



Schweizerische Meteorologische Anstalt  
Institut suisse de météorologie  
Istituto svizzero di meteorologia  
Swiss Meteorological Institute

No. 175

**Application d'un filtre de Kalman pour adapter les  
températures à 2 mètres fournies par le modèle  
ECMWF aux stations météorologiques  
de la Suisse**

Daniel Cattani, Genève

Mai 1994

Arbeitsberichte der SMA  
Rapports de travail de l'ISM  
Rapporti di lavoro dell'ISM  
Working Reports of the SMI

© SMA, Publikationen, CH-8044 Zürich

Schweizerische Meteorologische Anstalt  
Krähbühlstrasse 58, Postfach  
CH-8044 Zürich

Tel. (01) 256 91 11, Fax (01) 256 92 78, Telex 81 73 73 met ch

## **Application d'un filtre de Kalman pour adapter les températures à 2 mètres fournies par le modèle ECMWF aux stations météorologiques de la Suisse**

**Daniel Cattani, Genève**

Mai 1994

### **Résumé**

Les modèles météorologiques utilisent des orographies très simplifiées voire non réalistes en ce qui concerne les Alpes. Il est donc évident que certaines valeurs fournies par ces modèles numériques s'éloignent des grandeurs observées, notamment en ce qui concerne les paramètres près du sol comme les températures à 2 mètres pour les régions situées à l'intérieur du relief alpin.

Un traitement statistique s'avère donc nécessaire pour éliminer le bruit statistique et les biais systématiques des valeurs en prévision afin de les adapter aux conditions locales.

L'outil statistique choisi a été le filtre de Kalman. L'atout de ce filtre est sa bonne adaptation suivant les spécificités des sites et des situations rencontrées. En effet les relations établies entre observations et prévisions sont automatiquement et continuellement mises à jour suivant les dernières performances des sorties du modèle choisi [1].

Dans cette étude un filtre de Kalman a été exploité dans le but de corriger les températures minimum et maximum fournies par le modèle européen ECMWF, pour une sélection de sites en Suisse et ceci pour des échéances jusqu'à 5 jours.

### **Zusammenfassung**

Modelle, die in der Meteorologie zur Vorhersage des Wetters verwendet werden, enthalten eine so stark vereinfachte Orographie, dass sie für die Alpen der Wirklichkeit nicht mehr entspricht. Demzufolge weichen die von diesen Modellen stammenden Resultate zwangsläufig von den tatsächlich beobachteten Grössen ab, besonders wenn es sich um bodennahe Parameter wie die Temperatur auf 2 m über Grund für inneralpine Regionen handelt. Darum ist es notwendig, die Modellresultate vom statistischen Lärm und systematischen Fehlern zu befreien und an die örtlichen Gegebenheiten anzupassen.

Wegen seiner räumlichen und zeitlichen Anpassungsfähigkeit wurde die Filtermethode nach Kalman gewählt. Automatisch und kontinuierlich werden die Abweichungen der Messungen von den Modellresultaten für die laufende Anpassung der Korrekturfaktoren an die meteorologischen Gegebenheiten verwendet.

In der vorliegenden Arbeit werden die vom Modell des Europäischen Zentrums für Mittelfristprognosen vorhergesagten Minimum und Maximum Temperaturen durch Verwendung der Filtermethode für eine Anzahl Orte in der Schweiz adaptiert, und zwar für eine Zeitspanne von bis zu fünf Tagen.

### **Riassunto**

I modelli numerici che forniscono previsioni meteorologiche non descrivono la complessità orografica in maniera realista, soprattutto nella zona delle Alpi. E' evidente che i parametri in prossimità del suolo, come i valori di temperature a 2 metri, siano previsti con maggior errore.

Una tecnica statistica di post-elaborazione è dunque necessaria per adattare dalle previsioni numeriche le grandezze al suolo che si vogliono prevedere.

Con la tecnica del filtro di Kalman, si può adattare in continuo et automaticamente il legame statistico tra le grandezze previste dal modello e le osservazioni, secondo i precedenti risultati.

Si presenta una descrizione di un filtro di Kalman utilizzato per la correzione delle temperature minime et massime a 2 metri fornite dal modello europeo (ECMWF) ad una selezione di stazioni svizzere a breve e media scadenza.

### **Summary**

Because of their crude resolution, meteorological models are using a simplified and smoothed orography which seldom corresponds to real ones, especially in highly mountainous regions. This is the case in the Alps, where the orography is abrupt and characterized by complicated structures. Therefore, a statistical treatment is required to adjust the direct model outputs in order to reduce statistical noise and suppress bias of forecasted surface parameters such as the 2-meter temperatures inside the Alps mountains.

Kalman filtering has been chosen because of its good adaptation with respect to specific locations and encountered meteorological situations. Such a filter is able to update itself automatically and continuously day after day according to the performances of the last corrections.

This study shows the application of a Kalman filter in order to adapt the minimum and maximum temperatures forecasted by the ECMWF model at several stations in Switzerland up to five days ahead.

*\* Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre les sections CMG et MET.*

Application d'un filtre de Kalman pour adapter les  
températures à 2 mètres fournies par le modèle  
ECMWF aux stations météorologiques de la Suisse

## *Table des matières*

---

Résumé / Zusammenfassung / Riassunto / Summary

### Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aspect théorique</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Application au calcul des températures extrêmes</b> .....	<b>4</b>
3.1	Expressions utilisées .....	4
3.2	Détails de la procédure de calcul .....	4
3.3	Choix du point de grille .....	10
<b>4</b>	<b>Résultats</b> .....	<b>12</b>
4.1	Distributions d'erreurs .....	12
4.2	Efficacité suivant les saisons.....	12
4.3	Echéances.....	14
4.4	Comparaison avec une régression linéaire adaptée .....	15
<b>5</b>	<b>Fonctionnement en routine et programmes</b> .....	<b>17</b>
5.1	Programme K1 .....	17
5.2	Analyse des résultats durant le premier hiver d'exploitation.....	19
5.3	Programme K2 .....	20
<b>6</b>	<b>Améliorations et développements</b> .....	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>23</b>
	Remerciements .....	24
<b>8</b>	<b>Bibliographie</b> .....	<b>25</b>

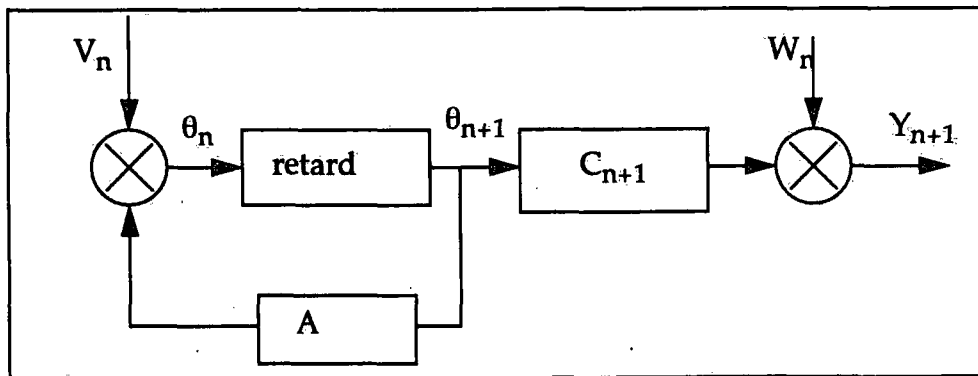
---

## 1 Introduction

L'idée de Kalman (1960) [2] [3] a été de développer un filtre combinant observations et prévisions. Cette théorie a tout d'abord été utilisée dans la navigation tant aéronautique que maritime, où la position et la vitesse du vaisseau mesurées avec plus ou moins de précision sont corrigées pour obtenir des données plus précises à l'aide d'estimations d'état réalisées par des éléments externes tels que les radars. Ce type de filtre peut être de plus utilisé pour effacer les erreurs systématiques de senseurs, ou les dérèglages d'appareils de mesure [4].

Alors que les traitements statistiques courants nécessitent une grande base de données et ne permettent pas de modification des relations établies entre observations et prévisions, le filtre de Kalman autorise une adaptation des liens statistiques par une approche récursive simple [5].

Supposons connues les observations jusqu'à  $n$ , le fonctionnement schématisé d'un filtre pour déterminer un estimateur  $Y_{n+1}$  à l'aide de la prévision  $C_{n+1}$  et de coefficients  $\theta_n$  peut être représenté par:



Le rôle du filtre dans sa phase active est de déterminer les coefficients  $\theta_n$  qui minimisent les erreurs quadratiques moyennes lors de l'estimation de  $Y$  à  $n+1$ , compte tenu des bruits aléatoires  $V_n$  et  $W_n$ . On définit un système d'équations, comprenant une équation d'évolution et une équation d'observation de la forme linéaire:

$$\theta_{n+1} = A \theta_n + V_n$$

et

$$Y_{n+1} = C_{n+1} \theta_{n+1} + W_n$$

Ces équations ainsi que les coefficients introduits font l'objet d'une approche par récurrence obtenue par les observations, et leur comparaison aux prévisions, jusqu'à  $n$ .

## 2 Aspect théorique

Sous une forme générale, le développement de Kalman se fonde sur 2 équations [6-9] :

- L'équation d'évolution qui exprime la variation en fonction du temps d'une grandeur  $\theta_n$  ( $n$  est l'indice numérotant la série de données connues,  $n+1$  les valeurs estimées).

$$(1) \quad \theta_{n+1} = \Phi_n(\theta_n) + V_n$$

où  $\Phi_n$  la dépendance fonctionnelle de  $\theta_n$ , est supposée connue et le bruit  $V_n$  a une moyenne statistique nulle.

- L'information sur  $\theta_n$  est complétée par des observations  $Y_n$ , de l'équation d'évolution :

$$(2) \quad Y_n = F_n(\theta_n) + W_n$$

Même remarque pour  $W_n$  moyenne également nulle et indépendante de  $V_n$  en fonction du temps. Lorsque  $V_n = 0$  et  $\Phi_n(\theta_n) = \theta_n$ , le problème se réduit à celui de la régression standard.

A ce stade il faut trouver des estimations de  $\theta_n$  optimales du point de vue statistique, c'est-à-dire avec une erreur quadratique moyenne nulle.

Soit  $\hat{\theta}_{n|n}$  l'estimateur de  $\theta_n$  évalué à partir des observations  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ .

