l'influence des paramètres spécifiques à la station sur les moyennes journalières, ainsi que l'approche spécifique de ce problème particulier. Enfin, un dernier sous-chapitre a pour sujet l'influence de certains types de temps sur le

comportement des principales méthodes de calcul de la température journalière moyenne. Des conclusions et une critique des résultats terminent le chapitre 5.

Le chapitre 6 est consacré à une application pratique, le contrôle des facteurs de correction K et de leur régionalisation. Il présente également une proposition pour une régionalisation simplifiée de ces facteurs de correction.

Pour terminer, le chapitre 7 nous permet de tirer les conclusions générales de cette étude.



## 4 METHODES, DEROULEMENT DU TRAVAIL

### 4.1 Introduction

Ce chapitre décrit les options prises concernant le choix des données, des stations et de la méthode d'investigation, options prises en regard de la problématique et des buts à atteindre énoncés précédemment.

Les modifications apportées au réseau climatologique de l'ISM en 1971 (déplacement de deux heures de l'observation du soir et introduction d'une nouvelle moyenne journalière) ayant été introduites simultanément sur l'ensemble du réseau, il nous est difficile d'en décrire les implications à l'aide des méthodes traditionnellement utilisées en climatologie. Par méthodes traditionnelles, nous entendons la comparaison de la station ayant subi une modification quelconque (remplacement d'un instrument, déplacement de la station, etc) avec d'autres stations voisines n'ayant pas subi de modification (méthode des différences ou des quotients; Allisow et al., 1956). Il faut toutefois relever que les stations proches de la frontière des réseaux allemands, français et italiens nous offriraient une telle possibilité. Le réseau autrichien n'entre, quant à lui pas en ligne de compte, puisqu'il a subi simultanément les mêmes modifications que le réseau helvétique. Cette comparaison avec des stations étrangères présente deux difficultés majeures:

1. Le sud des Alpes, les stations sommitales, les vallées alpines ainsi qu'une grande partie de l'ouest de la Suisse ne peuvent raisonnablement être homogénéisés sur la seule base des rares stations proches de la frontière.
2. L'acquisition de données climatologiques étrangères bien documentées, fiables et si possible sous forme digitale (support magnétique) n'est pas très aisée.

Le réseau synoptique (8 observations par jour) nous offrirait également une possibilité de comparer les stations du réseau climatologique avec des stations n'ayant pas été modifiées. Nous avons renoncé à cette solution pour deux raisons principales:

1. La banque de données de l'ISM au RZETH comprend 9 stations synoptiques. Parmi les 7 stations qui recouvrent convenablement les modifications effectuées le 1.1.1971 (la période 1961-1980), 5 sont placées sur un aéroport de plaine et deux en altitude. Les altitudes moyennes ne sont donc pas représentées et le choix des expositions est très limité.
2. Ces données, bien que régulièrement corrigées, ne peuvent être considérées comme homogènes. Nous devons donc compter avec des inhomogénéités causées par un déplacement du champ de mesures ou par une modification des alentours immédiats (événements relativement fréquents sur un aéroport en constant développement). L'automatisation successive de ces stations à partir de 1977 (stations ANETZ) avec le changement radical de l'instrumentation que cela implique représentent également une inhomogénéité potentielle. Il ne nous semble donc pas judicieux d'utiliser ces séries comme base de référence pour les stations du réseau climatologique, et plus particulièrement pour notre problématique.

Ces raisons, ainsi que notre volonté de décrire l'impact d'un changement du mode de calcul de la moyenne journalière de la température dans un cadre plus large que

celui de la problématique spécifique à l'ISM, nous ont conduit à choisir une méthode, plus souple et générale, basée sur la simulation.

Le réseau ANETZ permet, grâce à son emprise spatiale et temporelle, de simuler pratiquement toutes les heures d'observation imaginables et de confronter divers capteurs et installations. Nous pouvons ainsi comparer plusieurs formules de calcul de la moyenne journalière et même reconstituer (à posteriori) les modifications du régime des observations introduites au 1<sup>er</sup> janvier 1971. Afin de reconstituer au mieux les conditions d'observation de l'époque, de même que pour d'autres raisons discutées plus loin (voir chapitre 4.5), nous avons décidé de baser notre étude sur la température sous abri. Dans le cas de l'ANETZ, il s'agit d'un capteur électronique installé dans un abri traditionnel de type anglais (Stevenson-Screen). Notre préférence s'est portée sur cinq stations couvrant chacune une période de 10 ans, depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1981 (début de la phase opérationnelle de l'ANETZ) jusqu'au 31 décembre 1990. La sélection des stations, effectuées selon des critères climato-géographiques, n'a pas tenu compte des micro-climats propres à chacune d'elle. Nous avons en revanche tenté de réunir 5 stations possédant de longues périodes de mesures de bonne qualité, bien distinctes les unes des autres, et si possible représentatives d'un climat particulier. Mis à part Davos, toutes ces stations font partie du réseau "Climat" de l'OMM. Il s'agit d'un réseau mondial de stations de référence dont les observations sont livrées à intervalle régulier à l'OMM. L'OMM publie également les normes climatologiques à long terme (30 ans) de ces stations. Une liste des stations et de leur situation figure au tableau 4.1.

Station	Altitude m/m	Coordonnées kilométriques	Situation
Säntis	2500	744180/234920	Sommet du Säntis
Zurich ISM (SMA)	569	685100/248600	Est du Plateau
Genève Aéroport	430	498920/122710	Ouest du Plateau
Davos	1590	783575/187475	Vallée alpine
Lugano	276	717880/ 95390	Sud des Alpes

tableau 4.1 Liste des stations et de leur situation

Cette simulation de différentes heures d'observation effectuée à l'aide du réseau ANETZ s'est déroulée en deux phases. La première, tentée à l'aide des valeurs à 10 minutes (valeurs instantanées mesurées toute les 10 minutes) de l'ANETZ, s'est soldée par un échec. La deuxième, effectuée sur la base des valeurs horaires (dans notre cas la moyenne horaire de 6 valeurs à 10 minutes) du même réseau, a pu être menée à son terme.

Les chapitres suivants décrivent les deux tentatives de simulation. Puis nous parlerons de la qualité et du contrôle des données. Enfin, une comparaison des différentes méthodes de mesure de la température de l'air dans le réseau ANETZ nous permettra de justifier le choix de la température sous abri pour cette étude.

## 4.2 La simulation à l'aide des valeurs à 10 minutes

Une partie des mesures climatologiques contenues dans la banque de données de l'ISM étant actuellement effectuée grâce aux valeurs à 10 minutes de l'ANETZ, nous avons tout naturellement été tentés de créer les heures d'observation nécessaires à l'aide de ces mêmes valeurs instantanées de la température. Nous avons extrait de cette grande masse de données (144 mesures/jour) les heures d'observation suivantes:

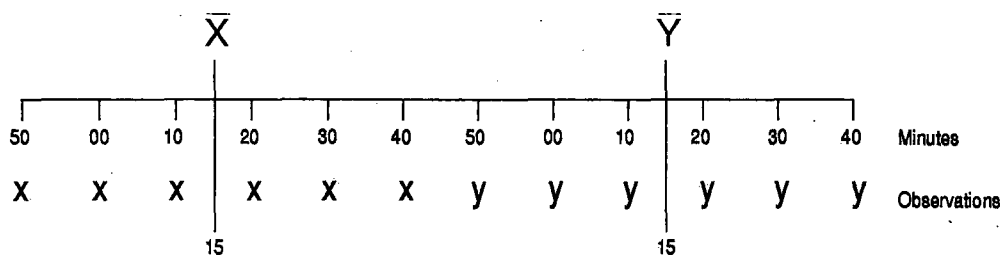
05.40 06.30 11.40 12.30 17.40 18.30 20.30 (TU)

La combinaison de ces heures d'observation nous a permis de calculer les différentes moyennes journalières décrites au chapitre 2, de les comparer entre elles ou avec la moyenne journalière de référence  $T_{m24}$  (2.6). Grâce à cette approche, nous aurions eu un instrument précis et puissant à disposition. Surtout, nous aurions pu utiliser de nombreuses applications déjà écrites pour la Klima-DB installée au RZETH. Hélas, au cours du travail, il apparut clairement que l'état peu satisfaisant d'une grande partie des données nécessitait un énorme travail de correction, ce qui nous aurait tenu éloigné des buts initiaux. A ce propos, il convient de rappeler que les valeurs à 10 minutes archivées par l'ISM (archives VAMP) sont des données brutes qui ne sont pas corrigées. De plus, la température sous-abri utilisée dans cette étude est seulement mesurée dans la moitié des stations ANETZ et ceci à titre de comparaison uniquement. Considérée donc comme un paramètre secondaire, elle ne fait pas

Säntis	125 (6.8%)
Zurich	87 (4.8%)
Genève	105 (5.8%)
Davos	80 (4.4%)
Lugano	100 (5.5%)

tableau 4.2 Nombre de moyennes journalières  $T_{maK}$  (2.4) manquantes sur la période 1981-1985 (1826 jours=100%)

l'objet de contrôles de qualité systématiques et l'entretien des capteurs n'est pas aussi efficace que celui des paramètres principaux. C'est également en partie pour cette raison qu'elle ne figure pas dans la banque de données ENAD installée au RZETH. Le test de qualité, exécuté lors du transfert des heures d'observation dans notre banque de données, a révélé, pour la période 1981-1985 (1826 jours), un nombre important de moyennes journalières manquantes (voir tableau 4.2). Ce test consiste uniquement à éliminer les températures non comprises entre  $-51^{\circ}\text{C}$  et  $+51^{\circ}\text{C}$ , c'est-à-dire trop grandes (nombre de bits) pour la structure de la banque de données. Il ne tient absolument pas compte des autres erreurs de mesures qui sont bien plus nombreuses. Les lacunes ne sont pas réparties régulièrement sur toute la période (par



$\bar{X}$  = moyenne des x,  $\bar{Y}$  = moyenne des y, HH = heure pleine

$$HH + 15 = \bar{X} \quad HH + 30 = \bar{X} + \frac{(\bar{Y} - \bar{X})}{4} \quad HH + 45 = \bar{X} + \frac{(\bar{Y} - \bar{X})}{2}$$

fig. 4.1 Méthode d'interpolation linéaire d'une heure d'observation déterminée à partir de 2 moyennes horaires.

exemple Lugano, septembre 1983: 15 moyennes journalières manquantes). Une moyenne est déclarée manquante lorsqu'un des termes de sa formule de calcul fait défaut. Nous nous sommes finalement vu dans l'obligation d'abandonner cette méthode, malgré un important travail de transfert des données et de développement. Profitant de l'expérience acquise et d'une partie des applications écrites pour cette approche, nous avons rapidement pu mettre sur pied une autre méthode, décrite au chapitre suivant.

### 4.3 La simulation à l'aide des valeurs horaires

Considérant les expériences tirées de la tentative précédente, nous avons finalement établi notre simulation sur les valeurs horaires (dans notre cas, il s'agit de moyennes) du réseau ANETZ (archives VAMP). Comme la température de l'air est un phénomène continu, nous avons décidé de simuler les heures d'observation requises en interpolant linéairement entre deux moyennes horaires. La méthode d'interpolation est illustrée par la figure 4.1. La période de mesure des moyennes horaires de l'ANETZ débute à HH+50 pour se terminer à HH+40 de l'heure suivante et comprend 6 mesures instantanées (valeurs à 10 minutes). La moyenne horaire ( $\bar{X}$  ou  $\bar{Y}$  dans la figure 4.1) correspond donc idéalement à une mesure effectuée à HH+15 (HH+15 représente la valeur centrale de la période de mesure). L'heure d'observation désirée est ensuite interpolée linéairement entre ces deux observations théoriques ( $\bar{X}$  et  $\bar{Y}$ ).

Les extrêmes journaliers (minima et maxima instantanés) de la température sous abri ne figurent pas dans les archives VAMP. Nous les avons déterminés à l'aide des moyennes horaires minimales et maximales des périodes de mesure correspondant aux 3 protocoles d'observation décrits à la figure 2.1.

La qualité de cette simulation (par rapport à la réalité) est discutée au chapitre suivant.

Une fois en possession des heures d'observation nécessaires, nous avons pu calculer les moyennes journalières décrites au chapitre 2. La moyenne sur 24 heures Tm24 (2.6), basée en fait sur 144 mesures à 10 minutes, dépeint avec une grande

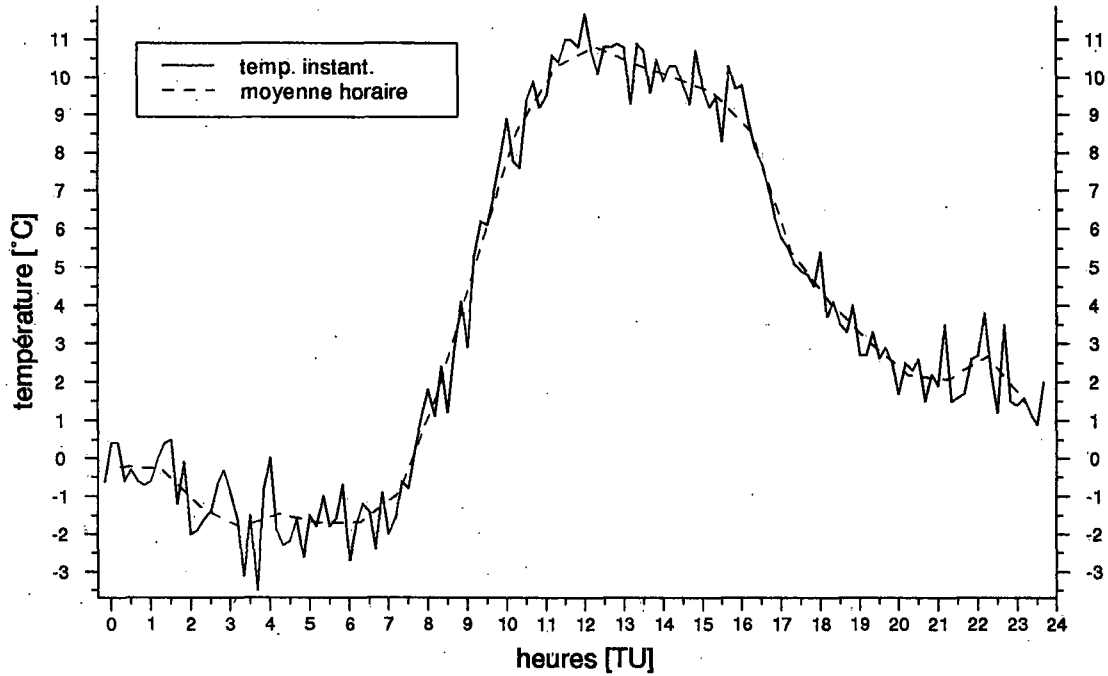


fig. 4.2 Valeurs instantanées et moyennes horaires de la température ventilée à Davos le 11 mars 1990

précision le cycle journalier de la température et nous sert de référence pour décrire le comportement des autres moyennes journalières. Nous avons alors en fait appliqué la méthode des différences à l'intérieur d'une même station (s) en calculant les écarts journaliers pour un jour (i) et pour une moyenne (Tmf) selon

$$dmf_{s,i} = Tmf_{s,i} - Tm24_{s,i} \quad (4.1)$$

De ces écarts journaliers nous tirons, pour une station (s), des écarts mensuels moyens

$$Dmf_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Tmf_{s,i} - Tm24_{s,i}) \quad (4.2)$$

282 ≤ n ≤ 310 (pour une période de 10 ans)

Cette fourchette est basée sur des valeurs maximales. En réalité, comme les échantillons mensuels contiennent des valeurs manquantes, ils sont légèrement plus petits que les valeurs maximales indiquées.

Cette méthode ne nécessite donc pas de comparaisons entre les stations. Nous pouvons étudier un signal précis sans avoir à tenir compte d'autres influences comme c'est le cas avec une application classique de la méthode des différences. En effet, lors d'une comparaison avec une ou plusieurs autres stations, des facteurs liés à la situation ou à l'instrumentation peuvent également jouer un rôle. Il est alors difficile d'expliquer avec certitude certaines particularités du signal étudié.

### 4.3.1 La qualité de l'interpolation

Il est bien clair que cette méthode d'interpolation n'est pas très précise. Comme elle opère avec des moyennes horaires, qui produisent un certain lissage des valeurs à 10 minutes, il n'est pas possible de reconstituer la valeur instantanée, qui peut fortement varier d'une mesure à l'autre. La figure 4.2 montre, pour un jour et une station choisis au hasard, les variations brèves de la température instantanée (valeur à 10 minutes) ainsi que le tracé des moyennes horaires, beaucoup plus régulier.

Afin d'apprécier la qualité de cette simulation, nous avons calculé, sur la base des moyennes horaires de la température ventilée (VHT), les mêmes heures d'observation que celles contenues dans la banque de données climatologiques. Ces dernières sont des mesures instantanées de la température ventilée effectuées à HH+40. Nous avons donc les mêmes conditions initiales (même capteur et même installation) et pouvons ainsi déterminer avec précision les erreurs dues à la méthode d'interpolation. Comme cette étude s'appuie principalement sur des moyennes journalières, et non sur des heures d'observation individuelle, nous avons calculé les différences entre températures observées ( $T_o$ ) et interpolées ( $T_i$ ) selon

$$\Delta_{\text{inter}}(a) = \frac{T_{o05.40} + T_{o11.40} + T_{o17.40}}{3} - \frac{T_{i05.40} + T_{i11.40} + T_{i17.40}}{3} \quad (4.3)$$

ainsi que selon

$$\Delta_{\text{inter}}(\text{Mm}) = \frac{T_{o\text{Max}} + T_{o\text{Min}}}{2} - \frac{T_{i\text{Max}} + T_{i\text{Min}}}{2} \quad (4.4)$$

Cette deuxième approche devrait nous permettre de décrire les différences entre les extrêmes journaliers observés et interpolés. Les minima et maxima contenus dans la banque de données climatologiques étant des valeurs instantanées, les extrêmes journaliers déterminés d'après les moyennes horaires seront toujours surévalués (pour les minima), respectivement sous-évalués (pour les maxima) par rapport à la réalité.

Les  $\Delta_{\text{inter}}$  moyens, calculés sur notre période de 10 ans, montrent que les différences, au niveau des deux moyennes journalières utilisées pour cette comparaison, restent généralement en deçà de la précision du capteur. Ils ne dépassent pas  $0.1^\circ$  dans le cas de  $\Delta_{\text{inter}}(a)$  (4.3) et  $0.2^\circ$  pour  $\Delta_{\text{inter}}(\text{Mm})$  (4.4). La dispersion des  $\Delta_{\text{inter}}$  journaliers est également très faible. Les intervalles interquartiles (50% des éléments d'une distribution) se situent entre  $0.1^\circ$  et  $0.3^\circ$ . La figure 4.3 montre, sous forme de *box plots*, les distributions des  $\Delta_{\text{inter}}$  journaliers (4.3) et (4.4) pour toutes les stations et pour les mois de janvier et juillet. Une explication du principe des *box plots* figure au chapitre 4.4. Pour les  $\Delta_{\text{inter}}(a)$  (4.3), tant les écarts moyens que les médianes des distributions sont nuls et la dispersion est faible. Les variations mensuelles sont également minimales. Les  $\Delta_{\text{inter}}(\text{Mm})$  (4.4) présentent dans l'ensemble une dispersion plus large et des écarts moyens plus importants. Les variations mensuelles sont également plus significatives que dans le cas de  $\Delta_{\text{inter}}(a)$  (4.3).

Une analyse plus fine à partir des heures d'observation individuelles montre des écarts moyens plus importants entre les observations réelles et les observations inter-

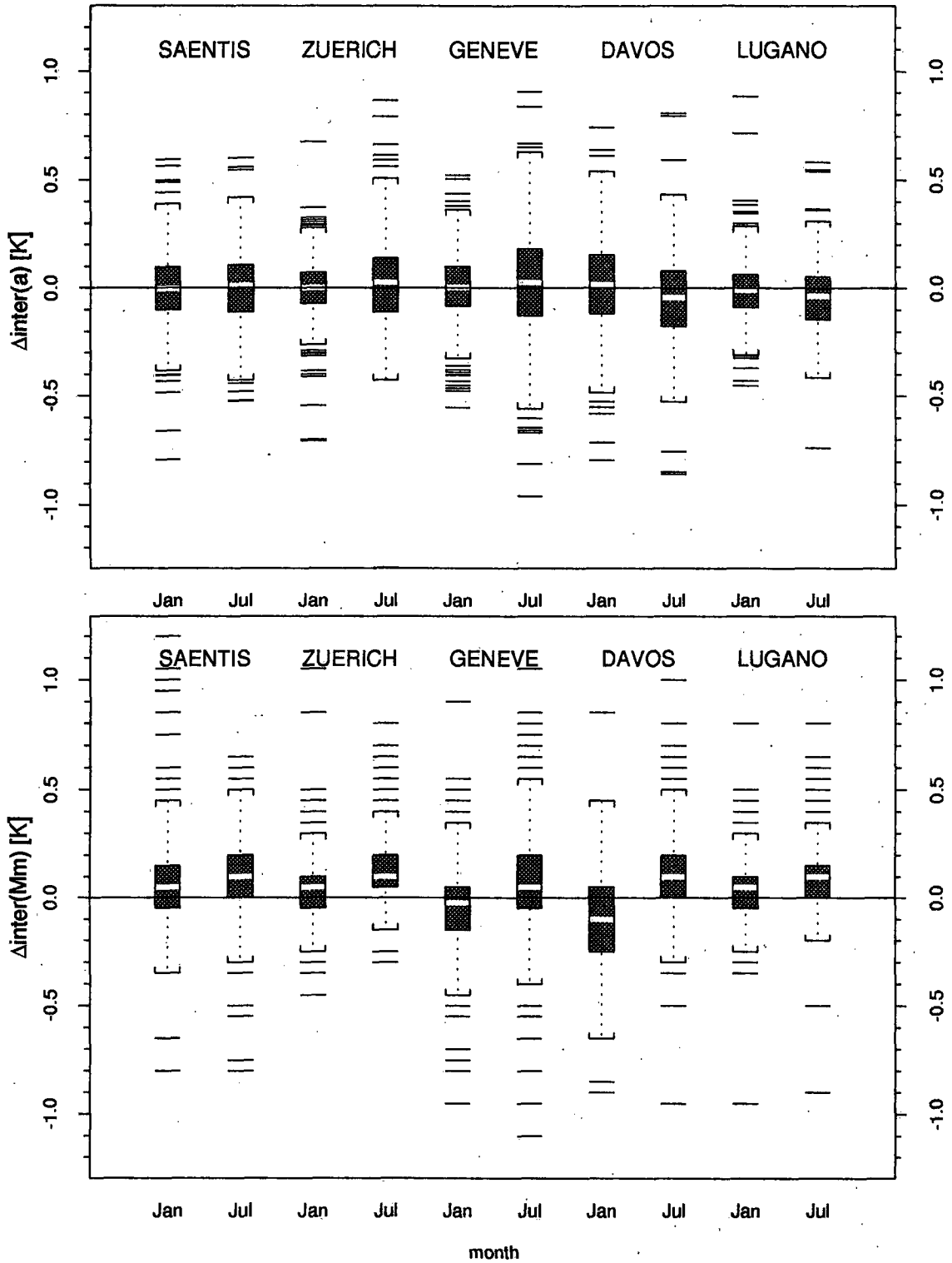


fig. 4.3 Box plots des  $\Delta_{inter(a)}$  (4.3) et  $\Delta_{inter(Mm)}$  (4.4) journaliers pour les mois de janvier et juillet. Le principe du box plot est expliqué au chapitre 4.4

polées, et surtout la dispersion des écarts journaliers est beaucoup plus large. Les intervalles interquartiles vont de  $0.2^\circ$  à  $0.7^\circ$ . Il en va de même pour les écarts entre la température minimale mesurée et celle qu'on a déterminée à l'aide de la moyenne horaire minimale. Nous avons des écarts variant de 0.2 K à 0.7 K selon le mois et la

station. Ces écarts correspondent parfaitement à ceux qui ont été calculés de manière comparable par Collison et Tabony (1984:337-342). Comme ces écarts ont un caractère aléatoire, ils se neutralisent mutuellement lors du calcul des moyennes journalières, ce qui explique que nous avons finalement des  $\Delta$ inter moyens très faibles.

Nous pouvons en fait admettre que, pour la température sous abri, les différences  $\Delta$ inter (4.3) et (4.4) doivent être plus faibles que les écarts calculés pour la température ventilée. En effet, la faible inertie du capteur du thermomètre VHT (constante de temps lors de la ventilation: 12 s; ADOC-4f, 1980:6) lui permet de saisir des variations brusques et rapides de la température qui peuvent, par exemple, apparaître durant la période de refroidissement radiatif précédant l'aube (voir figure 4.2). Cette caractéristique peut conduire à une plus forte dispersion des valeurs à 10 minutes à l'intérieur d'une moyenne horaire, ce qui diminue la représentativité et, dans notre cas, amoindrit la qualité de l'interpolation. L'abri météorologique de type anglais (installé dans la majeure partie du réseau) présente une constante de temps située entre 11 et 16 minutes. (Müller, 1984:24). Les oscillations brèves n'étant pas mesurées, il se produit un certain lissage des courbes de température. Considérant ces dernières constatations, nous pouvons admettre que, dans le cas de la température sous abri, du fait de l'importante inertie thermique de ce dernier, les écarts entre les mesures instantanées et les valeurs interpolées entre deux moyennes horaires sont très faibles. Notre approche permet donc une bonne simulation des diverses heures d'observation.

#### 4.3.2 Contrôle et qualité des données

Malgré la fiabilité de la plupart des données produites par le réseau ANETZ et par le fait que la température sous abri n'est pas considérée comme un paramètre principal, nous avons contrôlé toutes nos données en 2 phases. La première a consisté à dépouiller l'historique des stations afin d'y relever les pannes et les modifications apportées aux capteurs ou à l'installation. Les jours ou périodes mentionnés ont été représentés graphiquement et soigneusement examinés. Les valeurs horaires considérées comme fausses ont été simplement éliminées. La correction de ces erreurs aurait nécessité un travail de longue haleine, qui dépassait le cadre de cette étude.

Durant la deuxième phase, nous avons soumis toutes nos données à un contrôle de qualité afin de localiser les éventuelles erreurs de mesures non documentées dans l'historique de la station. Ce contrôle est basé sur deux tests différents.

1. Un test de consistance externe, établi par comparaison avec un autre paramètre, en l'occurrence la moyenne horaire de la température VHT. Soit  $T_a$ , la moyenne horaire de la température sous abri et  $T_v$ , la moyenne horaire de la température VHT à l'heure  $t_0$ . Sont considérées comme suspectes les  $T_a(t_0)$  pour lesquelles

$$|T_a(t_0) - T_v(t_0)| > 0.4^\circ\text{C} \quad (4.5)$$

Le seuil de 0.4 K est une valeur empirique déterminée et utilisée par le service de contrôle des données de l'ISM.

2. Un test de consistance interne ou temporelle, basé sur la redondance (ou persistance) d'une séquence d'observations d'un paramètre déterminé et issues d'une même



station (WMO, 1985: VI.19). Sont considérées comme suspectes les  $Ta(t_0)$  pour lesquelles

$$|Ta(t_0) - Ta(t_0 - d_t)| > Ttol(d_t) \quad (4.6)$$

$Ttol(d_t)$  est un seuil de tolérance déterminé empiriquement et pouvant varier selon la station et la valeur de  $d_t$ . Dans notre cas  $d_t=1$  heure et, à l'exception de Davos,  $Ttol=4$  K. La situation particulière de Davos nous a obligé à y appliquer un seuil de tolérance de 5 K. En effet, à Davos, comme dans d'autres vallées alpines, des variations horaires dépassant 4 K ne sont pas rares. Un  $Ttol$  plus bas aurait pour corollaire de déclarer suspect un trop grand nombre de jours, ce qui rendrait le contrôle manuel de ces jours très fastidieux. Le service de contrôle des données de l'ISM utilise également ces valeurs comme seuils de tolérance.

Les jours suspects détectés par ces deux tests ont été représentés graphiquement et examinés un à un. Les moyennes horaires considérées comme fausses ont été éliminées.

Dans certaines situations, cette procédure a pour corollaire de localiser un très grand nombre de jours douteux. Confronté à une véritable avalanche de jours suspects, mais en fait absolument corrects, nous avons quelque peu modifié le deuxième test. Ayant observé que les

$$\Delta Ta(t_0) = Ta(t_0) - Ta(t_0 - 1) \quad (4.7)$$

dépassant le seuil de tolérance, tout en étant absolument plausibles, apparaissent souvent par beau temps, entre le lever du soleil et midi, ou immédiatement après le coucher du soleil, nous avons adjoint les conditions suivantes au test de consistance temporelle.

Avec  $t_{sr}$  étant l'heure du lever du soleil,  $t_{ss}$  l'heure du coucher du soleil et  $rsd$ <sup>12</sup> la durée relative d'insolation horaire, nous soumettons  $\Delta Ta(t_0)$  aux épreuves suivantes:

$$Ttol(d_t) < |\Delta Ta(t_0)| < 10 \text{ K}$$

si cette condition est satisfaite alors, si

$$\Delta Ta(t_0) > 0$$

et que

$$t_{sr} < t_0 < t_{12} \text{ et } rsd > 80\%$$

alors  $\Delta Ta(t_0)$  est considéré comme plausible.

Si au contraire

$$\Delta Ta(t_0) < 0$$

et que

$$t_{ss} < t_0 < t_{ss+1}$$

alors  $\Delta Ta(t_0)$  est aussi considéré comme plausible.

---

12.  $rsd$ : abréviation de l'anglais "relative sunshine duration"

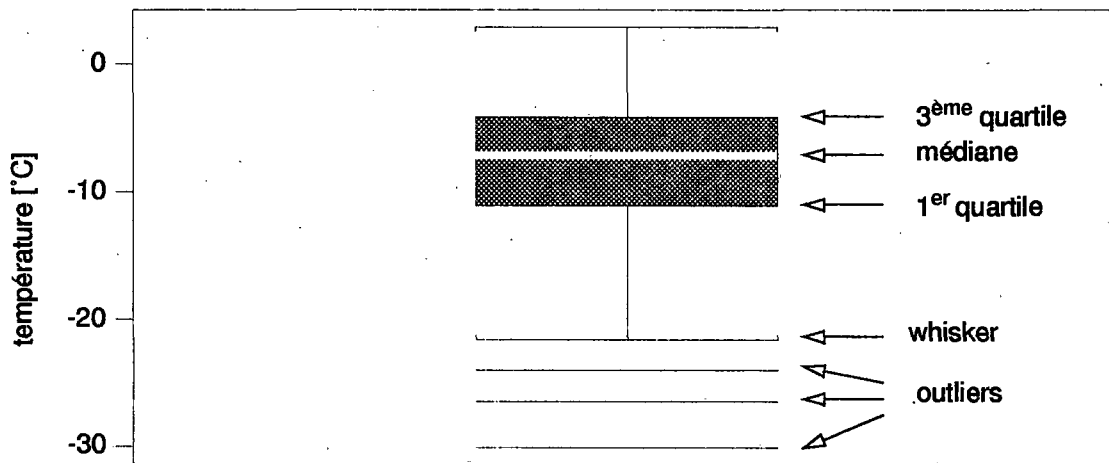


fig. 4.4 Exemple de box plot. Les explications se trouvent au chapitre 4.4

Le test de consistance externe (4.5) est en mesure de détecter une dérive lente d'un des capteurs. Le test de consistance temporelle a l'avantage de ne pas dépendre d'un autre capteur. Il peut localiser une brusque erreur de mesure, même si elle concerne simultanément plusieurs capteurs redondants. Ces deux tests se complètent donc mutuellement.

Tout compte fait, sur 87'648 moyennes horaires par station, nous avons localisé et éliminé 686 erreurs de mesure au Säntis (0.7%), 3 à Genève et 1 à Davos.

Les erreurs plus nombreuses du Säntis s'expliquent en partie par la situation exposée de cette station. En effet, il n'est pas rare que des instruments soient endommagés lors de tempêtes et, en hiver, l'abri météorologique est fréquemment rempli de neige. Si l'observateur ne remédie pas rapidement à cette situation, il peut arriver que toute une série de moyennes horaires soient faussées par l'effet d'isolateur thermique de la neige.

En conclusion, bien que nous ne puissions pas prétendre avoir localisé et éliminé toutes les erreurs, nous pouvons admettre que les données utilisées dans cette étude sont fiables et de bonne qualité.

#### 4.4 Représentation graphique

Afin de pouvoir présenter simultanément une distribution et sa valeur moyenne, nous avons souvent eu recours au *box plot*, qui n'est d'autre qu'une représentation graphique des quartiles. Un exemple de *box plot* se trouve à la figure 4.4. Le trait horizontal à l'intérieur de la boîte correspond à la médiane et représente le centre de la distribution. La hauteur de la boîte est égale à l'intervalle interquartile (IQR<sup>13</sup>), c'est-à-dire la différence entre le 3<sup>ème</sup> et le 1<sup>er</sup> quartile et comprend ainsi 50% des valeurs de la distribution. Les *whiskers* (les lignes terminées par un crochet carré qui prolongent la boîte) représentent 1.5xIQR (pris depuis le bord de la boîte, c'est-à-dire depuis le 1<sup>er</sup>, respectivement depuis le 3<sup>ème</sup> quartile). En présence d'une distribution gaussienne, environ 99.3% des valeurs se trouvent entre les 2 *whiskers*. Les valeurs qui se trouvent à l'extérieur des *whiskers* sont considérées comme étant des extrêmes aber-

13. de l'anglais "interquartile range"

rants (ou *outliers* en anglais) et sont représentées par un trait horizontal. Bien que nos distributions soient, dans la majeure partie des cas, normales et symétriques, il ne faut pas confondre médiane et moyenne arithmétique. Même si dans notre texte nous parlons de moyennes arithmétiques, nous avons tenu à accorder plus de poids à la représentation graphique de la dispersion des éléments d'une distribution qu'à une représentation exacte de la moyenne qui n'apporte pas plus d'informations. Comme nous le verrons plus loin à plusieurs reprises, le *box plot* offre, dans un espace très restreint, une vue globale d'une distribution et permet une localisation rapide des *outliers*. Pour des renseignements plus précis concernant la théorie et l'utilisation du *box plot* on consultera Tukey (1977), Velleman et al. (1981) ainsi que Hoaglin et al. (1983).

#### 4.5 La température sous abri

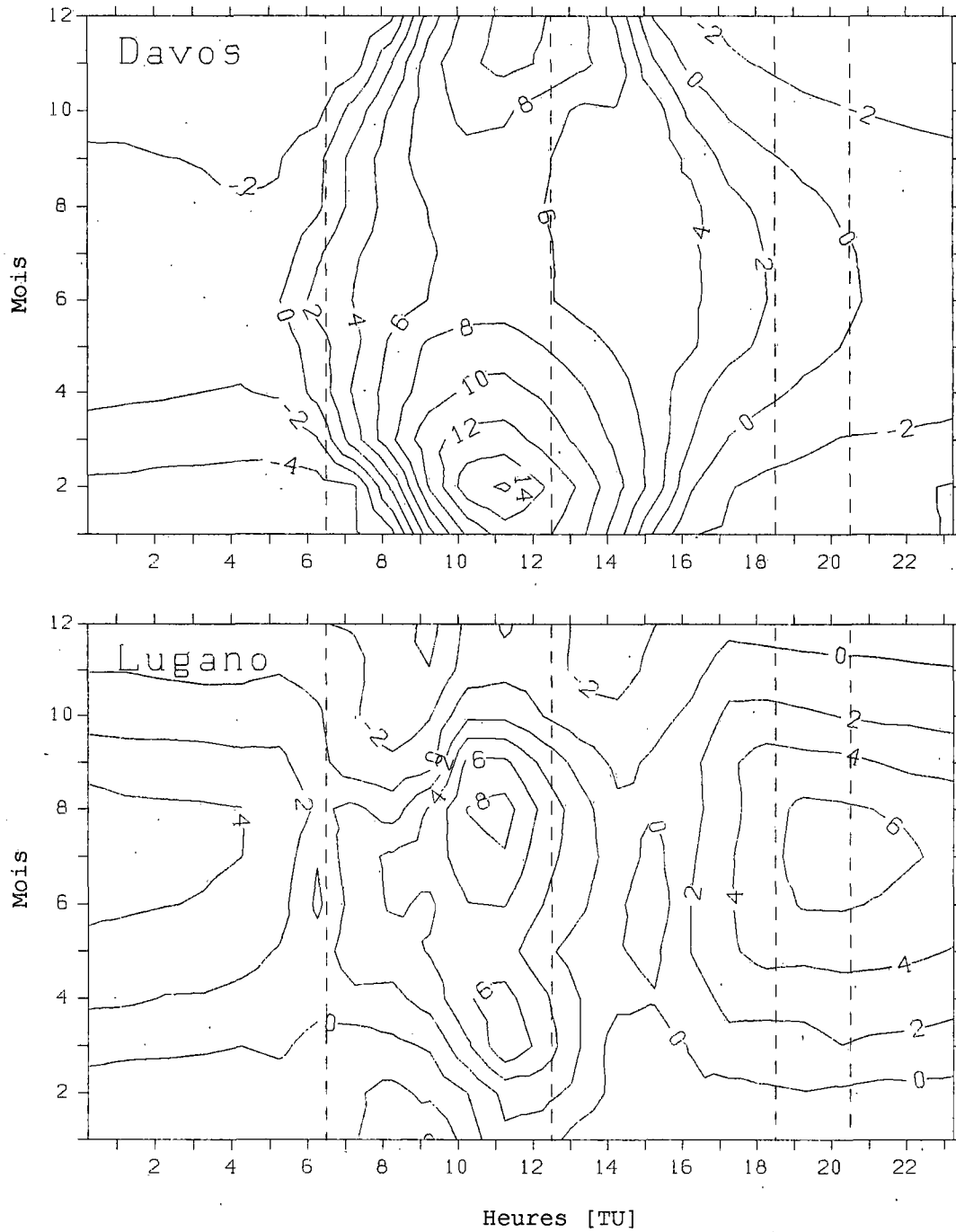
Initialement confrontés à de sérieux problèmes de transfert de données et considérant la qualité du paramètre choisi (la température sous abri), nous avons envisagé de remplacer cette dernière par la température ventilée.

Selon Müller (1984), Anderson et Mattisson (1991) ainsi que selon nos propres comparaisons, il apparaît clairement que l'abri météorologique exerce une influence importante sur les températures qui y sont mesurées. La température sous abri est généralement plus élevée que la température ventilée (VHT). En effet contrairement à un thermomètre ventilé, l'abri est particulièrement sensible au rayonnement. Par temps calme et ensoleillé, les températures sous abri sont toujours plus élevées que celles mesurées avec un thermomètre VHT. Ce phénomène peut être amplifié lorsque le sol est recouvert de neige. Lors de nuits calmes et claires, le refroidissement radiatif de l'abri agit sur les températures, qui sont alors plus basses que la référence ventilée. D'après Anderson et Mattisson (1991:9), un vent au sol de 0.5 m/s assure une ventilation naturelle de l'abri suffisante pour compenser le refroidissement radiatif. D'autres phénomènes, moins fréquents il est vrai, peuvent également provoquer des écarts par rapport au thermomètre VHT. Par exemples, le refroidissement par évaporation de l'abri après de fortes précipitations (Müller, 1984:9) ou l'isolation de l'abri par la neige soufflée qui obstrue les jalousies de ventilation. Finalement, l'état général de l'abri et particulièrement l'état de fraîcheur de sa peinture blanche joue également un rôle non négligeable (Anderson et Mattisson, 1991:14).

Ces propos ainsi que les deux paragraphes suivants nous interdisent d'utiliser la température VHT en lieu et place de la température sous abri pour la simulation des conditions d'observation des années 1970.

1. Les différences horaires moyennes température sous abri moins température VHT présentent des fluctuations saisonnières et journalières importantes. Elle dépendent en fait essentiellement des conditions atmosphériques.
2. L'importance prépondérante des conditions locales (Müller, 1984:34) ne nous autorise pas à tirer des conclusions générales valables pour toutes les stations.

La figure 4.5 illustre ces faits. On y remarque les importantes variations saisonnières des différences pour l'observation de 12h30 et de notables disparités locales. Le réchauffement de l'abri par le rayonnement direct est particulièrement visible à



**fig. 4.5** Différences horaires moyennes température sous abri moins température VHT [0.1 K]. Equidistance des isothermes 0.2 K. Période 1981 - 1990.

Davos en février. Il est probablement accentué par la réflexion du rayonnement direct sur la neige. Le refroidissement radiatif durant les nuits claires de janvier et février y est également bien visible.

Nous sommes parfaitement conscients que la température ventilée est qualitativement nettement supérieure à la température sous abri. Elle est peu sensible au rayonnement et permet de suivre fidèlement des variations rapides de la température. Un de

nos buts étant de simuler le réseau tel qu'il était lors de la modification de l'heure d'observation du soir, nous avons malgré tout basé notre étude sur la température sous abri.

## 5 RESULTATS

### 5.1 Introduction

En raison des options décrites au chapitre 4.1, les résultats qui suivent sont basés sur une période de dix ans d'observations horaires (1981-1990) et sur 5 stations. Ils sont présentés selon trois critères différents:

- Les écarts mensuels moyens entre les différentes moyennes journalières et la moyenne sur 24 heures. Cette approche permet la comparaison avec des travaux précédents.
- La dispersion (IQR) des écarts mensuels moyens et leur variabilité annuelle. Dans l'optique d'une éventuelle réduction d'une série de température, ces 2 paramètres décrivent la représentativité de ces écarts mensuels, d'une part, et de la période de mesure, d'autre part.
- L'influence de certaines situations météorologiques. Grâce à une analyse plus fine, effectuée sur une base journalière, il nous est possible de déterminer l'influence des paramètres spécifiques à la station et de mettre en évidence l'emprise de certains types de temps précis.

### 5.2 Différences mensuelles moyennes

Les écarts mensuels moyens dépendent essentiellement du tracé des courbes mensuelles moyennes. Ces courbes ont été standardisées afin d'en faciliter la comparaison. Elles représentent en fait les écarts horaires moyens par rapport à la moyenne sur 24 heures  $T_{m24}$ . Ces écarts horaires moyens se décrivent comme suit:

Si  $T_h$  est une moyenne horaire de la température pour une heure  $h$  et un jour  $i$ , alors les écarts horaires par rapport à  $T_{m24}$  pour ce jour  $i$  s'écrivent

$$\Delta T_{h,i} = T_{h,i} - T_{m24}, h = 1, \dots, 24 \quad (5.1)$$

alors que la moyenne de chaque  $\Delta T_h$  pour un nombre de jours  $n$  s'écrit

$$\Delta \bar{T}_h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{h,i} - T_{m24}) \quad (5.2)$$

et que la moyenne mensuelle ( $m$ ) sur 10 ans de chaque  $\Delta T_h$  s'écrit

$$\Delta \bar{T}_h(m), m = 1, \dots, 12 \quad (5.3)$$

Nous avons restreint notre présentation aux mois de janvier, mars et juillet (voir figure 5.1). En effet, durant ces trois mois, les différences moyennes des stations étudiées présentent des traits caractéristiques. Ces diagrammes seront commentés dans les chapitres suivants en fonction des différentes moyennes analysées. Précisons tout de même que ces courbes mensuelles moyennes, calculées sur une période de 10 ans, intègrent toutes les situations climatologiques apparues durant ce laps de temps (env. 300 jours). Il serait donc vain de vouloir en extraire un signal précis.

Les remarques suivantes décrivent le comportement des diverses moyennes journalières étudiées. Une présentation synoptique de ces moyennes se trouvent à la figure 2.4.

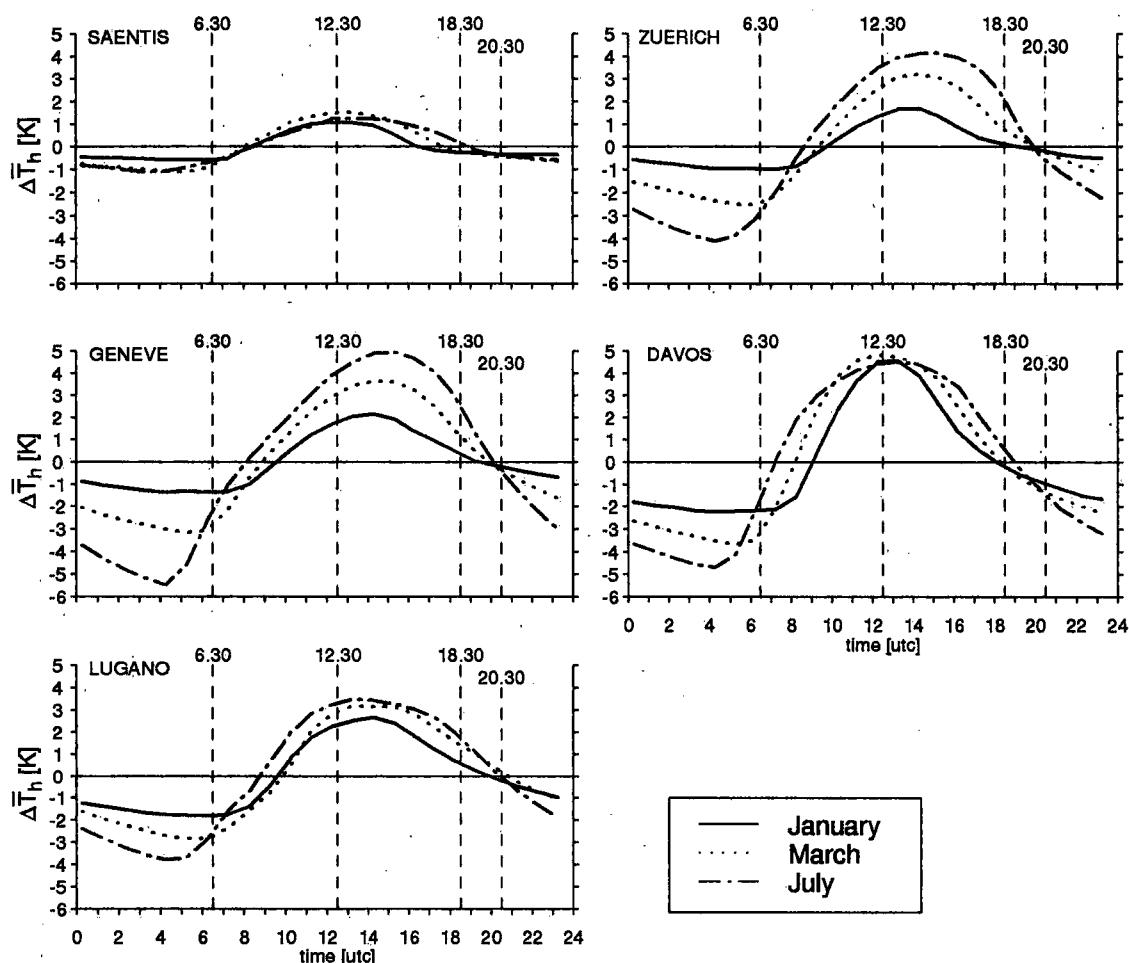


fig. 5.1 Courbes journalières standard pour janvier (trait plein), mars (pointillé) et juillet (trait-point) des écarts horaires moyens  $\Delta T_h(m)$  (5.3) par rapport à la moyenne sur 24 heures (matérialisée par la ligne du 0 K)

### 5.2.1 La moyenne pondérée $T_{mp21}$ (2.1)

Toutes les courbes de  $T_{mp21}$  (2.1) présentent, de manière plus ou moins prononcée, la double oscillation caractéristique déjà mise en évidence par de nombreux auteurs. Par rapport à la moyenne sur 24 heures, les moyennes mensuelles calculées à l'aide de  $T_{mp21}$  sont généralement surestimées en hiver et en été, et sous-estimées en automne et au printemps (Hellmann, 1915:(16)). L'explication de ce phénomène réside dans l'heure d'apparition du minimum. En mars, elle coïncide pratiquement avec l'observation du matin, ce qui tend à abaisser la moyenne  $T_{mp21}$ , tandis qu'en juillet, l'écart entre le minimum et l'observation du matin est plus important (voir figure 5.1). La moyenne  $T_{mp21}$  n'appréhende donc pas du tout les heures plus fraîches précédant le lever du soleil. Relevons que pour les deux autres heures d'observation, l'écart avec la moyenne sur 24 heures reste relativement constant.

Cette considération générale souffre naturellement de nombreuses exceptions, et chaque station étudiée ici présente un comportement particulier. Néanmoins, les différences mensuelles restent très faibles pour toutes les stations, avec un maximum

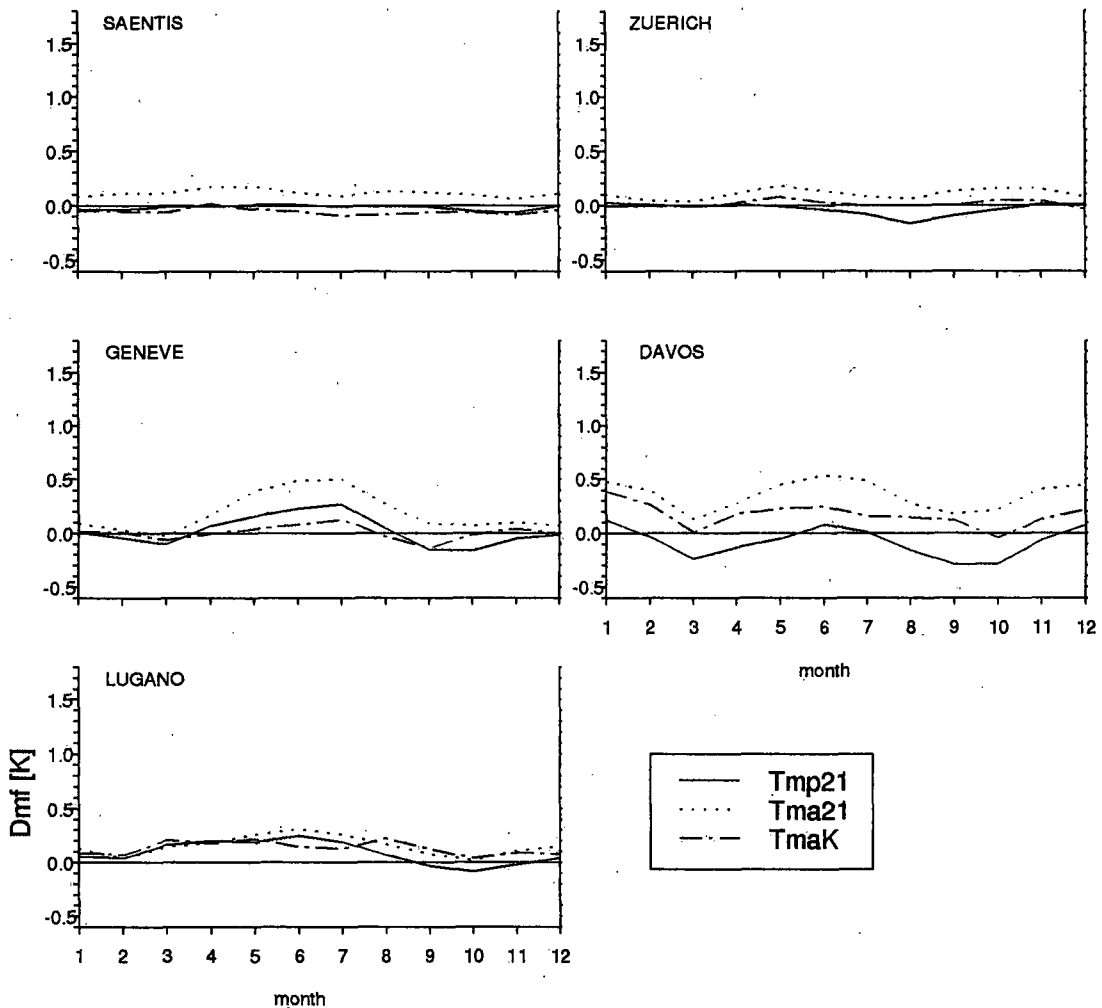


fig. 5.2 Différences mensuelles Dmf (4.2) entre les moyennes Tmp21 (2.1)(trait plein), Tma21 (2.2)(pointillé), TmaK (2.4) (trait-point) et la moyenne sur 24 heures (matérialisée par la ligne du 0 K).

de  $-0.32$  K pour Davos en septembre, et les écarts annuels moyens ne dépassent pas  $0.1$  K (voir figure 5.2).

Seule la station du Säntis peut être considérée comme caractéristique de sa situation. A cet endroit, en raison de la faible amplitude de température, presque tous les modes de calcul permettent une bonne approximation de la moyenne sur 24 heures. Les différences sont insignifiantes et, surtout, quasiment constantes durant toute l'année.

Pour les autres stations, il nous est, à ce stade, difficile de tirer des conclusions globales (applicables à d'autres stations) du tracé de ces courbes. En effet, chaque moyenne mensuelle intègre aussi bien les situations météorologiques apparues durant 10 ans que les signaux spécifiques à la station, tels que la topographie locale ou la configuration des alentours.

Les résultats tirés d'études précédentes confirment en partie les nôtres, et surtout apportent des informations importantes concernant l'influence de la période (époque,



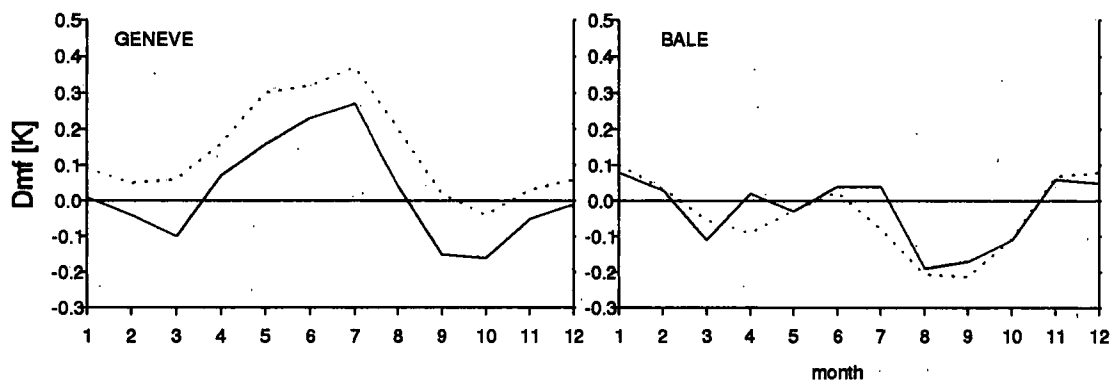


fig. 5.3 Comparaison des écarts mensuels Dmf (4.2) entre la moyenne Tmp21(2.1) et la moyenne sur 24 heures (2.6) pour deux périodes. Genève: 1981-1990 (trait plein) et 1902-1928 (pointillé). Bâle: 1981-1990 (trait plein) et 1955-1974 (pointillé)

durée) et de l'emplacement de la station (figure 5.3.). Ainsi, les différences calculées pour Bâle ne diffèrent pratiquement pas de celles publiées par Krammer (1976) et basées sur une période de 20 ans (1955-1974).

Pour Genève par contre, les écarts entre une étude (Archives des Sciences, 1929:111ff) portant sur une période de 27 ans (1902-1928) et nos résultats sont plus importants. Il faut toutefois relever que, contrairement à Bâle, la station de Genève ne se trouve plus à l'emplacement qu'elle occupait alors dans la vieille ville. Elle fut en effet remplacée en mars 1962 par la station de l'aéroport de Genève-Cointrin.

Cette petite comparaison semble démontrer que le choix de la période n'est pas trop important (pour autant qu'elle soit suffisamment longue), mais que l'emplacement de la station et son instrumentation jouent un rôle prépondérant dans le comportement des différences. Cette constatation va ainsi dans le même sens que celle faite par Hellmann lors de la comparaison de diverses stations allemandes et européennes (Hellmann, 1915:(18)). Nous traiterons de ce problème au chapitre 5.2.8

D'autres publications étrangères confirment le comportement général des courbes de différences, tout en ayant des valeurs différentes (Hellmann (1915:(19)), Erk (1906:32)). Seule la courbe des différences calculées par Siogas (1972:22) pour Innsbruck (période 1906-1930) diffère notablement de tous les autres résultats. L'auteur n'explique pas cette particularité (figure 5.5).

### 5.2.2 La moyenne arithmétique Tma21 (2.2)

Comme pour la moyenne Tmp21, nous avons ici une double oscillation des différences. Les moyennes mensuelles calculées à l'aide de cette formule sont toujours trop élevées, atteignant un maximum en juin - juillet. En fait, cette méthode de calcul fut avant tout conçue pour les moyennes journalières et n'est pas appropriée pour le calcul des moyennes mensuelles. Ceci fut mis en évidence par Schouw (1823) et, par la suite, de nombreux auteurs tentèrent d'y remédier en appliquant un facteur de correction à la moyenne arithmétique, afin de l'adapter au calcul de la moyenne mensuelle. Cette formule fut longtemps utilisée en Suisse, puisque qu'elle servit

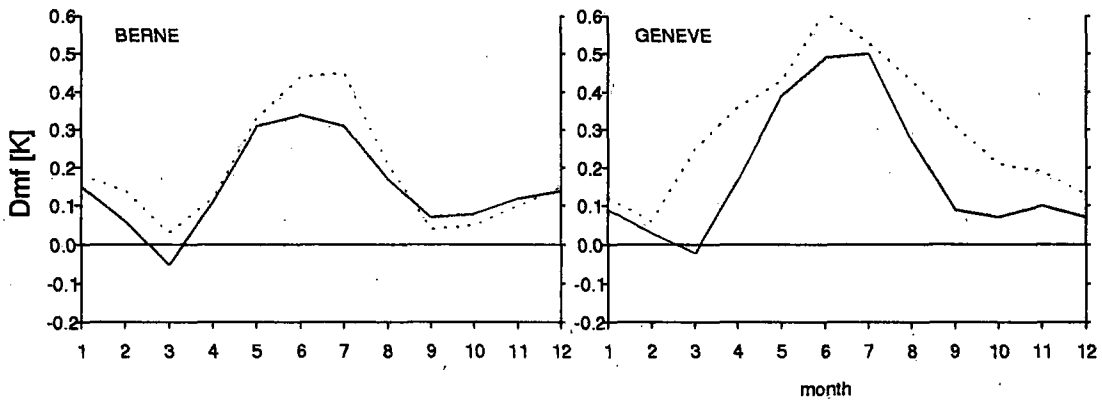


fig. 5.4 Comparaisons des écarts mensuels  $Dmf$  (4.2) entre la moyenne  $Tma_{21}$  (2.2) et la moyenne sur 24 heures  $Tm_{24}$  (2.6). Berne 1981-90 trait plein, 1866-71 pointillé. Genève 1981-90 trait plein, 1836-1860 pointillé (Plantamour, 1863)

jusqu'en 1970 au calcul des moyennes journalières publiées dans les Annales de l'ISM (les moyennes mensuelles étant calculées avec  $Tmp_{21}$ ). Dans notre cas, ce mode de calcul permet également d'illustrer l'importance du double poids de l'observation du soir dans la formule  $Tmp_{21}$  (2.1). Le travail de Weilenmann (1872) présente de faibles différences pour Berne. Relevons que, comme pour Genève, l'actuelle station de Berne-Liebefeld ne se trouve plus à l'emplacement original situé en pleine ville.

### 5.2.3 La moyenne arithmétique $Tma_K$ (2.4)

Le tracé des différences est particulier à chaque station et ne présente pas de comportement caractéristique comme c'est le cas pour  $Tmp_{21}$  (2.1) et  $Tma_{21}$  (2.2). Il dépend en effet des facteurs  $K$  utilisés. D'une manière générale, nous pouvons relever que cette formule permet une excellente approche de la moyenne sur 24 heures (2.6). Pour Genève et Zurich, les différences sont même plus faibles que celles résultant de la différence  $Tmp_{21}$ (2.1) moins  $Tm_{24}$  (2.6).

Un petit historique de la détermination des facteurs  $K$  utilisés pour le réseau climatologique suisse, de même que le contrôle de ces facteurs et de leurs répartitions spatiales, figure au chapitre 6.

Nous ne disposons malheureusement ni de point de comparaison ni d'autres publications pour étayer ces résultats, si ce n'est une petite étude de Dössegger et Moser (1983). Prenant en compte la température ventilée (VHT) et les heures d'observation synoptique, elle présente des résultats légèrement différents des nôtres. Elle ne nous est pas d'une grande aide, fondée qu'elle est sur une seule année d'observation (1981), et faisant, de plus, partie de notre période de référence.

### 5.2.4 La moyenne $TmA$ (2.5)

Tout comme la moyenne pondérée  $Tmp_{21}$  (2.1), les courbes de cette formule produisent une double oscillation, avec des différences maximales au printemps et en automne, et minimales en été. Par contre, d'après nos résultats, le calcul des moyennes mensuelles avec cette méthode conduit à une sous-estimation de la

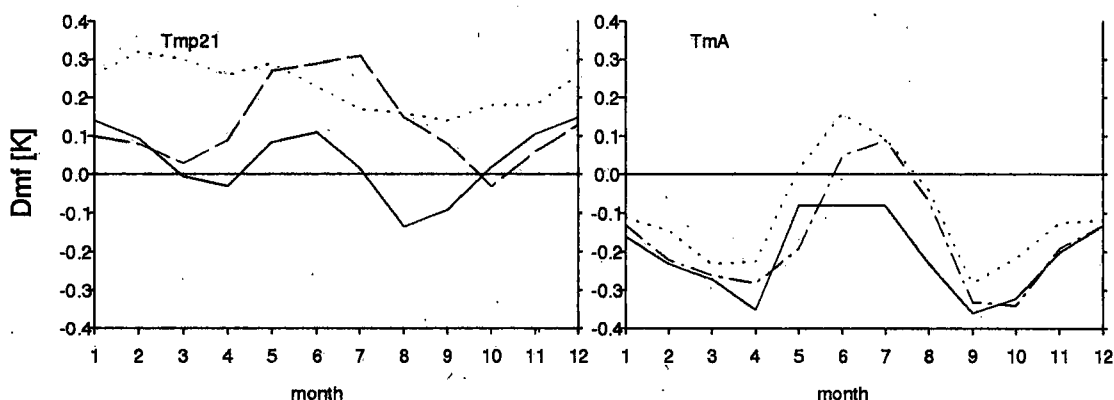


fig. 5.5 Tmp21: Comparaisons des écarts mensuels Dmf (4.2) Tmp21 - Tm24 pour Potsdam 1893-1912 (trait plein), Munich (traitillé) et Innsbruck 1906-1930 (pointillé).  
TmA: comparaisons des écarts mensuels TmA - Tm24 pour Bâle 1981-85 (trait plein)

moyenne sur 24 heures, tandis que l'écart annuel moyen est plus important que pour Tmp21 (2.1). Il oscille en effet entre -0.17 K pour le Säntis et -0.38 K pour Davos (voir figure 5.6), alors qu'il n'atteint pas 0.1 K dans le cas de Tmp21 (2.1). Nos résultats ne correspondent pas entièrement avec ceux de Krammer pour Bâle (1976:112) et de Siogas pour Innsbruck (1972:17). Précisons quand même que ces deux études sont basées sur d'autres périodes que la nôtre et que les différences avec nos résultats sont assez faibles (figure 5.5).

Siogas a tenté d'expliquer la double oscillation des différences à l'aide de l'écart T07 moins Tmin. Elles présentent en effet un tracé semblable (mais contraire) à la courbe des différences mensuelles. Selon l'auteur, une faible différence entre T07 et Tmin revient à doubler le poids de Tmin dans la formule et tend ainsi à abaisser la moyenne calculée avec TmA (2.5). Par contre, lorsque la différence est plus importante, T07 corrige un peu l'influence de Tmin et TmA (2.5) se rapproche de la moyenne sur 24 heures.

#### 5.2.5 La moyenne sur 24 heures Tm24 (2.6)

Comme nous l'avons vu précédemment, les premières moyennes journalières sur 24 heures datent de 1778, respectivement de 1824 (voir chapitre 2.3.1). Par la suite, l'introduction des thermographes ainsi que le développement des réseaux d'observation synoptique (pour les besoins de la navigation aérienne) a répandu l'usage de cette moyenne pour des applications climatologiques.

Elle est souvent appelée «moyenne vraie». Pour notre part, étant d'avis que la moyenne journalière vraie n'existe pas dans l'absolu, nous avons renoncé à cette appellation. Néanmoins, cette moyenne sert de référence pour nos comparaisons, ceci d'autant plus que l'usage toujours plus répandu de capteurs automatiques va en favoriser l'utilisation dans les années à venir.

### 5.2.6 La moyenne $TmMm$ (2.7)

Cette formule, qui n'a jamais été utilisée en Suisse, a fait l'objet de très nombreuses publications (voir chapitre 2.3.6) traitant en fait plus des déviations causées par les différentes heures de lecture des thermomètres à minima et maxima que des différences avec la moyenne sur 24 heures  $Tm24$ .

Comme pour les autres moyennes, nous sommes ici en présence d'une double oscillation du tracé des différences. Contrairement à  $Tmp21$  (2.1) et  $TmA$  (2.5),  $TmMm$  (2.7) produit une surestimation générale de la moyenne sur 24 heures, avec deux extrêmes en février-mars et en octobre-novembre. L'explication de ce comportement réside dans la distribution des moyennes horaires. En hiver, le tracé de la courbe, relativement plat aux alentours du minimum, et bien marqué au maximum, conduit à une surestimation de la moyenne sur 24 heures (2.6). Le rayonnement reçu par une surface horizontale est fonction du sinus de l'élévation du soleil. Le rayonnement reçu réagit donc plus fortement à une variation donnée de l'élévation lorsque l'angle est petit (soleil bas sur l'horizon) que lorsqu'il est grand. Ainsi, les variations de température dues au rayonnement sont plus marquées en hiver qu'en été (Collison, Tabony, 1984:331). En été, la distribution moins biaisée et les deux extrêmes bien définis permettent une assez bonne approche de  $Tm24$  (2.6). Cette interprétation s'applique particulièrement à Davos, où la distribution des différences, contrairement aux autres stations, a un caractère bimodal bien marqué.

D'après Collison et Tabony (1984), cette double oscillation est un signe de continentalité. En effet, selon les auteurs, les phénomènes advectifs hivernaux provoquent une sous-estimation de  $Tm24$  (2.6) et vont ainsi en sens contraire des influences radiatives. Les régions à régimes continentaux, moins sujettes aux influences advectives, présentent ainsi des différences plus faibles. Ce raisonnement est certainement valable pour la région étudiée (la Grande-Bretagne), où il est relativement simple de distinguer les stations côtières (régime maritime) des stations situées à l'intérieur des terres (régime plus continental). La topographie complexe du territoire helvétique, ainsi que notre méthode d'analyse, ne nous permettent pas de poser la même hypothèse.

D'un point de vue général,  $TmMm$  (2.7) ne permet pas une aussi bonne approximation de la moyenne sur 24 heures que  $Tmp21$  (2.1),  $TmaK$  (2.4) ou  $TmA$  (2.5) et surtout les résultats varient considérablement d'une station à l'autre. Les moyennes annuelles des différences vont en effet de 0.04 K pour Genève à 0.4 K pour Davos. Les moyennes mensuelles sont dans l'ensemble surestimées, avec un maximum de 1 K pour Davos en novembre.

### 5.2.7 Les moyennes arithmétique $Tma19$ (2.8) et pondérée $Tmp19$ (2.9)

Ces deux formules produisent de très fortes surestimations de la moyenne sur 24 heures  $Tm24$  durant les mois d'été (voir figure 5.6). Elles n'ont jamais été utilisées par l'ISM pour le calcul des moyennes journalières ou mensuelles.  $Tma19$  (2.8) met en évidence l'importance du terme correcteur  $K(N - T_{min})$  dans la formule  $TmaK$  (2.4).  $Tmp19$  (2.9) permet de simuler ce qui se serait passé lors du déplacement de l'heure d'observation du soir en 1971 si l'ISM n'avait pas introduit la nouvelle moyenne  $TmaK$  (2.4).

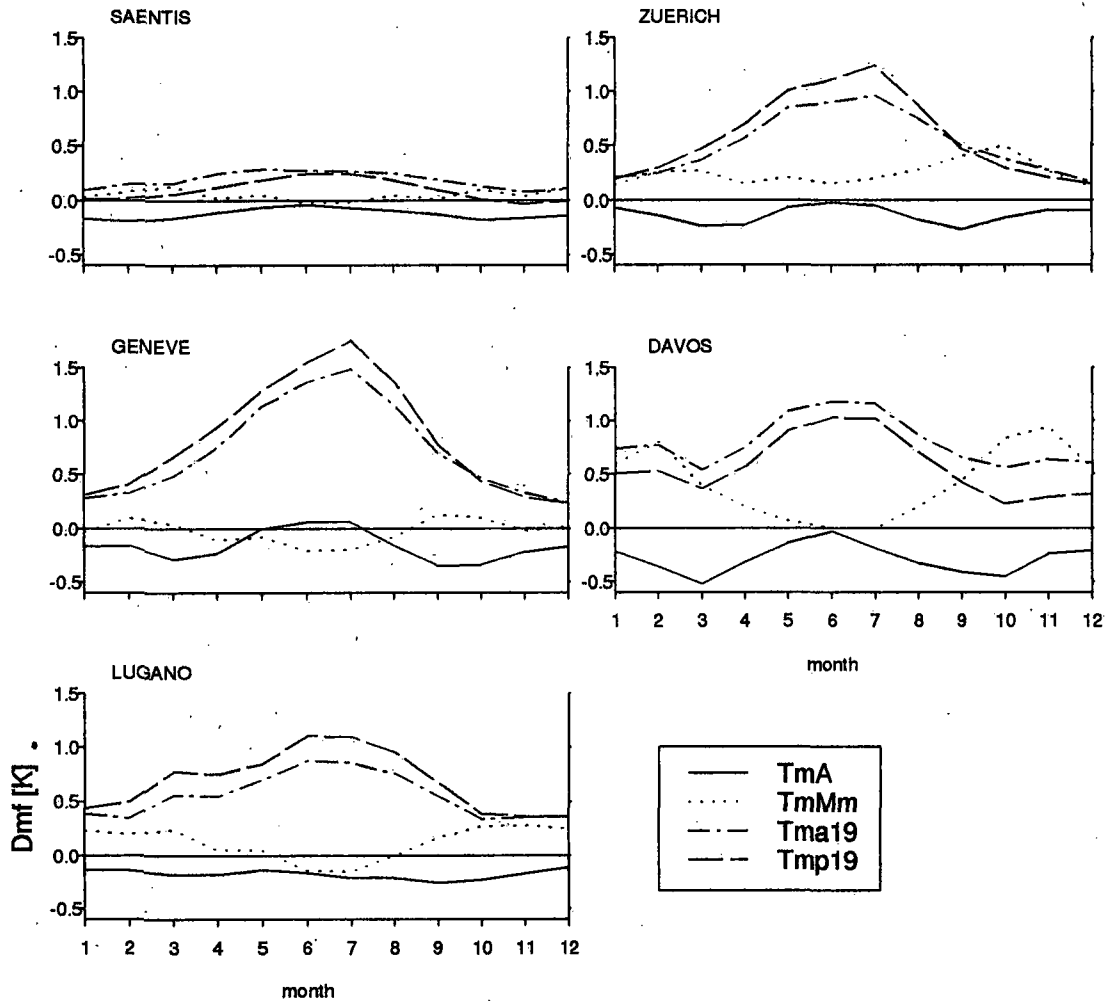


fig. 5.6 Différences mensuelles Dmf (4.2) entre les moyennes TmA (2.5)(trait plein), TmMm (2.7) (pointillé); Tma19 (2.8) (trait-point), Tmp19 (2.9)(traitillé) et la moyenne sur 24 heures Tm24 (matérialisée par la ligne du 0 K)

### 5.2.8 Discussion des résultats

Les points suivants résument les résultats des chapitres ci-dessus. Afin de clarifier la présentation, nous avons axé les diagrammes de la figure 5.7 sur les moyennes Tmp21 (2.1), TmaK (2.4), TmA(2.5) et TmMm (2.7).

1. Les différences annuelles produites par les moyennes Tmp21 (2.1) et TmaK (2.4) sont faibles pour toutes les stations (figure 5.7). Les moyennes TmA (2.5) et TmMm (2.7) occasionnent des déviations annuelles plus importantes (jusqu'à -0.3 K, respectivement 0.4 K pour Davos).
2. Les variations annuelles des différences moyennes de Tmp21 (2.1), TmaK (2.4) et TmA (2.5) ainsi que les écarts entre les stations sont également faibles. Ceci nous autorise à affirmer que contrairement à la moyenne TmMm (2.7), la représentativité spatiale et temporelle des déviations annuelles de ces trois formules est élevée.
3. Les différences mensuelles (figure 5.8, 5.9 et 5.10) présentent un comportement analogue à celui des différences annuelles tant du point de vue de la dispersion des

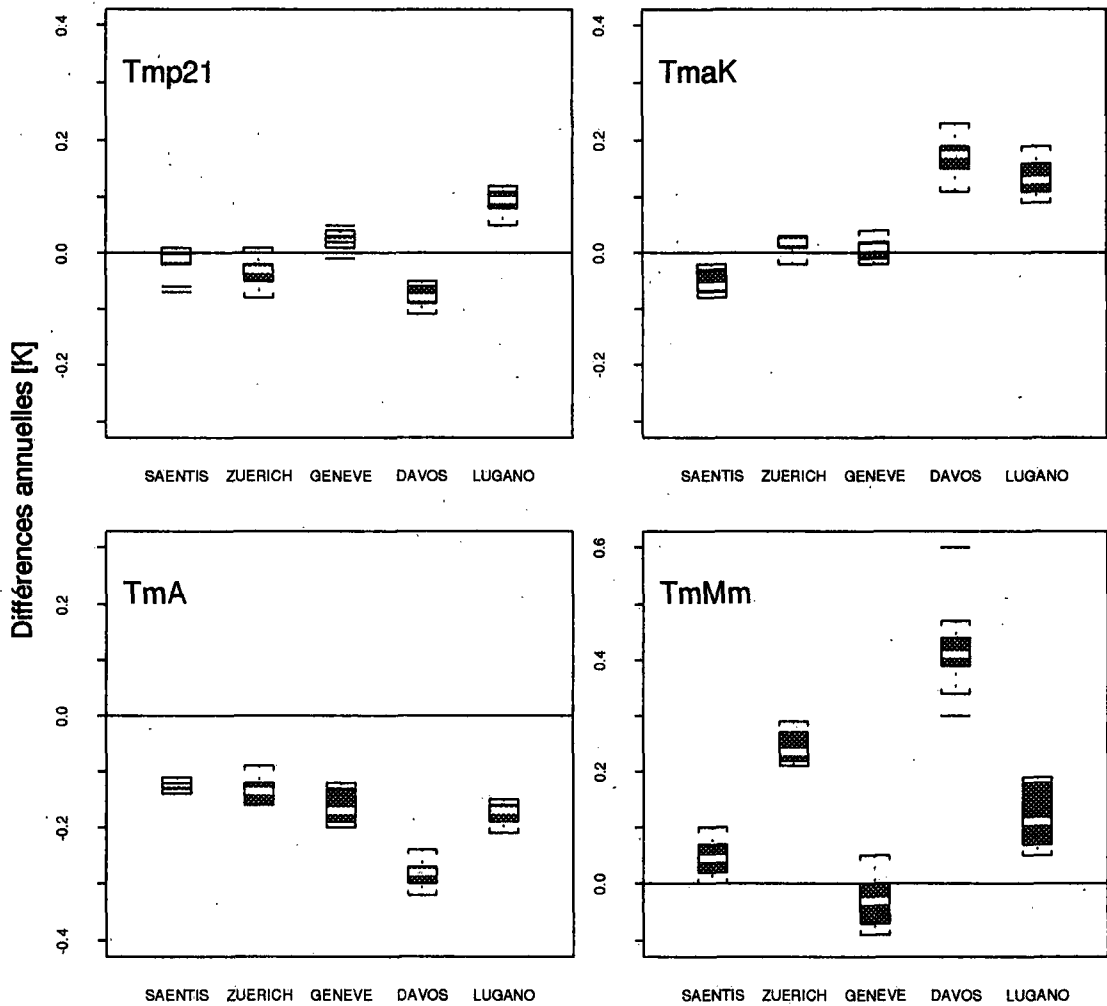


fig. 5.7 Box plot des différences annuelles moyennes [K]. N=10. Le principe du box plot est expliqué au chapitre 4.4

valeurs individuelles que des écarts entre les stations. Les moyennes Tmp21 (2.1), TmaK (2.4) et TmA (2.5) produisent des résultats constants, les variations annuelles sont faibles. L'amplitude des différences (sur 10 ans) est généralement inférieure à 0.3 K avec un maximum de 0.5 K (en janvier à Davos pour TmaK (2.4)). La moyenne TmMm (2.7) quant à elle, se caractérise par une grande instabilité temporelle (les différences mensuelles varient sensiblement d'une année à l'autre) ainsi que par des modifications notables de la moyenne et de la variabilité d'une station à l'autre. L'amplitude des différences mensuelles atteint 1.6° à Davos en janvier.

Ainsi, un passage de Tmp21 (2.1) à TmaK (2.4), TmA (2.5) ou Tm24 (2.6) (ou inversement), pour le calcul des moyennes journalières, ne devrait pas porter à conséquence au niveau de la moyenne annuelle, et provoquerait de légères déviations des moyennes mensuelles. Il n'en va pas de même de la moyenne TmMm (2.7). Vu les remarques précédentes, une réduction sur cette moyenne de la période climatique

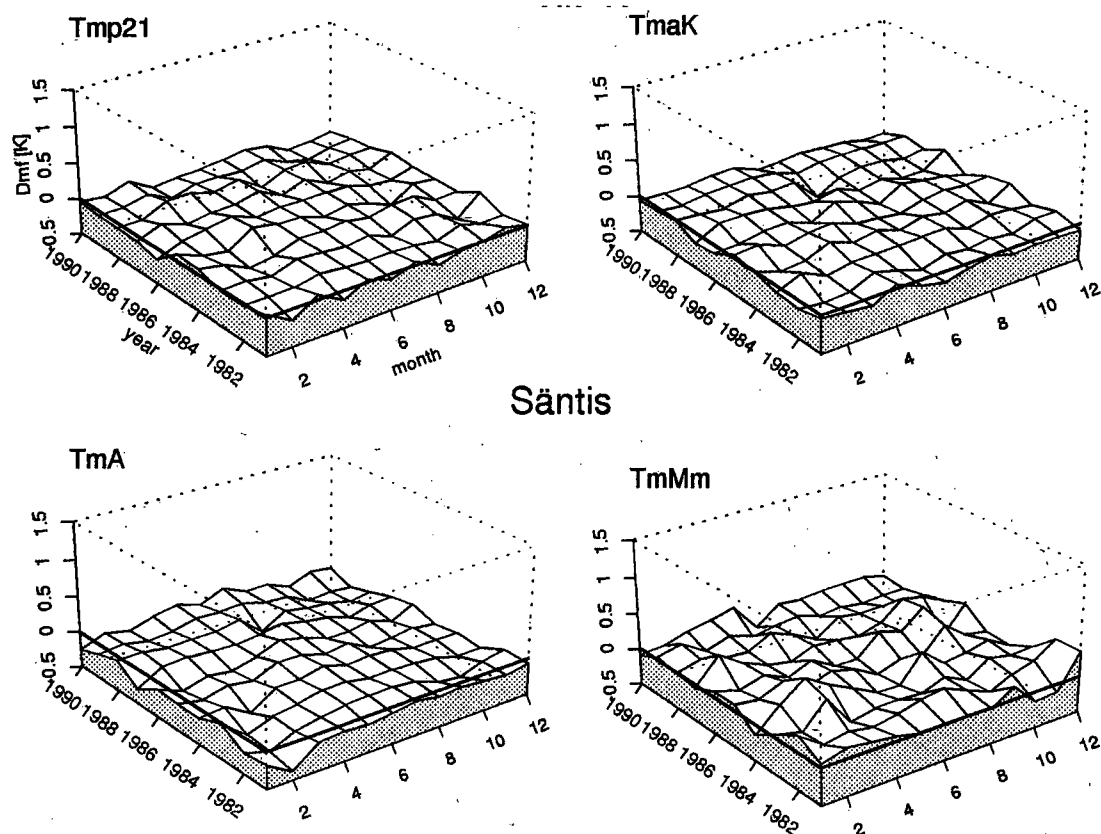


fig. 5.8 Différences mensuelles moyennes Dmf (4.2) durant 10 ans au Säntis

1961-90 telle qu'elle était initialement préconisée par l'OMM (WCDP-No. 10:6) nous semble difficilement réalisable.

Pour terminer, relevons que les bons résultats fournis par la moyenne Tmp21 (2.1)(développée par Kämtz) sont, selon Hellmann (1915:(16)), le fruit d'un heureux hasard. En effet, Kämtz a basé son étude sur des séries horaires un peu courtes pour une étude climatologique<sup>14</sup> de cette importance. Le comportement particulièrement stable de cette moyenne a évidemment joué en faveur de Kämtz.

Les graphiques ci-dessus ont démontrés que chaque station réagit diversement et possède sa propre courbe annuelle de différences. Si certaines courbes s'expliquent aisément (par exemple celle du Säntis, caractéristique d'une station sommitale), la méthode utilisée ne nous autorise pas à tirer des conclusions générales du tracé des courbes des autres stations étudiées et ne nous permet pas d'appliquer ces résultats à l'ensemble des stations du réseau climatologique suisse.

### 5.2.9 Critique des résultats

Cette approche classique sur la base des différences moyennes comporte de nombreux désavantages qui limitent le champ d'investigation:

---

14. Séries utilisées par Kämtz: Série de Chiminello à Padova: 16 mois d'observations horaires (de 04.00 à 23.00 + 1 observation irrégulière durant la nuit) entre 1778 et 1780; série de Brewster: 24 mois d'observations horaires à Edimbourg de 1824 à 1825 (Schouw, 1823:56 et Kämtz, 1831:72).

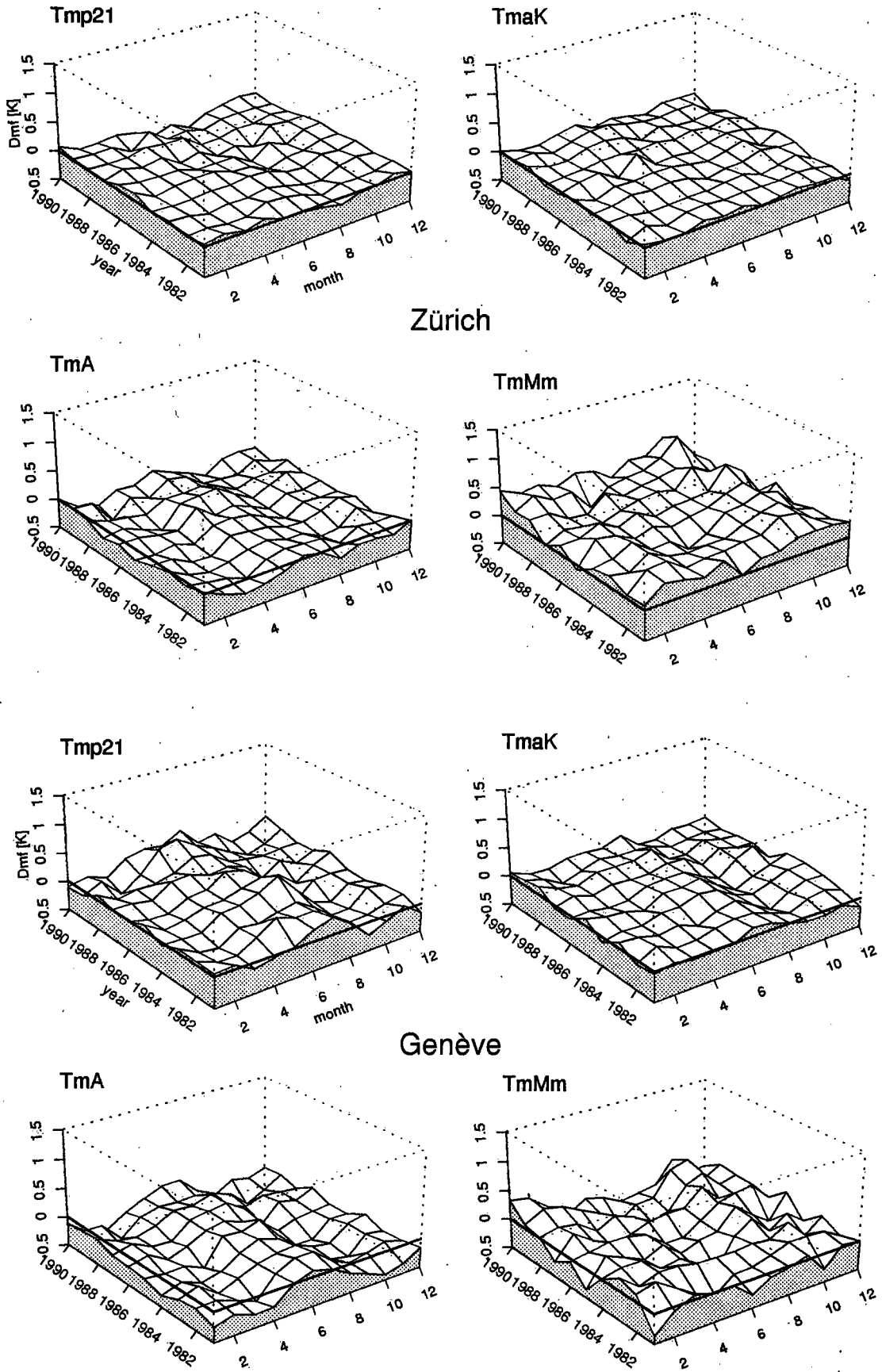


fig. 5.9 Différences mensuelles moyennes Dmf (4.2) durant 10 ans à Zurich et Genève



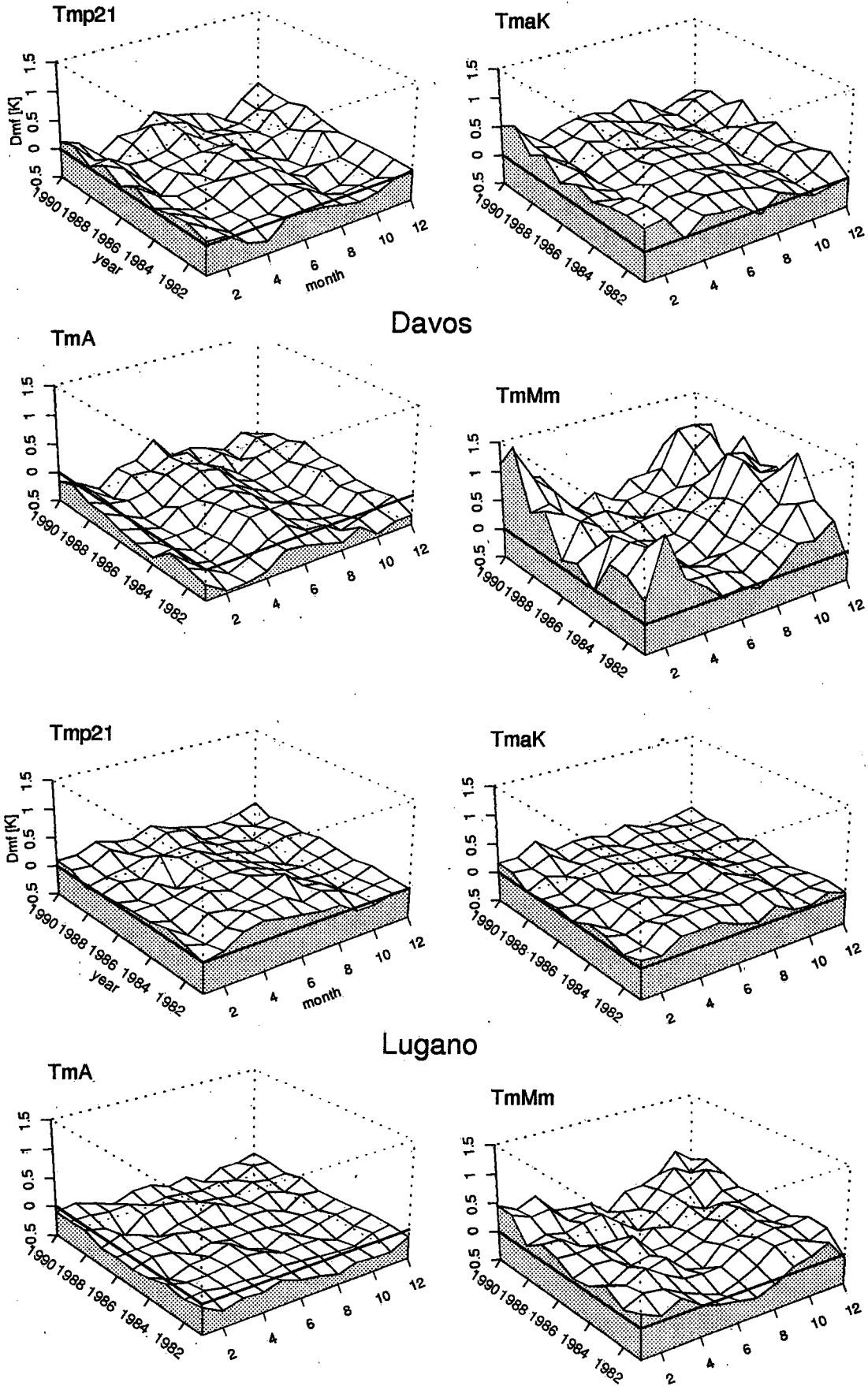


fig. 5.10 Différences mensuelles moyennes Dmf (4.2) durant 10 ans à Davos et Lugano

- Chaque courbe mensuelle moyenne intègre toutes les situations météorologiques ayant eu lieu durant la période étudiée. Il serait vain de vouloir en extraire un signal précis (l'influence de l'exposition ou d'un lac d'air froid par exemple) ou de chercher à déterminer l'effet d'une situation météorologique précise. Nous devons donc limiter l'application d'une courbe de différences calculée de cette manière (pour la réduction d'une période climatique, par exemple) à la station pour laquelle elle a été déterminée.
- Au vu de la variabilité des écarts mensuels de la moyenne  $TmMm$  (2.7) en particulier, nous pouvons admettre que la dispersion des écarts journaliers varie également passablement selon le mode de calcul utilisé. Or, si cette approche nous apporte des informations concernant les écarts mensuels moyens, les 10 valeurs annuelles mises à part, nous ne disposons d'aucun renseignement quant à la distribution de ces écarts.