Une première étape consiste à linéariser les équations (1) et (2) avec un développement de Taylor de  $\Phi_n$  et  $F_n$  pour une valeur initiale  $\theta_n^\circ$  telle que  $\theta_{n+1}^\circ = \Phi_n(\theta_n^\circ)$

$$\theta_{n+1} \sim \Phi_n(\theta_n^\circ) + \dot{\Phi}_n(\theta_n^\circ)(\theta_n - \theta_n^\circ)$$

$$Y_n \sim F_n(\theta_n^\circ) + \dot{F}_n(\theta_n^\circ)(\theta_n - \theta_n^\circ)$$

Une combinaison de ces équations avec omission des termes non-linéaires permet d'écrire:

$$(3) \quad \hat{\theta}_{n+1|n+1} = \Phi_n(\hat{\theta}_{n|n}) + A_n \{ Y_{n+1} - F_{n+1}(\hat{\theta}_{n|n}) \}$$

Les matrices  $A_n$  sont définies par récurrence en termes de bruits statistiques  $V_n, W_n$  et des fonction de transformation  $\dot{\Phi}_n(\theta_n^\circ), \dot{F}_n(\theta_n^\circ)$ .

Si les premières équations d'état sont des relations scalaires, on peut poursuivre en déterminant une limite des erreurs de prédiction. Soit  $t_{n+1} = \hat{\theta}_{n+1|n}$  l'estimation obtenue à partir des  $n$  observations précédentes.

$$(4) \quad t_{n+1} = \Phi_n(t_n) + a_n \{ Y_n - F_n(t_n) \}$$

Plusieurs hypothèses sont posées pour estimer les coefficients  $a_n$  qui minimisent l'erreur de prédiction:

- les bruits définis par  $V_n$  et  $W_n$  sont indépendant entre eux et en fonction du temps, avec de plus une moyenne nulle, leur variances sont connues.
- les dérivées des fonction  $F_n$  et  $\Phi_n$  sont bornées en tout point.

On peut montrer ensuite que l'erreur quadratique moyenne possède une limite supérieure qui ne dépend que des dérivées de  $F_n$  et  $\Phi_n$ , ainsi que des variances  $\sigma_v, \sigma_w$ . On trouve également une expression pour  $a_n$  qui dépend des mêmes paramètres que l'on estime ensuite par un processus de récurrence.

Si on transpose le problème à des équations linéaires telles que:

$$(5) \quad \theta_{n+1} = A \theta_n + V_n$$

$$(6) \quad Y_n = C_n \theta_n + W_{n-1}$$

on peut aboutir en première approximation à:

$$(7) \quad t_{n+1} = t_n + a_n \{ Y_n - C_n t_n \}, \quad \text{rappel } t_{n+1} = \hat{\theta}_{n+1|n}$$

On peut vérifier facilement qu'en minimisant l'erreur quadratique moyenne (i.e.  $Q_{n|n} = E(t_n - \theta_n)^2$  minimum), on trouve avec l'aide des équations précédentes les formulations suivantes:

$$(8) \quad a_n = \frac{C_n \cdot Q_{n|n-1}}{C_n^2 Q_{n|n-1} + \sigma_W^2}$$

$$(9) \quad Q_{n|n} = Q_{n|n-1} - Q_{n|n-1} \cdot a_n \cdot C_n$$

$$(10) \quad Q_{n+1|n} = A^2 \cdot Q_{n|n} + \sigma_V^2$$

Ces équations combinées permettent de déterminer le minimum de l'erreur quadratique en prévision. Le *gain de Kalman*  $a_n$  est alors défini à partir des variances  $\sigma_V$  et  $\sigma_W$  de la dernière valeur en prévision  $C_n$ , ainsi que des erreurs quadratiques  $Q_{n|n-1}$  qui explicitent les écarts observés entre l'estimateur obtenu par le filtre et la valeur du coefficient  $\theta_n$ .

D'autre part il faut noter que le gain de Kalman indique le poids qu'il faut accorder au dernier écart entre la valeur de prévision et la valeur estimée (équ.7).

L'estimation des coefficients et des gains se fait ensuite par récurrence à partir d'observations. Le déroulement d'une telle procédure peut être résumée comme suit:

- 1 Calcul du gain  $a_n$  en fonction des erreurs quadratiques moyennes avec l'équation (8) jusqu'à n-1.
- 2 Calcul de l'estimateur actuel (n) équation (7):  

$$t_n = t_{n-1} + a_n \{ Y_n - C_n t_{n-1} \}$$
 où  $Y_n$  est la dernière observation et  $C_n$  la dernière valeur en prévision.
- 3 Calcul de l'erreur d'estimation actuelle  $Q_{n|n}$  avec l'équation (9).
- 4 Génération d'une nouvelle estimation à l'aide de la valeur en prévision  $C_{n+1}$  suivant l'équation d'état (6).
- 5 Prévision d'erreur avec (10) conservée avec la valeur de prévision dans la mémoire du filtre.

Le filtre travaille donc avec pour données mémoire les variances, et les coefficients de l'équation d'évolution, ainsi que les données actuelles ou observations.

### 3 Application au calcul des températures extrêmes

L'application d'un filtre de Kalman pour corriger les valeurs estimées par un modèle numérique de prévision a pour but d'effacer les différences dues aux situations spécifiques des stations par rapport aux points de grille du modèle, et de réagir aux conditions climatiques locales.

Ce travail a pour but d'étudier l'apport d'un filtre de Kalman pour corriger de manière objective et automatique les valeurs des températures à 2 mètres fournies par le modèle européen, pour plusieurs stations et régions suisses.

#### 3.1 Expressions utilisées

Certains choix se présentent quant aux formulations des équations et l'utilisation d'estimateurs pour prévoir les déviations cherchées.

On peut par exemple écrire de multiples façons la dépendance suivante de l'écart de la température extrême à 2 mètres entre la valeur que le modèle prévoit et la valeur observée :

$$(11) \quad T_{2m} = T_{2m}^{obs} - T_{2m}^{ECMWF} = f_1(T_{2m}^{ECMWF}) + f_2(T_{850}^{ECMWF}) + f_3(T_{500}^{ECMWF}) + \dots$$

Il n'y a pas de restriction du nombre de paramètres utilisés. Pour premier choix ont été sélectionnées les températures prévues à 2 mètres aux heures UTC 06 ou 12 (*programme K1*), puis les températures extrêmes à 2m (*programme K2*).

Avec les équations suivantes:

$$(12) \quad \theta_{n+1} = A \theta_n + V_n$$

$$(13) \quad \Delta T_{2m_{n+1}} = T_{2m_{n+1}} \theta_{n+1} \quad \text{où } \theta \text{ est un vecteur}$$

Les coefficients d'évolution  $\theta_{n+1}$ ,  $\theta_n$ , sont estimés à partir des variances et observations suivant la procédure décrite avant.

$\theta$  vecteur d'ordre 2 suffit très bien pour une première approche, il garde en plus l'avantage de se présenter sous une forme proche de la régression simple ce qui favorise les comparaisons:

$$(14) \quad \Delta T_{2m_{n+1}} = \theta_{n+1}^1 + \theta_{n+1}^2 T_{2m_{n+1}}$$

#### 3.2 Détails de la procédure de calcul

En fait la démarche utilisée est sensiblement différente de celle présentée dans le paragraphe *aspect théorique*. Elle permet d'introduire des simplifications de calcul et autorise des paramètres ajustables, Persson [10]. Pour l'essentiel, l'originalité de la procédure est l'estimation des variances *a priori*, évitant d'une part un suralignement des données et réduisant d'autre part la dimension du fichier mémoire. La figure 1 retrace schématiquement la démarche du filtre.

Comme il n'existe pas de description même empirique de l'évolution de la fonction  $A(n)$ , (où  $n$  est le jour) cette fonction est posée égale à 1. Cela implique que les variations sont reliées uniquement au bruit aléatoire.



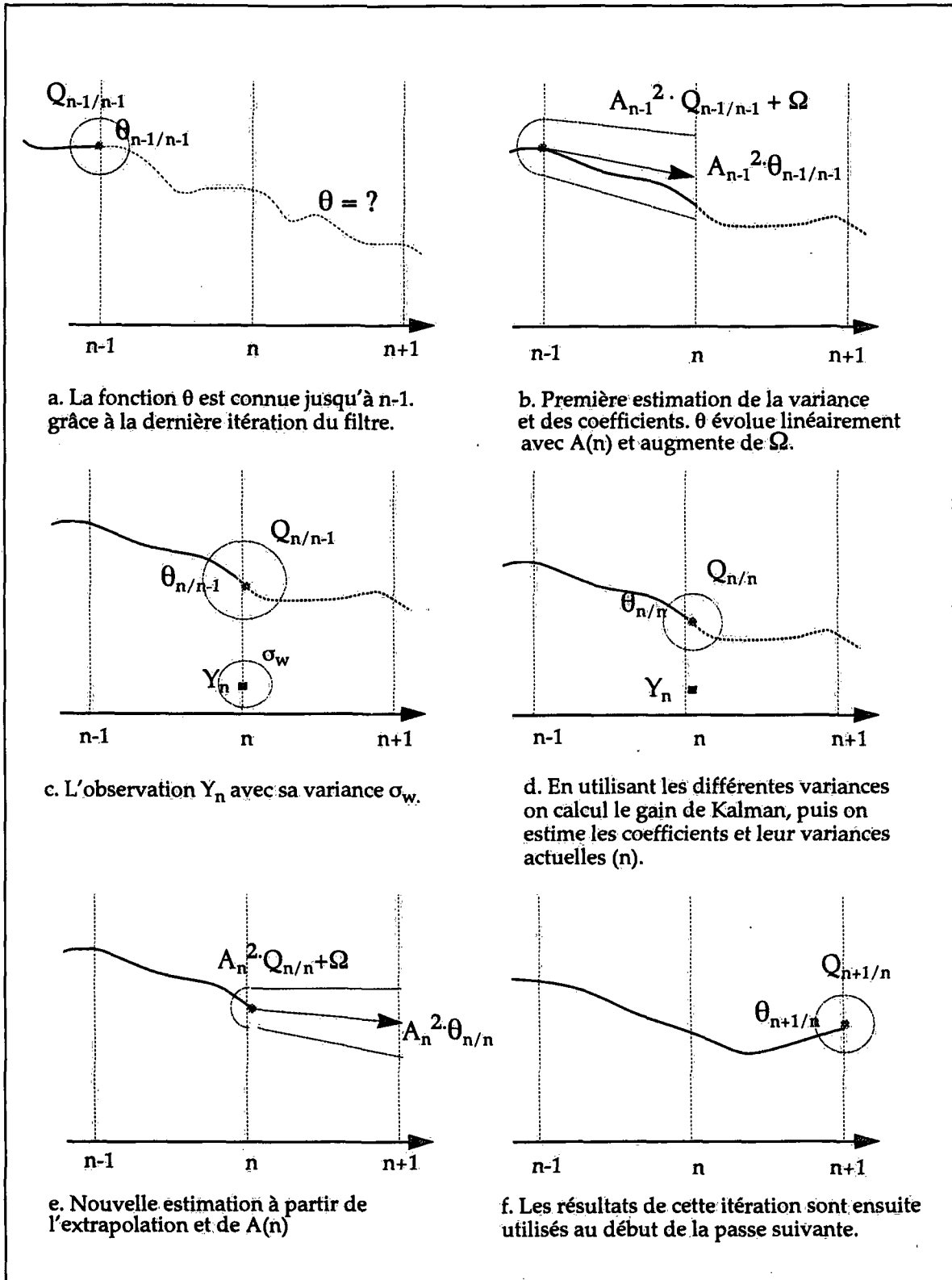


Figure 1 Description schématisée du traitement "a priori", des variances dans le programme de filtrage de Kalman (Persson [10]).