Une bonne compréhension du comportement de chaque moyenne passe donc obligatoirement par une analyse des différences journalières. Cette approche plus fine devrait nous permettre de mettre en évidence l'impact de certaines situations météorologiques, d'une part, ainsi que l'influence des paramètres propres à la station, d'autre part.

### 5.3 Influences locales

Nous avons vu au chapitre précédent que les écarts des différentes moyennes journalières sont particuliers à chaque station. Dans l'optique d'une approche globale du comportement de ces moyennes, le but de ce chapitre est de déterminer l'influence des paramètres spécifiques à la station sur la forme des courbes journalières moyennes et, par là, sur les différentes moyennes journalières. Sont considérés comme paramètres spécifiques à la station :

- L'exposition, c'est-à-dire la situation et l'orientation de la station par rapport à la topographie locale à meso-échelle (situation sommitale, sur un flanc ou dans un fond de vallée par exemple)
- L'horizon, par son influence sur la durée d'insolation

Notre but n'étant pas une étude micro-météorologique des différentes stations, nous ne prendrons pas en considération la configuration des alentours (présence d'un lac proche, de constructions nombreuses et importantes, etc). De plus, le réseau ANETZ étant homogène, tant du point de vue de l'instrumentation que de celui de l'installation, nous ne tiendrons pas compte de l'influence de ces deux paramètres.

#### 5.3.1 Approche

Afin de mieux cerner les influences locales, nous devons étudier des cas présentant des conditions météorologiques semblables pour l'ensemble des stations, et exempts de phénomènes aléatoires (passages frontaux ou changement de masse d'air). Lors de telles situations, nous admettons que les variations quotidiennes de la température sont essentiellement fonction du cycle journalier du rayonnement global, d'une part, et des paramètres spécifiques à la station, d'autre part.

Nous cherchons donc un collectif de situations convectives (gradient barométrique faible et pression atmosphérique supérieure à la moyenne). Pour éviter les cas de

brouillard, fréquents lors de situations convectives hivernales, ces jours doivent présenter une insolation relative importante ( $rsd^{15} > 90\%$ ). Enfin, une absence de précipitations ( $rr=0$ ) devrait éliminer les cas d'orages lors de situations convectives estivales.

### 5.3.1.1 Choix des situations

Grâce à la classification synoptique des situations météorologiques selon Schüepp (1979), nous pouvons localiser les situations convectives qui répondent aux critères cités ci-dessus. Elles sont définies par:

- Gradient barométrique faible, vent géostrophique (théorique) au sol  $\leq 15$  noeuds et pression barométrique (en altitude) supérieure à la moyenne saisonnière. Ce collectif peut être subdivisé en 5 situations numérotées de 1 à 5 (Schüepp, 1979:11):
  1. Vent au sol et en altitude (500 hpa) faible
  2. Vent au sol faible, en altitude de secteur ouest ( $\leq 49$  noeuds)
  3. Vent au sol faible, en altitude de secteur nord
  4. Vent au sol faible, en altitude de secteur est
  5. vent au sol faible, en altitude de secteur sud

De cet ensemble de situations convectives, nous avons extrait, pour chaque station, les jours ayant eu une insolation relative supérieure à 90% et exempts de précipitations.

Vu la taille insuffisante des échantillons mensuels, nous avons été contraint d'étudier ces cas sur une base saisonnière pour l'hiver (décembre-février) et l'été (juin-août) uniquement. Même si les situations de haute pression sont plus fréquentes en été qu'en hiver (Schüepp, 1979:12), cette tendance ne se retrouve pas dans la taille des échantillons qui diffèrent fortement d'une station et d'une saison à l'autre (voir tableau 5.1). Les conditions d'insolation très différentes en sont la cause. En été la

		hiver	été
Situations convectives (total saisonnier)		194	245
avec $rsd > 90\%$ et $rr=0$	Säntis	97 (10)	44 (4)
	Zurich	22	66
	Genève	13	46 (2)
	Davos	128 (3)	105
	Lugano	88	48 (1)

tableau 5.1 Taille (en jours) des échantillons de situations convectives avec  $rsd > 90\%$  et  $rr = 0$  après correction. Entre () nombre de jours éliminés. Période 1981 - 1990.

15. rsd: abréviation de l'anglais «relative sunshine duration»

présence de nuages d'origine orographique en montagne réduit l'insolation des stations de Davos et du Säntis alors qu'en hiver, le traditionnel stratus du Plateau inverse la situation pour les stations de Genève et Zurich. Nous avons choisi de travailler malgré tout avec ces échantillons de taille différente. Nous en tiendrons compte lors de l'analyse.

#### 5.3.1.2 Contrôle des données

Les premiers résultats nous ont démontré que même si nos échantillons sont assez homogènes, ils nécessitent une étude plus détaillée des quelques cas isolés présentant des écarts importants par rapport au reste de l'échantillon. Selon des critères subjectifs, nous avons éliminé les jours dont le tracé de la courbe diurne de température s'éloigne trop de la forme sinusoïdale recherchée, anomalies qui peuvent être expliquées par des phénomènes météorologiques aperiodiques. Ce sont, par exemple, le passage d'un grain lors d'un orage ou une brusque et importante variation de la force et direction du vent. Le tableau 5.1 indique le nombre de jours éliminés pour chaque station.

Cette classification selon Schüepp, contenue dans la banque de données climatiques de l'ISM, est théoriquement valable pour la région des Alpes Centrales, délimitée par un rayon de 222 km centré sur le Rheinwaldhorn et recouvrant pratiquement toute la Suisse. Cette classification décrit la situation générale pour une vaste région et il peut sembler pour le moins délicat de l'utiliser pour l'étude d'une station précise. L'épisode du 23 janvier 1981 (découvert par hasard) démontre assez clairement les limites de notre approche et nous rappelle que nos échantillons de situations convectives doivent être considérés et utilisés avec prudence.

#### *Un exemple de haute pression hivernale: l'épisode du 23.01.1981*

Situation générale: une zone de haute pression s'étend des Açores à l'ouest de la Russie et détermine le temps dans les Alpes. Selon la classification de Schüepp, nous avons une situation convective avec vent au sol faible et vent inférieur à 4 noeuds de secteur est à 500 hpa. Les stations de Zurich et Genève se trouvent sous le stratus et ne nous intéressent donc pas ( $r_{sd} < 90\%$ ). Davos et Lugano présentent les cycles diurnes de la température attendus lors d'une telle situation (voir figure 5.13, 5.14 et 5.15). Le Säntis se trouve par contre dans un courant d'est (25 noeuds) et la hausse de la température psychrométrique (+5 K en 24 heures) indique qu'un changement de masse d'air a eu lieu et qu'il a modifié le tracé de la température. Ce réchauffement est lié au front chaud qui touche Paris dans la nuit du 23.01.81. (voir figure 5.11). Les régions élevées de notre pays sont apparemment déjà touchées par ce front, alors que le Plateau et les vallées alpines se trouvent encore dans la masse d'air froid. L'examen des radiosondages de minuit de Payerne confirme cette observation (voir figure 5.12). On y voit clairement le réchauffement qui atteint 10 K à 2500m (environ 750 hpa) alors que la température au sol baisse légèrement et que l'altitude de l'inversion augmente.

Notre propos n'est pas mettre en évidence les faiblesses et les qualités de la classification selon Schüepp, mais d'en démontrer les limites, au niveau du champ d'application dans notre cas particulier. Nous n'avons évidemment pas contrôlé chaque cas séparément, et ceci devrait nous inciter à une certaine prudence.

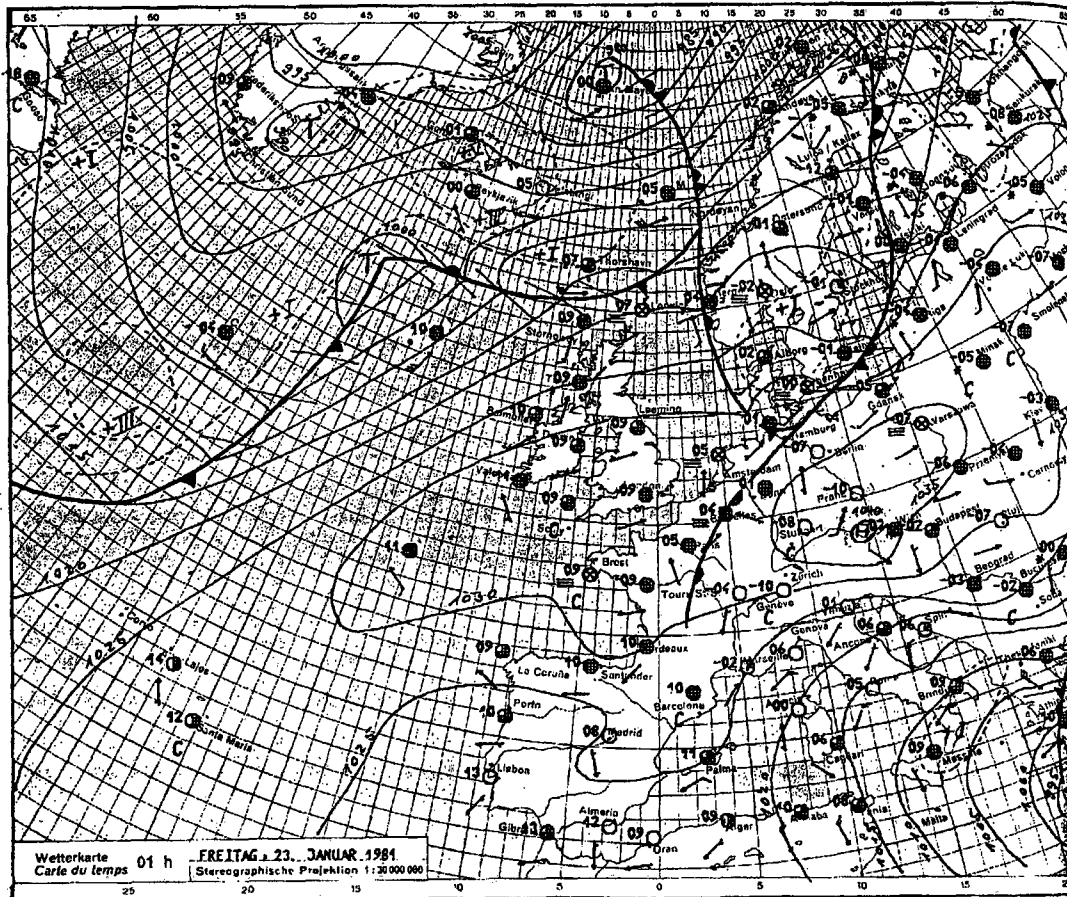


fig. 5.11 Carte du temps au sol pour le 23.01.81 à 01h

### 5.3.1.3 Qualité des données

La qualité des données a été estimée de deux façons:

1. Selon la répartition de fréquence des heures d'apparition des minima et maxima journaliers de la température (figure 5.16).
2. Selon les quartiles (*box plots*) des courbes journalières standards  $\Delta\bar{T}_h$  (5.2) (figure 5.17 à 5.19).

Le Säntis mis à part, toutes les courbes diurnes sont très proches de la forme sinusoïdale recherchée avec un minimum journalier à l'aube et un maximum après midi (voir figure 5.16). Les 3 stations de plaine (Zurich, Genève, Lugano) présentent une répartition des écarts horaires à la moyenne sur 24 heures  $\Delta T_h$  (5.1) bien groupée, tant en été qu'en hiver (figure 5.17, 5.18 et 5.19). Les variations horaires pour Davos (en hiver) et le Säntis sont plus importantes (figure 5.17 et 5.18).

A Davos, en hiver, la dispersion des écarts horaires  $\Delta T_h$  (5.1), particulièrement importante durant la période de refroidissement radiatif précédent l'aube, est probablement induite par la présence ou non d'une inversion de température dans le fond de la vallée (lac d'air froid). Après contrôle, il s'est avéré que l'apparition du minimum dans la deuxième partie de la journée n'est pas provoquée par des phénomènes advectifs, mais par un refroidissement radiatif intense durant la 1ère partie de

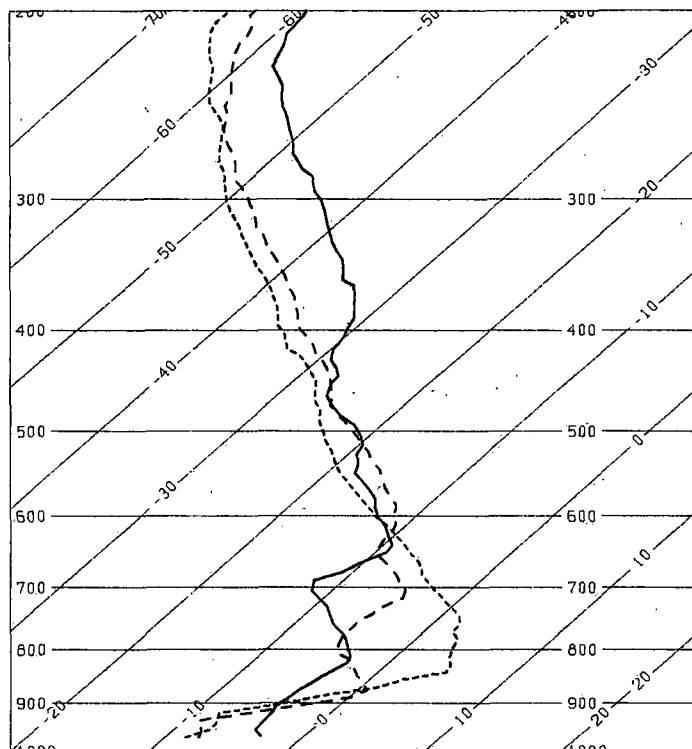


fig. 5.12 Radiosondage de Payerne 00h.[TU] 22.01.81 (trait plein), 23.01 (traitillé), 24.01 (pointillé)

la nuit (figure 5.16). Lors de telles situations, le minimum de la nuit a généralement lieu le jour suivant.

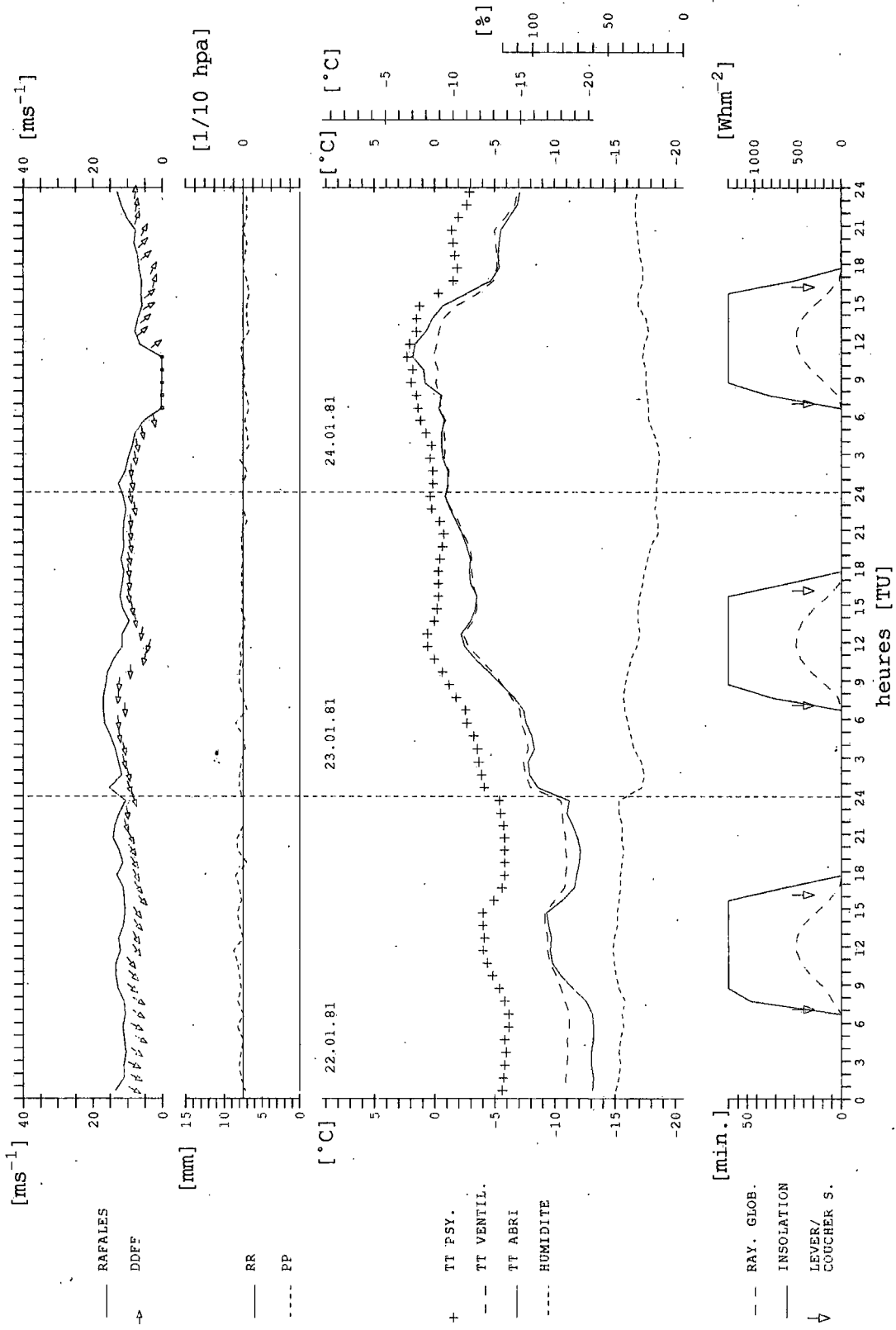
Le cas du Säntis, plus complexe, peut être en partie expliqué par la situation sommitale de la station, qui implique une faible amplitude journalière de la température. En raison de cette faible amplitude, et en l'absence de phénomènes advectifs, les influences locales exercent proportionnellement une plus grande emprise sur les variations quotidiennes de la température que pour une station de plaine ayant une amplitude de la température plus prononcée. Ainsi, la plus grande variabilité horaire du Säntis n'est pas le signe de la piètre qualité de notre échantillon de situations convectives, mais bien une des caractéristiques importantes du comportement de cette station lors de telles situations météorologiques.

En conclusion, considérant la répartition des heures d'apparition des extrêmes journaliers (figure 5.16) en conjonction avec les observations cités ci-dessus, nous pouvons affirmer que la majeure partie de nos échantillons correspond aux définitions du chapitre 5.3.1.1, et qu'ils sont donc homogènes.

### 5.3.2 Résultats

Les influences locales sont décrites, pour chaque station, selon deux approches. Premièrement, à l'aide des courbes de température journalières standards calculées selon  $\Delta\bar{T}_h$  (5.2) pour les situations convectives décrites précédemment (figure 5.21 et figure 5.22), nous tenterons d'expliquer les écarts des différentes moyennes avec la moyenne sur 24 heures (figure 5.25 et figure 5.26). Deuxièmement, d'après la varia-

(05) Saentis  
fig. 5.13



Saentis. Valeurs horaires de différents paramètres météorologiques du 22.01.81 au 24.01.81. Explications des signes: RAFALES [ $ms^{-1}$ ]: maximum horaire instantané de la force du vent; DDFF [ $ms^{-1}$ ]: direction et force du vent; RR [mm]: précipitations; PP [0.1 hpa]: variations horaires de la pression; TT PSY [ $^{\circ}C$ ]: température psychrométrique; TT VENTIL [ $^{\circ}C$ ]: température VHT; TT ABRI [ $^{\circ}C$ ]: température sous abri; HUMUDITE [%]: humidité relative; RAY GLOB [ $Whm^{-2}$ ]: sommes horaires du rayonnement global horizontal; INSOLATION [minutes]: durée horaire d'insolation; LEVER/COUCHER S.: lever/coucher du soleil.

fig. 5.14 Davos. Valeurs horaires de différents paramètres météorologiques du 22.01.81 au 24.01.81

(28) Davos

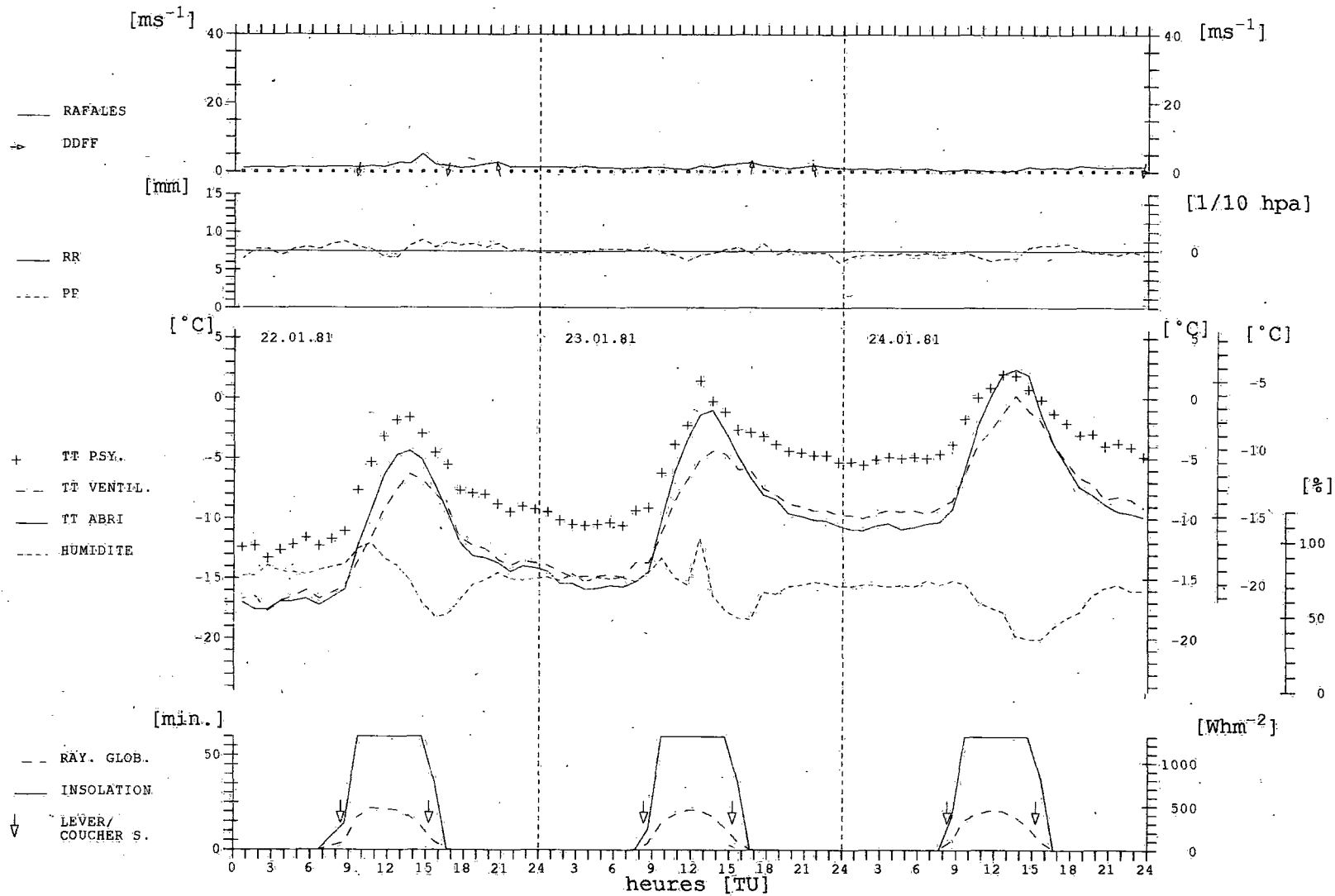
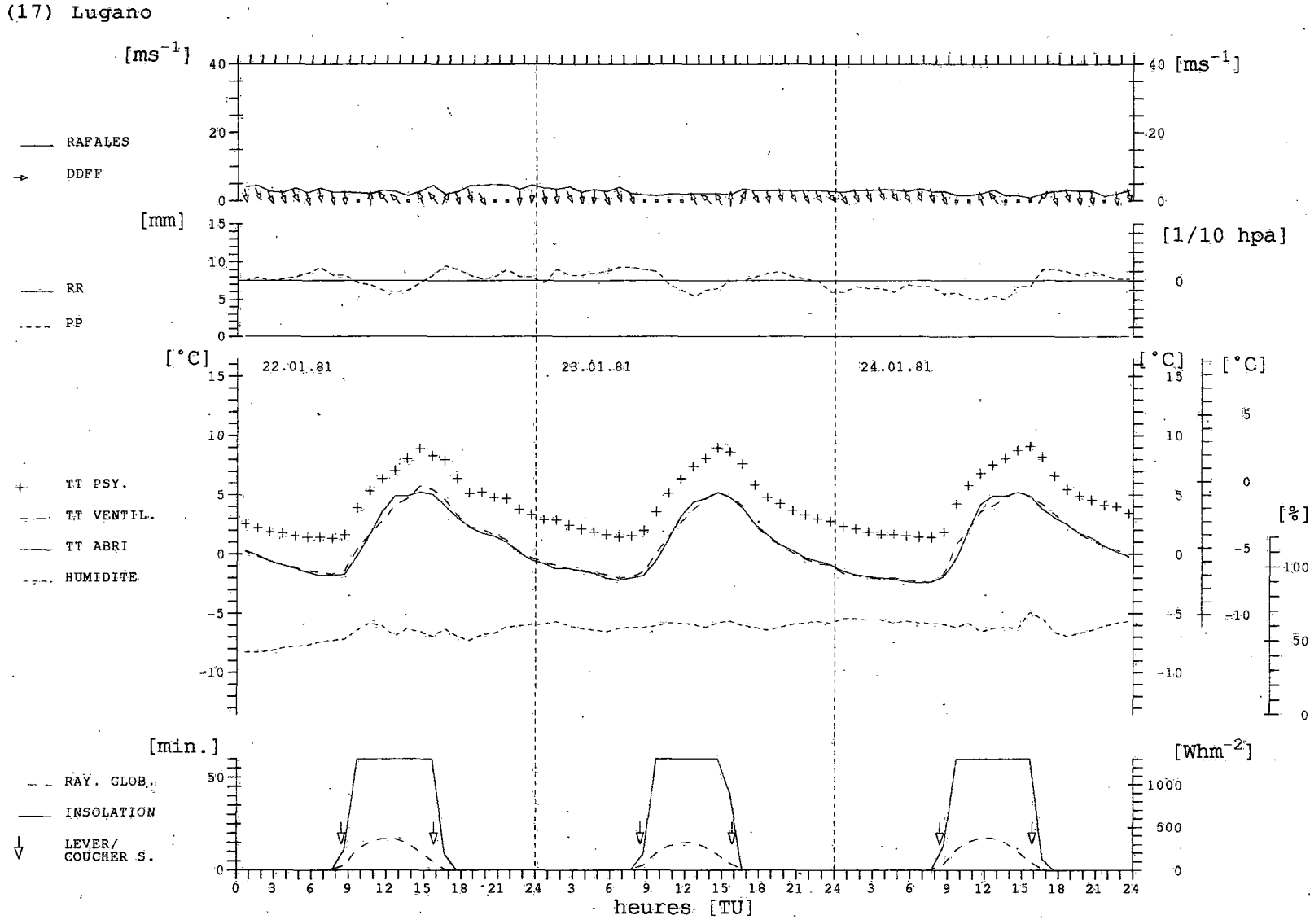




Fig. 5.15 Lugano: Valeurs horaires de différents paramètres météorologiques du 22.01.81 au 24.01.81



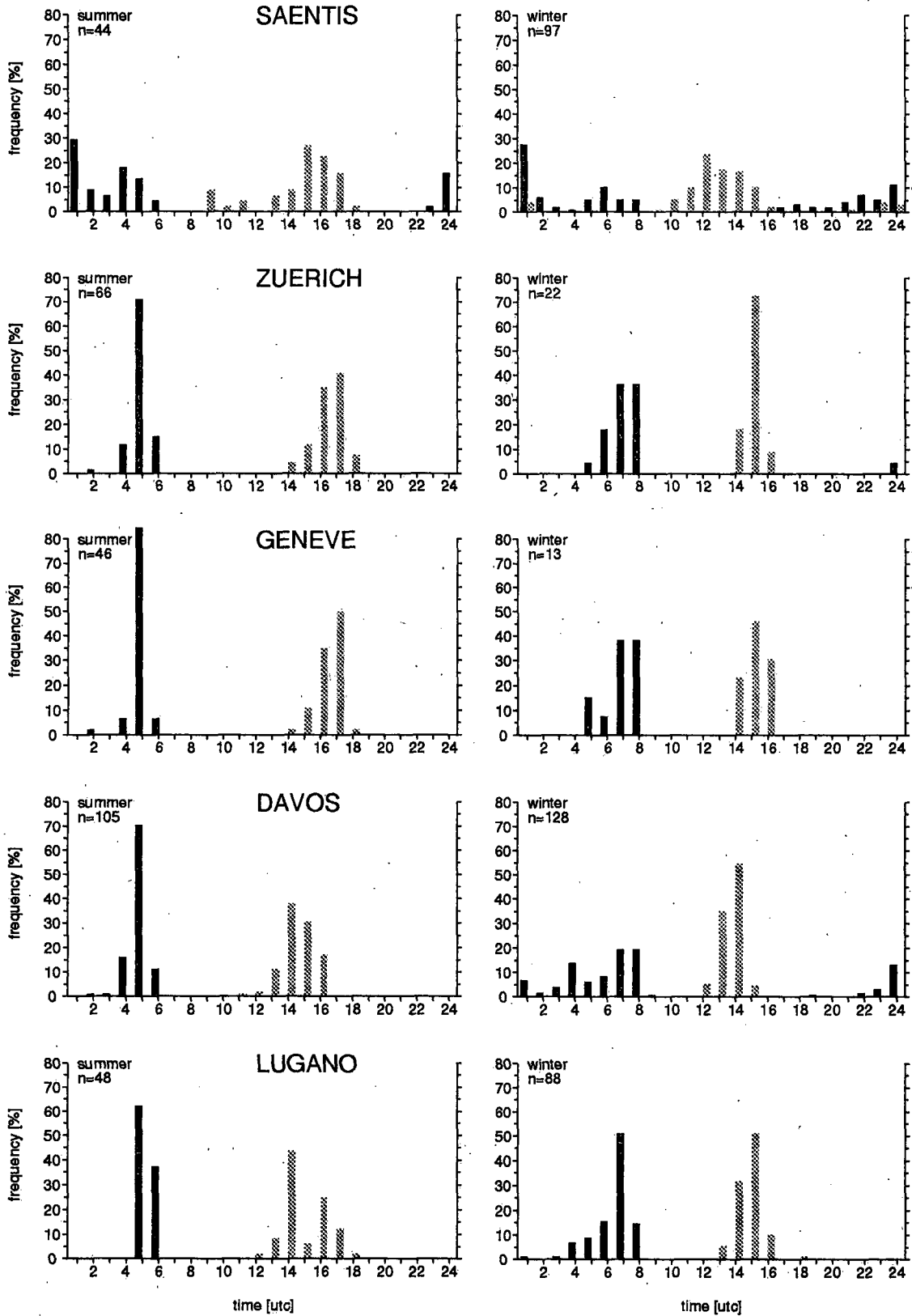


fig. 5.16 Fréquences de l'heure d'apparition des minimum (en noir) et maximum (en gris) journaliers de la température.

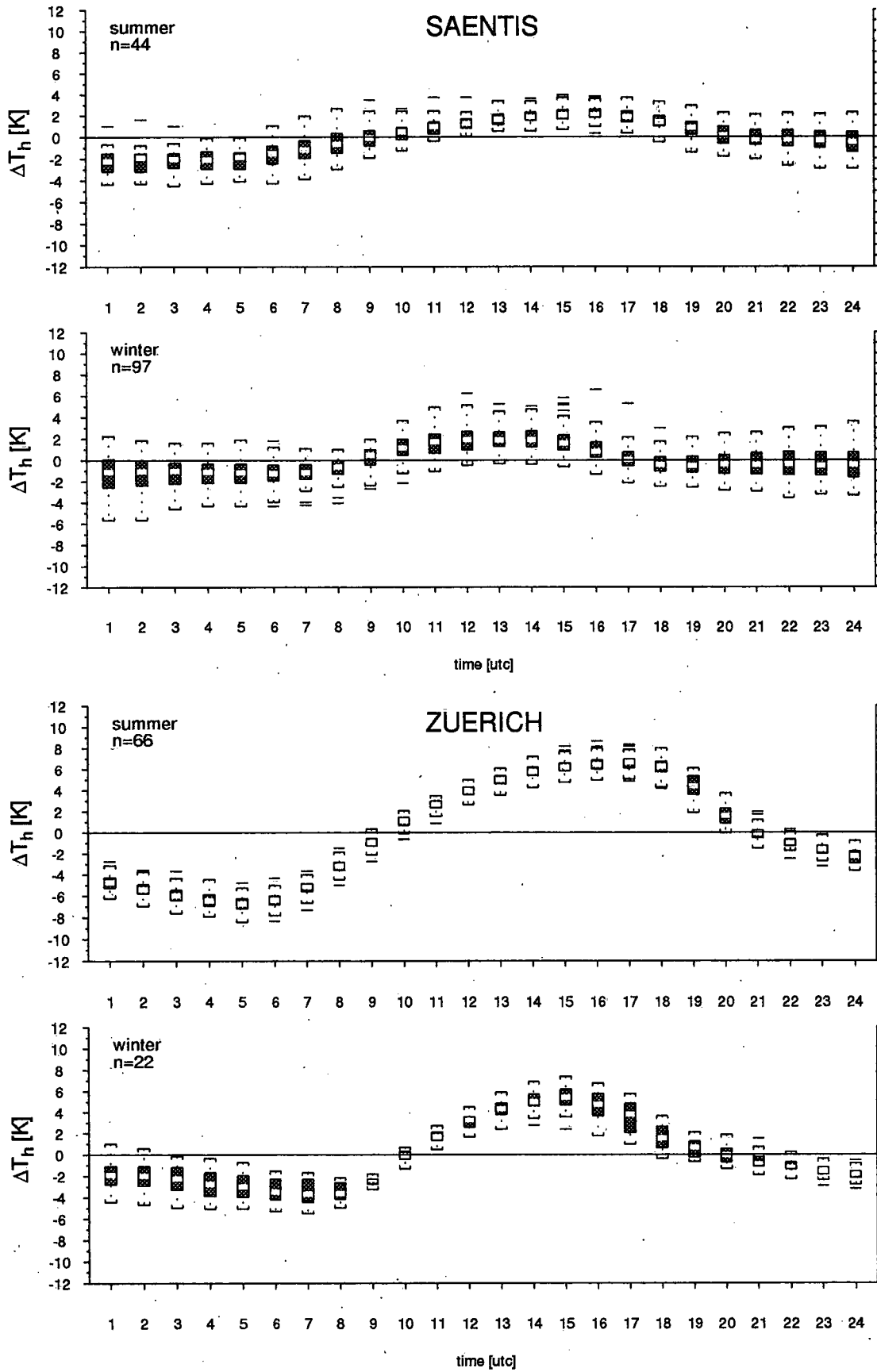


fig. 5.17 Box plots des écarts horaires  $\Delta T_h$  (5.1) à la moyenne sur 24 heures lors de situations convectives hivernales et estivales.

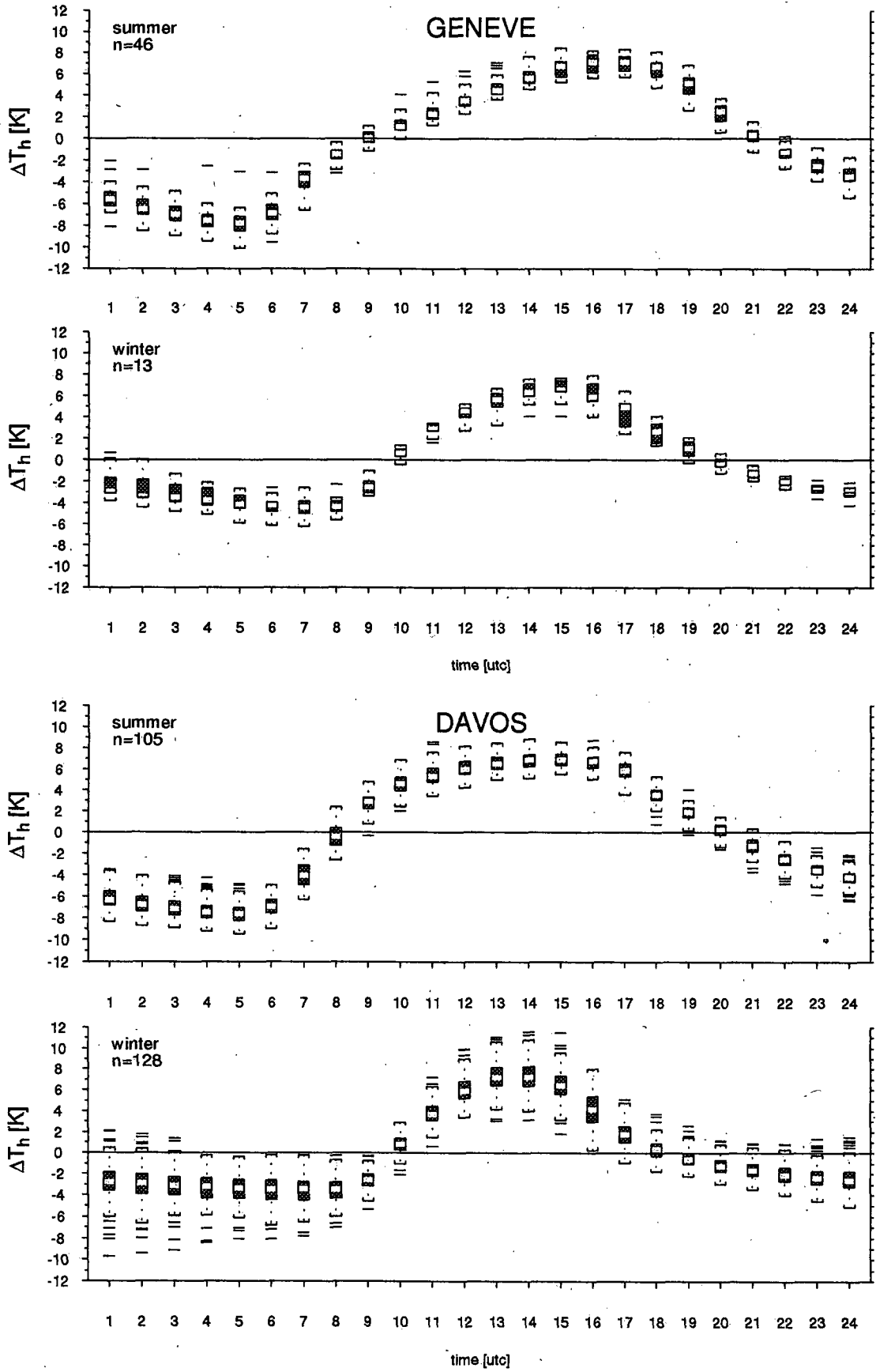


fig. 5.18 Box plots des écarts horaires  $\Delta T_h$  (5.1) à la moyenne sur 24 heures lors de situations

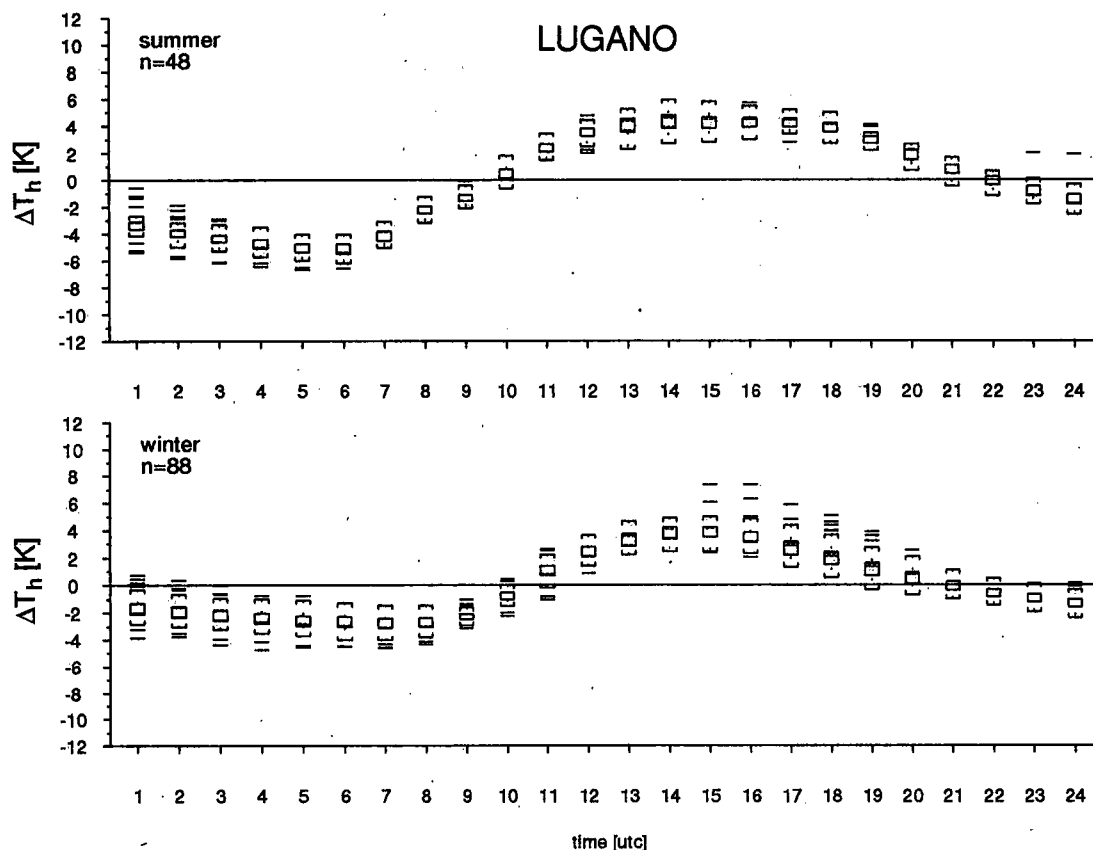


fig. 5.19 Box plots des écarts horaires  $\Delta T_h$  (5.1) à la moyenne sur 24 heures lors de situations convectives hivernales et estivales.

bilité de ces écarts, qui trouve son explication dans la variabilité des différences horaires (figure 5.17 à figure 5.19). L'analyse ne sera donc pas effectuée sur une base journalière, mais, au contraire, sur un collectif bien déterminé.