A cette hypothèse on peut ajouter une décroissance  $A(n)=1-\varepsilon$ ,  $\varepsilon < 0.1$  en cas d'absence de données. De sorte que  $A(n)=0$  lorsqu'une longue série de valeurs sont absentes, réduisant ainsi à zéro les corrections apportées.

Pour une première estimation du gain de Kalman, il est nécessaire de connaître la variance  $Q_n|_{n-1}$  (c'est-à-dire la variance pour le jour  $n$  basée sur les  $n-1$  jours précédents). On fait évoluer la valeur connue  $Q_{n-1}|_{n-1}$  en supposant que l'incertitude est plus grande pour la valeur en prévision que pour la valeur mesurée, on fait donc évoluer cette variance en ajoutant un terme constant  $\Omega$ , valeur à priori de  $\sigma_v$ :

$$Q_n|_{n-1} = A^2 \cdot Q_{n-1}|_{n-1} + \Omega$$

Un nouveau paramètre  $\Omega$  apparaît, il peut être interprété comme un bruit de fond constant lié à la nature même du problème de prévision. Il reste évidemment ajustable et peut être utilisé pour moduler la réaction du filtre suivant les situations. Une adaptivité rapide correspond à des grandes valeurs de  $\Omega$ .

A l'aide de quelques graphiques de situations simulées l'importance des valeurs de  $\Omega$  est démontrée (fig.2-5). Le compromis qui doit être trouvé, doit fournir une réponse rapide aux derniers scores enregistrés sans produire d'oscillations supplémentaires. C'est surtout le poids attribué au coefficient  $\theta^2$  qui est déterminant.

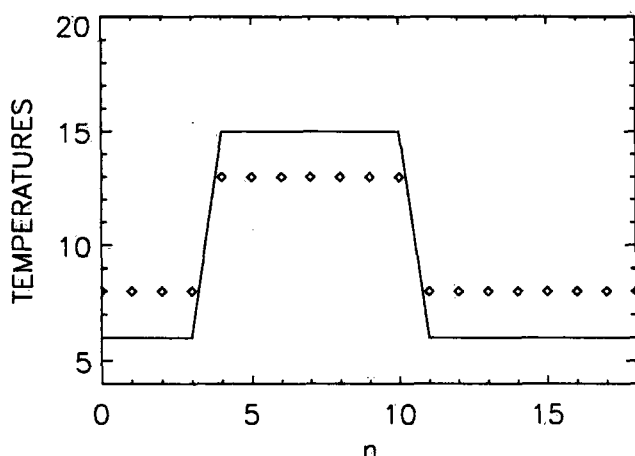


Figure 2

Simulation d'une situation où les valeurs du modèle (ligne continue) sont alternativement en-dessous et en-dessus des valeurs observées (symboles).

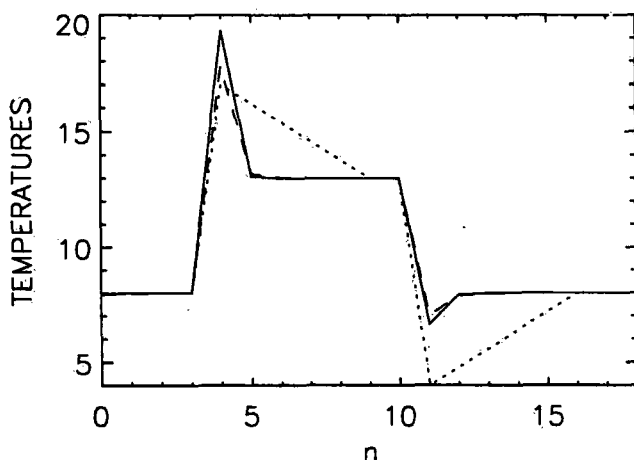


Figure 3

Réponse de post-traitement des données. A titre comparatif la ligne en pointillé correspond à une régression linéaire adaptative avec 5 jours de mémoire. Les deux autres courbes à un filtre de Kalman avec pour valeurs de  $\Omega$ ;  
 (0.75, 0.3) ligne continue  
 (0.75, 0.03) ligne en traitillé

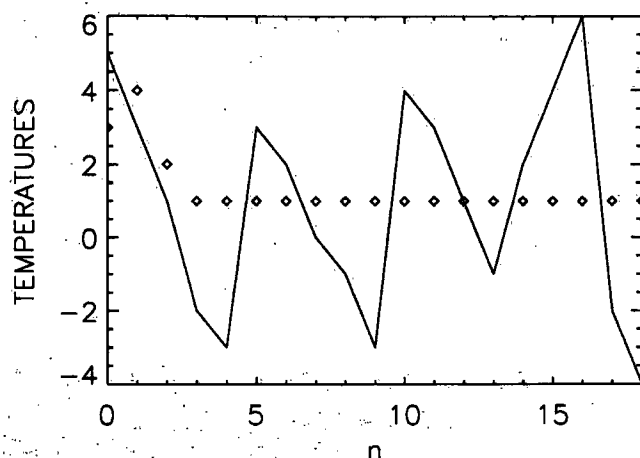


Figure 4

Simulation d'une situation d'inversion où la température au sol devient constante (symboles), alors que le modèle continue à fournir des variations (ligne continue).

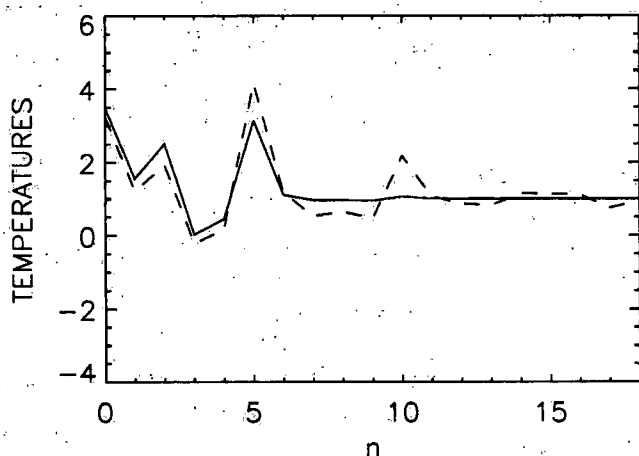


Figure 5

Résultat d'un traitement avec filtrage de Kalman, les différentes courbes correspondent à des variations des valeurs de  $\Omega$  ajoutées aux variances ;  
 (0.75, 0.3) ligne continue  
 (0.75, 0.03) ligne en traitillé

On remarque que si l'on laisse trop de souplesse au paramètre  $\theta^2$  on introduit des fluctuations importantes lors de changement de correction (figures 2-3).

D'autre part, en cas d'inversion thermique lorsque la température à 2 mètres observée ne suit plus les variations annoncées par le modèle, il est nécessaire de permettre une réaction importante du paramètre  $\theta^2$ , (figures 4-5).

Pour notre application, après de nombreux essais, notre choix s'est porté sur une variation "a priori" plutôt rigide de  $\theta^2$  et plus souple pour le paramètre de biais  $\theta^1$ . Notre critère a été de limiter les cas de fluctuations où les écarts entre les valeurs corrigées et les observations étaient trop importants, tout en tolérant des réactions (plus lentes) du coefficient  $\theta^2$ . Nous nous sommes toutefois bien assuré que les cas d'inversion soient correctement corrigés.

Les paramètres choisis correspondent à l'hypothèse où la variance  $Q_{n-1|n-1}$  du coefficient  $\theta^2$  n'évolue pratiquement pas lors de la première estimation "a priori" de  $Q_n|n-1$ . Notre choix :  $\Omega = (0.75, 0.02)$ . A la figure 6 sont comparés deux choix de paramètres. Avec notre sélection le nombre de cas avec des erreurs élevées est réduit, par exemple il n'y a que 14 cas contre 26 avec des écarts supérieurs à 5 degrés.

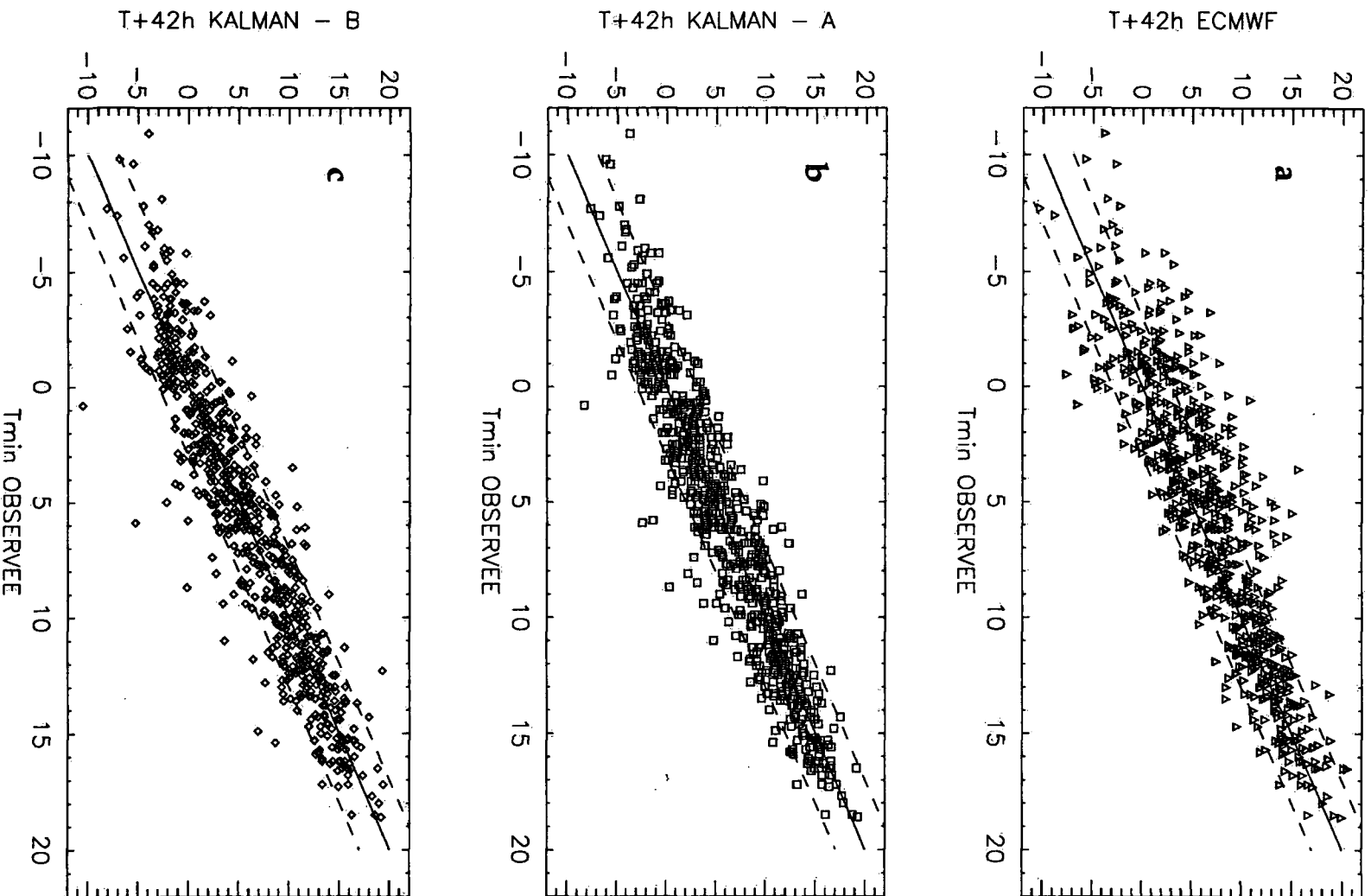


Figure 6 Distributions des températures min. prévues à 2 mètres T+42h, en fonctions des observations, l'ensemble étudié est #GVE. (a) données directement fournies par le modèle. (b) valeurs corrigées avec le filtre à l'aide des paramètres établis dans ce travail, (c) avec les paramètres proposés par Persson [10]. Les lignes pointillées correspondent aux écarts  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

En ce qui concerne la bulle d'erreur sur l'écart des températures  $Y_n$ , on attribue un bruit de fond que l'on considère constant. Des tentatives pour inclure les derniers scores obtenus, ou des variations saisonnières n'ont pas amené d'amélioration significative. En général  $\sigma_w = 5$ .

Les valeurs de tous ces paramètres ont été établies à partir de l'étude de l'échantillon de développement suivant; températures minimales et températures à 2 mètres du modèle ECMWF T+42h, station de Genève, 1 juin 1989 - 31 mai 1991. Cet ensemble est nommé #GVE par la suite.

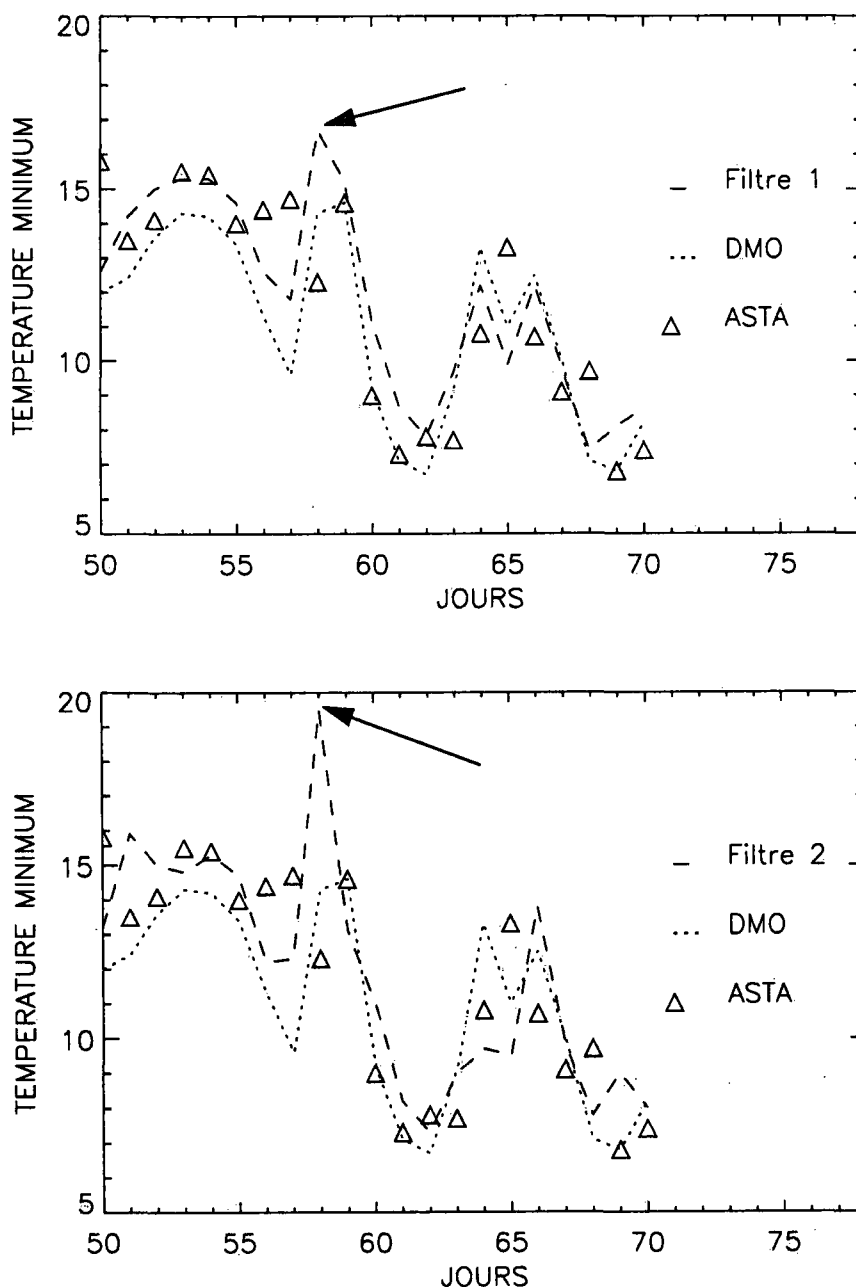


Figure 7 Températures min. pour Genève observées (ASTA), comparées aux prévisions du modèle ECMWF (T+42h) avant (DMO) et après l'application d'un filtre (Filtre 1 & 2). Au jour 58 le Filtre 2 amplifie exagérément la dernière correction. Cette différence de réaction est pilotée uniquement par une variation de l'amplitude du terme  $\Omega_2$ , qui passe de  $1.10^{-3}$  pour le Filtre 1 à  $70.10^{-3}$  pour le Filtre 2.

### 3.3 Choix du point de grille

Au vu de la grande simplification de l'orographie dans le modèle européen, les points de grille ne correspondent aucunement aux situations climatologiques locales. Il n'est donc pas étonnant de constater qu'une application d'un filtre qui corrige les déviations systématiques permette d'ajuster n'importe quel point de grille proche des valeurs locales.

A la figure 9 sont représentés les résultats d'analyse statistique pour une période d'une année et demi (juin 89- janvier 91) des écarts entre les températures minimum mesurées et les valeurs de températures fournies par le modèle (échéance T+42h) pour 12 points de grille (fig.8) avant et après l'application d'un filtre.

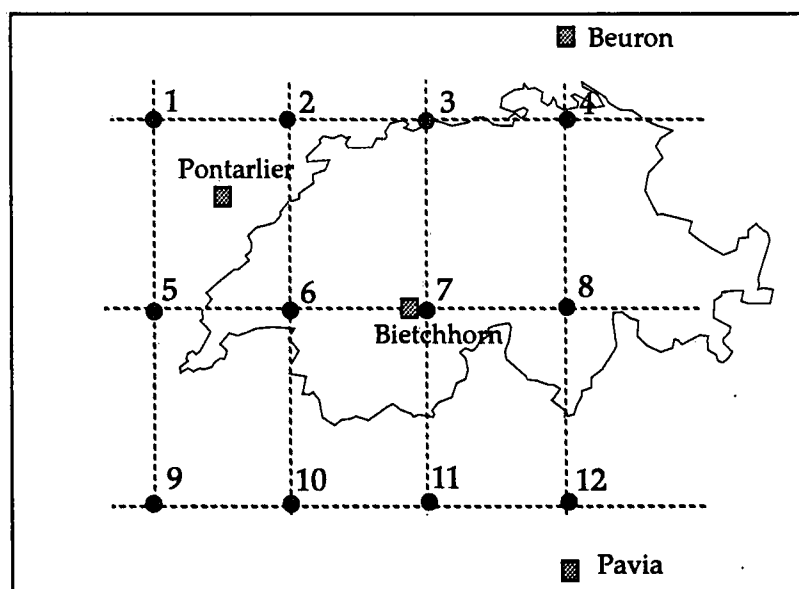


Figure 8 Points de grille utilisés par le modèle dans la région des Alpes, numérotés de 1 à 12. (Les points Pontarlier, Beuron, Bietchhorn et Pavia sont décrit dans le text, § 5.3)

On remarque d'une part que l'efficacité du filtre est indépendante du point de grille choisi, d'autre part que les biais très importants sans traitement sont fortement réduits et inférieurs à 0.1 (C) en moyenne (figure 9).

Notre préférence s'est portée sur l'utilisation des points de grille en dehors du relief alpin, afin d'éviter les artifices du modèle dans les Alpes et de laisser le soin au filtre de reproduire les conditions locales telles que l'altitude.

Notons qu'une composition linéaire de plusieurs points de grille n'amène aucune amélioration.