En l'absence de phénomènes advectifs, les variations quotidiennes de la température peuvent être convenablement décrites à l'aide de 5 paramètres (Reuter, 1980:240):

1. La température de départ
2. Le bilan du rayonnement dans le domaine des ondes courtes
3. Le bilan du rayonnement dans le domaine des ondes longues
4. L'état du sol (température, couverture, taux d'humidité)
5. Les flux verticaux d'origine non-advective

Lorsque le ciel est clair, pour une élévation donnée, les échanges radiatifs dépendent en grande partie du trouble atmosphérique et de la quantité d'eau précipitable contenue dans l'atmosphère, ou  $P_w$  pour le terme anglais «precipitable water» (Valko, 1980:8-2). Celle-ci se trouve sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère. D'autres gaz tels que le  $CO_2$  et l'ozone contribuent également à l'absorption du rayonnement par l'atmosphère. Il convient de différencier ces composants atmosphériques selon leurs spectres d'absorption. Les aérosols, par exemple, responsables en partie du trouble atmosphérique, ont un pouvoir d'absorption radiatif fort dans le domaine des ondes courtes, et faible dans celui des ondes longues, alors que, pour la vapeur d'eau,

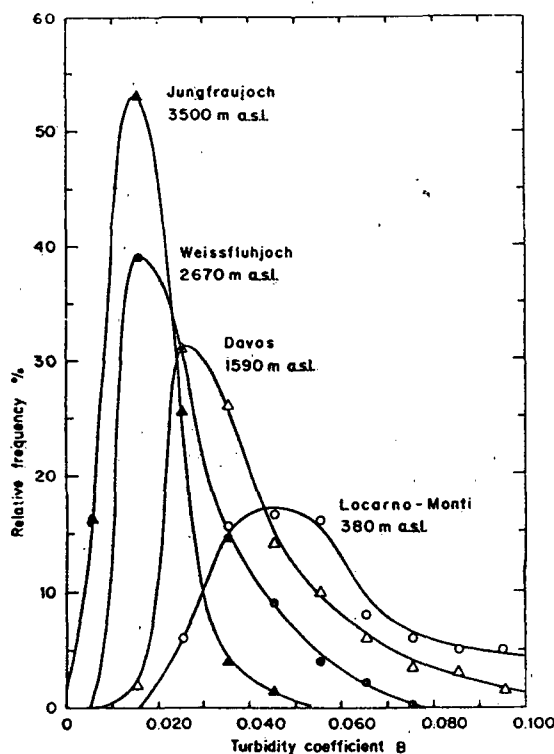


fig. 5.20 Fréquence relative du trouble atmosphérique B pour différentes altitudes. ▲ Jungfrauoch, ● Weissfluhjoch, Δ Davos, ○ Locarno-Monti (Valko, 1980:8-3)

on assiste au phénomène inverse (Gygax, 1985:141). Il faut relever qu'il existe une certaine corrélation entre le trouble atmosphérique et la quantité d'eau précipitable. Ces deux éléments ne peuvent ainsi pas être complètement dissociés (Valko, 1971:12).

Ils exercent donc une influence sur les variations diurnes de la température. Dans les régions de plaine, une partie de l'énergie reçue sous forme de rayonnement direct est absorbée par les aérosols et la vapeur d'eau. Les variations de la température (essentiellement dues aux variations du rayonnement lors de situations convectives) sont donc plus lentes que dans les vallées situées à l'intérieur des chaînes alpines où, du fait de la plus faible hygrométrie et de la clarté de l'atmosphère, une part plus importante du rayonnement reçu est directement transformé en chaleur sensible. La même démarche s'applique également à la deuxième moitié de la journée. L'atmosphère plus sèche des vallées intra-alpines retient mal le rayonnement infrarouge émis par le sol. Le refroidissement est plus rapide que dans les régions de plaine où l'air humide lui offre un écran plus efficace.

Selon ce modèle très simplifié, et pour les situations convectives utilisées ici, les variations diurnes de la température, donc la forme de la courbe journalière moyenne, sont en partie déterminées par le trouble atmosphérique ainsi que par le taux d'humidité absolue de l'air. L'état du sol, en particulier sa couverture et son taux d'humidité, joue également un rôle important dans les variations quotidiennes de la température. D'une manière générale, nous pouvons considérer que, du fait de la plus faible pluvio-

sité, les sols des vallées intra-alpines sont plus secs que ceux des régions de plaine. Nous pouvons y appliquer le même raisonnement que pour l'atmosphère.

Dans notre cas, comme nous travaillons avec des moyennes et que nous ne disposons pas de tous les paramètres décrits par Reuter, nous nous sommes bornés à décrire l'importance du trouble atmosphérique pour quelques stations de différentes altitudes (voir figure 5.20) et à quantifier Pw à l'aide de<sup>16</sup>:

$$Pw = \exp(2.2572 + 0.05454 \times Td) \quad (5.4)$$

Pw = quantité d'eau précipitable [mm]  
Td = température au point de rosée [°C]

Ainsi, lorsque dans les lignes qui suivent, il sera question du taux d'humidité de l'air, il s'agira en fait de la quantité d'eau précipitable. Les Pw, calculés pour nos collectifs de situations convectives, figurent dans le tableau suivant:

	Säntis	Zurich	Genève	Davos	Lugano
Eté	9.9	18.3	18.3	13.1	22.3
Hiver	4.2	9.2	9.5	5.7	8.5

tableau 5.2 Quantité moyenne d'eau précipitable [mm] lors de situations convectives estivales et hivernales

### Säntis

La faible amplitude des variations journalières estivales et hivernales de la température est caractéristique d'une station sommitale telle que le Säntis. L'été se différencie de l'hiver par une phase plus longue ainsi que par une baisse plus lente de la température durant la deuxième moitié de la journée. Ce dernier phénomène pourrait être dû à la présence de nuages d'origine convective aux alentours du sommet du Säntis. Cette nébulosité a pour effet de ralentir le processus de refroidissement radiatif (Richner et Phillips, 1984:1336). Au vu de la forte variabilité des différences horaires qui servent au calcul de la courbe journalière moyenne (figure 5.17), nous ne sommes pas en mesure de tirer des explications de la forme générale de cette dernière. Il est par contre intéressant de relever le comportement hivernal de la moyenne Tmp21 (2.1), qui présente un écart moyen faible (0.1 K) et une dispersion particulièrement élevée, causée probablement par la double pondération de l'observation du soir, qui accentue l'influence de la variabilité plus prononcée des écarts horaires du soir sur la variance de la moyenne Tmp21 (2.1). La moyenne Tma21 (2.2), qui utilise les mêmes heures d'observation, montre en effet une dispersion plus faible des écarts à la moyenne sur 24 heures.

### Zurich et Genève

En été, mis à part durant les premières heures de la journée, les deux courbes sont quasi identiques et sont toutes les deux marquées par un biais prononcé. Le maximum journalier est atteint vers 15h30 (TU), ce qui correspond au maximum journalier du

---

16. Won (1977)

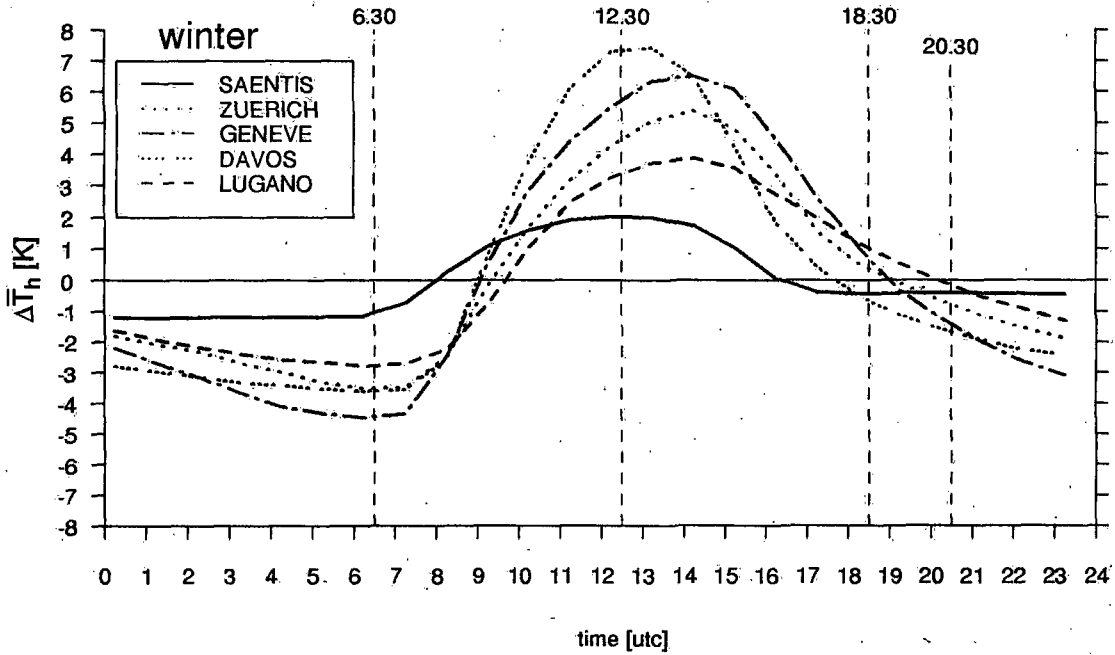


fig. 5.21 Ecart horaire moyen  $\Delta\bar{T}_h(5.2)$  par rapport à la moyenne sur 24 heures (matérialisée par ligne du  $0^\circ$ ) lors de situations convectives hivernales.

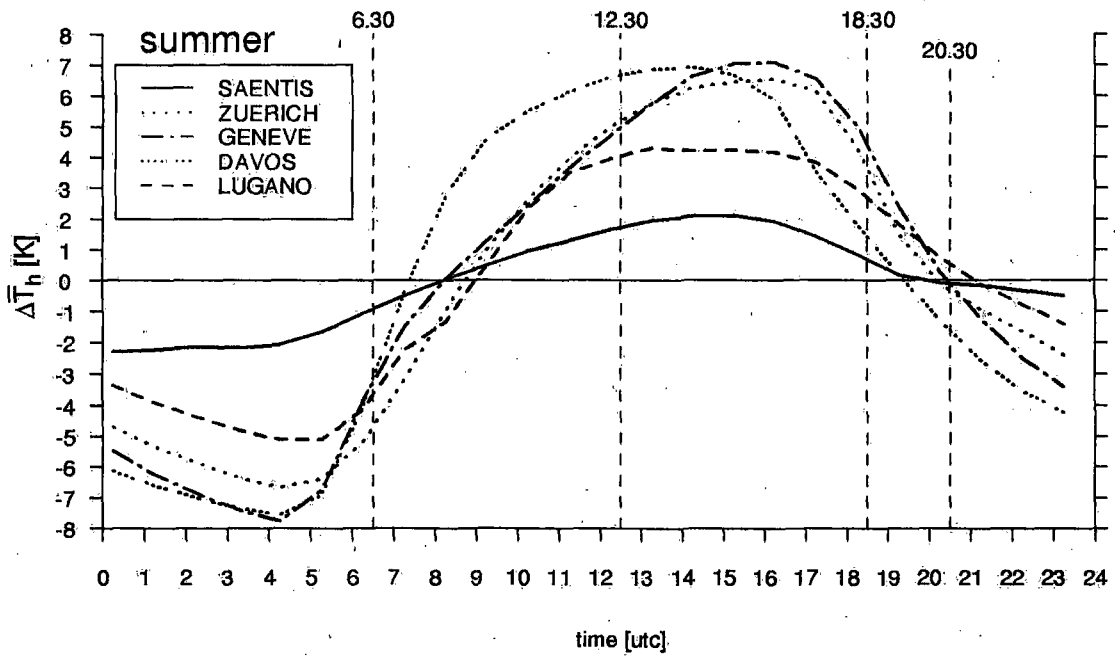


fig. 5.22 Ecart horaire moyen  $\Delta\bar{T}_h(5.2)$  par rapport à la moyenne sur 24 heures (matérialisée par ligne du  $0^\circ$ ) lors de situations convectives estivales.

rayonnement infrarouge (Reuter, 1980:239). Le taux d'humidité de ces deux stations (en hiver 18.3 mm) joue certainement un rôle prépondérant dans ce comportement. En été, Genève se distingue par des minima plus bas que Zurich, ainsi que par un réchauffement particulièrement rapide après le lever du soleil. Cette caractéristique



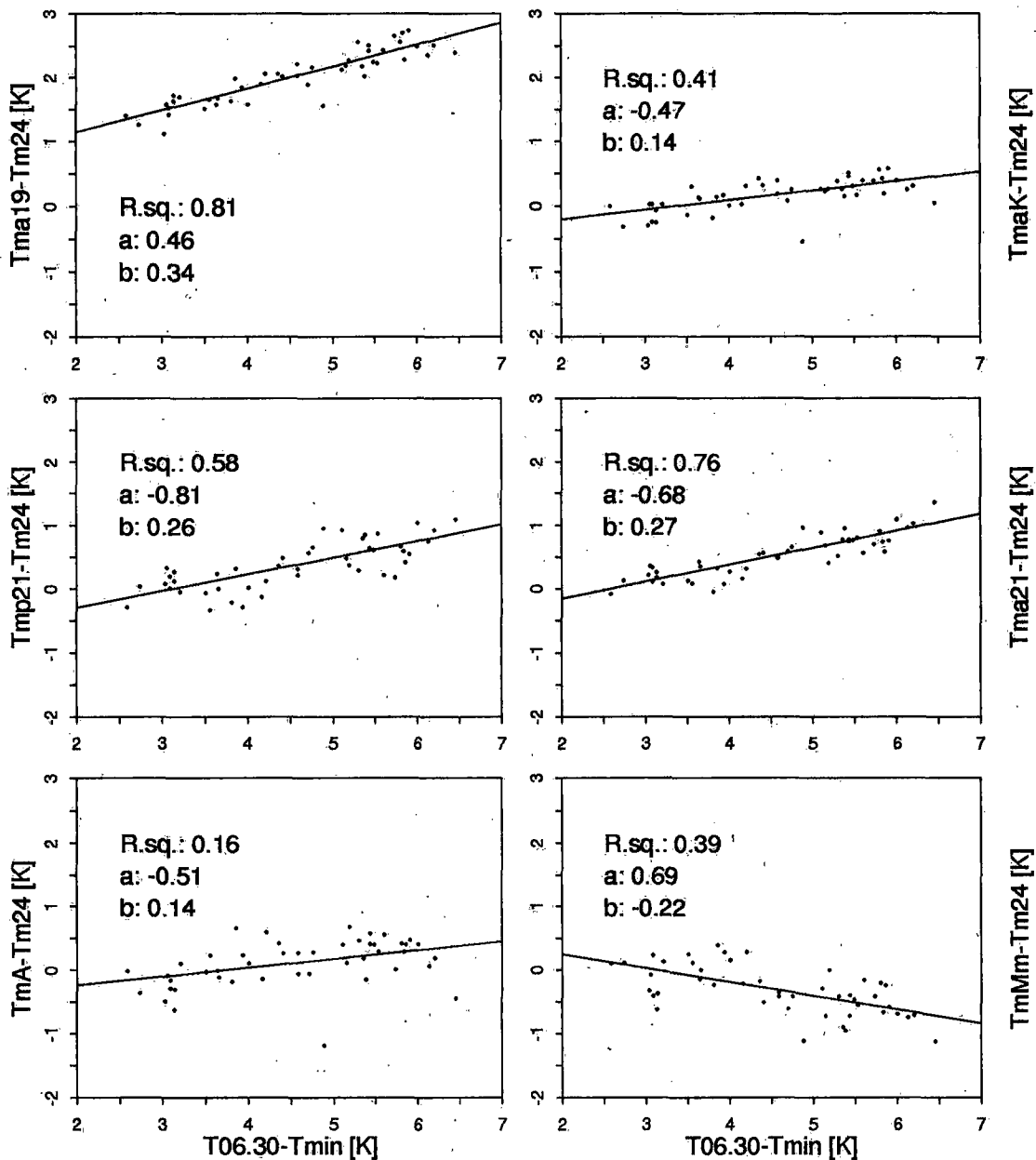


fig. 5.23 Relation de la forme  $y = a + bx$  entre les écarts journaliers  $Tmf-Tm24$  et  $T06.30-Tmin$  à Genève lors de situations convectives estivales.  $R.sq. = R^2$

s'explique par l'emplacement de la station située dans la plaine de Cointrin, et donc sujette à des inversions matinales qui se dissipent rapidement dans les premières heures de la matinée. La station de Zurich, sise sur une pente à 150 m au-dessus du fond de la vallée, est mieux ventilée, et donc moins soumise à des inversions locales (Tabony, 1985). A Genève, celles-ci sont particulièrement décelables dans le comportement des moyennes Tma19 (2.8) et Tma21 (2.2), ainsi que, dans une moindre mesure, dans celui de la moyenne Tmp21 (2.1). D'après Siogas (1972), ces différences sont fonction de l'écart entre l'observation du matin (T06.30) et le minimum journalier (Tmin). En effet, lorsque l'écart est important, T06.30 n'est pas représentatif de la période de refroidissement radiatif précédant l'aube, et conduit donc à une suresti-

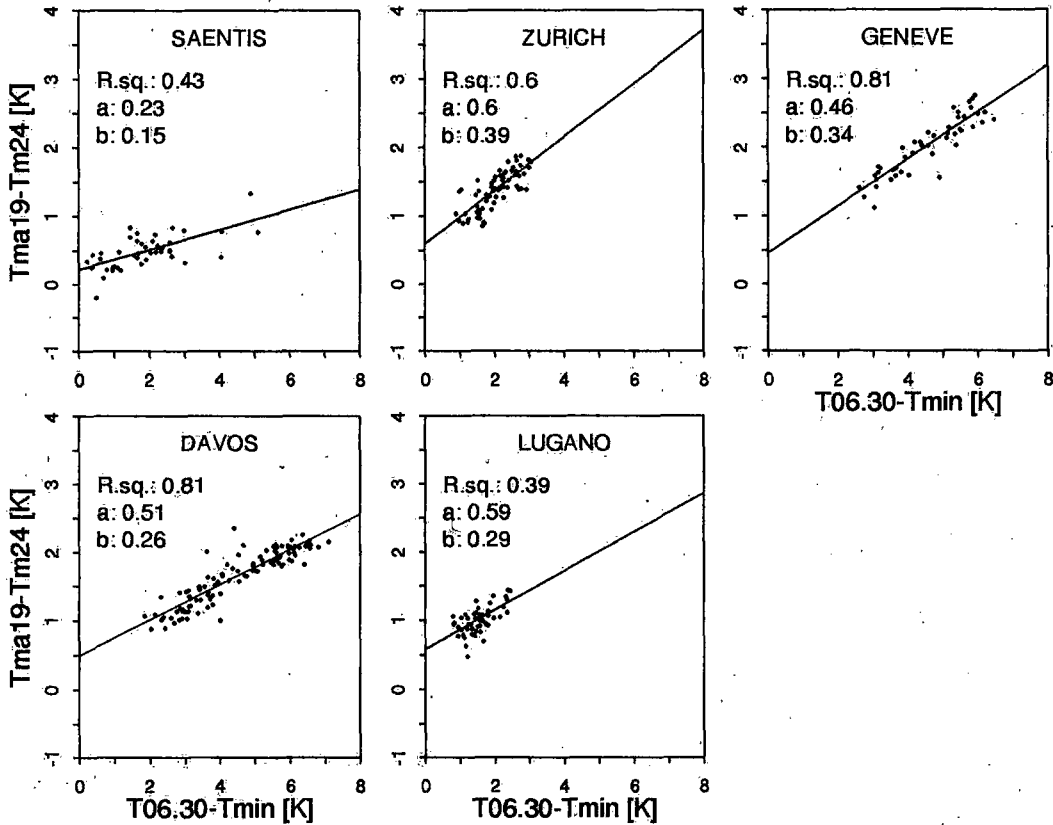


fig. 5.24 Relation de la forme  $y = a + bx$  entre les écarts journaliers Tma19 moins Tm24 et T0630 moins Tmin lors de situations convectives estivales. R.sq. =  $R^2$

mation de la moyenne sur 24 heures. La station Genève, prise à titre d'exemple pour étudier le comportement de toutes les moyennes, confirme ce phénomène (figure 5.23). Les droites de régression de la forme

$$y = a + bx \quad (5.5)$$

où pour une station (s) et une moyenne journalière (f),  $y = Tmf_s$  et  $x = T0630_s - Tmin_s$ , démontrent une relation pour les moyennes Tma19 (2.8) et Tma21 (2.2) ainsi que, dans une moindre mesure, pour la moyenne Tmp21 (2.1), alors que les autres moyennes ne présentent pas ou peu de corrélation entre ces deux termes ( $R^2 < 0.5$ ). A Zurich, l'exemple de la moyenne Tma19 (2.8), utilisée pour présenter le comportement des autres stations, démontre clairement l'absence ou le peu d'ampleur de ces inversions matinales (figure 5.24). En hiver, en raison de l'aube plus tardive, le minimum journalier se trouve au voisinage de l'observation du matin. T06.30 est  $\pm$  égale à Tmin et la corrélation décrite ci-dessus n'existe donc pas. Notons également que les moyennes TmaK (2.4), Tmp21 (2.1) et TmA (2.5) ne réagissent pratiquement pas au cycle hiver - été lors de situations convectives. Il n'en va pas de même pour la moyenne TmMm (2.7), qui, tant à Zurich qu'à Genève, produit des variations supérieures à 1 K entre l'hiver et l'été.

#### Davos

La station, de par sa situation proche du fond de la vallée (+ 30 m) est, comme Genève, également sous l'influence d'inversions matinales estivales (figure 5.21)

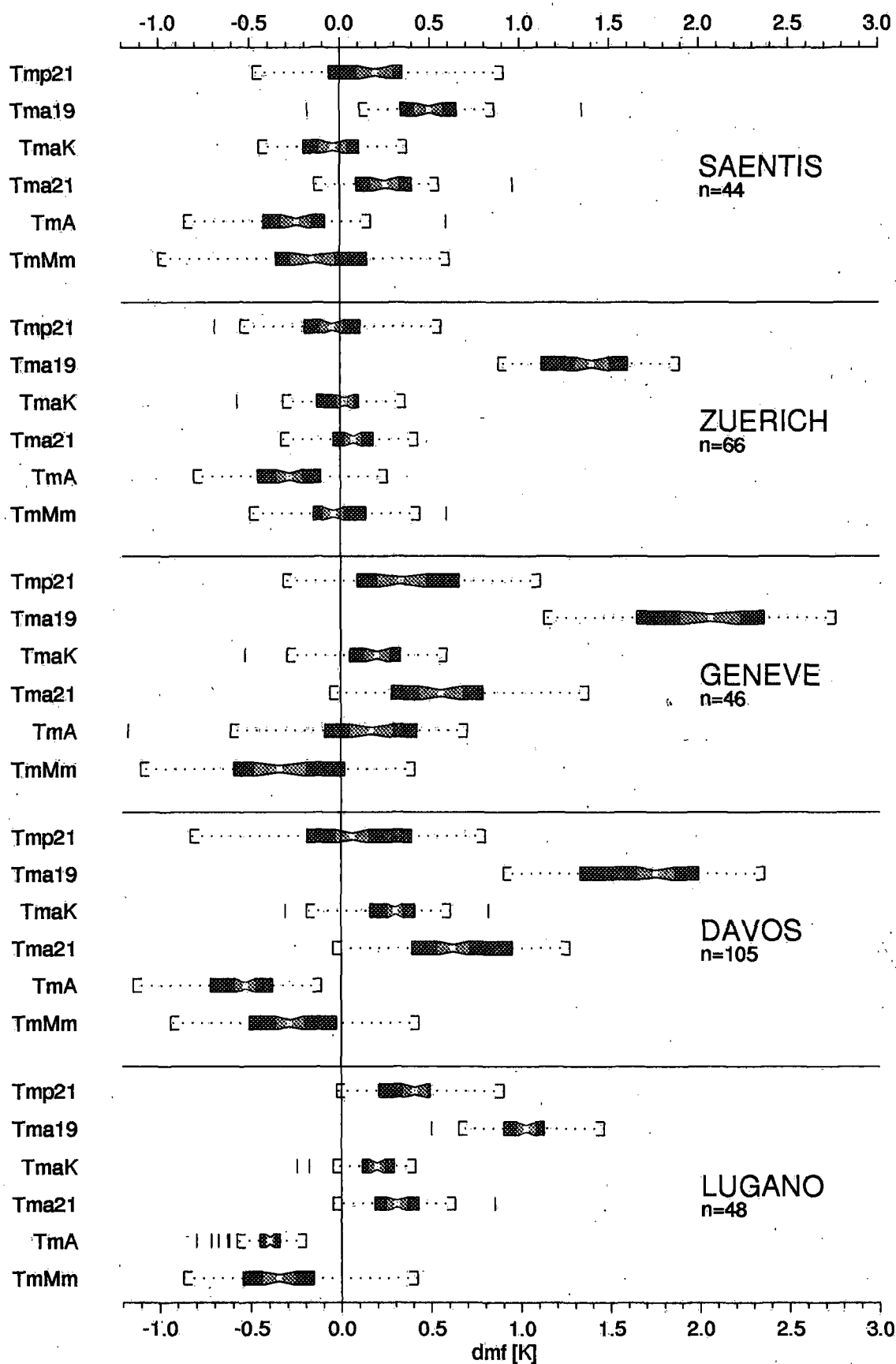


fig. 5.25 Box plots des écarts dmfs (4.1) avec la moyenne sur 24 heures lors de situations convectives estivales. Une explication du box plot se trouve au chapitre 4.4

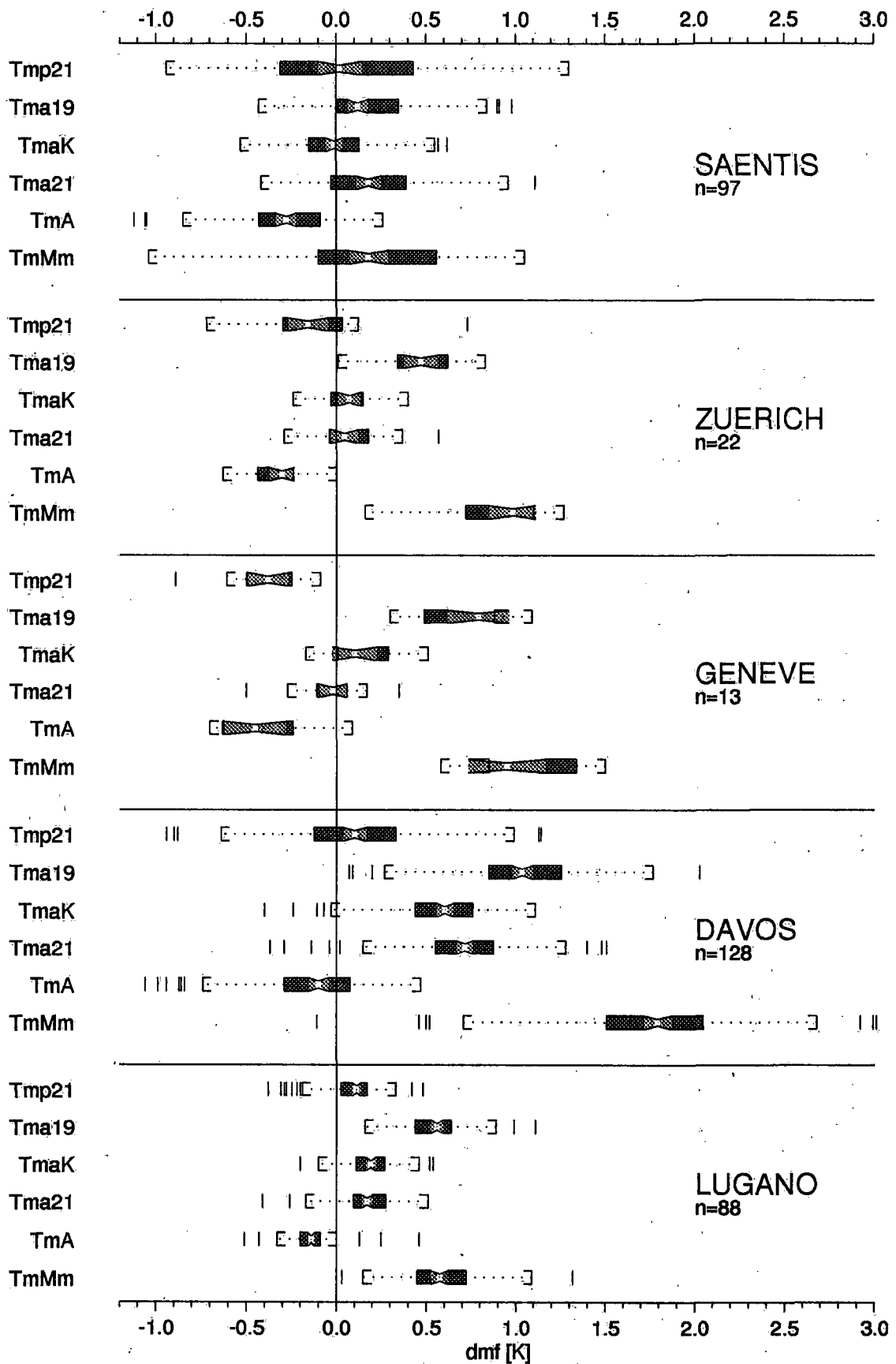


fig. 5.26 Box plots des écarts dmf (4.1) avec la moyenne sur 24 heures lors de situations convectives hivernales.

(Urfer, 1981:8). Elle présente ainsi, du point de vue des écarts à la moyenne sur 24 heures, un comportement similaire à celui de Genève. Du fait de la faible hygrométrie (Pw estivale: 13.1 mm) et du trouble atmosphérique moins important qu'en plaine, le tracé des variations journalières de la température se rapproche de la forme sinusoidale du rayonnement direct journalier. La variance plus importante des écarts horaires moyens (figure 5.18) se répercute naturellement sur la variance des différences entre les moyennes journalières et la moyenne sur 24 heures  $T_{m24}$ .

### Lugano

Une hygrométrie (en été Pw: 22.3 mm) et un trouble atmosphérique assez importants, ainsi que la présence proche d'un lac, qui agit comme compensateur thermique, confèrent aux variations diurnes de la température une amplitude relativement faible et des contrastes thermiques peu prononcés. De plus, la faible variance des écarts horaires (figure 5.19) amènent de petits écarts entre les différentes moyennes journalières et la moyenne sur 24 heures. La variance de ces écarts est également faible. Vu la lente baisse de la température durant la deuxième partie de la journée, l'observation de 20h30 (TU) est, aussi bien en été qu'en hiver, plus élevée que la moyenne sur 24 heures. Les moyennes qui utilisent cette heure d'observation (la moyenne  $T_{mp21}$  (2.1) et la moyenne  $T_{ma21}$  (2.2)) produisent une surestimation de la moyenne sur 24 heures. De plus, la double pondération de l'observation du soir dans la moyenne  $T_{mp21}$  provoque même des écarts légèrement plus importants que pour la moyenne  $T_{ma21}$ .

A Lugano, la situation un peu particulière de l'abri météorologique dans un parc ombragé par de grands arbres se répercute sur la forme de la courbe journalière, qui présente une cassure entre 7h00 et 8h00 (TU). Les horizons de l'ANETZ, calculés pour le pyranomètre installé sur le toit d'un bâtiment voisin, ne peuvent être utilisés ici pour déterminer l'influence de l'horizon proche sur les variations diurnes de la température.

### 5.3.3 Discussion

Cette approche permet de détecter certains signaux locaux. Mais, en raison du choix limité des stations étudiées, nous ne pouvons pas tirer de conclusions précises du comportement de chacune d'elles. Cela nécessiterait une étude micro-climatique semblable à celle effectuée par Urfer (1981) dans le Dischmatal près de Davos, étude dans laquelle Urfer démontre que les courbes journalières de température peuvent sensiblement varier dans un espace restreint en fonction de l'exposition.

En fait, cette approche est destinée à attirer notre attention sur l'importance de certains paramètres propres à la station pouvant jouer un certain rôle, lors d'une régionalisation par exemple. De plus, elle nous offre la possibilité de quantifier la variabilité spatiale des différentes moyennes utilisées ici et d'en établir un classement en fonction de ce critère. Nous attendons en effet d'une moyenne journalière non seulement une excellente estimation de la moyenne sur 24 heures, mais également des écarts constants, quel que soit le point du territoire où elle est appliquée.

Les différentes moyennes sont classées d'une part selon l'écart moyen calculé pour un ensemble de stations et, d'autre part, selon la variance (donc de la variabilité dans l'espace) de cet écart moyen.

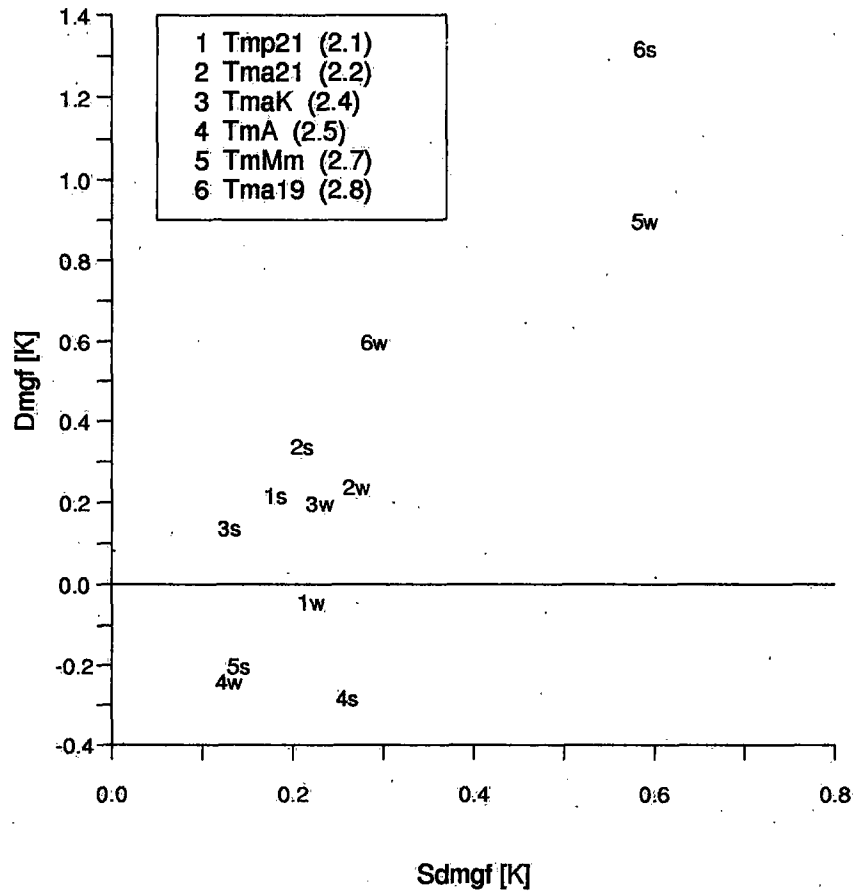


fig. 5.27 Classement des moyennes journalières en fonction de la variabilité spatiale Sdmgf et de l'écart global moyen Dmgf. w: hiver, s: été

De l'écart moyen  $Dmf_s$  entre une moyenne journalière  $Tmf_s$  et la moyenne sur 24 heures  $Tm24_s$  calculé pour une station  $s$

$$Dmf_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Tmf_{s,i} - Tm24_{s,i}) \quad (4.2)$$

nous obtenons l'écart moyen global de la moyenne  $f$  (pour 5 stations)

$$Dmgf = \frac{1}{5} \sum_{s=1}^5 Dmf_s \quad (5.6)$$

ainsi que l'écart-type

$$Sdmgf = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^5 (Dmf_s - Dmgf)^2}{s-1}} \quad (5.7)$$

De ce classement (voir figure 5.27), établi pour les collectifs convectifs estivaux et hivernaux, il ressort que:

1. Les moyennes Tmp21 (2.1), TmaK (2.4) et TmA (2.5) produisent des écarts faibles et sans importantes variations spatiales. Ces moyennes ne réagissent donc que faiblement aux influences locales.
2. En été, la moyenne TmMm (2.7) produit des écarts faibles pour toutes les stations. En hiver, en revanche, les différences moyennes et l'écart-type sont importants.
3. La moyenne Tma19 (2.8) produit des différences importantes, tout particulièrement en été. La forte variance des écarts estivaux est due à la sensibilité de cette moyenne aux inversions matinales.

#### 5.3.4 Critiques des résultats

En analysant ces résultats, il convient de ne pas oublier qu'ils s'appuient sur des échantillons de tailles différentes. Les échantillons de situations convectives hivernales comptent 128 cas à Davos pour seulement 13 cas à Genève.

Il peut également sembler hasardeux de calculer l'écart-type d'un ensemble de 5 cas (voir figure 5.27). Comme la même représentation, basée sur l'intervalle de variation en lieu et place de l'écart-type, fournit les mêmes résultats, nous avons donc choisi d'utiliser l'écart-type.

Nous sommes conscient que l'existence des inversions matinales décrites précédemment pour Genève et Davos ne peut pas être établie avec certitude uniquement à l'aide des paramètres météorologiques de la station. De nombreux indices, ainsi que les travaux de Tabony (1985) et Urfer (1981), nous autorisent néanmoins à travailler avec cette hypothèse.

#### 5.4 Différences journalières

Bien que la plupart des formules de calcul de la moyenne journalière soient avant tout destinées à déterminer des moyennes mensuelles et non des moyennes journalières individuelles, plusieurs raisons, énumérées au chapitre 2.8, ont dicté notre choix d'en étudier le comportement sur une base journalière.

Certaines applications, telles la phénologie ou le calcul des jours de chauffage, font appel à des sommes de température calculées à partir de moyennes journalières individuelles. Ces applications nécessitent donc des moyennes journalières de la température assez précises et n'apportant pas d'importantes modifications selon le mode de calcul utilisé.

Notre propos n'est pas de corriger, jour après jour, les différentes moyennes journalières, mais de qualifier la représentativité des écarts mensuels moyens par l'analyse des différences journalières, ainsi que de mettre en évidence le comportement des modes de calcul de la moyenne journalière étudiés ici dans leurs relations avec certaines situations météorologiques.

##### 5.4.1 Approche

Les figures ci-dessous (voir figure 5.28 et figure 5.29) nous donnent, pour les stations de Zurich et Davos, un aperçu des différences journalières durant une année (1985) prise au hasard. Le filtre passe-bas de Gauss (période 31 jours) n'a d'autre

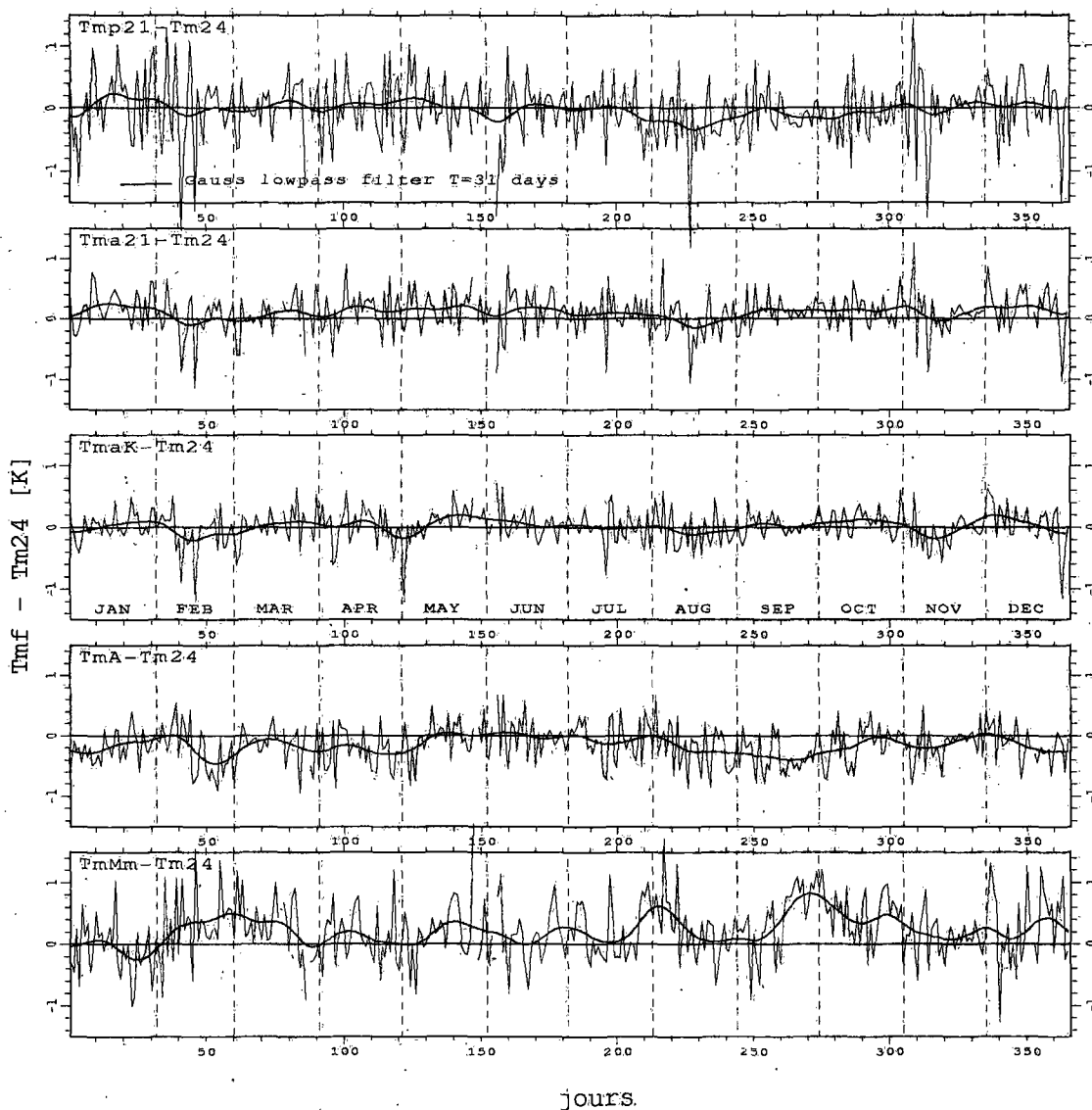


fig. 5.28 Zurich, différences journalières  $T_{mf}-T_{m24}$  durant l'année 1985

justification que de représenter le comportement moyen des différences journalières. Même si nous pouvons discerner certaines analogies entre le tracé du filtre passe-bas et celui des différences mensuelles moyennes (voir chapitre 5.2), nous sommes dans la plupart des cas, en présence d'un signal oscillant de manière apparemment aléatoire de part et d'autre de la ligne du 0 K (matérialisant la moyenne sur 24 heures).

Une représentation des écarts journaliers sous forme de box plots (voir chapitre 5.4.2) nous offre une vision globale de leur distribution mensuelle pour la période 1981 - 1990. Comme nous utilisons fréquemment le boxplot pour la représentation graphique de la variabilité, il nous a semblé logique de qualifier la représentativité des écarts mensuels moyens à l'aide des intervalles interquartiles (IQR) et non par l'écart-type. Par contre, comme nos données sont distribuées normalement et bien que l'usage de la médiane puisse sembler plus logique (à cause des quartiles), nous avons continué à utiliser la moyenne arithmétique.