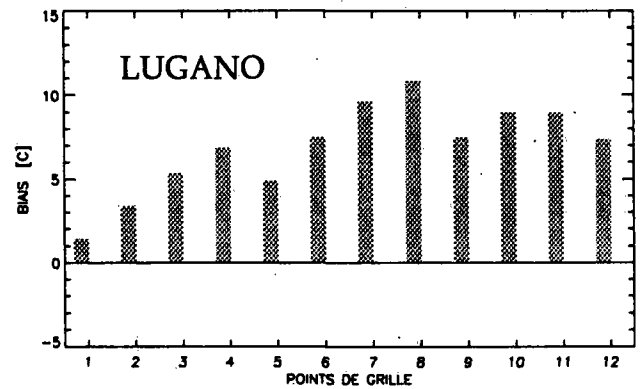
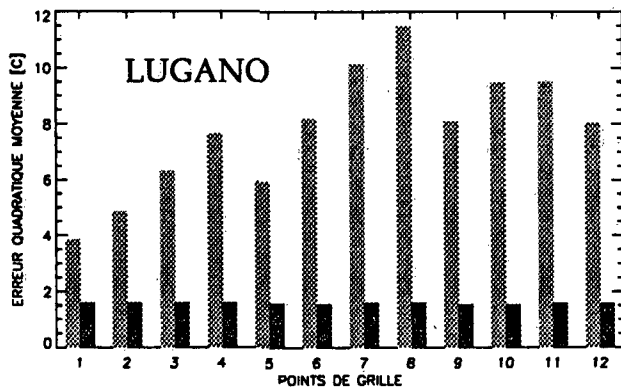
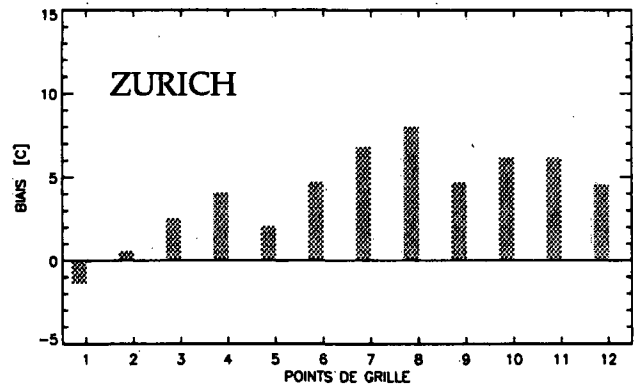
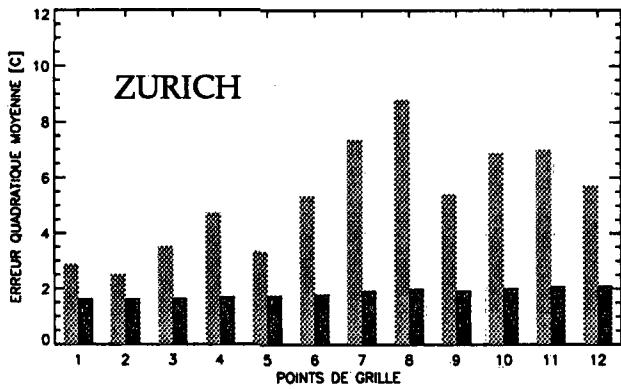
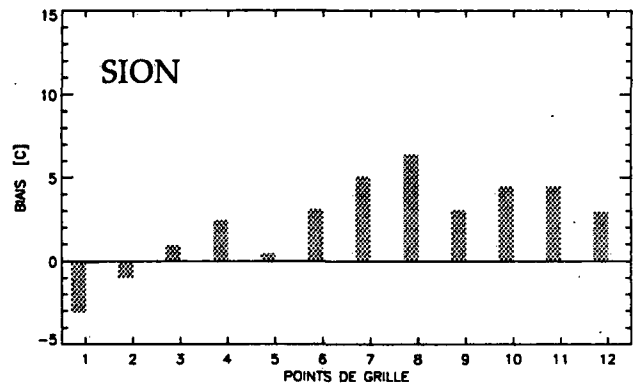
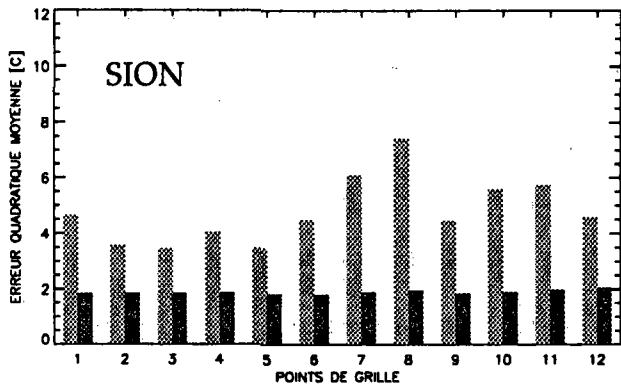
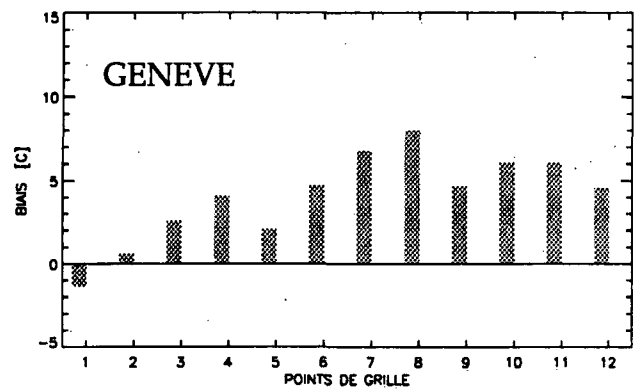
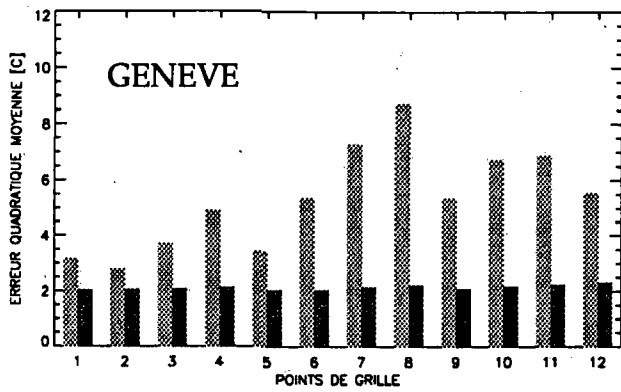


Figure 9 Erreurs quadratiques moyennes et biais lors des comparaisons des températures minimales observées et prévues (échéance T+42h) aux différents points de grille (fig.8), les barres grises correspondent aux valeurs sans traitement et les barres noires après un filtre.

## 4 Résultats

Dans la section suivante sont présentés quelques résultats obtenus sur l'échantillon de développement (1.6.89 - 31.5.91) #GVE, en utilisant un filtre de Kalman pour traitement statistique des sorties du modèle ECMWF des températures à 2m.

### 4.1 Distributions d'erreurs

A la figure 10, sont tracés les histogrammes des distributions d'erreurs obtenues avec et sans corrections. On remarque que le traitement de Kalman répond bien à l'attente d'un outil statistique qui élimine bruits et déviations systématiques (également fig. 5)

Après l'application du filtre les erreurs sont regroupées autour de zéro (biais proche de zéro), et l'écart type est fortement réduit tout comme le nombre d'événements avec une grande déviation.

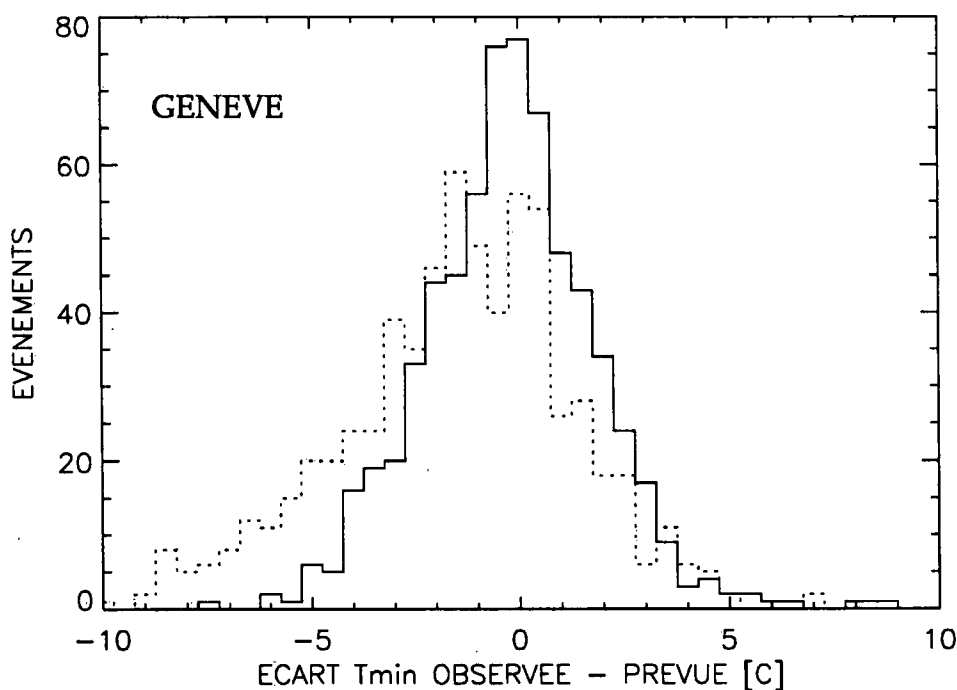


Figure 10 Distribution des écarts de température minimum avant le filtre (ligne traitillée), et après l'application du filtre de Kalman (ligne continue) sur les prévisions à T+42h du modèle ECMWF. Période juin 89 - mai 91, Genève, #GVE.

### 4.2 Efficacité suivant les saisons

En décomposant mois par mois les résultats pour Genève, on remarque que l'utilité d'un traitement est nécessaire notamment durant les mois d'hiver et d'automne pour les températures minimum (fig.11). Durant les mois d'octobre à mars les valeurs de température à 2m du modèle sont fortement biaisées par rapport aux stations suisses. Les corrections apportées sont alors remarquables. Au printemps et durant l'été les sorties du modèle sont moins entachées de biais et l'effet du filtre moins marqué.