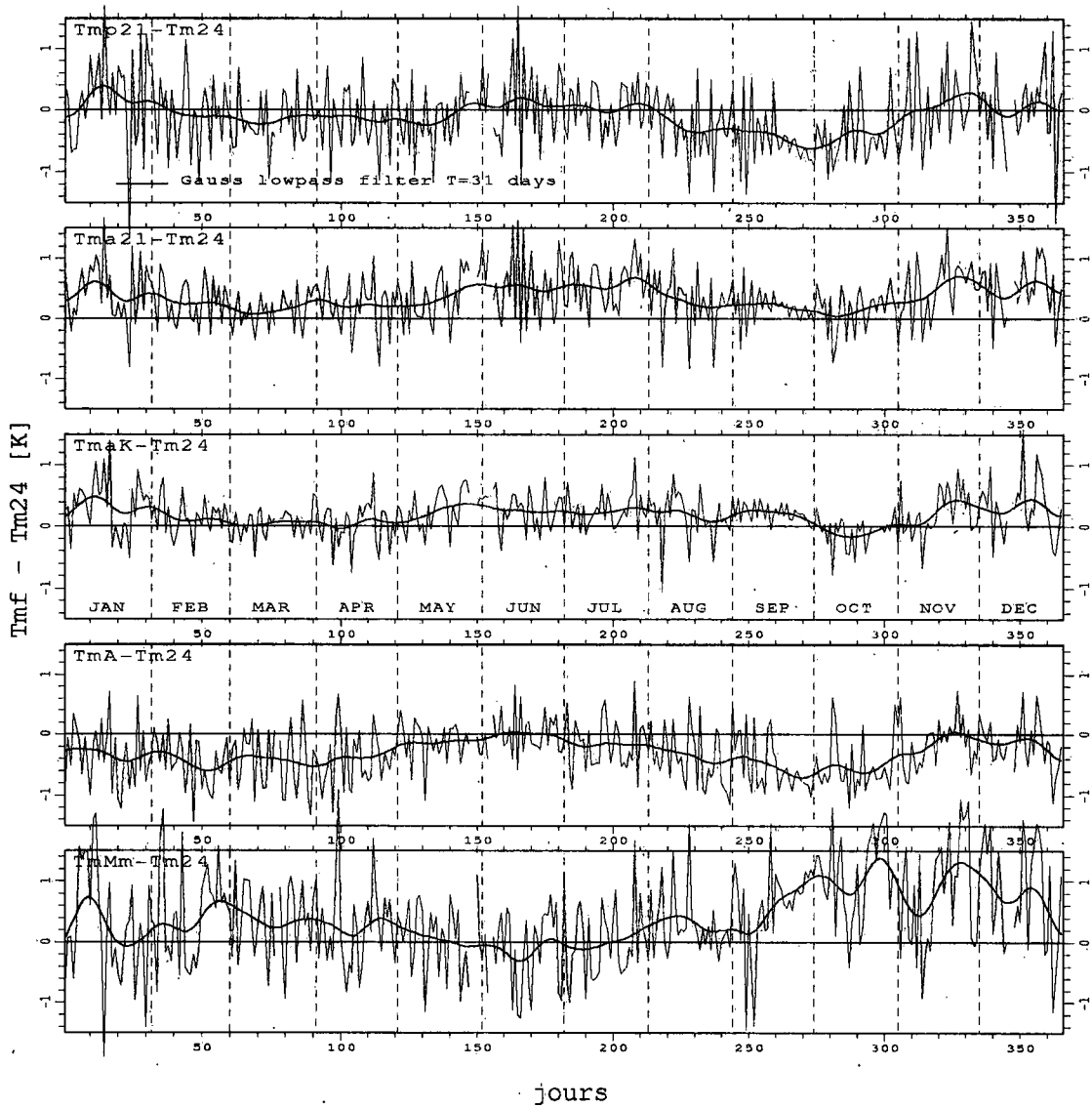


fig. 5.29 Davos, différences journalières  $T_{mf}-T_{m24}$  durant l'année 1985

Sur la base de ces figures (figure 5.28 et figure 5.29), considérant le caractère apparemment aléatoire des écarts journaliers, et dans le but de mettre en évidence l'influence de certaines situations météorologiques, nous avons adopté la démarche suivante:

#### 5.4.1.1 Démarche générale

Face à ces oscillations et partant de l'idée que toute moyenne journalière n'est au mieux qu'une approximation de la moyenne sur 24 heures (considérée ici comme étant la moyenne "vraie"), nous avons décidé de ne traiter que les valeurs extrêmes et d'accepter les autres comme des erreurs aléatoires inhérentes à ce genre d'approximation. Sont considérés comme valeurs extrêmes tous les écarts journaliers  $|T_{mf}-T_{m24}| > 0.8$  K.

Le seuil de 0.8 K, commun à toutes les moyennes et toutes les stations étudiées ici, a été déterminé de manière semi-empirique et correspond à environ  $2 \cdot S_x$  ( $S_x$ =écart-

type de l'échantillon) de l'écart moyen TmaK moins Tm24. De toutes les moyennes décrites dans cette étude, la moyenne TmaK fournit en effet, tant du point de vue des écarts moyens que de la distribution des écarts journaliers, la meilleure approximation et représente ainsi une sorte de standard à atteindre pour les autres moyennes.

L'usage du seuil commun de  $\pm 0.8$  K a pour corollaire, lorsque le signal moyen présente des écarts systématiques, de localiser un grand nombre de valeurs extrêmes (plus de 1000 jours dans le cas de la moyenne TmMm à Davos). Comme la procédure mise au point pour étudier ces écarts extrêmes en fonction de certaines situations météorologiques implique un dépouillement manuel des données (voir ci-dessous), il nous est pratiquement impossible de travailler avec des échantillons aussi importants. Pour des raisons de transparence, nous avons malgré tout décidé de maintenir ce seuil unique tout en réduisant de manière aléatoire la taille des échantillons. Cette procédure de réduction, qui respecte la distribution annuelle de l'échantillon d'origine, a pour avantage de permettre un dépouillement manuel des données tout en produisant des échantillons de taille plus ou moins égale pour toutes les stations et moyennes étudiées. Le tableau 5.3 présente la taille des échantillons avant et après la procédure de réduction. Nous voyons que presque tous les échantillons ont été réduits à une taille comprise entre 80 et 100 jours. En raison de leur faible variabilité, les échantillons concernant la moyenne TmaK ont été conservés dans leur dimension originale.

	Säntis	Zurich	Genève	Davos	Lugano
Tmp21	89 (511)	89 (303)	59 (572)	90 (469)	91 (228)
Tma21	92 (149)	72 (72)	93 (327)	94 (580)	95 (95)
TmaK	72 (72)	33 (33)	51 (51)	135 (135)	56 (56)
TmA	95 (159)	102 (102)	85 (257)	80 (432)	83 (83)
TmMm	92 (408)	100 (537)	76 (571)	112 (1193)	94 (310)

tableau 5.3 Taille des échantillons de  $|Tmf-Tm24| > 0.8$  K avant (entre parenthèses) et après réduction

#### 5.4.1.2 Choix et définitions des situations météorologiques

Les échantillons réduits (voir ci-dessus) ont été répartis en 4 classes correspondant aux types de temps suivants:

- advection froide (passage d'un front froid)
- advection chaude (passage d'un front chaud)
- convection (situation de beau temps)
- autres types de temps

Ce choix nous a été dicté par le caractère apparemment aléatoire des écarts journaliers dépassant le seuil de 0.8 K. Un tel comportement est naturellement le résultat d'un phénomène aussi irrégulier dans sa fréquence et dans son intensité qu'un passage frontal, par exemple. Par ailleurs, les résultats du chapitre précédent ont montré que des situations convectives peuvent engendrer des écarts journaliers

importants. Une publication de Collison et Tabony (1984) ayant pour objet le comportement de la moyenne  $T_{mMm}$  en fonction de situations convectives et advectives simulées nous a conforté dans notre choix.

Il ne nous a pas été possible de recourir à la classification des situations météorologiques utilisées au chapitre 5.3 pour définir les différents types de temps, car nous avons besoin de renseignements précis pour chaque station. En effet, cette classification prend en compte la situation météorologique générale de toute la région des Alpes centrales. La statistique des passages frontaux, également contenue dans la banque de données AWS (Alpenwetterstatistik), aurait éventuellement pu nous être utile. Malheureusement, elle est établie uniquement pour la station de Zurich. Le passage d'un front au-dessus de la topographie complexe des Alpes étant très difficile à prévoir, il est impossible d'utiliser cette statistique pour d'autres stations passablement éloignées de Zurich. De plus, la reconnaissance automatique d'un passage frontal étant extrêmement complexe, nous avons donc décidé de dépouiller manuellement les données et de répartir nos échantillons dans les quatre classes mentionnées ci-dessus à l'aide d'une représentation graphique de différents paramètres météorologiques de l'épisode concerné. Les quatre types de temps répondent aux critères suivants:

- **Advection froide:** Cette situation implique le passage d'un front froid (changement de masse d'air) influençant notablement les variations diurnes de la température. Ce passage est généralement marqué par:
  - une hausse rapide de la pression
  - une modification de la force et de la direction du vent
  - un ciel couvert ou très nuageux (pas d'insolation)
  - une baisse sensible de la température du psychromètre (en tenant compte des variations diurnes)
  - la présence de précipitations
- **Advection chaude:** Cette situation implique le passage d'un front chaud (changement de masse d'air). Les variations diurnes de la température sont principalement causées par le passage frontal. Les modifications des paramètres météorologiques sont moins marquées que dans le cas du front froid. Le front chaud se reconnaît par:
  - une baisse rapide de la pression
  - une hausse de la température du psychromètre (en tenant compte des variations diurnes)
- **Convection:** Situation de beau temps avec possibilité d'orage. Les variations diurnes de la température sont principalement fonction des variations journalières du rayonnement. Cette situation est caractérisée par:
  - une faible modification de la pression
  - un vent faible ou nul
  - une insolation importante
  - des précipitations possibles à l'occasion d'un orage
- **Autres types de temps:** Cette classe regroupe tous les épisodes n'ayant pu être attribués avec certitude à l'une des trois catégories précédentes. Elle comprend

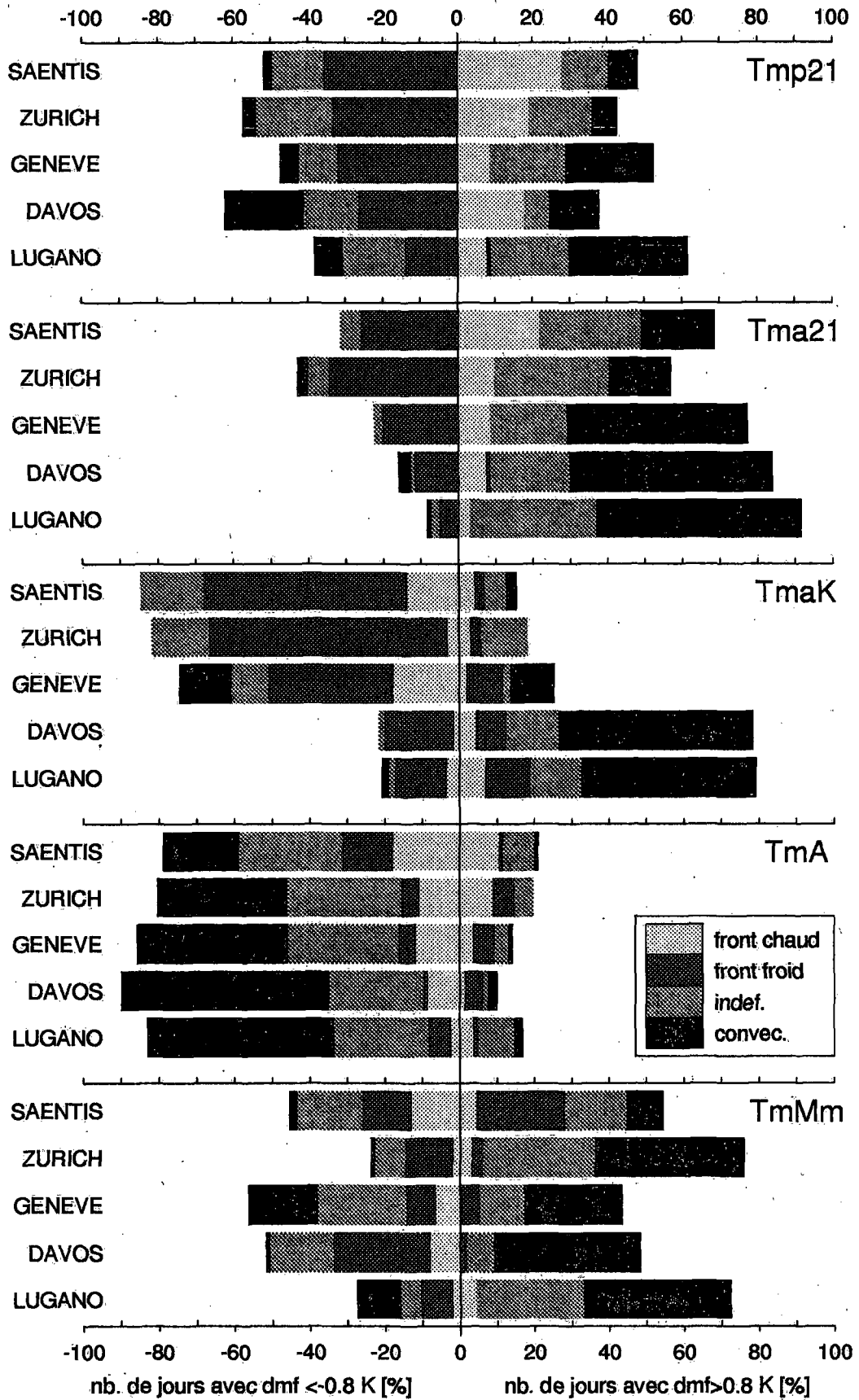


fig. 5.30 Répartition relative des jours présentant des écarts journaliers dmf (4.2)  $|T_{mf} - T_{m24}| > 0.8$  K selon 4 types de temps. Chaque barre horizontale représente 100%.

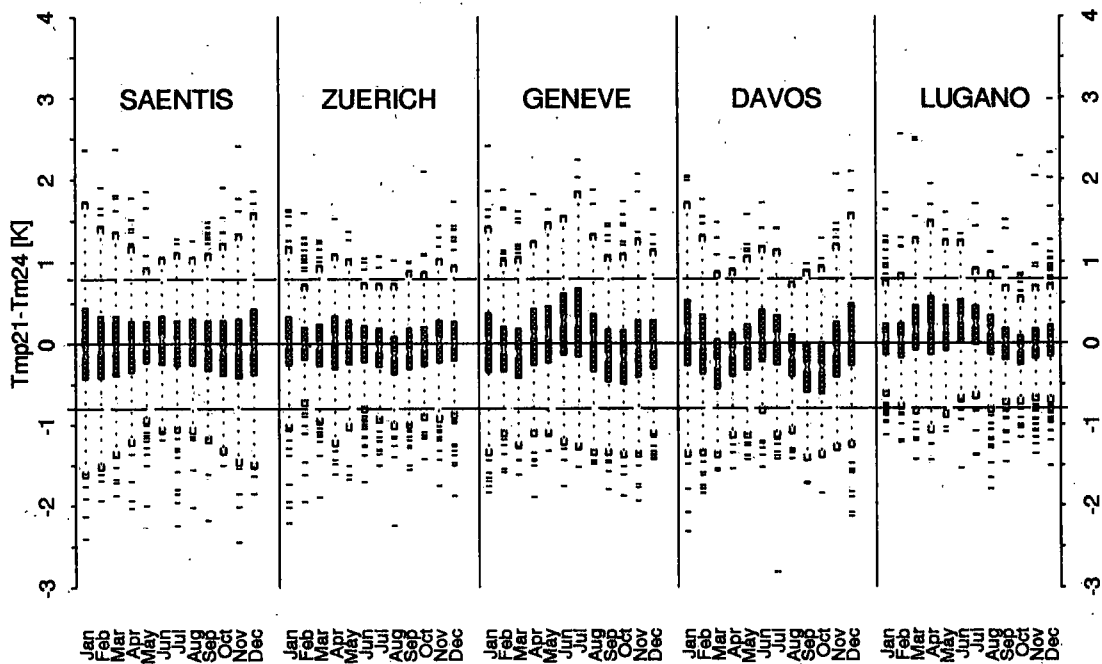


fig. 5.31 Box plots mensuels des écarts journaliers Tmp21-Tm24. Période: 1981-1990

notamment les épisodes de foehn, pour autant qu'ils aient pu être reconnus comme tels.

Cette classification a donc été effectuée à l'aide d'un graphique (pour un exemple, voir figure 5.13) en tenant également compte de la situation du jour précédent et du jour suivant. Nous sommes parfaitement conscient de la subjectivité de cette méthode et ne pouvons pas garantir une parfaite consistance des critères énumérés ci-dessus tout au long du travail de classification. Nous pouvons néanmoins admettre que la taille des échantillons et la simplicité de la classification (nous ne tenons compte ni de l'heure du passage frontal, ni de son intensité) autorisent quelques erreurs.

#### 5.4.2 Résultats

Conformément aux orientations prises au chapitre 5.2 nous présentons les résultats pour chaque moyenne séparément.

##### 5.4.2.1 La moyenne Tmp21 (2.1)

Malgré des différences mensuelles moyennes très faibles, la variabilité des écarts journaliers est sensiblement plus élevée que pour la moyenne TmaK (IQR situés entre 0.4° et 0.9°), et possède de plus un caractère saisonnier bien marqué (figure 5.31). A Genève et Davos, le maximum estival de la fréquence des écarts positifs (figure 5.32) est causé par des situations convectives qui provoquent les inversions matinales décrites au chapitre 5.3. La moyenne Tmp21 est particulièrement sujette aux passages frontaux, ce qui s'explique par la double pondération de l'observation du soir. Un front froid amène ainsi une sous-estimation de Tm24, tandis qu'un front chaud conduit à une surestimation de Tm24 (figure 5.30). Les fronts provoquent des écarts

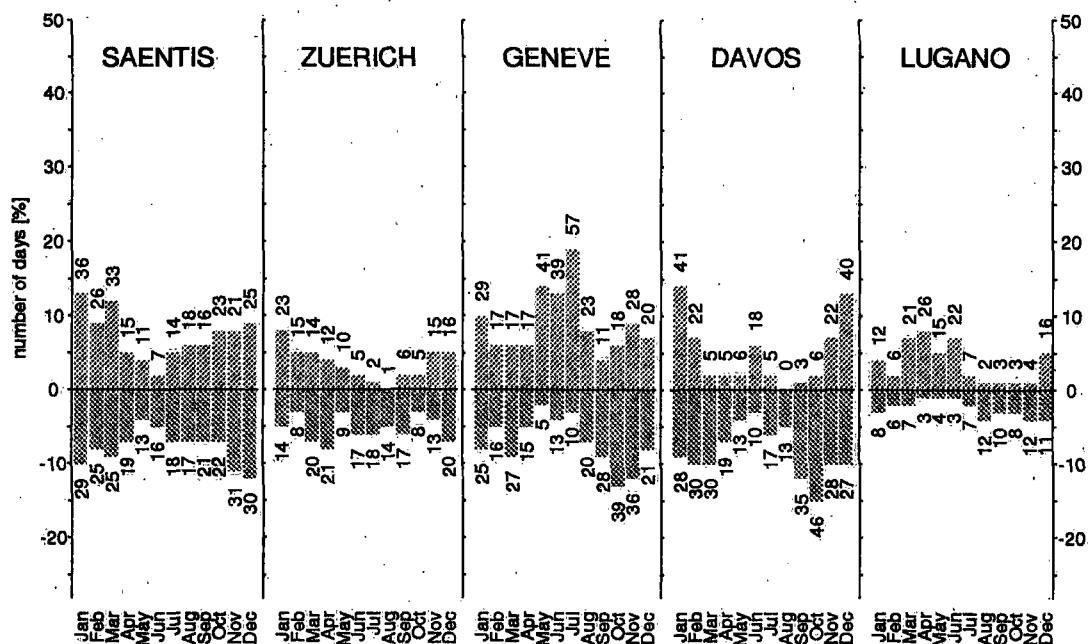


fig. 5.32 Répartition mensuelle des fréquences relatives des écarts journaliers  $|T_{tmp21} - T_{m24}| > 0.8 \text{ K}$ . Les chiffres à l'extrémité des colonnes indiquent la fréquence absolue avant réduction. Les fréquences négatives correspondent aux écarts  $< 0.8 \text{ K}$ .

importants entre octobre et mars principalement (70% des fronts froids et 100% des fronts chauds de notre classification apparaissent durant cette période). En effet, durant les mois d'été, le contraste thermique entre les masses d'air est plus faible, alors que la part du rayonnement dans les variations diurnes de la température est plus importante (Collison et Tabony, 1984:334).

#### 5.4.2.2 La moyenne Tma21 (2.2)

Contrairement à la moyenne Tmp21 (2.1), nous avons ici des écarts moyens plus élevés et conduisant à une surestimation générale de Tm24, alors que la dispersion des écarts journaliers est nettement plus faible (figure 5.33). Toutefois, comme dans le cas précédent, les phénomènes locaux décrits aux chapitre 5.3 sont à l'origine du caractère saisonnier bien marqué de la variabilité des écarts journaliers. Cette approche nous permet également d'expliquer les disparités régionales de la variabilité des écarts journaliers. Les inversions matinales qui se produisent lors de situations convectives sont pratiquement inconnues à Zurich et au Sântis, alors qu'elles sont fréquentes à Genève et à Davos, où elles provoquent de nombreux écarts journaliers positifs (surestimation de Tm24)(figure 5.34). La comparaison des deux moyennes Tmp21 et Tma21 illustre parfaitement l'une des conclusions tirée du travail de Schreiber (1916:309): "*Man könnte übrigens die Mittel (7,2,9)<sup>17</sup> mit fast gleichem Recht wie die (7,2,9,9)<sup>18</sup> als wahre Mittel betrachten, handelt es sich meist nur um*

17. Tma21 (2.2)

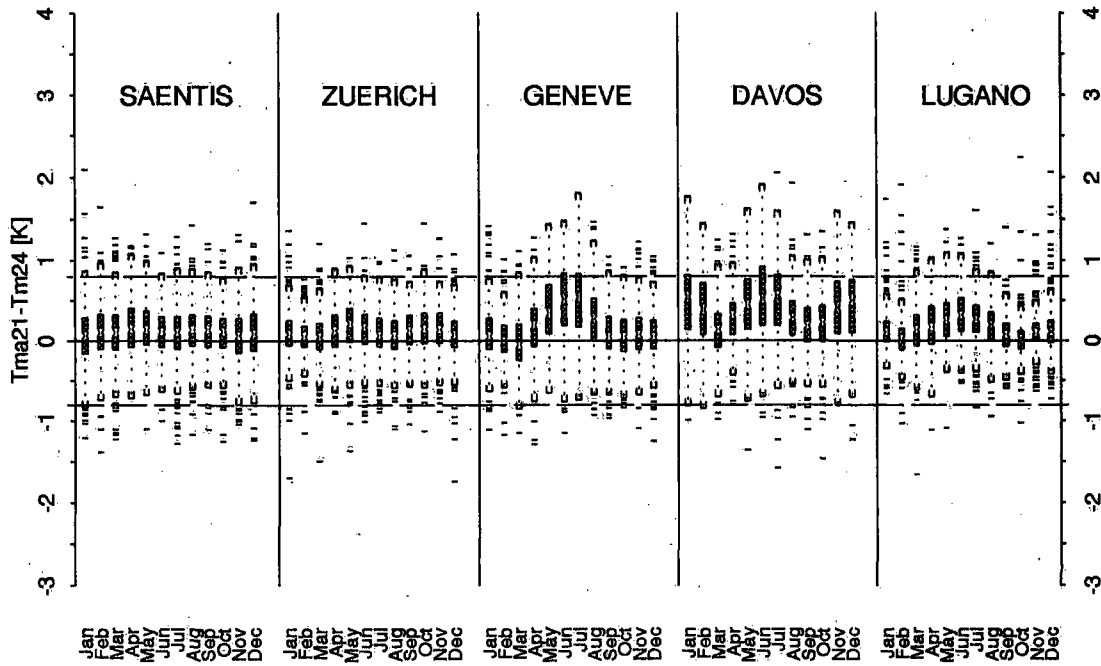


fig. 5.33 Box plots mensuels des écarts journaliers Tma21-Tm24. Période: 1981-1990

zwei Zehntelgrade, und es ist sicher, dass für die einzelnen Tage das doppelte Gewicht der Abendbeobachtung in keiner Weise theoretisch begründet werden kann". En effet, si l'on fait abstraction d'un écart moyen légèrement plus important, la moyenne Tma21 permet, du point de vue de la dispersion des écarts journaliers, une aussi bonne approximation de Tm24 que celle produite par la moyenne Tmp21. En revanche, Tma21 réagit plus fortement, et surtout plus diversement selon la station, aux situations convectives (situations par ailleurs, utilisées pour déterminer les influences locales).

#### 5.4.2.3 La moyenne TmaK (2.4)

La principale caractéristique de cette moyenne réside dans la faible dispersion des écarts journaliers (voir figure 5.35). Les IQR des différentes stations sont faibles (de 0.2° à 0.6°) et les distributions des écarts sont pratiquement symétriques. Seuls les mois d'hiver à Davos (en premier lieu janvier), et de mars à Lugano, présentent une plus grande variabilité, ce qui ressort particulièrement de l'histogramme des écarts dépassant le seuil de 0.8 K (voir figure 5.36) La classification des situations météorologiques (voir figure 5.30) nous apprend que, à l'exception des cas déjà mentionnés, les écarts importants sont négatifs et produits par des passages frontaux froids. A Davos, 90% des écarts positifs liés à des situations convectives ont lieu durant les mois d'hiver et peuvent être attribués aux influences locales décrites au chapitre 5.3 Ces écarts devraient pouvoir être corrigés avec des facteurs K mieux adaptés à la station (voir chapitre 6.1).

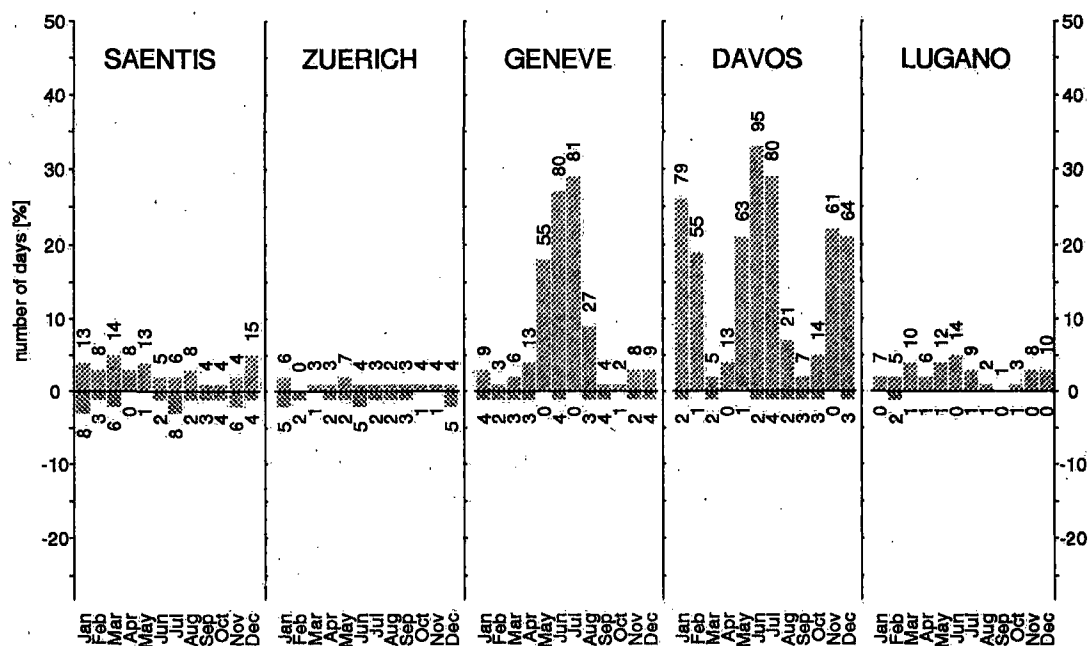


fig. 5.34 Répartition mensuelle des fréquences relatives des écarts journaliers  $|T_{ma21} - T_{m24}| > 0.8$  K. Les chiffres à l'extrémité des colonnes indiquent la fréquence absolue avant réduction. Les fréquences négatives correspondent aux écarts  $< 0.8$  K.

#### 5.4.2.4 La moyenne TmA (2.5)

L'IQR des différences journalières est comparable à celui de la moyenne TmA<sub>K</sub> (2.4), mais il s'en distingue par des variations saisonnières bien marquées avec un maximum en février-mars et en septembre-octobre (figure 5.37). Cette plus grande variabilité est causée par des situations convectives principalement (figure 5.30). A Davos, 66% (à Genève 52%) des écarts importants ( $|T_{mA} - T_{m24}| > 0.8^\circ$ ) des périodes sus-mentionnées sont occasionnés par des situations convectives. Une des caractéristiques de cette moyenne réside dans sa faible sensibilité aux situations advectives. Le fait que TmA se calcule à partir de 4 points de mesure joue certainement un rôle. La part relativement grande de situations indéfinies est la conséquence du protocole d'observation des minima et maxima journaliers. Nous avons en effet calculé cette moyenne avec le protocole d'observation en usage depuis 1971 pour toutes les stations climatologiques conventionnelles (voir figure 2.1). Ainsi, même lorsqu'un épisode présente une faible amplitude de la température, la moyenne TmA peut provoquer un écart journalier important si le minimum de la période 19h30-24h00 du jour précédant, ou le maximum de la période 24h00-07h30 du jour suivant, diffère notablement des minima et des maxima de l'épisode proprement dit. La figure 5.39 illustre un tel cas extrait de notre échantillonnage.

#### 5.4.2.5 La moyenne TmMm (2.7)

La variabilité des écarts journaliers de cette moyenne est particulièrement importante pour toutes les stations, avec un maximum à Davos (IQR de décembre et janvier:



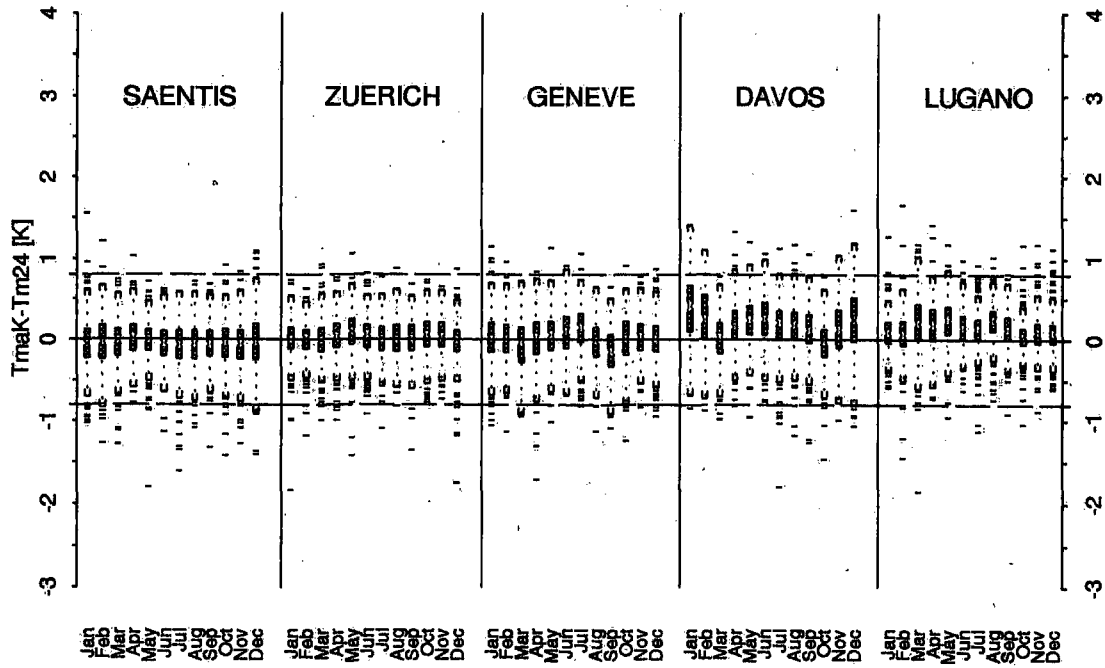


fig. 5.35 Box plots mensuels des écarts journaliers TmaK-Tm24. Période: 1981-1990

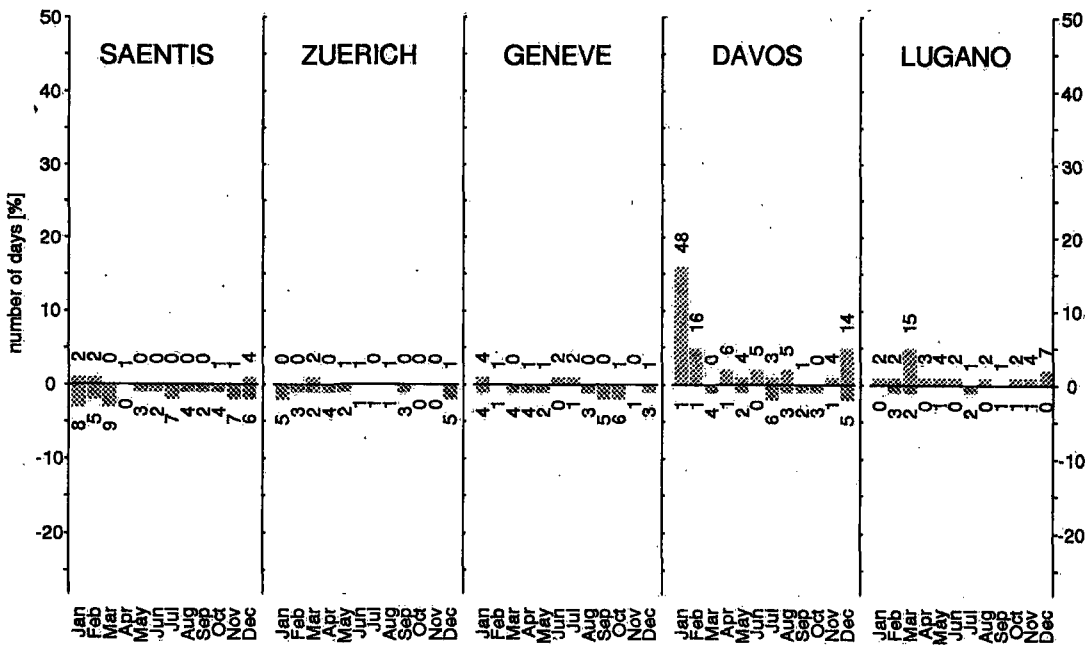


fig. 5.36 Répartition mensuelle des fréquences relatives des écarts journaliers  $|TmaK - Tm24| > 0.8 K$ . Les chiffres à l'extrémité des colonnes indiquent la fréquence absolue avant réduction. Les fréquences négatives correspondent aux écarts  $< 0.8 K$ .

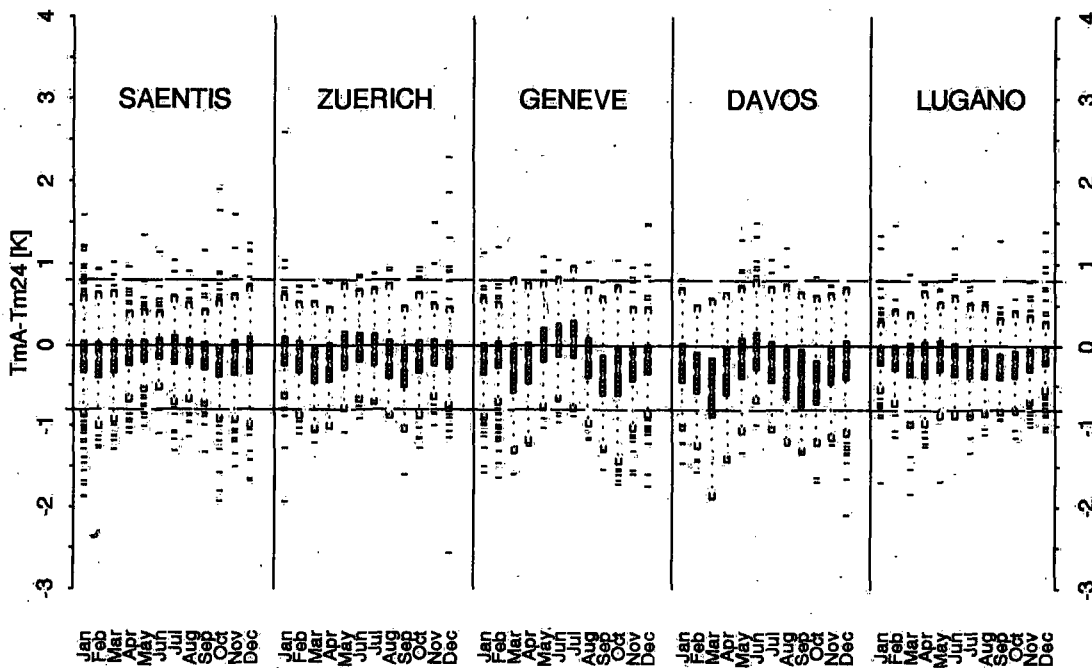


fig. 5.37 Box plots mensuels des écarts journaliers  $T_{mA}-T_{m24}$ . Période: 1981-1990

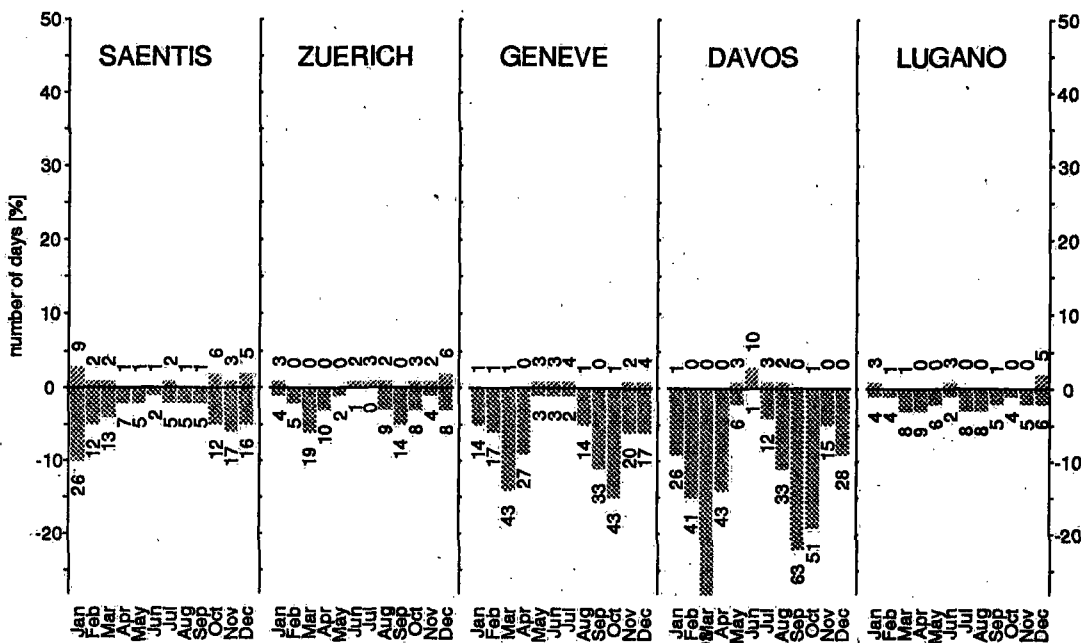


fig. 5.38 Répartition mensuelle des fréquences relatives des écarts journaliers  $|T_{mA} - T_{m24}| > 0.8$  K. Les chiffres à l'extrémité des colonnes indiquent la fréquence absolue avant réduction. Les fréquences négatives correspondent aux écarts  $< 0.8$  K.

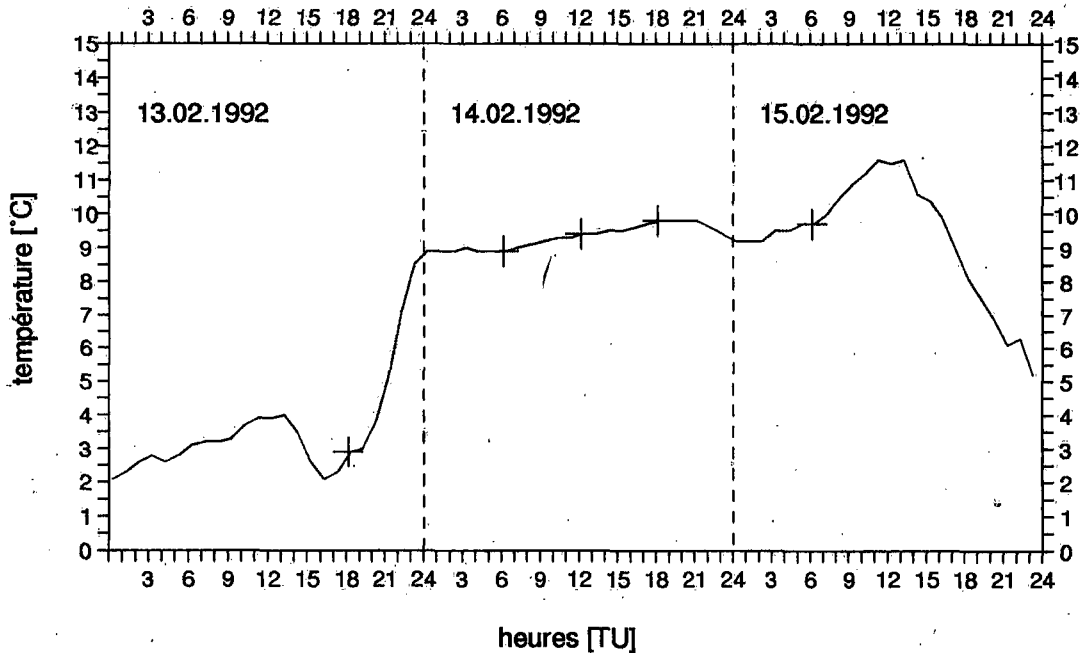


fig. 5.39 Variations horaires de la température à Genève. L'écart  $T_{mA} - T_{m24}$  atteint  $1.5^{\circ}C$  le 14.02.92. Il est dû au minimum journalier de la moyenne  $T_{mA}$  ( $2.9^{\circ}C$ , apparu en fait à 18.30 le 13.02), tandis que le minimum du 14.02 s'élève à  $8.9^{\circ}$  pour une amplitude journalière de  $0.9 K$ .

1.7°). Les variations saisonnières diffèrent d'une station à l'autre (figure 5.40). D'après notre classification selon 4 types de temps (figure 5.30), les situations advectives conduisent à une sous-estimation de  $T_{m24}$ , tandis que les situations convectives produisent généralement des écarts positifs. Selon Collison et Tabony (1984) les écarts positifs hivernaux (surestimation de  $T_{m24}$ ) sont généralement le fait de situations convectives (voir figure 5.42). Si Davos confirme cette constatation (86% des cas), les autres stations présentent des comportements différents (Genève 62%, Zurich 46%) tout en conservant la même tendance générale. Les résultats du chapitre 5.3, basés également sur des situations convectives, vont dans le même sens (voir figure 5.26). Cette particularité de Davos s'explique facilement par l'environnement intra-alpin de la station. Durant les situations convectives hivernales, Davos jouit d'une insolation plus importante que les stations de plaine, situées généralement sous le stratus, et n'ayant donc que de faibles amplitudes thermiques. Ce fait a déjà dicté la taille de nos échantillons de situations convectives hivernales, utilisés pour déterminer les influences locales (voir chapitre 5.3). De plus, le climat plus continental de Davos (faible hygrométrie et clarté de l'atmosphère favorisant les échanges radiatifs), en conjonction avec un horizon réduit, confère aux variations diurnes de la température la forme typique, qui est à l'origine des écarts importants, décrite par Collison et Tabony (1984), et reprise et discutée au chapitre 5.2.6.

#### 5.4.3 Discussion et critique des résultats

La diversité et la relative complexité des résultats ci-dessus requièrent une présentation globale de l'influence des différents types de temps sur les moyennes journalières.

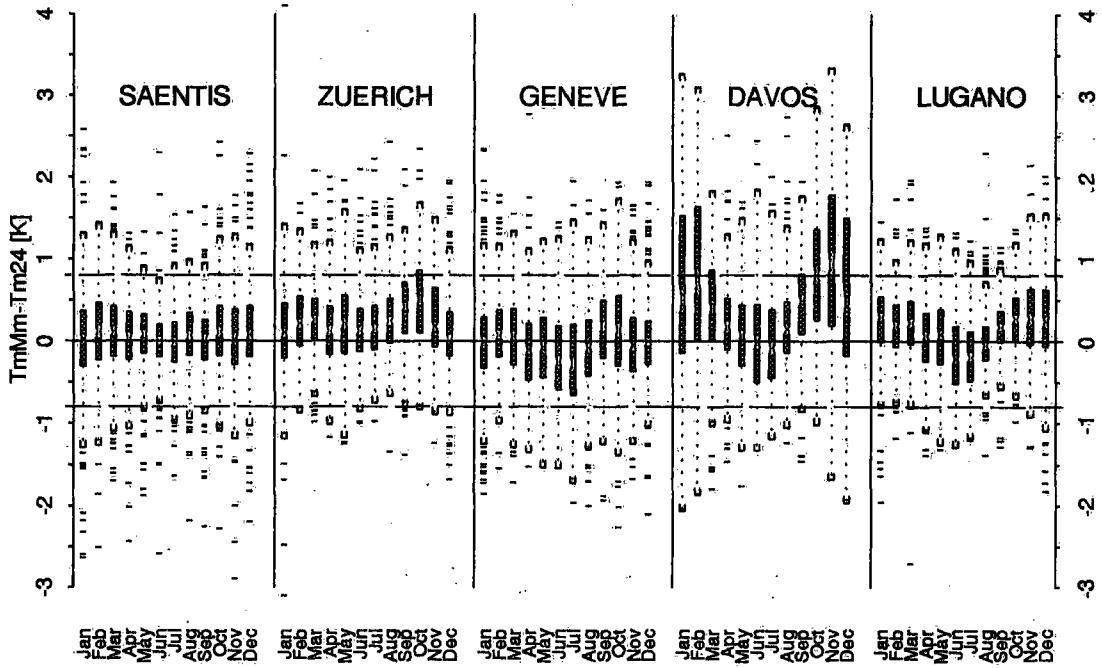


fig. 5.40 Box plots mensuels des écarts journaliers  $T_{mMm} - T_{m24}$ . Période: 1981-1990.

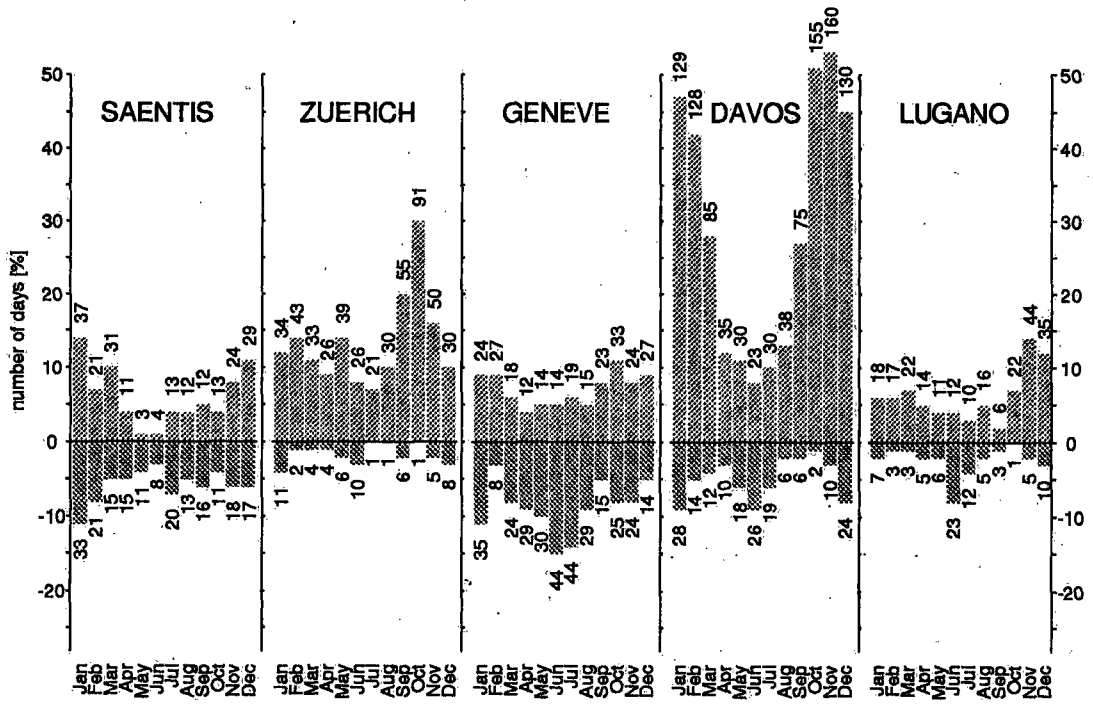


fig. 5.41 Répartition mensuelle des fréquences relatives des écarts journaliers  $|T_{mMm} - T_{m24}| > 0.8$  K. Les chiffres à l'extrémité des colonnes indiquent la fréquence absolue avant réduction. Les fréquences négatives correspondent aux écarts  $< 0.8$  K.

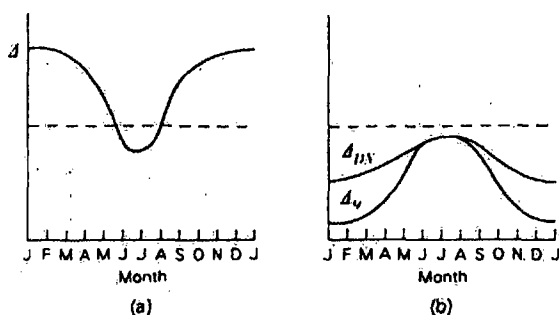


fig. 5.42 Ecarts moyens  $T_{mMm}-T_{m24}$  lors de situations convectives (a) et advectives (b). Tiré de Collison et Tabony (1984:333)

lières étudiées. Le tableau 5.4 offre une vue synoptique, fortement schématisée, des variations annuelles des écarts mensuels moyens selon trois situations météorologiques. Uniquement basée sur les écarts journaliers importants ( $|T_{mf}-T_{m24}|>0.8^\circ$ ), cette présentation intègre aussi bien les influences locales propres à une station et ayant une incidence lors de situations spécifiques (par exemple la présence d'un lac d'air froid lors de situations convectives), que la fréquence d'apparition de ces mêmes situations, fréquence qui dépend de phénomènes à plus large échelle. Prenons pour exemple la moyenne  $T_{mMm}$  lors de situations convectives hivernales (d'après notre définition: vent faible, insolation importante et absence de précipitations). Selon les résultats du chapitre 5.3, nous savons que de tels cas produisent des écarts positifs significatifs pour presque toutes les stations. Or, les hautes pressions hivernales étant souvent liées à un stratus recouvrant le Plateau, ces cas sont rares pour les stations de plaine du nord des Alpes (Zurich et Genève). Ils ne produisent donc pas d'écarts moyens significatifs, alors qu'ils sont nombreux pour les stations bénéficiant d'une insolation plus généreuse dans ces circonstances (Davos et Lugano). L'incidence sur les écarts moyens est alors plus sensible.

Il se dégage plusieurs tendances de ces résultats. Les plus grandes différences entre les stations apparaissent lors de situations convectives. La cause en est d'une part, les facteurs locaux déjà décrits précédemment. Pour mémoire, il s'agit entre autre des bilans radiatifs différents, eux-mêmes causés par les variations du trouble atmosphérique et par la configuration de l'horizon de la station, ainsi que de la topographie locale qui peut favoriser la formation d'inversion au sol. La variabilité spatiale de certains paramètres météorologiques, qui peut être très importante lors de situations convectives, en est une autre cause. Citons pour exemple le stratus hivernal du Plateau suisse, ou la nébulosité d'origine orographique sur les reliefs lors de situations convectives estivales. Dans le premier, cas nous avons un important gradient vertical de la durée d'insolation, alors que ce même gradient est horizontal dans le second cas. De plus, lors de situations convectives, les écarts diffèrent notablement selon la moyenne utilisée. Seules la moyenne  $T_{maK}$  et, dans une moindre mesure, la moyenne  $T_{mp21}$ , présentent un tracé des différences uniforme et semblable pour toutes les stations. Comme nous l'avons déjà dit précédemment, les écarts de la moyenne  $T_{maK}$  observés à Davos et Lugano pourront être corrigés avec un facteur  $K$  amélioré.

Situation	Moyenne	Sants	Zurich	Genève	Davos	Lugano
Convective	$\Delta+$ Tma21 0					
	$\Delta+$ TmaK 0					
	$\Delta+$ TmaA 0					
	$\Delta+$ TmMm 0					
	$\Delta+$ Tmp21 0					
	$\Delta+$ Tma21 0					
Advective froide	$\Delta+$ TmaK 0					
	$\Delta+$ TmaA 0					
	$\Delta+$ TmMm 0					
	$\Delta+$ Tmp21 0					
	$\Delta+$ Tma21 0					
	$\Delta+$ TmaK 0					
Advective chaude	$\Delta+$ TmaK 0					
	$\Delta+$ TmaA 0					
	$\Delta+$ TmMm 0					
	$\Delta+$ Tmp21 0					
	$\Delta+$ Tma21 0					
	$\Delta+$ TmaK 0					

Tableau 5.4 Présentation schématisée des écarts mensuels moyens selon trois situations météorologiques. Les chiffres romains inscrits au-dessus de la 1ère ligne indiquent le mois.

Lors d'un passage frontal intensif (avec un important contraste thermique entre les masses d'air), les différences locales décrites plus haut ne jouent plus un rôle déterminant dans les variations diurnes de la température. Celles-ci sont alors principalement la résultante du phénomène advectif. Les différences entre les stations sont donc peu marquées. Seule la station du Säntis, de par la faible amplitude de température qui y règne, montre une sensibilité moindre que les autres stations aux passages frontaux froids. Ceci s'observe dans les tracés des écarts moyens, déterminés pour les situations advectives froides. Il n'y a pas de différences notables entre les stations. Les passages frontaux froids conduisent généralement à une sous-estimation de la moyenne sur 24 heures  $T_{m24}$ , mais seule la moyenne  $T_{mp21}$  présente des écarts significatifs. Comme nous l'avons vu plus haut, ceci est dû à la double pondération de l'observation vespérale. Par contre, rien ne nous permet d'expliquer les écarts observés pour la moyenne  $T_{mMm}$  à Davos.

Une bonne compréhension des résultats nécessitent quelques considérations critiques:

- La détermination des situations météorologiques n'est pas toujours chose aisée, et tout particulièrement au Säntis. Etant donné la faible amplitude journalière de la température, les passages frontaux y sont, par exemple, moins bien définis que pour une autre station située à plus basse altitude. La classification des écarts importants selon les 4 types de temps y est donc certainement moins précise que pour les autres stations.
- Les cas de föhn ne sont pas pris en compte (pour autant qu'ils aient pu être localisés comme tels). Nos stations n'étant pas fortement soumises au föhn, ces cas sont de ce fait peu nombreux. De plus, ils comprennent des séquences de föhn très brèves, qui n'influencent pas forcément les moyennes journalières. Notre approche devrait probablement être modifiée pour des stations ayant un régime de föhn plus fréquent (par exemple: Altdorf, Coire, Vaduz).
- Comme nous l'avons déjà relevé précédemment, le dépouillement manuel des données n'est pas absolument homogène. Une deuxième classification par une tierce personne apporterait certainement de légères modifications.
- Les situations advectives sont décrites sommairement, uniquement d'après les paramètres météorologiques de la station elle-même. On ne tient compte ni de l'intensité du front ni de son heure de passage sur la station.

Cette méthode traite seulement les écarts importants ( $|T_{mf} - T_{m24}| > 0.8 \text{ K}$ ). Il s'agit uniquement d'une approche descriptive qui permet d'exposer comment et dans quelles circonstances apparaissent ces écarts importants. Elle ne permet en aucun cas le cheminement inverse, c'est-à-dire de déterminer l'importance d'un écart journalier en fonction d'une situation météorologique déterminée. Une telle approche nécessiterait un matériel (statistique des passages frontaux) que nous ne possédons pas. Une telle statistique devrait être établie pour plusieurs stations et comprendre des indications sur le type du front, son intensité et son heure de passage à la station.

## 5.5 Conclusions

### *Différences mensuelles moyennes*

Dans l'ensemble, les différentes formules de calcul de la température journalière moyenne utilisées par l'ISM, permettent une bonne approximation de la moyenne sur 24 heures  $Tm_{24}$ . Les écarts mensuels moyens et leur variabilité annuelle sont faibles. La moyenne  $Tm_A$ , utilisée par le service météorologique autrichien, apporte des résultats comparables à la moyenne pondérée  $Tmp_{21}$  utilisée jusqu'en 1970 par les services suisse et autrichien. La moyenne  $Tm_K$ , introduite en 1971 par l'ISM, permet la meilleure approximation de la moyenne sur 24 heures  $Tm_{24}$ , tant du point de vue des écarts moyens, que de la variabilité de ces écarts. Les inconvénients liés à la détermination et à la régionalisation des facteurs de correction  $K$  de  $Tm_K$  nous semblent minimes en regard des avantages apportés par cette méthode de calcul. La moyenne des minima et maxima  $Tm_{Mm}$ , encore en usage dans de nombreux pays, produit les écarts mensuels les plus importants. De plus, au vu de la variabilité particulièrement importante de ces écarts, il nous semble difficile d'homogénéiser, sur la base d'un écart mensuel moyen, une série de température calculée avec  $Tm_{Mm}$ .

Les différences entre les stations sont plus importantes, tant pour les écarts moyens eux-mêmes que pour leur variabilité annuelle. Même si certains facteurs locaux (exposition, topographie des alentours) à l'origine d'inversions matinales, permettent d'expliquer une partie des disparités entre les stations, notre échantillon de cinq stations ne nous autorise ni à tirer des conclusions générales du tracé de ces différences, ni à utiliser ces différences pour la réduction ou l'homogénéisation de séries temporelles provenant d'autres stations, suisses ou étrangères.

### *Différences journalières*

L'approche sur une base journalière des écarts entre les formules de calcul de la température journalière moyenne et la moyenne sur 24 heures  $Tm_{24}$ , a permis de démontrer l'importante variabilité de ces écarts et l'influence prépondérante de certaines situations météorologiques. Une moyenne, comme  $Tmp_{21}$ , par exemple, qui produit des écarts moyens très faibles, présente une variabilité journalière beaucoup plus importante que la moyenne arithmétique  $Tm_A$ , qui occasionne pour sa part des écarts moyens importants.

L'importance des situations météorologiques sur le comportement des moyennes journalières a deux conséquences principales:

1. Elle réduit les possibilités de comparaisons entre des séries temporelles calculées avec des moyennes différentes. Admettons, par exemple, que le réchauffement global de l'atmosphère ait pour conséquence une augmentation de la fréquence des situations convectives. Une série calculée avec la moyenne des extrêmes  $Tm_{Mm}$  aura tendance à accentuer artificiellement le phénomène de réchauffement, tandis que celle calculée avec la moyenne  $Tm_K$  réagira «normalement» à la modification climatique.
2. Elle diminue la représentativité spatiale d'une série. En raison de la variabilité spatiale de la température, lors de situations convectives hivernales, par exemple, les écarts entre une moyenne journalière et la moyenne  $Tm_{24}$ , calculés pour une sta-



tion de plaine, ne peuvent être utilisés pour la réduction d'une station située au-dessus du stratus.

Néanmoins, près de 80% des écarts importants, c'est-à-dire supérieurs, respectivement inférieurs à  $\pm 0.8$  K, peuvent être mis en relation avec un des trois types de temps définis. Une approche déterministe de la correction des moyennes journalières est donc théoriquement réalisable. Cette approche sera discutée plus en détails lors des conclusions générales du travail (voir chapitre 7).

## 6 APPLICATIONS PRATIQUES

En usage depuis plus de 20 ans, tant dans le réseau climatologique conventionnel que pour le calcul des moyennes journalières des données ANETZ de la Klima-DB, les facteurs de correction K et leur régionalisation n'ont jamais été contrôlés depuis lors. Les possibilités offertes par le réseau ANETZ nous permettent d'effectuer un tel contrôle.

Les chapitres qui suivent retracent l'historique de la détermination des facteurs K, décrivent l'approche nécessaire à leur contrôle et en présentent les résultats. Enfin, dans un dernier chapitre nous proposerons une simplification de la régionalisation de ces facteurs.

### 6.1 Contrôle des facteurs K

#### 6.1.1 Introduction

Comme nous l'avons vu précédemment (voir chapitre 2) les facteurs de correction K de la formule  $T_{maK}$  (2.4) ont été déterminés à la fin des années 1970 par Schüepp et Urfer, selon le modèle décrit dans les lignes qui suivent. Si nous posons

$$T_M = N - K \times (N - T_{min}) \quad (2.4)$$

nous obtenons

$$K = (N - T_M) / (N - T_{min}) \quad (6.1)$$

Pour déterminer K, nous devons donc connaître  $T_M$  (dans notre cas la moyenne sur 24 heures), N et  $T_{min}$ . D'après les notes manuscrites dont nous disposons, les facteurs K ont essentiellement été déterminés à l'aide des 8 stations synoptiques rattachées au réseau international. Il s'agit de Bâle-Mulhouse, Zurich-Kloten, Genève-Aéroport, Sion, Berne (par la suite Payerne), Locarno-Magadino, Gütsch et Testa Grigia. Ces stations effectuent 8 observations quotidiennes, ce qui permet de calculer une moyenne journalière assez proche de  $T_{m24}$  (2.6) et d'interpoler les heures d'observations nécessaires au calcul de N. De plus, Schüepp et Urfer ont disposé des thermogrammes de La Brévine (1965 - 1969), Davos (1968 - 1969), Bad Ragaz (1966 - 1969), Muri (1966 - 1969), Montana (1953 - 1959), Oeschberg (1961 - 1969) et Locarno-Monti (1954 - 1962). Ce matériel implique un travail considérable, puisque chaque heure d'observation doit être relevée manuellement sur le thermogramme.

Les facteurs K varient légèrement selon le mois, selon la situation de la station et selon les heures d'observation. Les stations reliées au réseau international ou utilisées pour les prévisions du temps effectuent les observations 45 minutes plus tôt et nécessitent donc d'autres facteurs de correction. La régionalisation des facteurs K a permis de répartir les stations du réseau climatologique en sept groupes comme suit.

#### *Groupes 1 à 4*

Les stations situées en dessous de 800 m d'altitude ont été groupées en quatre régions distinctes (voir carte figure 6.1).

*Groupe no. 5*

Comprend les stations situées entre 800 et 2200 m d'altitude, sur une pente exposée au S ou au SE.

*Groupe no. 6*

Comprend toutes les autres stations situées entre 800 et 2200 m d'altitude.

*Groupe no. 7*

Ce groupe réuni les stations situées au-dessus de 2200 m d'altitude.

D'après les documents dont nous disposons, la régionalisation n'a pas été faite d'après les coefficients calculés pour les stations à disposition, mais selon des critères climato-géographiques. Le matériel à disposition (petit nombre de stations et séries relativement courtes) n'aurait pas permis une autre approche.

6.1.2 Approche

6.1.2.1 Données

Chacune des 5 stations étudiées fait partie d'un groupe de facteurs K différent. Seuls les groupes 2 (Valais) et 5 (exposition S/SE entre 800 et 2200 m) ne sont donc pas représentés.

Profitant des possibilités offertes par le réseau ANETZ, nous avons recalculé les facteurs K de chaque groupe à l'aide des stations ANETZ correspondantes. Afin de garantir une certaine cohésion avec les données utilisées jusqu'ici (moyennes horaires de la température sous abri), nous avons retenu uniquement les stations équipées d'un abri météorologique et dont les données couvrent la période 1981 - 1990<sup>19</sup>. La station du Jungfraujoch n'a pas été prise en considération, à cause de sa situation particulièrement exposée et de l'instrumentation spécifique qui en découle (thermomètre VHT placé dans un abri météorologique). Avec les 5 stations étudiées dans les chapitres précédents, nous atteignons ainsi un total de 34 stations. Il est clair que ce choix nous fait renoncer à de nombreuses stations intéressantes et que ce réseau réduit ignore totalement ou partiellement certaines régions (voir figure 6.1 et tableau 6.1). La répartition verticale des stations n'est pas non plus idéale. Près de 70% des stations sont situées au-dessous de 700 m/m et les altitudes intermédiaires comprises entre 700 m et 1000 m ainsi que entre 1700 m et 2200 m ne sont pas représentées (figure 6.2). A ce sujet, il faut relever que le réseau ANETZ complet ne couvre pas non plus régulièrement tout le territoire. Le choix de l'emplacement d'une station dépend en effet de nombreuses contraintes et doit répondre à des besoins parfois contradictoires, qui ne peuvent pas tous être comblés. Pour notre part, comme tous les groupes sont représentés par 2 stations au moins, et comme toute notre étude est basée sur la température sous abri, nous avons décidé d'accepter les inconvénients cités ci-dessus et de recalculer les facteurs K à l'aide de ces 34 stations.

Toutes les données ont été contrôlées et éventuellement corrigées selon les procédures mentionnées au chapitre 4.3.2. La méthode d'interpolation des heures d'observation décrite au chapitre 4.3 a également été utilisée ici et les remarques des

---

19. A l'exception d'Aigle qui couvre la période 1982 - 1990

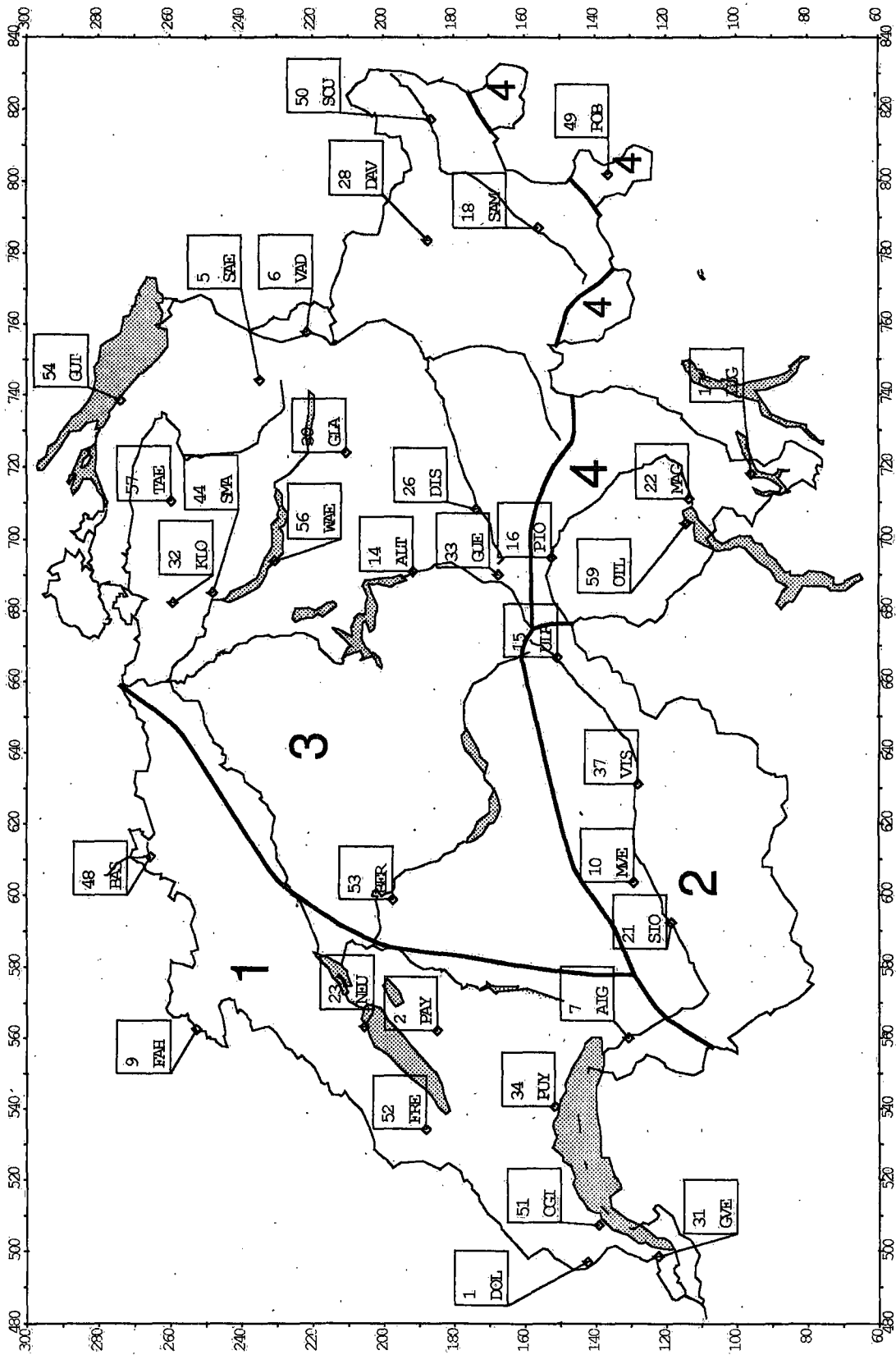


fig. 6.1 Répartition horizontale des stations et limites des régions de facteurs K. Echelle kilométrique. Les indicatifs et abréviations des stations se réfèrent au tableau 6.1.

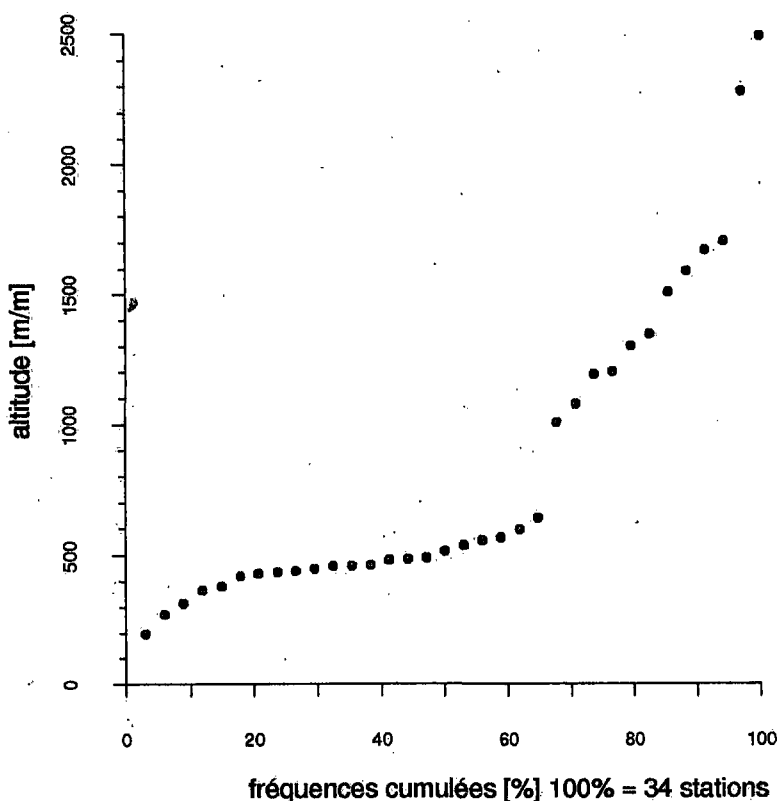


fig. 6.2 Répartition verticale des stations en fonction de l'altitude.

chapitres 4.3.1 (La qualité de l'interpolation) et 4.3.2 (Contrôle et qualité des données) sont aussi valables pour ces 29 stations supplémentaires.

#### 6.1.2.2 Méthodes

Pour chaque station, nous avons déterminé des valeurs mensuelles de K à l'aide des moyennes mensuelles des différents termes de

$$K = (N - TM) / (N - Tmin) \quad (6.1)$$

Pour une station (s) et un mois (m)

$$N_{s,m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{T7.30_{s,i} + T13.30_{s,i} + T19.30_{s,i}}{3} \quad (6.2)$$

$$TM_{s,m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Tm24_{s,i} \quad (6.3)$$

et si Tmin est le minimum journalier de la température mesuré selon le protocole en vigueur à partir de 1971 pour les stations conventionnelles du réseau climatologique (voir figure 2.1), alors

No	Station	Code	Coordonnées kilométriques	Altitude m/m	Groupe K
2	Payerne	PAY	562100/184700	490	1
7	Aigle	AIG	560120/130630	381	1
9	Fahy	FAH	562460/252650	596	1
23	Neuchâtel	NEU	563150/205600	485	1
31	Genève-Cointrin	GVE	498580/122320	420	1
34	Pully	PUY	540820/151570	461	1
48	Basel-Binningen	BAS	610850/265620	316	1
51	Changins	CGI	507280/139170	430	1
21	Sion	SIO	592200/118625	482	2
37	Visp	VIS	631150/128020	640	2
6	Vaduz	VAD	757700/221700	460	3
14	Altdorf	ALT	690960/191700	449	3
30	Glarus	GLA	723750/210580	515	3
32	Zürich-Kloten	KLO	682280/259220	436	3
44	Zürich ISM	SMA	685125/248090	556	3
53	Bern-Liebefeld	BER	598610/197470	565	3
54	Güttingen	GUT	738430/273950	440	3
56	Wädenswil	WAE	693770/230780	463	3
57	Tänikon	TAE	710500/259820	536	3
17	Lugano	LUG	717880/95870	273	4
22	Locarno-Magadino	MAG	711160/113540	197	4
59	Locarno-Monti	LOC	704160/114350	366	4
10	Montana	MVE	603600/129160	1508	5
26	Disentis	DIS	708230/173780	1190	5
50	Scuol	SCU	817130/186400	1300	5
52	La Frêtaz	FRE	534230/188080	1202	5
15	Ulrichen	ULR	666740/150760	1345	6
16	Piotta	PIO	694930/152500	1007	6
18	Samedan-St.Moritz	SAM	787150/156040	1705	6
28	Davos	DAV	783580/187480	1590	6
49	Robbia	ROB	801850/136180	1078	6
1	La Dôle	DOL	497050/142380	1670	6
5	Säntis	SAE	744100/234900	2490	7
33	Gütsch	GUE	690090/167490	2282	7

tableau 6.1 Liste des stations et de leur situation. Les stations sont groupées selon leurs facteurs K.

$$TMIN_{s,m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Tmin_{s,i} \quad (6.4)$$

Pour les 3 formules 6.2, 6.3 et 6.4 nous avons, sur une période de 10 ans,

$$282 \leq n \leq 310$$

Les 12  $K_{s,m}$  ainsi obtenus pour chaque station (s) ont été lissés avec une moyenne glissante selon

$$K_{s,m} = \frac{K_{s,m-1} + 2K_{s,m} + K_{s,m+1}}{4}, m = 1, \dots, 12 \quad (6.5)$$

Avec  $m-1=12$  lorsque  $m=1$  et  $m+1=1$  lorsque  $m=12$ .

Les  $K_m$  moyens (ou  $\bar{K}_m$ ) de chaque région ou des groupes définis par Schüepp ont finalement été recalculés selon

$$\bar{K}_m = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n K_{s,m} \quad (6.6)$$

avec n variable selon le nombre de stations appartenant au groupe concerné (voir tableau 6.1). Ce dernier point est évidemment regrettable. L'idéal aurait été d'avoir à disposition des groupes de même taille. La répartition des stations du réseau nous contraint à travailler selon cette configuration.

Les résultats sont représentés graphiquement, tout d'abord par une vue conjointe des facteurs K officiels ( $Koff_m$ ) et des nouveaux  $K_{sm}$ , déterminés pour chaque station. Ceci nous a permis de visualiser les variations annuelles des  $Koff_m$  et des  $K_{sm}$ . Puis, grâce à la représentation des écarts, entre les K de chaque station et les K moyens,

$$\Delta \bar{K}_m = K_{s,m} - \bar{K}_m, m = 1, \dots, 12 \quad (6.7)$$

d'une part, et entre les K de chaque station et les K officiels,

$$\Delta Koff_m = K_{s,m} - Koff_m, m = 1, \dots, 12 \quad (6.8)$$

d'autre part, nous avons pu démontrer si cette nouvelle détermination des K de chaque groupe apporte une amélioration. Cette représentation nous a également aidé à contrôler la définition des groupes et à en proposer une simplification. Puis, les nouveaux  $\bar{K}_m$  des groupes de nos 5 stations ont été appliqués pour le calcul des écarts moyens et des écarts journaliers entre TmaK (2.4) et Tm24 (2.6), selon les procédures utilisées au chapitre 5. Enfin, pour un ultime contrôle, les nouveaux K ont servi au calcul des moyennes journalières de la période 1961 - 1990, afin de déterminer si, et dans quelle mesure, l'inhomogénéité constatée pour certaines stations au chapitre 2 a été résorbée ou atténuée.

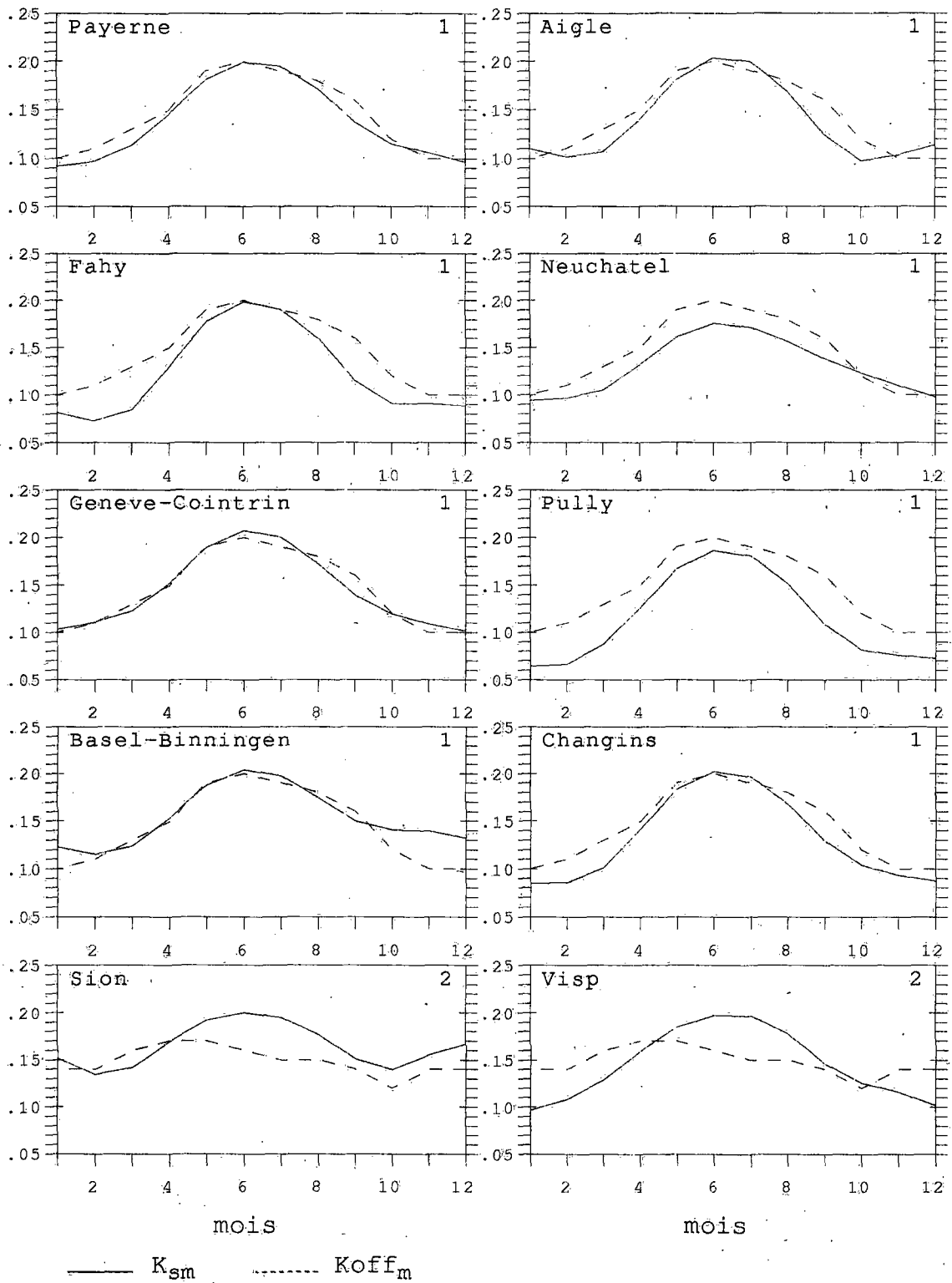


fig. 6.3 Valeurs mensuelles des facteurs K déterminés pour chaque station ( $K_{sm}$ ) et des facteurs K officiels ( $K_{off_m}$ ) du groupe correspondant (indiqué par un chiffre en haut à droite de chaque graphique).



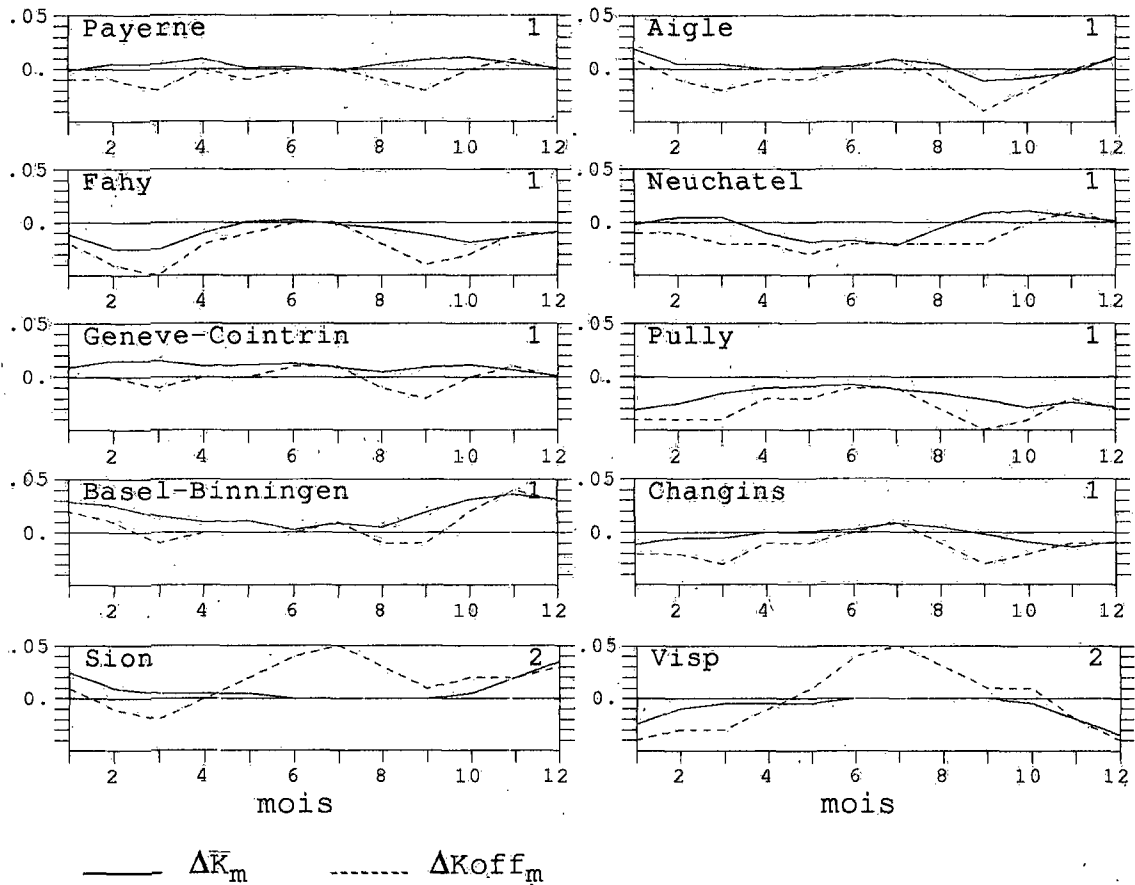


fig. 6.4 Écarts mensuels entre les valeurs K déterminées pour chaque station ( $K_{sm}$ ) et la moyenne des  $K_{sm}$  du groupe ( $\Delta\bar{K}_m$ ) et entre  $K_{sm}$  et les K officiels ( $K_{off_m}$ ) du groupe.

### 6.1.3 Résultats

#### 6.1.3.1 Calcul et contrôle des groupes

L'examen des variations annuelles des  $K_{sm}$  des 34 stations étudiées, ainsi que de leurs écarts par rapport aux anciennes ( $K_{off_m}$ ) et aux nouvelles ( $\bar{K}_m$ ) valeurs de K des groupes, amènent les constatations suivantes:

*Groupe no. 1 (figure 6.3 et figure 6.4)*

Les  $K_{sm}$  de Genève et Payerne ne diffèrent pratiquement pas des  $K_{off_m}$ . Ceci s'explique aisément. Les données de ces deux stations ont été utilisées à l'époque pour la détermination des  $K_{off_m}$  de ce groupe! Les autres stations diffèrent plus ou moins fortement. Il semble que la situation de la station joue un rôle plus important que son appartenance à une région climatique précise. Les écarts entre Genève, Changins et Pully sont, en ce sens, assez significatifs.

Les  $\bar{K}_m$  de ce groupe apportent une amélioration par rapport aux  $K_{off_m}$  pour presque toutes les stations concernées. Basel-Binningen et Genève, dans une moindre mesure, font exception. Pour les autres stations, les améliorations sont le plus souvent minimales et, surtout, elles varient selon le mois considéré.