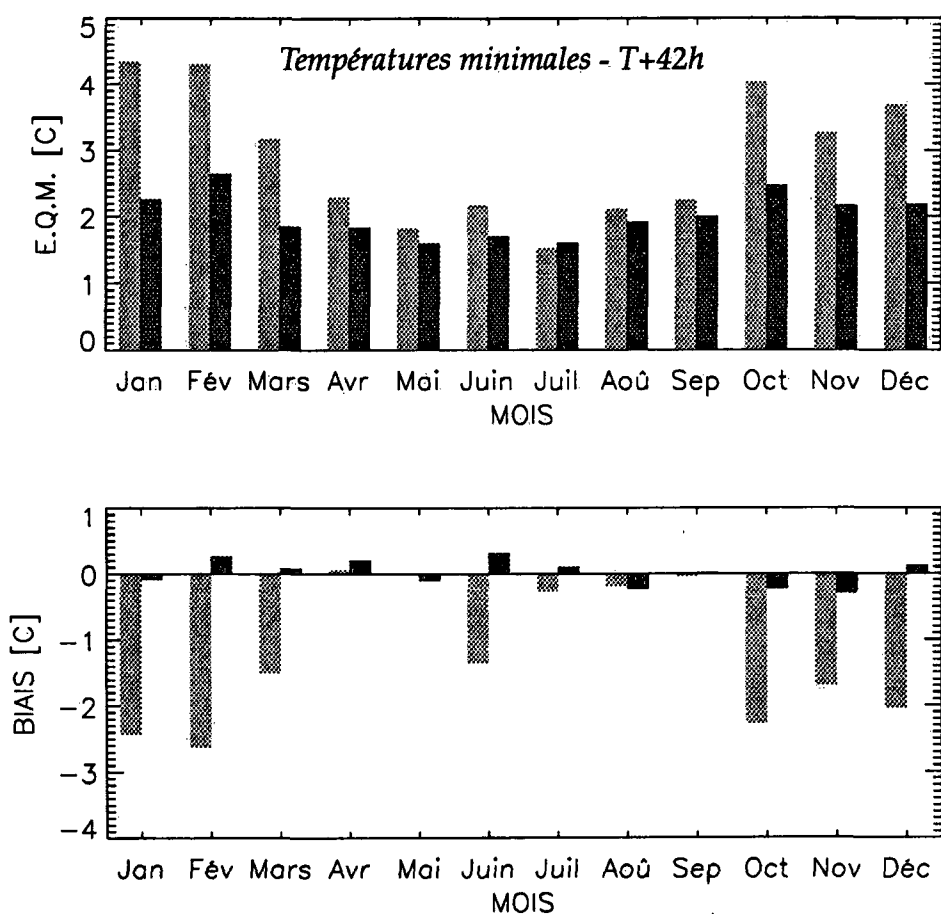


Figure 11 Erreurs quadratiques moyennes et biais, avant (gris) et après (noir) l'application d'un filtre de Kalman pour corriger les températures minimales prévues. Echantillon de développement pour Genève. Initialisation du modèle jour  $j-1$  (12z), observations récentes jour  $j$  comparaisons avec les prévisions de  $j-2$  (12z), et prévisions pour le jour  $j+1$ .

En ce qui concerne le traitement des températures maximales (fig.12), on note que le modèle fournit les biais les plus importants durant les mois d'avril à juillet, alors que les réductions d'erreurs sont les plus nettes entre octobre et janvier, comme pour les températures minimales.

Cependant le fait que l'on obtienne de meilleurs scores avec les températures minimales peut s'expliquer davantage par la difficulté de prédiction des températures maximales que par une mauvaise adaptivité. Dans l'estimation de ces valeurs le modèle inclut les bilans radiatifs donc les nébulosités qui restent très difficiles à évaluer. Si l'on ajoute le fait que les calculs se font à partir de points de grille de référence très éloignés, on comprend que de nombreux facteurs peuvent fausser les prévisions des températures maximales.

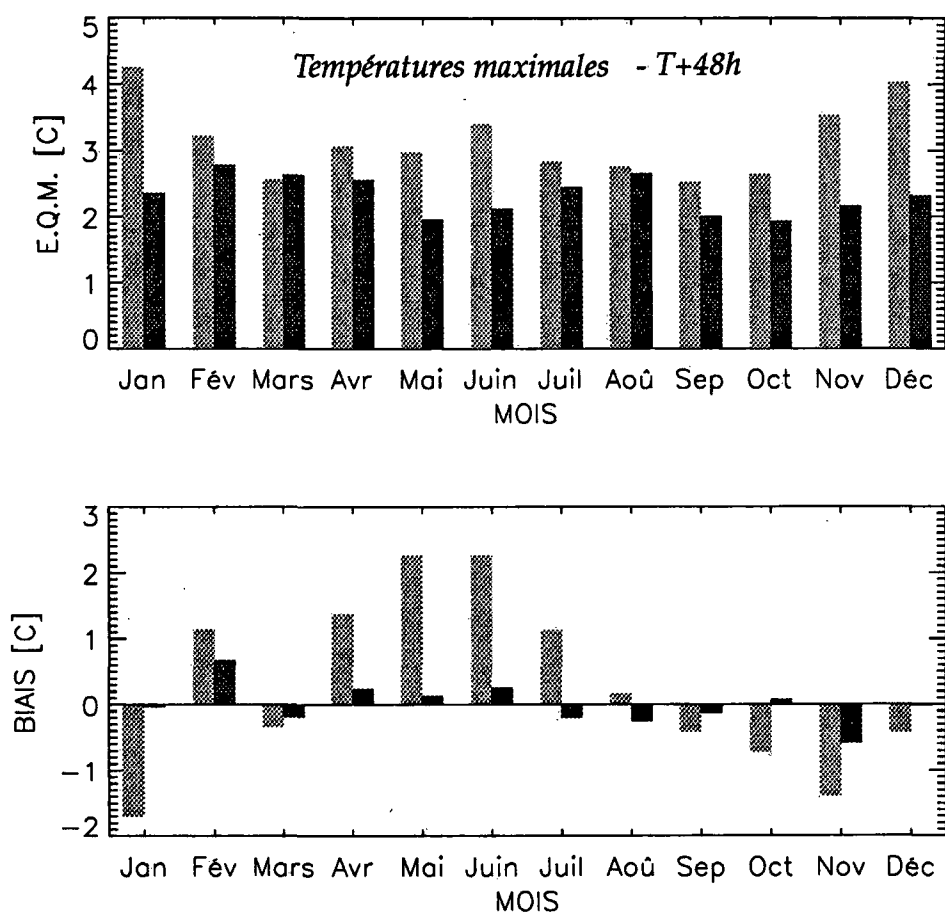


Figure 12 Erreurs quadratiques moyennes et biais, avant (gris) et après (noir) l'application d'un filtre de Kalman pour corriger les températures maximales prévues. Echantillon de développement pour Genève. Initialisation du modèle jour j-1 (12z), observations récentes jour j comparaisons avec les prévisions de j-2 (12z), et prévisions pour le jour j+1.

### 4.3 Echéances

Pour corriger les valeurs de prévision des échéances au-delà de 48h, sont utilisés deux groupes de coefficients; les uns évalués à l'aide des températures minimales comparées aux valeurs T+42, les autres obtenus par comparaison de températures maximales aux valeurs T+48h.

La qualité des correction est évidemment meilleure pour les échéances proches car les valeurs du modèle sont tachées de moins d'erreurs de prédictabilité (fig.13). Néanmoins on observe que les corrections amenées par le filtre sont effectives pour l'ensemble des échéance, notamment grâce à l'élimination du biais.

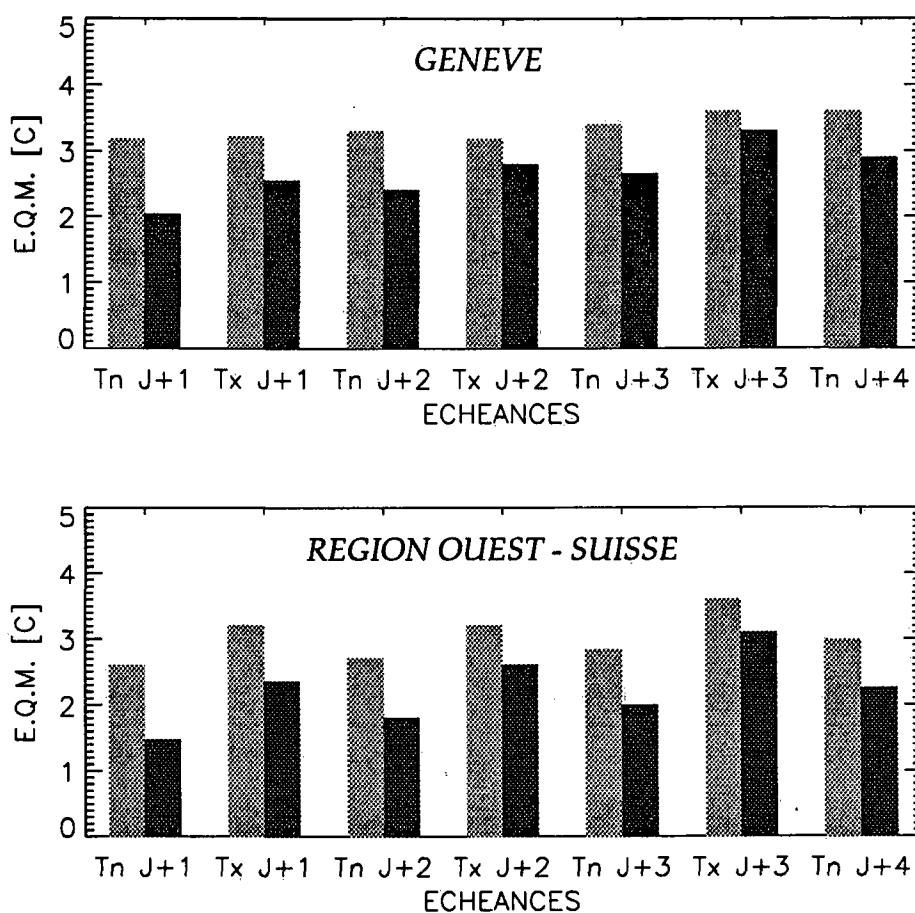


Figure 13 Erreurs quadratiques moyennes calculées sur l'échantillon de développement, concernant les écarts des températures minimales et maximales pour les échéances  $j+1$  à  $j+4$ . En gris les comparaisons avec les prévisions directement fournies par le modèle, en noir après filtrage.