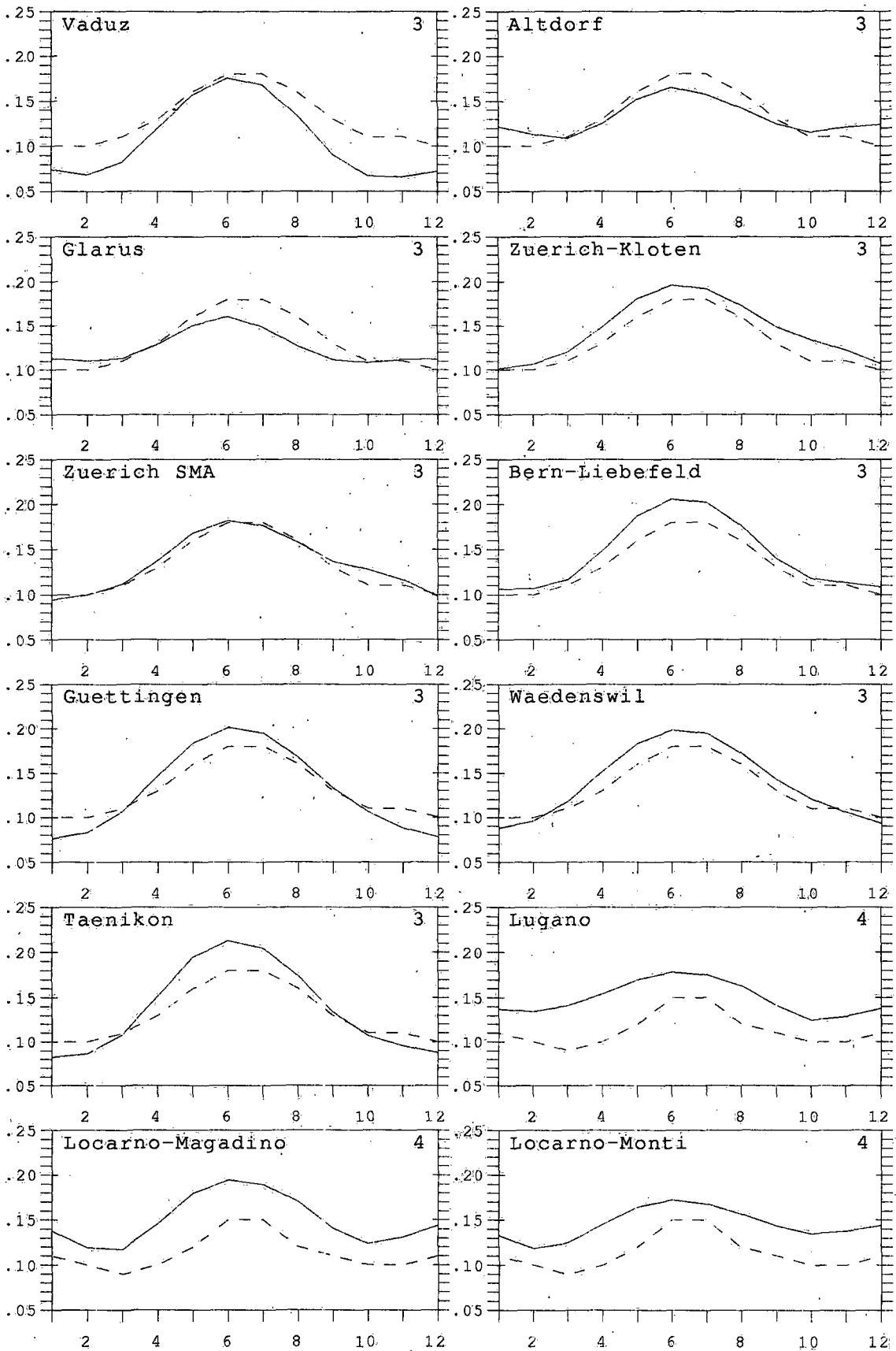


fig. 6.5 Valeurs mensuelles des facteurs K déterminés pour chaque station ( $K_{sm}$ ) et des facteurs K officiels ( $K_{off_m}$ ) du groupe correspondant (indiqué par un chiffre en haut à droite de chaque graphique). Légende voir figure 6.3

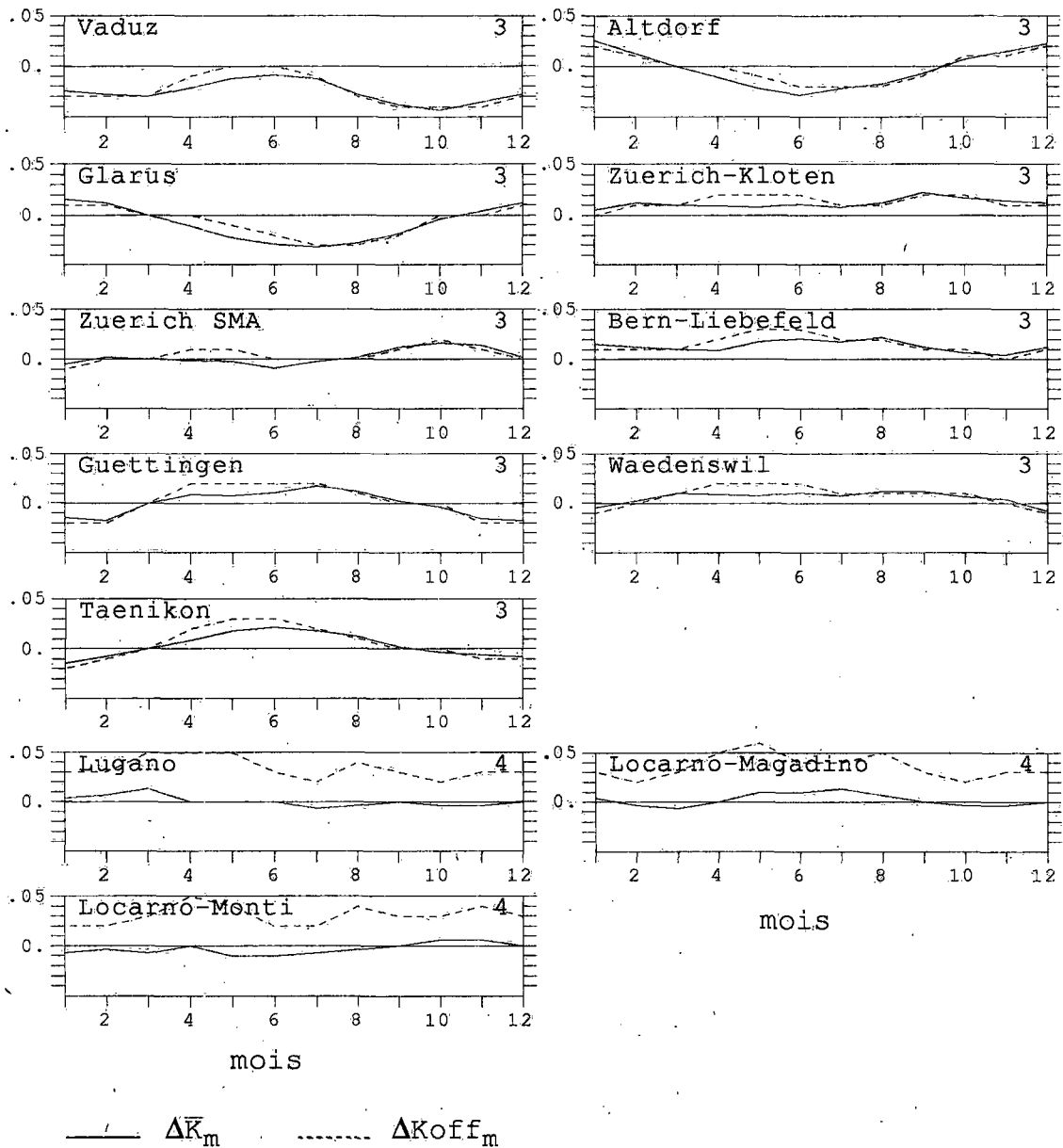


fig. 6.6 Ecarts mensuels entre les valeurs K déterminées pour chaque station ( $K_{Sm}$ ) et la moyenne des  $K_{Sm}$  du groupe ( $\Delta\bar{K}_m$ ) et entre  $K_{Sm}$  et les K officiels ( $K_{off}_m$ ) du groupe.

*Groupe no. 2 (figure 6.3 et figure 6.4)*

Les écarts entre Sion et Visp (Viège), particulièrement importants durant les mois d'hiver, peuvent s'expliquer par les horizons différents de ces deux stations. La station de Visp n'a aucune insolation en décembre et en janvier, et une très faible insolation en novembre, alors que Sion jouit d'une insolation potentielle plus importante (Zelenka et al., 1991).

Les améliorations des  $\bar{K}_m$  par rapport aux  $K_{off}_m$  sont surtout perceptibles entre mars et septembre. Rappelons que ce groupe n'est pas très homogène (voir ci-dessus), et qu'il serait souhaitable d'y inclure d'autres stations comparables.

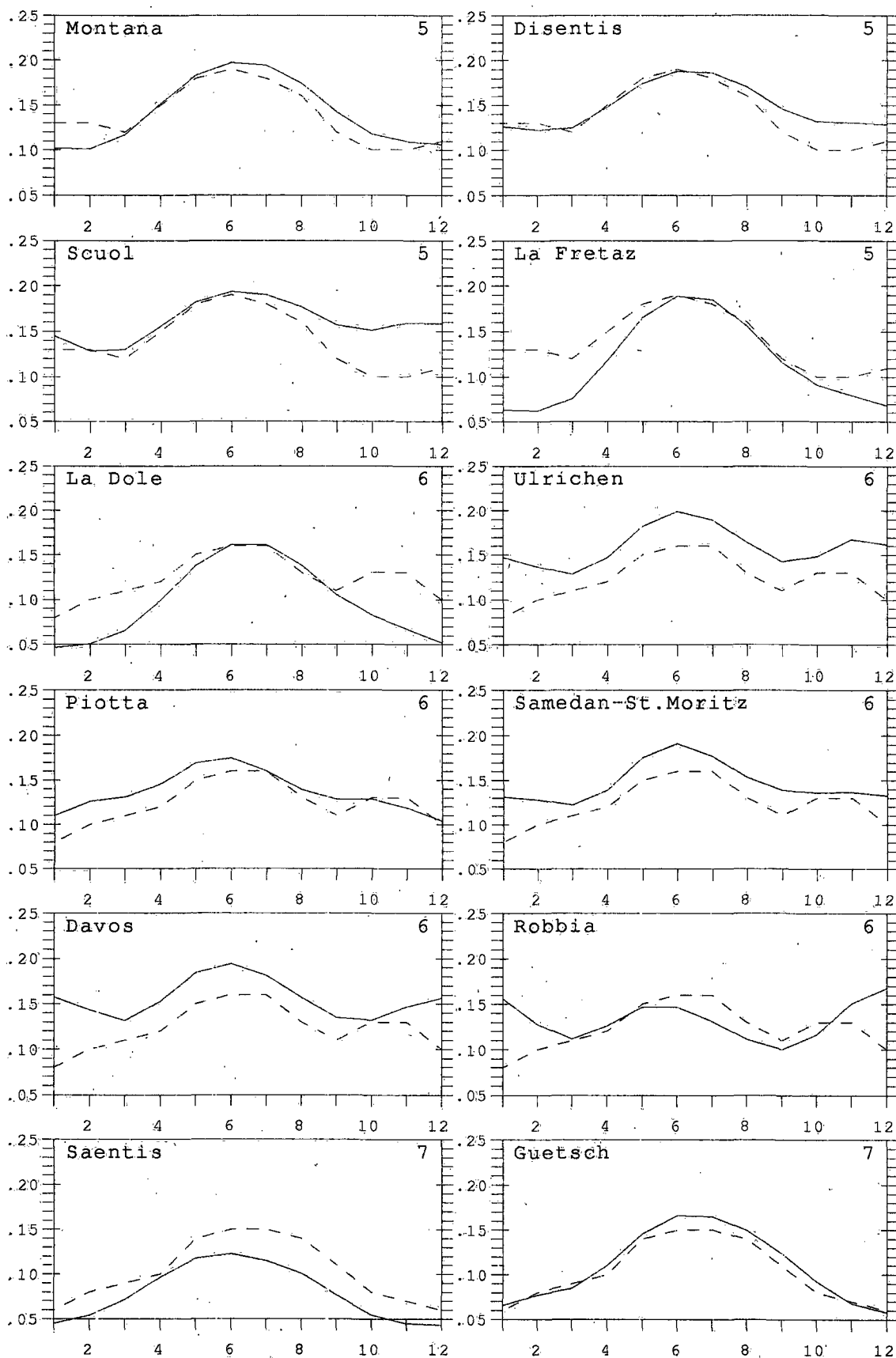


fig. 6.7 Valeurs mensuelles des facteurs K déterminés pour chaque station ( $K_{sm}$ ) et des facteurs K officiels ( $K_{off_m}$ ) du groupe correspondant (indiqué par un chiffre en haut à droite de chaque graphique). Légende voir figure 6.3

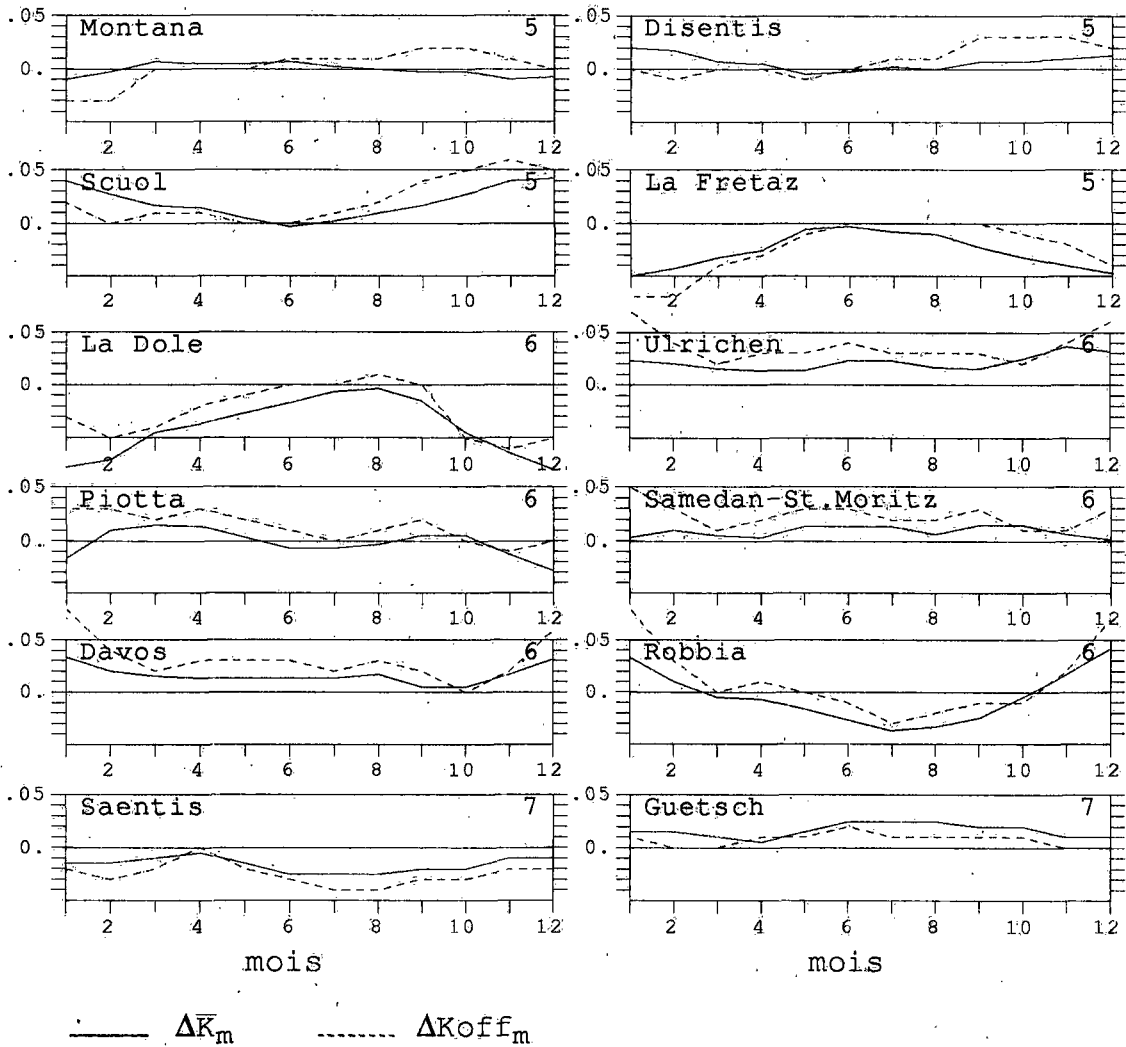


fig. 6.8 Ecart mensuels entre les valeurs K déterminées pour chaque station ( $K_{sm}$ ) et la moyenne des  $K_{sm}$  du groupe ( $\Delta\bar{K}_m$ ) et entre  $K_{sm}$  et les K officiels ( $K_{off_m}$ ) du groupe.

Groupe no. 3 (figure 6.5 et figure 6.6)

Zürich-Kloten, Zürich-SMA (ISM), Bern et Wädenswil présentent des valeurs de  $K_{sm}$  assez semblables et qui diffèrent peu des  $K_{off_m}$ . Celles d'Altdorf et de Glarus sont également comparables entre elles, en particulier pour les valeurs hivernales de  $K_{sm}$ . Ces deux stations, situées à la limite nord des Alpes, sont, lors de situations convectives hivernales, moins sujettes aux stratus que les autres stations du Plateau. Nous avons vu pour le cas de Davos que des situations convectives hivernales, accompagnées d'une forte insolation, produisent des écarts  $T_{maK}$  moins  $T_{m24}$  importants et requièrent des coefficients K plus élevés. Le föhn, relativement fréquent pour ces deux stations, peut également jouer un rôle. Vaduz se distingue des autres stations du groupe par des  $K_{sm}$  hivernaux nettement plus faibles.

Pour ce groupe, les  $\Delta\bar{K}_m$  n'apportent pratiquement aucune amélioration par rapport à la situation actuelle. Pour certaines stations (Glarus, Altdorf et Vaduz), les écarts sont même légèrement supérieurs.

*Groupe no. 4 (figure 6.5 et figure 6.6)*

Les trois stations tessinoises sont très semblables et diffèrent nettement des  $K_{off_m}$ . Les  $\Delta\bar{K}_m$  sont faibles. Les  $\bar{K}_m$  apportent donc une amélioration qui devrait se répercuter sur les écarts mensuels  $T_{maK}$  (2.4) moins  $T_{m24}$  (2.6).

*Groupe no. 5 (figure 6.7 et figure 6.8)*

Contrairement aux quatre premiers, ce groupe est défini par l'altitude (entre 800 et 2200 m/m) et par la situation topographique (pentes exposées au S, SE). Aucune des stations de ce groupe ne correspond aux  $K_{off_m}$  et, mis à part Disentis et Scuol, il n'y a pratiquement aucune similitude entre elles. C'est pour La Frêtaaz que les différences sont le plus marquées. Cette station, située sur le flanc sud du Jura, n'a pas beaucoup de points communs avec une station située dans une vallée intra-alpine, comme Scuol, par exemple.

D'après les  $\Delta\bar{K}_m$  il apparaît clairement que ce groupe serait plus homogène sans La Frêtaaz.

*Groupe no. 6 (figure 6.7 et figure 6.8)*

Ce groupe, défini par l'altitude (entre 800 et 2200 m/m) semble assez hétéroclite, et pratiquement tous les  $K_{sm}$  sont passablement éloignés des  $K_{off_m}$ . Ulrichen, Samedan, Davos, ainsi que, dans une moindre mesure, Robbia, présentent des similitudes et pourraient éventuellement constituer un groupe homogène. De par sa situation (vallée alpine), Piotta devrait probablement faire partie du même groupe. Mais, à cause de l'horizon réduit de la station, qui diminue considérablement l'insolation de novembre, décembre et janvier, les  $K_{sm}$  de ces mois sont moins élevés que ceux des autres stations du groupe.

Malgré cette situation (groupe hétérogène), les  $\bar{K}_m$  apportent une réelle amélioration pour Davos, Ulrichen et Samedan, et une faible amélioration pour Robbia durant les mois d'hiver uniquement. La Dôle ne devrait pas faire partie de ce groupe. Sa situation sommitale très exposée lui confère les mêmes caractéristiques que des stations comme Güttsch ou le Säntis, situées à des altitudes plus élevées.

*Groupe no. 7 (figure 6.7 et figure 6.8)*

Ce groupe comprend toutes les stations situées au-dessus de 2200 m/m. Les  $K_{sm}$  de Güttsch sont très proches des  $K_{off_m}$  du groupe. Les  $K_{sm}$  du Säntis sont bas, ce qui s'explique par la faible amplitude thermique de cette station.

Les  $\bar{K}_m$  du groupe apportent une légère amélioration pour le Säntis et sont, au contraire, moins favorables à la station de Güttsch.

### 6.1.3.2 Contrôle des nouveaux facteurs K

Le but des nouveaux facteurs K ( $\bar{K}_m$ ) étant principalement de permettre une meilleure approximation de  $T_{m24}$  (2.6) par  $T_{maK}$  (2.4), nous les avons introduits dans la formule  $T_{maK}$  (qui devient ainsi  $T_{maK_n}$ ) et avons calculé, pour les cinq stations de cette étude, les écarts mensuels moyens  $D_{mf}$  (4.2) ainsi que les écarts journaliers  $d_{mf}$  (4.1) entre cette moyenne et la moyenne sur 24 heures  $T_{m24}$ . Ces écarts sont ensuite comparés avec les écarts « officiels » issus de  $T_{maK}$  moins  $T_{m24}$ .

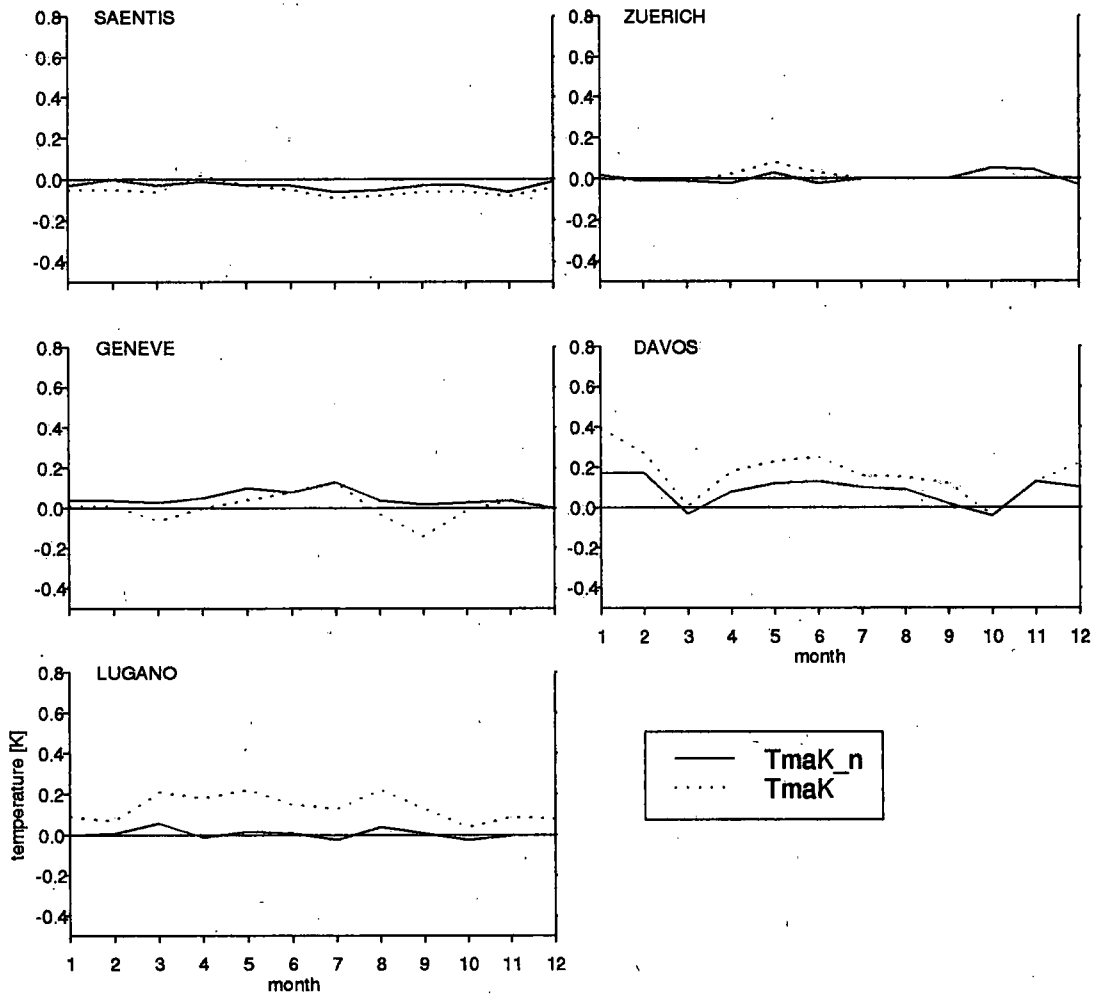


fig. 6.9 Ecart mensuel moyen TmaK moins Tm24 calculé avec les nouveaux facteurs  $\bar{K}_m$  (TmaK\_n) et avec les facteurs  $K_{off_m}$  (TmaK).

*Ecart mensuel moyen (figure 6.9)*

La figure 6.9 correspond aux figures présentées au chapitre 5 (par exemple, figure 5.2). Seule l'échelle a été modifiée afin de faciliter la lecture des deux courbes relativement proches.

Pour le Sântis et Zurich, les améliorations apportées par les nouveaux  $\bar{K}_m$  sont pratiquement inexistantes. Pour Genève, ils provoquent des écarts constants inférieurs à 0.1 K alors que les écarts produits par les  $K_{off_m}$  varient d'un mois à l'autre. Pour ces trois stations, les différences sont de toute façon faibles et difficilement décelables. A Davos, les  $\bar{K}_m$  apportent un gain global atteignant 0.2 K en janvier. La double oscillation des différences est atténuée, mais ne disparaît pas complètement. Nous avons vu, au chapitre précédent, qu'une modification de la composition du groupe auquel appartient Davos devrait probablement produire des facteurs K mieux adaptés à la station, ce qui amènerait une diminution des écarts mensuels. Lugano apporte les résultats les plus probants. Les écarts mensuels disparaissent presque complètement avec l'introduction des nouveaux  $\bar{K}_m$ .

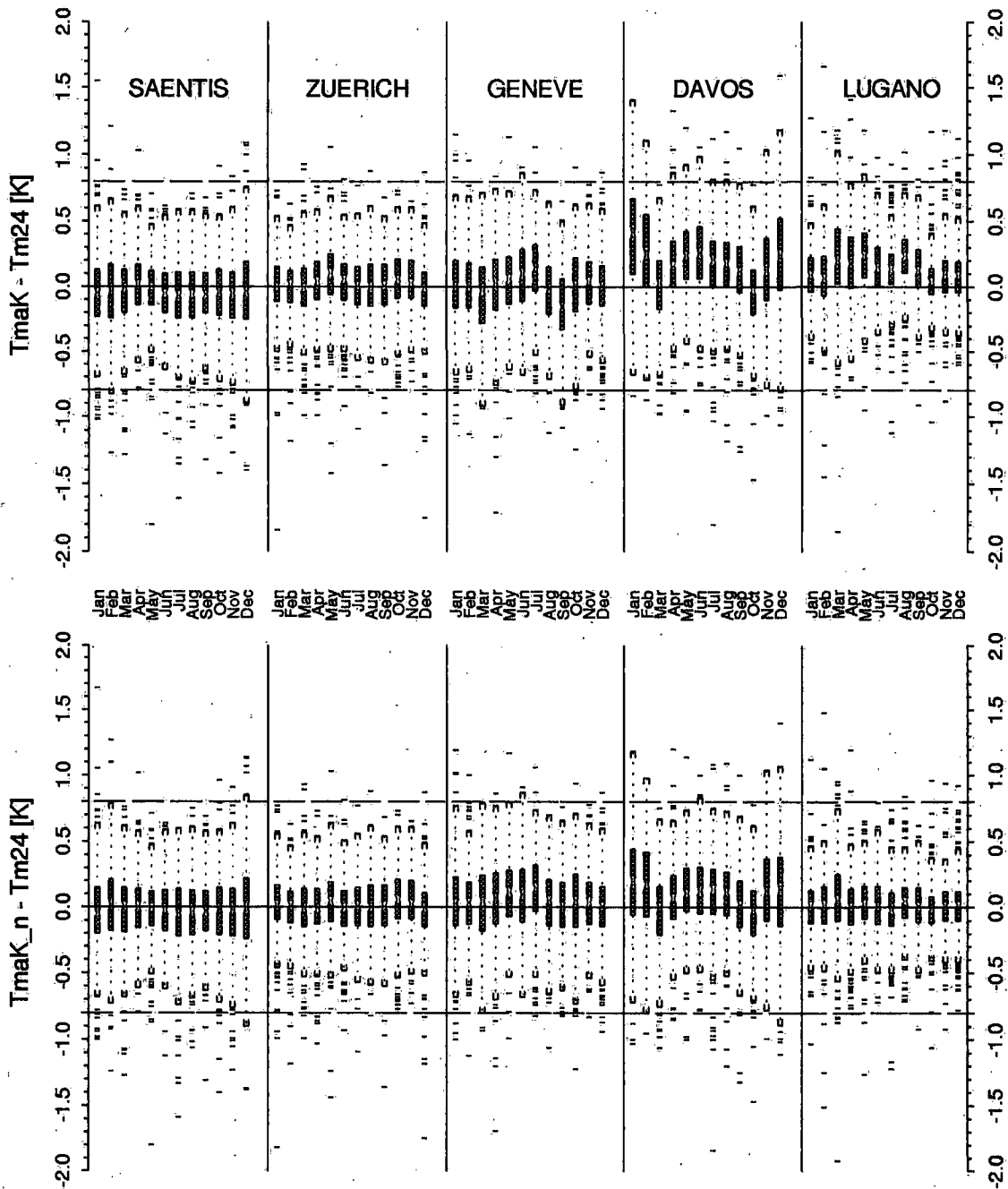


fig. 6.10 Box plot des écarts journaliers TmaK moins Tm24 calculés avec les nouveaux facteurs  $\bar{K}_m$  (TmaK\_n, en bas) et avec les facteurs  $K_{off_m}$  (TmaK, en haut). Le principe du box plot est expliqué au chapitre 4.4

*Écarts journaliers (figure 6.10)*

La figure 6.10 correspond aux *box plots* déjà utilisés au chapitre 5.4 (par exemple la figure 5.31).

Nous avons vu que les écarts mensuels du Säntis et de Zurich n'ont pratiquement pas été modifiés par l'utilisation des nouveaux facteurs K. Il en est de même ici pour la dispersion des *outliers* (extrêmes aberrants). On distingue tout au plus un meilleur centrage des distributions mensuelles. Les médianes sont en effet légèrement plus



proches de la ligne du 0 K. La même observation est également valable pour Genève. Les intervalles interquartiles (IQR) n'ont pas non plus été modifiés par ces nouveaux facteurs K. A Davos, l'amélioration est plus visible, particulièrement en décembre - janvier et en mai - juin. Les *outliers* n'ont en revanche pratiquement pas été modifiés. A Lugano, comme pour les écarts moyens, les médianes ont sensiblement diminué et ne dépassent pas 0.1 K. Les IQR de certains mois ont également diminué (mars - avril - mai) et une partie des *outliers* positifs ont disparu ou ont été ramenés sous la ligne de +0.8 K. Selon notre définition (voir chapitre 5.4.1.1), toutes les valeurs supérieures, respectivement inférieures, à  $\pm 0.8$  K sont considérées comme *outliers*.

### 6.1.3.3 Application des nouveaux facteurs K pour la période 1961 - 1990

Cette application se limite à Lugano et à Bâle. En effet, des deux stations pour lesquelles l'introduction des nouveaux facteurs est nettement décelable (voir chapitre précédent), seule Lugano peut être comparée avec une station de référence n'ayant pas subi de modification au 1<sup>er</sup> janvier 1971. Nous avons vu, au chapitre 2.5.1, qu'il s'agit de la station synoptique de Locarno - Magadino. Pour Davos, nous ne disposons malheureusement d'aucune station de référence à proximité. Bien que Bâle ne fasse pas partie de notre collectif de 5 stations, nous avons décidé de la présenter ici, car elle se trouve également au voisinage d'une station synoptique. Nous avons vu, au chapitre 2.5.3, que l'introduction de la moyenne  $T_{maK}$  (2.4) en 1971 a provoqué une discontinuité dans les séries de température de Bâle. Les nouveaux facteurs K du groupe no. 1 sont, pour cette station, moins favorables que les  $K_{off_m}$  (voir figure 6.4). La comparaison des deux séries calculées avec les  $K_{off_m}$  et les nouveaux  $\bar{K}_m$  devrait nous permettre de déterminer l'influence d'une modification des facteurs K sur les séries de température.

#### *Lugano (figure 6.11)*

Les nouveaux  $\bar{K}_m$  ont été utilisés pour le calcul des moyennes mensuelles de la période 1971 - 1980 (moyenne  $T_{maK_n}$ , graphique inférieur de la figure 6.11). Les périodes précédentes (1961 - 1970) et suivantes (1981 - 1990) restent inchangées et sont identiques pour les deux graphiques. Pour ces deux périodes, les différences entre les deux courbes sont dues à l'écart moyen  $\bar{Z}_m$  (2.11) qui se calcule sur toute la période. Ces deux courbes ne sont donc pas basées sur la même référence, ce qui en complique la comparaison. Les deux courbes de sommes cumulées présentent évidemment d'autres inhomogénéités, probablement en partie inhérentes à l'automatisation des stations (par exemple entre 1977 et 1980). Néanmoins, on remarque que la cassure de 1971, nettement visible avec les  $K_{off_m}$  (moyenne  $T_{maK}$ , graphique supérieur de la figure 6.11), s'est en partie résorbée. Les écarts entre les deux courbes sont faibles, et surtout, la fracture causée par le passage de  $T_{maK}$  à  $T_{m24}$  (en 1981) est difficile à interpréter. La diminution des écarts moyens entre  $T_{maK}$  et  $T_{m24}$ , absolument visible dans la simulation du chapitre précédent, est très difficilement discernable dans la réalité. Le signal provoqué par la modification des facteurs K est noyé par d'autres inhomogénéités ou par d'autres facteurs dus à la distance entre les deux stations.

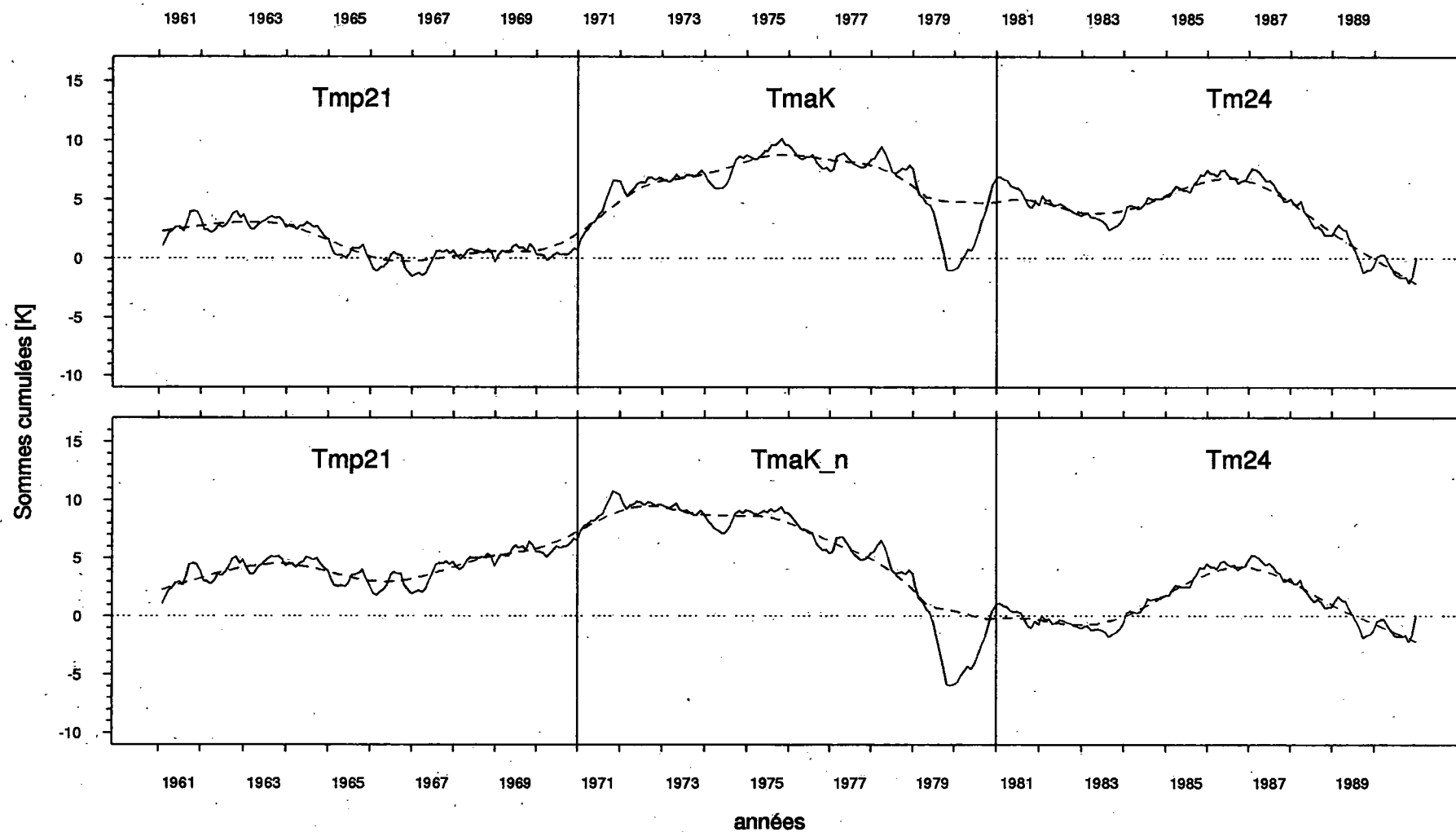


fig. 6.11 Sommes cumulées  $sc$  (2.13) des différences mensuelles  $d_i$  (2.12) entre Lugano et Locarno - Magadino calculées avec les facteurs  $K$  officiels (TmaK, en haut) et avec les nouveaux facteurs  $K$  (TmaK\_n, en bas). Période 1961 - 1990.

Bâle - Binningen (figure 6.12)

Bien que les nouveaux  $\bar{K}_m$  diffèrent plus des facteurs K spécifiques à la station ( $K_{sm}$ ) que les  $K_{off_m}$ , les écarts entre les deux courbes sont imperceptibles. Il est intéressant de constater que même l'utilisation des  $K_{sm}$  de la station ne fait qu'adoucir légèrement la discontinuité. Comme dans le cas des différences entre Lugano et Locarno - Magadino, il est possible que d'autres inhomogénéités jouent également un rôle et atténuent ou accentuent la discontinuité provoquée par le passage de Tmp21 (2.1) à TmaK (2.4).

#### 6.1.3.4 Conclusions

Ces résultats nous permettent de tirer les conclusions suivantes du contrôle des facteurs K:

Dans l'ensemble, une nouvelle détermination des facteurs K qui respecte les groupes définis par Schüepp ne se justifie pas. Mises à part certaines exceptions, les différences entre les facteurs K officiels et ceux qui ont été déterminés ici sont faibles. Et même pour le sud des Alpes, où les nouveaux facteurs K apportent, dans le cas de Lugano, une diminution de l'écart moyen entre la moyenne TmaK et la moyenne sur 24 heures Tm24 de l'ordre de 0.2 K, la modification est quasiment imperceptible sur les séries longues. Ce dernier phénomène est causé non seulement par les autres inhomogénéités, contenues aussi bien dans la série à étudier que dans la série de référence, mais également par le fait que nous avons calculé les facteurs K sur une période de 10 ans et que nous les appliquons ensuite pour des mois pris individuellement et, de plus, sur une autre période. Nous avons vu, au chapitre 5.2.8, que la variation annuelle des écarts mensuels atteint environ 0.2 K. Avec une diminution de 0.2 K des écarts mensuels moyens, nous restons en fait dans le «bruit» inhérent à cette moyenne, et il est donc logique que l'amélioration constatée à l'aide des écarts moyens ne soit pas perceptible sur les séries temporelles.

Des facteurs K améliorés ne permettent pas de corriger les extrêmes aberrants. L'idéal serait probablement des K déterminés non pas pour chaque station (l'exemple de Bâle démontre que le gain n'est pas significatif), mais pour certains types de temps. Cette solution n'est évidemment que difficilement ou même pas du tout réalisable dans la pratique.

Toutefois, au vu des similitudes entre certains groupes de facteurs K et de la composition hétérogène d'autres groupes et considérant la faible incidence d'une amélioration des facteurs d'un groupe ou d'une station sur les séries temporelles de cette station, il nous semble opportun de proposer un remodelage, qui devrait tendre vers une simplification des critères de détermination des groupes de facteurs K. Köppen était d'ailleurs arrivé à des conclusions semblables en relevant que "*Im Allgemeinen sind die Verschiedenheiten zwischen den einzelnen Orten überraschend klein und gesetzmässig vertheilt, wodurch die Unsicherheit über die Grösse des Faktors resp. über die Wahl einer Normalstation für die Reduktion einer gegebenen Beobachtungsreihe in erfreulicher Weise eingeschränkt wird*" (Köppen, 1988:346). Il est vrai que Köppen s'est principalement basé sur 5 stations du nord de l'Europe et n'a pas dû faire face aux importants contrastes climatiques des régions alpines.

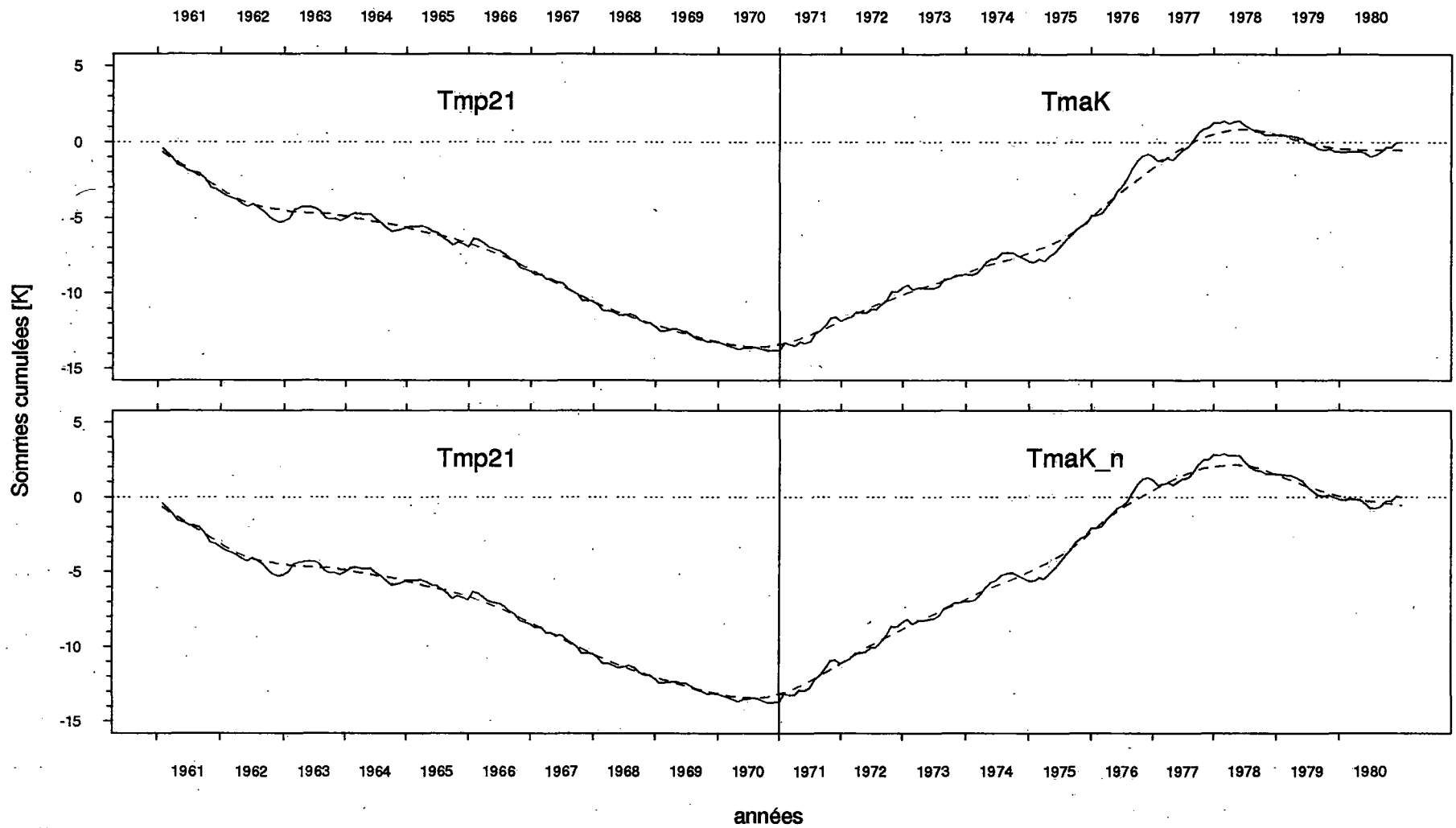


fig. 6.12 Sommes cumulées sc (2.13) des différences mensuelles  $d_i$  (2.13) entre Bâle - Binningen et Bâle - Mulhouse calculées avec les facteurs K officiels (TmaK, en haut) et avec les nouveaux facteurs K (TmaK\_n, en bas). Période 1961 - 1980.

Le prochain chapitre présente une nouvelle clef de détermination des groupes de facteurs K.

## 6.2 Propositions pour une nouvelle régionalisation des facteurs K

### 6.2.1 Problématique

Nous avons vu, au chapitre 6.1.1, que la régionalisation des facteurs K a été effectuée par Schüepp, non pas d'après les données elles-mêmes, mais d'après des critères climatologiques généraux. Malgré une quantité de données suffisante (34 stations durant 10 ans), il ne nous a pas été possible de reconstituer la régionalisation selon Schüepp. Notre approche, qui consiste à regrouper les stations possédant la même courbe annuelle de facteur K, produit une multitude de petits groupes, ne répondant à aucun critère défini et, de plus, absolument hétérogènes du point de vue climatologique. En fait, il faudrait probablement établir, non pas une régionalisation, mais des classes qui tiennent compte de la situation et de l'exposition de la station et varient selon les saisons. Cette opération, certes réalisable, va à l'encontre de notre volonté de simplification et de transparence. L'autre solution, que nous avons également explorée, consiste à calculer des facteurs K mensuels uniques, communs à toutes les stations. Ces K uniques produisent des résultats acceptables, les écarts moyens étant, en règle générale, légèrement plus importants qu'avec les K officiels. Entre ces deux solutions extrêmes, nous avons choisi un compromis qui satisfait notre désir de simplification tout en respectant certaines particularités climatiques du réseau climatologique.

### 6.2.2 Résultats

Notre approche est semi-empirique. Elle se base sur les écarts entre les facteurs K de chaque station ( $K_{sm}$ ) et les nouveaux facteurs K de chaque groupe ( $\bar{K}_m$ ) tels qu'ils sont présentés au chapitre 6.1.3.1 (figure 6.4, 6.6 et 6.8) ainsi que sur des connaissances générales de la climatologie de la Suisse. Conformément à l'approche décrite au chapitre 6.1.2.2, nous déterminons d'abord un facteur  $K_m$  moyen pour chaque nouveau groupe ( $\bar{K}_{g_m}$ ). La représentation graphique des écarts  $\Delta\bar{K}_{g_m}$  entre les  $K_{sm}$  (6.5) et les  $\bar{K}_{g_m}$  des nouveaux groupes nous permet d'apprécier l'homogénéité du groupe.