#### 4.4 Comparaison avec une régression linéaire adaptée

A titre comparatif un traitement statistique basé sur une régression a été appliqué. La période de régression choisie est de 20 jours, ce qui permet d'obtenir la plus faible déviation standard. Les coefficients de cette régression sont ensuite utilisés pour estimer la déviation de la valeur en prévision.

La comparaison des scores montre un avantage pour filtre de Kalman (tableau 1). Mais on remarque qu'en utilisant une régression adaptative la correction des valeurs de prévision souffre d'une inertie correspondant aux nombre de données utilisées. C'est-à-dire que les corrections sont toujours en retard face à l'évolution de la situation. Les valeurs sont plusieurs jours de suite plus basse puis plus élevées (exemple figure 3).

GENEVE : Données	Déviatiion standard °C	Biais °C
ECMWF sans corrections	2.41	1.45
Kalman	1.60	0.03
Régression adaptative	1.72	0.08

REGION OUEST : Données	Déviatiion standard °C	Biais °C
ECMWF sans corrections	2.05	0.80
Kalman	1.75	0.03
Régression adaptative	1.85	0.10

*Tableau 1 Résultats comparatifs de l'application de traitements de correction des données de prévision de températures à 2m (T+42h) vis-à-vis des températures minimales. Sur l'échantillon de développement #GVE.*

Le filtre de Kalman permet quant à lui de suivre plus rapidement l'évolution des conditions locales, le prix à payer est le risque d'aboutir à des oscillations telles que nous les avons montrées à la figure 7.

## 5 Fonctionnement en routine et programmes

Un premier programme (K1) en langage Pascal a été installé sur METEOR (sept 92) puis sur SUN (déc 92 jusqu'en mai 93) pour un fonctionnement routinier avec 7 stations et régions suisses. Un second (K2) travaille sur SUN (jan 93) et fournit des données pour 42 stations et régions. Tous les deux utilisent les coefficients et paramètres établis lors de l'étude sur l'échantillon de développement.

### 5.1 Programme K1

Les températures extrêmes sont ajustées aux valeurs prévues aux heures 6 et 12UTC, pour respectivement les températures minimales et maximales. Le calcul des corrections se fait de manière indépendante pour le minimum et le maximum. D'où la possibilité d'être confronté à des minimums supérieurs aux maximums lors de variations faibles de la température en cours de journée.

Lors du fonctionnement, vers 7 UTC le programme s'appuie sur un fichier mémoire conservant les coefficients déjà établis ainsi que les dernières valeurs prévues, et sur un fichier d'observations fabriqué sur METEOR qui contient les températures ASTA (stations automatiques suisses) maximum de la veille et minimum du jour (figure 14 et résultat figure 15).

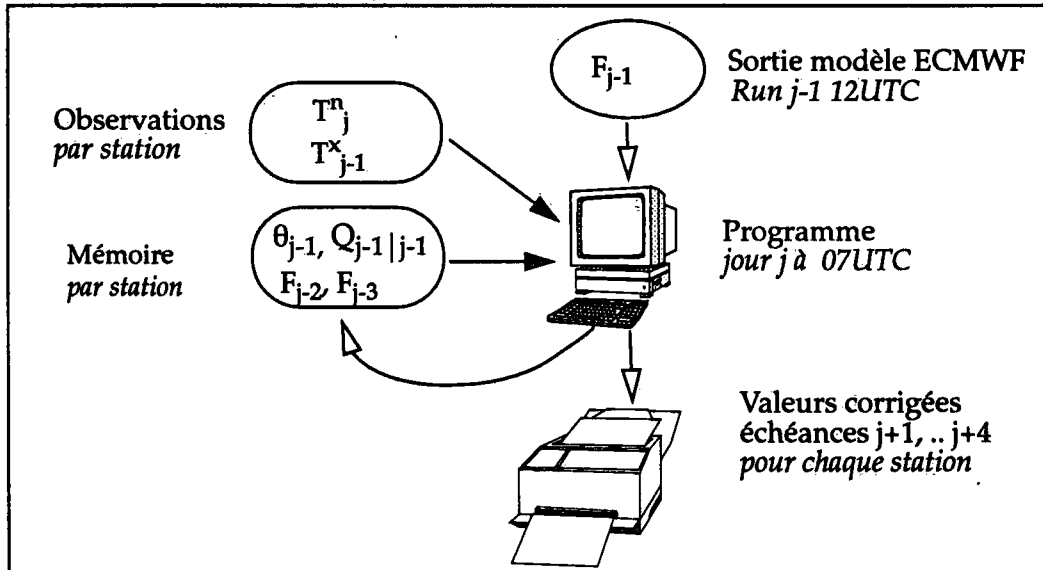


Figure 14 Schéma de fonctionnement de la procédure K1 au jour  $j$ .

La dernière comparaison d'écart de températures maximales se fait donc avec un décalage d'un jour par rapport aux données de températures minimales. Les réactions apportées par le filtre sont meilleures car plus récentes en ce qui concerne les températures minimums.

Les points de grille utilisés sont les points 1,2 et 5 définis à la figure 8.

MET/CMG Filtre de Kalman: températures minimales et maximales								
Date : jeu 22 4 1993								
Pour	ven 23. 4		sam 24. 4		dim 25. 4		lun 26. 4	
SION	6.9	24.3	7.2	23.8	9.4	22.3	9.1	
GENEVE	6.5	22.5	9.5	22.7	8.4	21.6	8.7	
ZURICH	8.8	22.1	9.1	21.6	11.2	20.3	10.8	
LUGANO	9.3	19.7	10.6	19.9	10.1	19.1	10.2	
Region 3	7.6	22.4	8.7	21.8	9.7	20.0	9.3	
Region 7	7.1	22.3	7.5	21.8	10.3	20.5	9.8	
Region 14	8.2	21.2	8.9	20.9	9.5	19.7	9.3	
Pt( 1)	3.7	18.0	5.2	17.4	6.5	15.3	6.0	
Pt( 2)	2.2	18.0	2.7	17.4	6.2	15.7	5.6	
Pt( 3)	3.0	17.0	6.8	17.3	5.4	15.9	5.8	

Figure 15 Exemple de sortie de valeurs corrigées par le programme K1, les sites Pt(n) représentent les valeurs des points de grille sans traitement. Initialisation du modèle le 21.4 à 12UTC.

Le traitement statistique par filtrage de Kalman est évidemment affecté par des retards ou absences de données, des valeurs du modèle ou des températures enregistrées sur le réseau ANETZ (stations automatiques suisses).

Dans de tels cas, le manque de comparaisons récentes et l'utilisation d'anciens coefficients (si les sorties ECMWF sont présentes) introduit des dérives qui ne sont pas rattrapées avant 2 à 3 jours.

Malgré diverses interruptions de données survenues durant cette période opérationnelle, on peut remarquer que les scores obtenus sont bons et en tout point comparables à ceux établis pour l'échantillon de développement (fig.16). Une amélioration est souhaitée afin d'améliorer les scores relatifs aux températures maximales. Un premier pas dans ce sens est réalisé grâce à la nouvelle version du programme K2.

## 5.2 Analyse des résultats durant le premier hiver d'exploitation

Pour la période du 1 novembre 1992 au 31 mars 1993								
	JOUR + 1		JOUR + 2		JOUR + 3		JOUR + 4	
	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn	
<b>BIAIS DES SORTIES DIRECTES DU MODELE</b>								
SION	-4.03	3.38	-3.89	3.61	-3.84	3.57		1.19
GENEVE	1.86	3.32	1.90	3.37	1.76	7.67		1.93
ZURICH SMA	2.44	2.24	2.57	2.32	2.34	2.19		2.39
LUGANO	4.62	5.34	-1.32	5.53	-1.26	5.47		-1.01
Region 3	1.79	8.30	-1.96	8.23	-2.80	8.23		-2.78
Region 7	2.31	2.20	2.20	1.29	2.26	1.33		2.21
Region 14	3.00	5.21	3.08	5.33	3.00	5.36		2.66
<b>ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DES SORTIES DIRECTES DU MODELE</b>								
SION	5.30	5.24	5.34	5.54	5.39	5.29		3.78
GENEVE	3.47	4.30	3.70	4.48	3.86	8.97		3.87
ZURICH SMA	3.49	4.21	3.87	4.33	4.09	4.19		4.32
LUGANO	5.68	6.80	3.56	6.97	3.52	6.89		3.59
Region 3	3.10	9.08	3.63	9.27	5.01	9.29		5.13
Region 7	3.57	4.13	5.03	4.28	5.27	4.28		5.17
Region 14	4.30	6.83	4.42	6.90	4.52	6.86		4.41
<b>BIAIS APRES FILTRE</b>								
SION	-0.09	0.05	-0.00	0.15	-0.16	0.30		-0.35
GENEVE	-0.07	-0.01	-0.03	-0.02	-0.09	-0.01		-0.26
ZURICH SMA	-0.05	0.10	0.12	0.13	-0.09	0.14		0.01
LUGANO	-0.06	0.06	-0.03	0.11	-0.05	0.09		-0.03
Region 3	-0.06	0.04	0.04	0.06	-0.02	0.11		0.04
Region 7	0.03	-0.08	0.14	-0.06	-0.11	-0.03		-0.03
Region 14	-0.09	-0.07	-0.07	-0.07	-0.15	-0.07		-0.18
<b>ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE APRES FILTRE</b>								
SION	2.28	3.38	2.76	3.46	3.01	3.66		3.27
GENEVE	2.35	2.54	2.63	2.75	2.77	2.91		2.98
ZURICH SMA	2.16	3.41	2.50	3.67	2.82	3.80		3.08
LUGANO	2.06	4.03	2.36	4.21	2.50	3.89		2.63
Region 3	2.07	2.48	2.48	2.77	2.79	2.86		3.01
Region 7	2.29	3.27	2.66	3.65	3.09	3.72		3.37
Region 14	2.12	4.13	2.43	4.33	2.58	4.27		2.77

Figure 16 Analyse des résultats pour une période d'exploitation.

### 5.3 Programme K2

Le principe de fonctionnement de ce programme est identique à celui de K1. Par contre sont utilisés comme référence trois points de grille situés en plaine autour du relief alpin et un point de grille en altitude pour les stations au-dessus de 1500m (figure 8). La répartition des points de grille est la suivante: Pontarlier pour l'ouest et le Valais, Pavia le sud des Alpes, et Beuron la Suisse alémanique, ainsi que le Bietchhorn pour les stations situées au-dessus de 1500m d'altitude. Il est à relever que ces points sont directement issus de la grille gaussienne du modèle et ne subissent en conséquence aucune interpolation.