Nous avons formé un ensemble de 5 groupes répartis en 3 régions (anciennement 4) et 2 classes selon l'altitude. Nous ne tenons plus compte de l'exposition. Ils sont définis comme suit:

#### *Groupe no. I (figure 6.13)*

Ce groupe réunit les régions no. 1 et 3 selon Schüepp et comprend toutes les stations du nord des Alpes et du nord et centre des Grisons situées en dessous de 800 m d'altitude. Les faibles écarts entre ces deux régions nous autorisent à les rassembler en un seul groupe.

#### *Groupe no. II (figure 6.4)*

Pas de changement par rapport à l'ancienne classification. Cette région regroupe les stations valaisannes situées en dessous de 800 m. Le cas de Visp a déjà été discuté précédemment. L'échantillonnage de ce groupe est un peu maigre pour calculer des facteurs K valables pour toute la région.

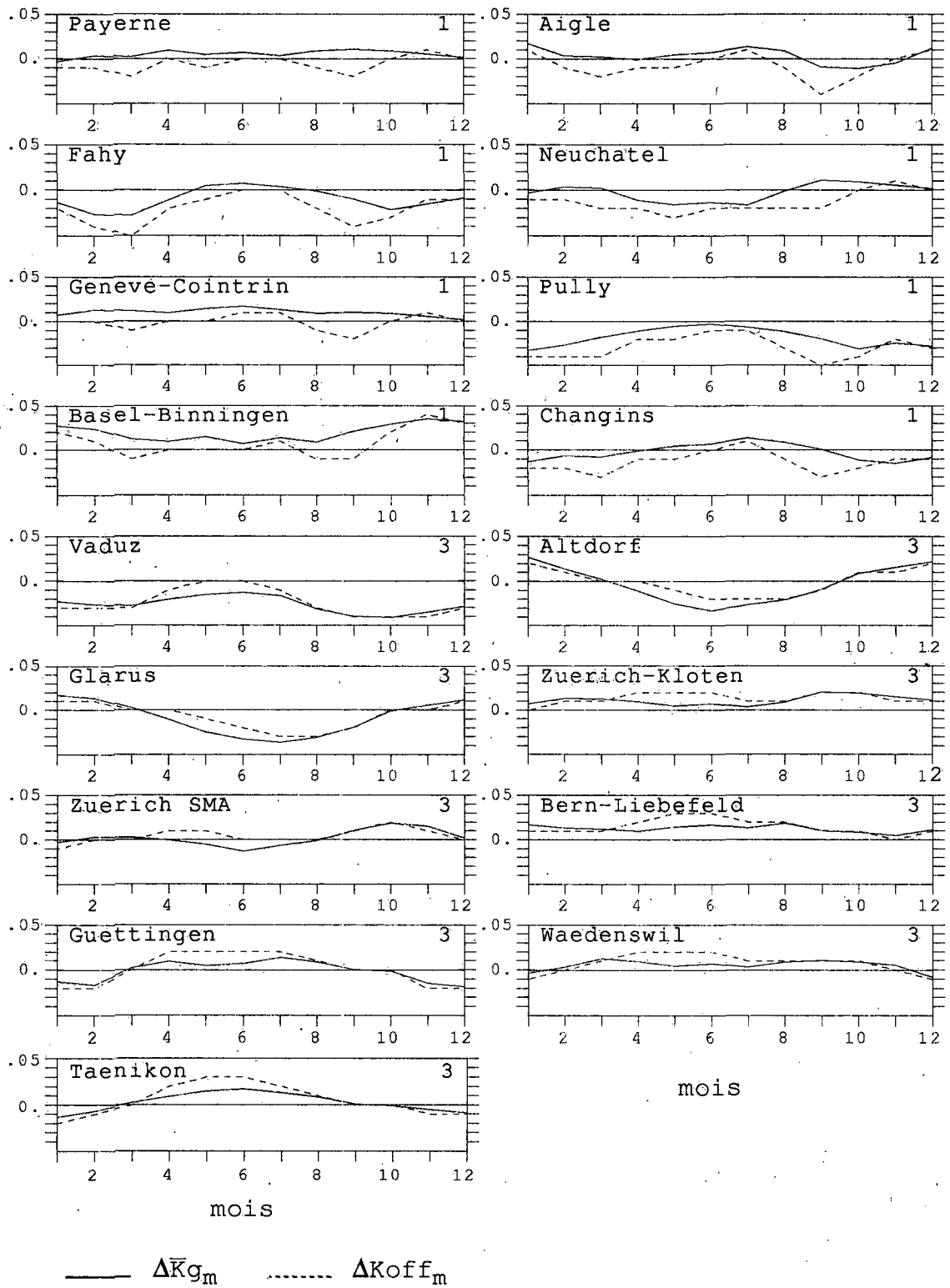
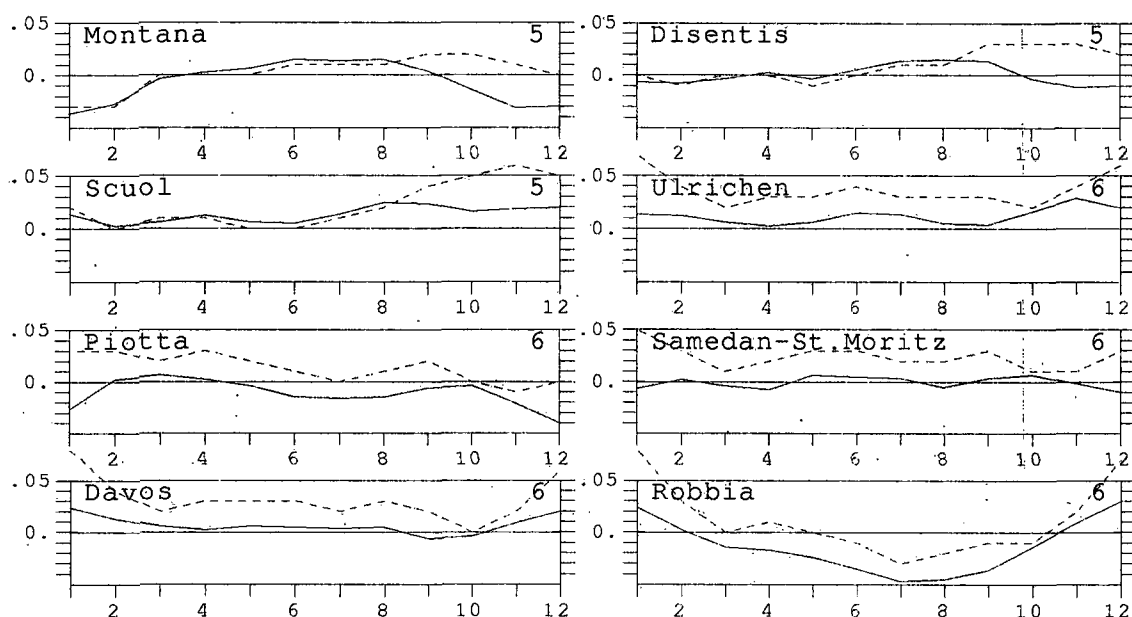


fig. 6.13 Groupe no. I. Ecart mensuels entre les valeurs K déterminées pour chaque station ( $K_{sm}$ ) et la moyenne des  $K_{sm}$  du groupe ( $\Delta\bar{K}_{g_m}$ ) et entre  $K_{sm}$  et les K officiels de l'ancien groupe ( $\Delta K_{off_m}$ ). Le chiffre à droite de chaque graphique correspond au groupe officiel selon Schtepp.



**fig. 6.14** Groupe no. IV. Ecart mensuels entre les valeurs  $K$  déterminées pour chaque station ( $K_{sm}$ ) et la moyenne des  $K_{sm}$  du groupe ( $\Delta\bar{K}_{gm}$ ) et entre  $K_{sm}$  et les  $K$  officiels de l'ancien groupe ( $\Delta K_{off_m}$ ). Le chiffre à droite de chaque graphique correspond au groupe officiel selon Schüepp. Légende voir figure 6.13

*Groupe no. III (figure 6.6)*

Anciennement région no. 4. Comprend les stations du sud des Alpes situées en dessous de 800 m. Ce groupe est particulièrement homogène.

*Groupe no. IV (figure 6.14)*

Comprend les groupes no. 5 et 6 selon Schüepp et inclut toutes les stations situées entre 800 et 2200 m d'altitude sans tenir compte de leur exposition. Nous avons éliminé la station La Frêtaz de ce groupe. Cette station présente un comportement trop différent des autres stations du groupe. De plus, n'ayant jamais été exploitée comme station conventionnelle, elle ne nécessite pas l'emploi de la moyenne  $T_{maK}$ . Ce groupe comprend principalement des stations situées dans les vallées alpines. Mise à part La Frêtaz, notre collectif ne comprend aucune station jurassienne se trouvant dans cette fourchette d'altitudes. Il est tout à fait possible qu'il soit en fait nécessaire de créer un groupe pour les stations extra-alpines situées entre 800 et 2200 m d'altitude.

*Groupe no. V (figure 6.15)*

Anciennement groupe no. 7. Comprend les stations situées au-dessus de 2200 m ainsi que toutes les stations sommitales. L'examen attentif des stations du groupe no. 6 démontre que La Dôle, station sommitale située à 1700 m, présente les mêmes caractéristiques que des stations se trouvant à des altitudes plus élevées. A notre sens, il convient donc de modifier le groupe no. 7 en y adjoignant les stations sommitales se trouvant en dessous de 2200 m. Comme pour le groupe no. IV, notre collectif de 34

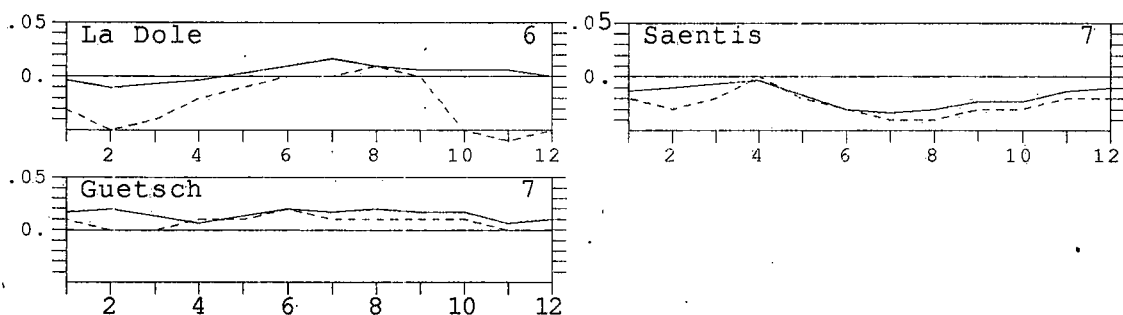


fig. 6.15 Groupe no. V. Ecart mensuels entre les valeurs K déterminées pour chaque station ( $K_{sm}$ ) et la moyenne des  $K_{sm}$  du groupe ( $\Delta\bar{K}_{gm}$ ) et entre  $K_{sm}$  et les K officiels de l'ancien groupe ( $\Delta K_{off_m}$ ). Le chiffre à droite de chaque graphique correspond au groupe officiel selon Schüepp. Légende voir figure 6.13

stations ne nous permet pas de fixer de limites d'altitude inférieures pour les stations sommitales.

### 6.3 Conclusions et critiques des résultats

Cette nouvelle régionalisation des groupes de facteurs K a pour principale qualité de réduire à cinq le nombre de groupes nécessaires à la classification des stations du réseau climatologique. Par contre, comme elle est basée sur une approche semi-empirique faisant appel à des connaissances qui ne sont pas liées directement à cette problématique, rien ne nous permet de la justifier ou de la préférer à l'ancienne régionalisation de Schüepp. En fait, nous aurions tout aussi bien pu proposer un nombre de groupes encore plus restreint ou même un groupe unique.

L'opération de contrôle des facteurs K a démontré la faible incidence d'une amélioration des facteurs K d'un groupe ou d'une station sur les séries temporelles de température. De plus, elle nous a permis de prouver que des facteurs K, déterminés il y a 20 ans d'après un nombre limité de stations, s'avèrent parfaitement utilisables et ne nécessitent, au pire, que de modestes corrections.

Finalement, toutes ces constatations démontrent la robustesse de la moyenne journalière TmaK. Si on l'affecte à l'usage pour lequel elle a été créée, c'est-à-dire le calcul des moyennes mensuelles, les valeurs des facteurs K ou l'attribution d'une station à un groupe plutôt qu'à un autre important peu. Comme nous l'avons vu au chapitre 6.1.3.4, cette caractéristique de la moyenne TmaK a été observée par Köppen il y a plus d'un siècle!

Notre collectif de 34 stations, réparties de manière inégale, tant horizontalement que verticalement, constitue une des principales faiblesses de toute l'opération de contrôle des facteurs K. Malgré les constatations énumérées ci-dessus, il n'est pas impossible qu'une plus forte représentation de certaines régions (en particulier le Jura et les altitudes basses du Valais) permettent une meilleure compréhension des différences régionales.



## CONCLUSIONS GENERALES

Ce chapitre résume d'abord les conclusions de chaque chapitre et tire les conséquences générales de cette étude. A partir des profondes modifications subies par le réseau climatologique de l'ISM durant ces vingt dernières années, et plus particulièrement des modifications du mode de calcul de la température journalière moyenne, nous avons étudié plusieurs méthodes de calcul de la température journalière moyenne. Ce travail, motivé par la perspective d'une homogénéisation de la période climatologique 1961 - 1990, avait pour but d'établir une base de connaissances nécessaires, d'une part à l'homogénéisation de cette période climatologique à l'aide de méthodes classiques, d'autre part au développement d'une approche déterministe de l'homogénéisation des séries de température.

### 7.1 Résumé des conclusions des chapitres précédents

#### *Méthodes*

1. L'approche utilisée ici, basée sur la simulation des heures d'observation à l'aide de moyennes horaires, s'est avérée particulièrement flexible et suffisamment précise pour cet usage. La période de dix ans nous semble également adaptée à notre problématique. Les écarts moyens calculés sur dix ans sont certainement comparables avec des écarts déterminés sur une période plus longue. Une statistique des passages frontaux plus détaillée et plus étendue nous aurait permis de décrire avec plus de précision la relation situations météorologiques - écarts journaliers.

#### *Ecarts annuels moyens*

2. Les écarts annuels sont, pour les deux moyennes utilisées par l'ISM (T<sub>mp21</sub> et T<sub>maK</sub>) et pour toutes les stations, inférieurs à 0.2 K.
3. La moyenne T<sub>mA</sub>, utilisée par les services météorologiques autrichiens, et la moyenne des extrêmes T<sub>mMm</sub>, produisent des différences annuelles plus importantes allant jusqu'à 0.4 K. Les écarts entre les stations sont également sensiblement plus élevés (jusqu'à 0.5 K).

#### *Ecarts mensuels moyens*

4. Les écarts restent faibles, voir insignifiants pour les moyennes T<sub>mp21</sub>, T<sub>maK</sub> et T<sub>mA</sub>. La moyenne T<sub>mMm</sub> produit par contre des différences mensuelles moyennes pouvant atteindre 1.0 K.
5. Les écarts mensuels de T<sub>mp21</sub>, T<sub>maK</sub> et T<sub>mA</sub> varient très peu d'une année à l'autre. Ils sont donc représentatifs et pourraient être utilisés comme base de réduction pour l'homogénéisation de séries de température. La variation annuelle des écarts de la moyenne T<sub>mMm</sub> est par contre très importante. Ces écarts moyens nous semblent donc difficilement utilisables pour l'homogénéisation d'une série de température.

#### *Influences locales*

6. Chaque station possède sa propre courbe de différences mensuelles. Certains facteurs locaux, telles l'exposition ou la topographie locale, permettent d'expliquer une partie des différences entre les stations lors de situations convectives. Malheureusement, il nous est difficile, sur le base de cinq stations uniquement, de justifier

l'utilisation de ces écarts mensuels moyens comme base de réduction pour d'autres stations suisses ou étrangères.

### *Écarts journaliers*

L'approche, sur une base journalière, des différences entre les méthodes de calcul de la température journalière moyenne et la moyenne sur 24 heures  $T_{m24}$ , a démontré leur importante variabilité journalière. Face au comportement apparemment aléatoire de ces différences, l'étude a été concentrée sur les écarts importants, c'est-à-dire supérieurs, respectivement inférieurs à  $\pm 0.8$  K. Les autres écarts sont considérés comme un bruit inhérent à toute approximation.

7. A l'exception de  $T_{maK}$ , toutes les moyennes présentent une forte variabilité journalière.
8. Il n'y a pas de relation entre les écarts mensuels moyens et la variabilité journalière. La moyenne pondérée  $T_{mp21}$  présente des écarts moyens très faibles, mais une forte variabilité, alors que la moyenne arithmétique  $T_{ma21}$  occasionne des écarts moyens importants pour une variabilité moindre.
9. Près de 80% des écarts importants de chaque moyenne peuvent être expliqués par les trois types de temps définis.
10. Au niveau de la réaction à un certain type de temps, il n'y a pas de grandes différences entre les stations. Elles sont dues principalement à la fréquence d'un certain type de temps et non aux influences locales décrites plus haut.

### *Contrôle des facteurs de correction K*

L'opération de contrôle des facteurs K de la formule  $T_{maK}$  a permis de tirer les conclusions suivantes:

11. Il est possible de simplifier l'actuelle classification des facteurs K. Cette nouvelle régionalisation, effectuée, comme l'ancienne, sur une base climato-géographique, a pour principal avantage de ne comprendre que cinq groupes, au lieu de sept pour l'ancienne classification.
12. La moyenne  $T_{maK}$  est particulièrement robuste quant au choix des facteurs K. L'attribution d'une station à un groupe plutôt qu'à un autre importe peu.

## 7.2 Conséquences

Une homogénéisation des séries de moyennes mensuelles de la température d'après les écarts mensuels moyens est tout à fait réalisable. Par contre, l'homogénéisation des moyennes journalières d'après les écarts mensuels moyens ne peut se justifier. La variabilité des écarts journaliers par rapport aux écarts moyens est trop importante (Paesler, 1983:5).

Selon les conclusions ci-dessus, particulièrement d'après les points 9 et 10, une homogénéisation des moyennes mensuelles, fondée sur une approche déterministe, et non sur une approche statistique, est théoriquement possible. Une telle approche, postulée par plusieurs auteurs (voir chapitre 2.7.3), devrait être basée sur la correction des jours présentant des écarts extrêmes. En raison du caractère aléatoire des écarts compris entre  $-0.8$  K et  $+0.8$  K, la correction de tous les autres jours ne se justifie pas d'un point de vue climatologique. Cette méthode devrait permettre l'homogénéisa-

tion des séries de moyennes mensuelles de la température ayant subi un changement de la méthode de calcul de la température journalière moyenne. Cette homogénéisation des moyennes mensuelles devrait s'effectuer uniquement par la correction des jours présentant des écarts extrêmes, et non par l'homogénéisation de toutes les moyennes journalières.

Une méthode déterministe aurait (théoriquement) plusieurs avantages par rapport aux méthodes classiques basées sur la constance des différences entre deux ou plusieurs stations:

1. Universalité. Elle peut être utilisée pour un grand nombre de stations.
2. Automatisation. Il est tout à fait concevable d'automatiser la localisation et la correction des jours présentant des écarts importants.
3. Transparence. Elle ne dépend pas de l'expérience de la personne chargée du travail d'homogénéisation, mais de critères objectifs.

Sa réalisation présente cependant de nombreuses difficultés. Nous avons établi les correspondances entre les écarts journaliers et les types de temps à l'aide des nombreux paramètres mesurés par le réseau ANETZ. Or, cette méthode est destinée à l'homogénéisation d'un réseau conventionnel, où l'on effectue trois observations quotidiennes sans utiliser des instruments automatiques. Il n'est donc pas possible d'utiliser les critères définis au chapitre 5.4.1.2 pour localiser les passages frontaux par exemple. Nous avons vu, tout au long du chapitre 5, que les écarts entre une moyenne journalière et la moyenne sur 24 heures dépendent de la forme de la courbe journalière de température. Cette méthode ne devrait donc pas uniquement se baser sur des paramètres météorologiques, mais principalement sur la forme de la courbe journalière de température. Ceci d'autant plus que nous avons vu au chapitre 5.4.1.2 que la localisation automatique d'un passage frontal sur une station n'est pas très aisée.

### 7.3 Perspectives

Au cours d'une tentative de développement d'une méthode déterministe d'homogénéisation des séries temporelles de température, nous avons eu la possibilité d'explorer diverses voies pouvant mener à un résultat concret. Pour des raisons de temps et également à cause de la complexité des problèmes à résoudre, cette tentative n'a pu être menée à son terme. Nous sommes malgré tout d'avis que cette méthode est réalisable.

Au cours de cette tentative, il s'est avéré que la difficulté majeure de cette méthode réside dans la localisation automatique des jours qui présentent des écarts extrêmes. La correction de ces jours, effectuée à l'aide d'un spline cubique, ne présente aucune difficulté majeure. Une fonction spline, appuyée sur les heures d'observation du jour à corriger ( $j$ ) et des deux jours précédents et suivants permet de calculer les 24 valeurs horaires du jour  $j$ , et donc de remplacer la moyenne journalière à l'origine de l'écart important par une moyenne sur 24 heures.

La localisation des jours qui présentent des écarts extrêmes, jusqu'ici uniquement basée sur la forme de la courbe journalière, pourrait éventuellement être facilitée par l'adjonction de paramètres météorologiques et, pourquoi pas, par l'emploi d'un système expert. Quoiqu'il en soit, la reconnaissance automatique de la forme d'une courbe journalière de température reste une tâche éminemment complexe.

- ADOC - 4f. Description générale des capteurs. Zurich : Institut suisse de météorologie, 1980
- Allisow, B.P.; Drosdow, O.A.; Rubinstein, E.S. Lehrbuch der Klimatologie. Berlin : Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1956
- Anderson, Tage; Mattisson, Ingemar. A field test of thermometer screens. In : Reports meteorology and climatology, Nr. 62, Swedish meteorological and hydrological institute, 1991
- Archives des Sciences. Modifications de la publication mensuelle des observations météorologiques de Genève et du Grand Saint-Bernard. In : Arch. Sci. Phys. , 5e période, 11, 1929, p. 111-112
- Backer, Donald G. Effect of observation time on mean temperature estimation. In : J. Appl. Meteor., 14, Nr. 4, 1975, p. 471-476
- Brook, C.E.P. True mean temperature. In : Mon. Weather Rev., 49, No 4, 1921, p. 226-229
- Collison, P.; Tabony, R.C. A comparison of daily maximum and minimum temperatures with the highest and lowest of 24 hourly observations. In : Met. Mag., 113, 1984, p. 337-342
- Collison, P.; Tabony, R.C. The estimation of mean temperature from daily maxima and minima. In : Met. Mag., 113, 1984, p.329-337
- Craddock, J.M. Methods of Comparing annual Rainfall Records for Climatic Purposes. In : Weather, 34, 1979, p. 332-346
- Dale, Robert F.; Schall, Lawrence A. Time of observation temperature bias and "climatic change". In : J. App. Meteor., 16, No. 3, 1977, p. 215-222
- Donnel, C.A. The effect of the time of observation on mean temperatures. In : Mon. Weather Rev., 40, No 5, 1912, p.708
- Dössegger, R; Moser, W. Methodenvergleich Tagesmittelbildung bei Temperatur und Feuchtigkeit. Charan-Doc 3, Schweizerische Meteorologische Anstalt, 1983.
- Dössegger, R. et al. Thygan Benutzerinformationen und -erfahrungen. Beiträge zum Kollokium "Automatische Messnetze SMA" vom 22. Mai 1992 in Zürich. Arbeitsbericht der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Nr. 170, 1992
- Ekholm, Nils. Calcul de la température moyenne mensuelle de l'air aux stations météorologiques suédoises. In : Appendice aux observations météorologiques suédoises, 56, 1914, 110 p.

- Ellis, William. On the difference produced in the mean temperature derived from daily maximum and minimum, as depending on the time at which the thermometers are read. In : Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 16, 1890, p.213-220
- Gisler, Othmar. Untersuchung zur Uebereinstimmung von Messungen der Klimaelemente Lufttemperatur, Luftdruck und relativer Luftfeuchtigkeit mittels herkömmlicher Ablesung der Instrumente und automatisch erfasster Daten. Arbeitsbericht der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Nr. 171, 1992
- Gygax, Hans Adrian. Das regionale Windfeld über komplexer Topographie und sein Einfluss auf den Tagesgang der Temperatur und einer Auswahl von Spurengasen in der planetaren Grenzschicht. Dissertation ETH-Zürich, 1985
- Hajósy, Franz. Zur einfachsten Bestimmung des Tagesmittel der Temperatur mit Hilfe der Extreme. In : Zeitschrift für angewandte Meteorologie, 49, No 9, 1932, S. 281-285
- Hartzell, F.Z. Comparison of methods for computing daily mean temperatures: Effect of discrepancies upon investigations of climatologists and biologists. In : Mon. Weather Rev., 47, No 11, p. 799-801
- Hellman, G. Ueber die Kämtz'sche Formel  $\frac{1}{4}(7+2+2*9)$  zur Berechnung der mittleren Tagestemperatur. In : Bericht über die Tätigkeit des Königlich Preussischen Meteorologischen Instituts im Jahre 1914, S. (15)-(21). (Veröffentlichungen des Königlich Preussischen Meteorologischen Instituts, Nr. 284, 1915)
- Hoaglin, David C.; Mosteller, Frederick; Tuckey, John W. Understanding robust and exploratory data analysis. 447 p. New-York : Wiley and Sons, 1983
- ISM. 100 ans Institut suisse de météorologie. Zurich : Institut suisse de météorologie, 1981
- Junge, Christof. Mitteilung zur Tagestemperaturmittelbildung. In : Z. Meteorol., 39, No 4, 1989, S. 231-233
- Junghans, Horst. Die Genauigkeit von Temperaturmitteln aus Terminwerten. In : Z. Meteorol , 20, Heft 7/8, 1968, S. 242-247
- Karl, Thomas R.; Williams, Claude N. An Approach to adjusting Climatological Time Series for Discontinuous Inhomogeneities. In : Tenth Conference on Probability and Statistics in Atmospheric Sciences: Preprints. Boston : American Meteorological Society, 1987, p. 169-177
- Kaemtz, Ludwig Friedrich. Lehrbuch der Meteorologie. Halle : Gebauer, 1831
- Köppen, W. Ueber die Ableitung wahrer Tagesmittel aus den Beobachtungsstunden 8h a.m., 2h p.m. und 8h p.m. In : Ann. Hydr., 16 , 1888, S. 341-354

- Krammer, Martin. Vergleich verschiedener Methoden, ein Temperaturmittel zu berechnen. In : Wetter und Leben, 28, Heft 2, 1976, S. 111-115
- Lingelbach, E. Vom Messnetz der Societas Meteorologica Palatina zu den weltweiten Messnetzen heute. In : Annalen der Meteorologie, 16, 1980, S. 1-9
- McGill, Robert; Tukey, John W.; Wayne A. Larsen. Variations of Box Plots. In : Am. Stat., February 1978, 32, No.1, p. 12-16
- Mitchel, J. Murray. On the causes of instrumentally observed secular temperature trends. In : J. Meteor., 10, 1953, p. 244-261
- Mitchel, J. Murray. Effect on changing observation time on mean temperature. In : Bull. Amer. Meteor. Soc., 39, No. 2, 1958, p. 83-89
- Mohn, H. Jahrbuch des Norwegischen Meteorologischen Instituts, 1884
- Müller, G. Vergleich der Temperaturen verschiedener Wetterhütten an einigen Stationen des Anetzes. Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, No. 119, 1984
- Nichols, E.S. Time Limits of the day as affecting records of minimum Temperature. In : Mon. Weather Rev., 62, No. 9, 1934, p. 337-343
- Paesler, M. Homogenisierung. In : Promet 1/2, 1983, S. 3-7
- Plantamour, E. Du climat de Genève. 208 p. Genève: Georg, 1863
- Richner, Hans; Phillips, Peter D. A comparison of temperatures from mountaintops and the free atmosphere: Their diurnal variation and mean difference. In : Mon. Weather Rev., 112, No. 7, 1984, p. 1328-1340
- Reuter, H. Zur Frage der Erfassung des Temperaturtagesganges durch eine diskrete Anzahl von Beobachtungen. In : Arch. Met. Geoph. Biokl., Serie B, 28, No. 3, 1980, S. 237-241
- Rumbaugh, W.F. The effect of time of observation on mean temperature. In : Mon. Weather Rev., 62, No. 10, 1934, p. 375-376
- Ruppert, Paul. THYGAN: Beschreibung der Funktion und der Technik. Arbeitsbericht der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Nr. 164, 1991
- Schönwiese, Christian-Dietrich. Nicht-Stationarität oder Inhomogenität? Ein Beitrag zur statistischen Analyse klimatologischer Zeitreihen. In : Wetter und Leben, 37, 1985, S. 181-193
- Schouw, Joakim Frederik. Grundzüge einer allgemeinen Pflanzengeographie. Berlin : Relmer, 1823

- Schreiber, Paul. Zur Frage der Herleitung wahrer Tagesmittel der Lufttemperatur aus drei- resp. viermaligen Beobachtungen. In : *Meteorologische Zeitschrift*, 5. Jhrg. 1888, S. 259-269
- Schreiber, Paul. Untersuchung über die Genauigkeit der Tages-, Monats-, und Jahresmittel aus den temperaturbeobachtungen für die drei Stundenkombinationen: 6a-2p-10p, 8a-2p-8p, 7a-2p-9p. In : *Met. Zs.*, Hann-Band, 1906, S. 40-59
- Schreiber, Paul. Ueber die Herleitung von Tagesmitteln der Lufttemperatur aus den Terminbeobachtungen. In : *M. Zs.*, 33, Heft 7, 1916, S. 306-309
- Schüepp, Max. *Witterungsklimatologie. Klimatologie der Schweiz*, Bd. III. Zürich, Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, 1979
- Schüepp, Max. Methoden und Probleme der Bebearbeitung langjähriger meteorologischer Beobachtungsreihen. In : *Das Klima, Analysen und Modelle, Geschichte und Zukunft*. Hrsg. von H.Oeschger et al. Berlin : Springer, 1980
- Siogas, Leonidas. Vergleich von Temperaturmittelbildungen mit dem wahren Mittel für das Observatorium Innsbruck-Universität. In : *Wetter und Leben*, 24, 1972, s. 17-22
- Süring, R. *Hann-Süring : Lehrbuch der Meteorologie*, Bd. 1. Leipzig : W. Keller, 1939
- Tabony, R.C. The estimation of mean temperature from daily maxima and minima. In : *Met. Mag.*, 113, 1984, p. 329-337
- Tuckey, John W. *Exploratory data analysis*. 446 p. Reading: Addison-Wesley, 1977
- Urfer, Charlotte. *Mittlere Temperatur- und Windverteilung im Dischmatal bei Davos*. Veröffentlichung der schweizerischen Meteorologischen Anstalt, No. 43, 1981
- Valko, Peter. Das kurzweilige Strahlungsfeld des Atmosphaere : Richtwert für Ingenieure und Architekten. In : *Schweizerische Blätter für Heizung und Lüftung*, 38 (1971): 121-126
- Valko, Peter. Some empirical properties of solar radiation and related parameters. In : *An introduction to meteorological measurments and data handling for solar energy applications / International Energy Agency*. Washington : U.S. Departementof Energy, 1980
- Velleman, Paul F.; Hoaglin, David C. *Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis*. 354 p. Boston : Duxbury Press, 1981
- Weilenmann, A. Ueber den täglichen Gang der Temperatur in Bern. In : *Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Central-Anstalt*, 1872, S. XXV-LIII



Won, Thorne K. The simulation of hourly global radiation from hourly reported meteorological parameters - Canadian Prairies area. In : Proceeding of the 3th. Conference, Canadian Solar Energy Society, 1977

World Climate Data Programme. Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. WCDP-No. 10, World Meteorological Organisation, 1989

World Climate Data Programme. CCL Working Group on Climate Data. WCDP-No. 18, World Meteorological Organisation, 1991

WMO. Guide du système mondial de traitement des données. World Meteorological Organisation, No. 305, Suppl No. 1 (VIII), 1985

Zelenka, A; Bantle, H; Lazic, D. Horizons apparents ainsi qu'arcs diurnes calculés et observés pour les héliomètres du réseau ANETZ de l'ISM. Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, No. 166, 1991

## EPILOGUE

Ce travail n'aurait pu voir le jour sans le soutien de deux institutions: Le Fonds national suisse pour la recherche scientifique qui a soutenu ce projet durant deux ans (de 1987 à 1989), et l'Institut Suisse de Météorologie (ISM) qui en a poursuivi le financement durant trois ans (de 1989 à 1992) et qui, surtout, a mis toutes les infrastructures (bureau, ordinateurs) à ma disposition. Elles ont droit à toute ma gratitude.

De nombreuses autres personnes m'ont également soutenu et apporté leur aide. Parmi elles, je tiens à remercier:

- Le Prof. Dr. G. Furrer de l'Institut de géographie de l'Université de Zurich, pour m'avoir offert la possibilité de réaliser ce travail, qui m'a redonné goût aux études et à la climatologie.
- Le Dr. W. Kirchhofer, chef de la section de climatologie de l'ISM, qui a suivi et dirigé ce travail, pour sa patience et la confiance qu'il m'a accordée.
- Les Dr. Max Schüepp et Gian Gensler, co-initiateurs du projet du Fonds national, qui ont guidé mes premiers pas à l'ISM et ont toujours été prêts à me dépanner.
- Heinz Bantle, informaticien de la section de climatologie de l'ISM, qui m'a initié aux joies du FORTRAN et du NOS-VE, pour son aide et sa disponibilité de tous les instants.
- Le Dr. Antoine Zelenka, pour les intéressantes discussions et les précieux conseils qu'il m'a prodigués.
- Christian Häberli pour le graphique de la page 69 et les innombrables discussions et autres «disputes» climatologiques.
- Jean Mamie pour son précieux travail de lecture et de correction.

Et pour terminer, un merci tout particulier à ceux qui me sont proches et qui ont dû supporter les périodes de découragement. Isabelle pour son soutien affectif, moral et matériel, et qui a eu le courage de relire et corriger ce texte. Notre fils Numa, qui me rappelle tous les jours que les aspects véritablement intéressants de la vie sont souvent passablement éloignés de la climatologie.

Adresse de l'auteur:  
Dr. André de Montmollin  
Institut Suisse de Météorologie  
Krähbühlstrasse 58  
CH-8044 Zürich

- Nr. 1a Uttinger H., Die Niederschlagsstunden in Zürich.  
22 Seiten, 1962
- Nr. 1b Ambrosetti Fl., Die Niederschlagsstunden in Locarno-Monti.  
12 Seiten, 1965
- Nr. 2 Thams J.C., unter Mitarbeit von A. Aufdermaur, P. Schmid und E. Zenone.  
Die Ergebnisse des Grossversuches III zur Bekämpfung des Hagels im  
Tessin in den Jahren 1957-1963.  
32 Seiten, 1966 (vergriffen)
- Nr. 3 Grütter M., Die bemerkenswertesten Niederschläge der Jahre  
1948-1964 in der Schweiz.  
20 Seiten, 1966
- Nr. 4 Schram K. und Thams J.C., [Redaktion], 9. Internationale Tagung für Alpine  
Meteorologie in Brig und Zermatt, 14.-17. September 1966.  
366 Seiten, 1967
- Nr. 5 Ambrosetti Fl. und Thams J.C., Die direkte Sonnenstrahlung auf die Flächen eines  
nach Süden orientierten Würfels ohne Grundfläche in Locarno-Monti.  
16 Seiten, 1967
- Nr. 6 Schram K. und Thams J.C., Der Tagesgang der Abkühlungs- und  
Aufwärmungsgrösse in Locarno-Monti.  
20 Seiten, 1968 (vergriffen)
- Nr. 7 Ambrosetti Fl., Schram K. und Thams J.C., Die Intensität der direkten  
Sonnenstrahlung in verschiedenen Spektralbereichen in  
Locarno-Monti.  
13 Seiten, 1968 (vergriffen)
- Nr. 8 Uttinger H., Die Zahl der Tage mit Windspitzen von mindestens  
20 Metern pro Sekunde in Zürich (1934-1967).  
22 Seiten, 1968
- Nr. 9 Mäder F., Untersuchung über die Windverhältnisse in Bodennähe  
bei verschiedenen Wetterlagen.  
42 Seiten, 1968
- Nr. 10 Schram K., Die Windverhältnisse in der bodennahen Luftschicht  
an einem Hang von etwa 25° Grad Neigung.  
13 Seiten, 1968 (vergriffen)
- Nr. 11 Schüepp M., Kalender der Wetter- und Witterungslagen von 1955 bis 1967.  
44 Seiten, 1968 (vergriffen)
- Nr. 12 Ackermann P., Die neue Radiosondenstation Payerne  
der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt.  
36 Seiten, 1968 (vergriffen)
- Nr. 13 Junod A., Contribution à la méthodologie granulométrique  
des aérosols amicroscopiques.  
70 Seiten, 1969
- Nr. 14 Joss J., Schram K., Thams J.C., Waldvogel A., Untersuchungen zur quantitativen  
Bestimmung von Niederschlagsmengen mittels Radar.  
37 Seiten, 1969 (vergriffen)
- Nr. 15 Courvoisier H.W., Die quantitative Niederschlagsprognose winterlicher  
zyklonaler Witterungslagen auf der Alpennordseite der Schweiz.  
15 Seiten, 1970 (vergriffen)

- Nr. 16 Schram Karin und Thams J.C., Die kurzwellige Globalstrahlung und die diffuse Himmelsstrahlung auf dem Flugplatz Zürich-Kloten.  
18 Seiten, 1970
- Nr. 17 Kasser P., Schram Karin und Thams J.C., Die Strahlungsverhältnisse im Gebiet der Baye de Montreux.  
46 Seiten, 1970
- Nr. 18 Gutermann Th., Vergleichende Untersuchungen zur Föhnhäufigkeit im Rheintal zwischen Chur und Bodensee.  
68 Seiten, 1970
- Nr. 19 Ginsburg Theo, Die statistische Auswertung von langjährigen Temperaturreihen.  
42 Seiten, 1970
- Nr. 20 Primault B., Du risque de gel et de sa prévision.  
20 Seiten, 1971
- Nr. 21 Piaget A., Utilisation de l'ozone atmosphérique comme traceur des échanges entre la troposphère et la stratosphère.  
72 Seiten, 1971
- Nr. 22 Zenone E., Die Gewitterverhältnisse in den südlichen Zentralalpen und Voralpen.  
24 Seiten, 1971
- Nr. 23 Kirchofer W., Abgrenzung von Wetterlagen im zentralen Alpenraum.  
72 Seiten, 1971
- Nr. 24 Primault B., Le climat, élément du plan d'aménagement.  
Das Klima, eine der Grundlagen der Landesplanung.  
The climate as an element of the land management.  
28 Seiten und eine Karte, 1971
- Nr. 25 Fröhlich C. und Wierzejewski, Die verschiedenen Messverfahren zur Bestimmung der Strahlungsintensität mit dem Kompensationspyheliometer und die Entwicklung eines verbesserten Modells.  
36 Seiten, 1972
- Nr. 26 Bouët M., Le foehn du Valais.  
12 Seiten, 1972
- Nr. 27 Zenone E., Die Gewitterverhältnisse in den südlichen Zentralalpen und Voralpen  
32 Seiten, 1972
- Nr. 28 Catzeflis J., Primault B., Strehler H., Analyse de la pluviosité dans le Valais central.  
15 Seiten, 1972
- Nr. 29 Courvoisier H.W., Die Niederschlagswirksamkeit markanter, hochreichender Kaltlufteinbrüche im Sommer in der Schweiz.  
11 Seiten, 1973
- Nr. 30 Sevruk B., Erfahrungen mit Totalisatoren mit schiefen, geneigten und bodenebenen Auffangflächen im Einzugsgebiet der Baye de Montreux.  
Einfluss der Temperatur auf die Messung des Niederschlages mit Totalisator.  
44 Seiten, 1973
- Nr. 31 Strehler H., Beziehung zwischen Witterung und Zuckerrübenmerkmalen im Spätsommer.  
20 Seiten, 1975
- Nr. 32 Courvoisier H.W., Katalog objektiv-statistischer Wetterprognosen für die Alpensüdseite und das Oberengadin.  
24 Seiten, 1975
- Nr. 33 Primault B., Essais d'évaluation climatologique du risque de gel.  
28 Seiten, 1975

- Nr. 34 Kirchhofer W., Stationsbezogene Wetterlagenklassifikation  
50 Seiten, 1976
- Nr. 35 Piaget A., L'évolution orageuse au nord des Alpes  
et la tornade du Jura vaudois du 26 août 1971  
114 Seiten, 1976
- Nr. 36 Bouët M., Contribution à l'étude de la variation diurne  
de pression en Suisse romande  
23 Seiten, 1976
- Nr. 37 Zenone E., Die Gewitterverhältnisse in den südlichen  
Zentralalpen und Voralpen  
60 Seiten, 1976
- Nr. 38 Primault B., Diagrammes psychrométriques  
Quiby J., différenciés en altitude  
36 Seiten, 1977
- Nr. 39 Courvoisier H. W., Katalog objektiv-statistischer Wetterprognosen  
für die Alpennordseite, das Wallis sowie  
Nord- und Mittelbünden  
58 Seiten, 1978
- Nr. 40 Gutermann Th., 15. Internationale Tagung für alpine Meteorologie,  
Mäder F. Grindelwald 19.-23. September 1978, 332 Seiten, 1978  
(Redaktion) Tagungsbericht 1. Teil
- Nr. 41 Gutermann Th., 15. Internationale Tagung für alpine Meteorologie,  
Mäder F. Grindelwald 19.-23. September 1978, 1979  
(Redaktion) Tagungsbericht 2. Teil
- Nr. 42 Courvoisier H. W., Starkniederschläge in der Schweiz in Abhängigkeit  
vom Druck-, Temperatur- und Feuchtefeld  
59 Seiten, 1981
- Nr. 43 Urfer Charlotte, Mittlere Temperatur- und Windverteilung im  
Dischmatal bei Davos bei typischen sommerlichen  
Witterungslagen  
32 Seiten, 1981
- Nr. 44 J.-D. Altherr, Prévision objective des hauteurs de précipitations  
M. Dupanloup, et de l'ensoleillement relatif au moyen de l'analyse  
Y. Ganter, discriminante  
E. Junet, 43 Seiten, 1982
- Nr. 45 Courvoisier H. W., Abgeschlossene Höhentiefs und ihre Wetter-  
auswirkungen in der Schweiz  
44 Seiten, 1984
- Nr. 46 Perret R., Une classification des situations météorologiques  
à l'usage de la prévision  
127 Seiten, 1987
- Nr. 47 Courvoisier H. W., Regionale Wetterauswirkung und Prognose von Staulagen in der Schweiz  
22 Seiten, 1988
- Nr. 48 Gutermann Th., 21. Internationale Tagung für alpine Meteorologie,  
Mäder F. Engelberg 17.-21. September 1990, 437 Seiten 1990  
(Redaktion) Tagungsbericht 1. Teil
- Nr. 49 Gutermann Th., 21. Internationale Tagung für alpine Meteorologie,  
Mäder F. Engelberg 17.-21. September 1990, 135 Seiten, 1991  
(Redaktion) Tagungsbericht 2. Teil
- Nr. 50 Defila C., Pflanzenphänologie der Schweiz,  
238 Seiten, 1991

- Nr. 51 Binder P., Aspects of precipitation simulation in numerical weather prediction  
Towards an operational mesoscale NWP model,  
148 Seiten, 1992
- Nr. 52 Brändli J., Niederschlag, Verdunstung und Wasserbilanz  
der Station Zürich SMA von 1901 bis 1990  
Monats-, Jahreszeiten- und Jahressummen, Mittelwerte,  
Verteilungen und Zeitreihen  
109 Seiten, 1993
- Nr. 53 de Montmollin A., Comparaisons de différentes méthodes de calcul  
de la température journalière dans leurs influences  
sur les longues séries d'observations  
144 Seiten, 1993