Les valeurs de prévisions utilisées sont les températures extrêmes à 2m du modèle ECMWF. La comparaison s'établit entre les observations de la veille (j-1) et les valeurs minimum et maximum prévues l'avant veille (j-2). Le domaine des prévisions est alors étendu aux températures minimum et maximum jusqu'à 4 jours (figure 17).

Les paramètres utilisés sont les mêmes que ceux définis pour K1, établis par l'étude de l'échantillon de développement.

En principe ce programme est opérationnel dès l'arrivée des valeurs du modèle numérique c'est-à-dire vers 00UTC.

Une première évaluation statistique des résultats de ce programme a pu être effectuée, on remarque déjà que les scores sont pratiquement similaires à ceux obtenus avec K1 pour les stations de plaine (figure 18). Avec une nette amélioration pour les stations dans le sud et dans l'est de la Suisse, les points de grille choisis sont donc plus représentatifs des sites étudiés. Les températures maximums sont par ailleurs mieux corrigées en utilisant comme prédicteur la température à 2 mètres maximum du modèle.

Les sites de montagne n'ont par contre pas été corrigés en dessous de 3 degrés d'erreur quadratique moyenne. Cette faiblesse incombe plutôt au choix du prédicteur, les températures en air libre à 850 et/ou 500 hPa conviennent certainement mieux que les valeurs de températures à 2m d'une altitude de 3500m.

Les corrections sont également efficaces pour les échéances élevées sauf pour les températures maximales prévues pour la dernière échéance qui sont systématiquement en-dessous des valeurs observées. Ce biais est uniquement lié à une mauvaise prédiction du modèle pour la dernière échéance.



## MET/CMG Filtre de Kalman: températures minimales et maximales

Date : mar 27 4 1993

Pour	mer 28. 4		jeu 29. 4		ven 30. 4		sam 1. 5	
MONTANA	4.2	10.5	4.4	10.1	3.5	7.6	2.2	7.9
ZERMATT	2.1	8.6	2.3	8.2	1.3	5.9	-0.4	6.3
SION	10.2	19.3	10.5	18.8	9.3	16.1	7.4	16.5
DOLE	2.0	10.3	2.1	9.9	1.6	7.4	0.8	7.8
FAHY	7.5	18.1	7.7	17.6	6.8	14.7	5.4	15.1
CHAUX-FONDS	4.8	16.4	5.1	15.9	3.7	13.1	1.5	13.5
PAYERNE	7.7	18.8	8.1	18.3	6.8	15.6	4.7	16.0
NEUCHATEL	10.6	19.6	10.9	19.1	9.8	16.5	8.1	16.9
GENEVE	8.9	18.6	9.2	18.1	7.9	15.4	5.8	15.8
PULLY	10.6	18.5	10.8	18.1	9.9	15.6	8.5	15.9
PLAFFEIEU	6.1	15.3	6.3	14.8	5.4	11.9	3.9	12.3
AIGLE	10.5	19.8	10.9	19.3	9.5	16.7	7.4	17.1
MOLESON	1.7	7.6	1.9	7.2	1.1	4.9	-0.0	5.2
BALE	10.1	22.3	11.0	21.4	10.0	17.7	8.8	19.3
BERNE	7.5	20.8	8.3	19.9	7.4	16.2	6.3	17.8
SCHAFFHOUSE	9.4	23.5	10.3	22.5	9.2	18.2	8.0	20.1
ZURICH SMA	9.6	22.8	10.2	21.8	9.5	17.7	8.5	19.5
ALTORF	13.9	22.1	14.9	21.2	13.7	17.2	12.4	18.9
GUETSCH	-0.9	2.5	-1.0	2.3	-1.4	2.2	-2.1	1.7
LUCERNE	10.2	22.8	11.1	21.8	10.1	17.6	9.0	19.5
ENGELBERG	9.0	19.3	9.9	18.3	8.9	13.9	7.7	15.8
SAENTIS	0.0	4.2	-0.1	3.9	-0.4	3.9	-1.0	3.3
VADUZ	13.6	23.6	14.3	22.5	13.4	18.1	12.4	20.0
SAINT GALL	11.3	20.1	12.1	19.1	11.2	14.9	10.1	16.8
COIRE	10.3	22.3	11.0	21.3	10.2	17.1	9.3	19.0
DAVOS	4.2	14.5	5.2	13.7	4.1	10.0	2.9	11.6
SAMEDAN	1.6	12.3	3.0	11.6	1.4	8.5	-0.5	9.9
PIOTTA	6.7	11.0	5.8	9.3	4.4	9.1	4.4	9.3
ROBBIA	6.1	14.1	4.7	12.1	2.7	11.8	2.6	12.1
COMPROVASCO	7.9	14.1	7.0	12.0	5.8	11.7	5.7	12.0
LUGANO	10.7	14.6	9.8	12.6	8.5	12.3	8.4	12.6
LOC. MAGADINO	10.4	15.2	8.9	13.1	6.7	12.8	6.6	13.1
LOC. MONTI	9.9	14.5	9.4	12.4	8.7	12.1	8.6	12.4
CIMETTA	2.0	6.6	1.8	5.3	1.6	5.1	1.6	5.3
Region 1	9.5	17.3	9.9	16.9	8.6	14.3	6.5	14.7
Region 3	9.3	18.9	9.6	18.4	8.4	15.8	6.6	16.2
Region 6	7.5	22.0	8.4	21.1	7.4	17.3	6.1	19.0
Region 7	8.4	22.9	9.3	21.9	8.3	17.7	7.1	19.6
Region 8	7.6	17.6	7.9	17.0	6.8	14.1	5.0	14.5
Region 9	12.0	22.4	12.9	21.5	11.9	17.4	10.7	19.2
Region 10	12.0	23.0	12.7	22.0	11.9	17.6	10.8	19.5
Region 14	10.0	14.7	8.8	12.6	7.1	12.4	7.0	12.6
PONTARLIER	5.5	17.8	5.9	17.3	4.3	14.5	1.8	14.9
BEURON	4.4	20.3	5.8	19.0	4.2	13.5	2.3	15.9
PAVIA	9.7	20.7	7.4	17.7	4.2	17.3	4.0	17.7
BIETCHHORN	-1.6	1.1	-1.9	0.7	-4.0	0.6	-7.6	-0.4

Figure 17 Exemple de sortie en routine de températures corrigées, les quatre dernières stations représentent les points grille de référence avec les valeurs brutes du modèle.

### Erreurs quadratiques moyennes après filtrage de Kalman

	JOUR + 1		JOUR + 2		JOUR + 3		JOUR + 4	
	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx	Tn	Tx
MONTANA	2.57	2.38	2.82	2.84	3.04	3.36	3.21	4.04
ZERMATT	2.35	2.54	2.82	2.89	3.02	3.32	3.24	4.04
SION	1.90	2.14	2.18	2.63	2.27	3.17	2.44	3.80
DOLE	3.11	2.31	3.37	2.69	3.57	3.12	3.70	3.94
FAHY	2.35	2.74	2.50	3.26	2.61	3.82	2.78	4.27
CHAUX-FONDS	2.32	2.35	2.66	2.80	2.93	3.38	3.23	4.27
PAYERNE	2.02	2.53	2.28	3.03	2.43	3.52	2.61	3.89
NEUCHATEL	1.94	2.50	2.12	2.93	2.30	3.40	2.47	3.79
GENEVE	1.99	2.51	2.35	2.93	2.52	3.39	2.59	3.85
PULLY	2.02	2.33	2.17	2.75	2.31	3.08	2.38	3.58
PLAFFEIEN	2.52	2.16	2.70	2.55	2.86	2.93	2.99	3.71
AIGLE	2.14	2.04	2.34	2.40	2.46	2.82	2.48	3.44
MOLESON	3.46	2.30	3.71	2.71	3.91	3.20	4.11	3.87
BALE	2.18	3.71	2.42	3.95	2.77	4.60	2.84	5.06
BERNE	1.99	2.85	2.23	3.40	2.63	3.77	2.69	4.21
SCHAFFHOUSE	1.92	2.78	2.21	3.45	2.59	3.94	2.70	4.37
ZURICH SMA	2.30	2.90	2.45	3.48	2.78	4.04	2.95	4.38
ALTORF	2.40	2.83	2.58	3.40	2.86	3.88	3.06	4.26
GUETSCH	3.48	2.87	3.85	3.28	4.15	3.72	4.35	4.16
LUCERNE	2.07	2.71	2.25	3.28	2.59	3.79	2.68	4.21
ENGELBERG	2.56	2.97	2.84	3.45	3.22	3.99	3.42	4.57
SAENTIS	4.00	3.38	4.41	3.82	4.84	4.37	5.14	4.73
VADUZ	2.80	2.86	3.02	3.36	3.33	3.89	3.42	4.25
SAINTE GALL	3.01	2.80	3.17	3.31	3.47	3.72	3.63	4.11
COIRE	2.48	2.96	2.71	3.51	3.05	4.05	3.20	4.56
DAVOS	2.58	3.25	2.84	3.73	3.33	4.23	3.48	4.84
SAMEDAN	3.47	2.79	3.73	3.23	4.21	3.49	4.44	4.08
PIOTTA	2.37	3.27	2.50	3.54	2.53	3.89	2.57	4.35
ROBBIA	2.74	3.09	2.87	3.36	3.00	3.66	2.98	4.13
COMPROVASCO	2.20	3.24	2.40	3.41	2.53	3.70	2.59	4.19
LUGANO	1.96	2.48	2.14	2.66	2.16	2.89	2.32	3.33
LOC. MAGADINO	2.32	2.86	2.59	2.99	2.68	3.30	2.64	3.75
LOC. MONTI	2.27	2.92	2.50	3.09	2.63	3.37	2.74	3.91
CIMETTA	3.44	2.77	3.71	3.08	3.93	3.38	4.13	3.77
Region 1	1.99	2.18	2.24	2.64	2.36	3.08	2.55	3.78
Region 3	1.76	2.35	2.02	2.79	2.19	3.24	2.31	3.67
Region 6	1.82	2.77	2.08	3.40	2.54	3.85	2.59	4.25
Region 7	1.93	2.70	2.17	3.34	2.60	3.91	2.79	4.28
Region 8	2.03	2.09	2.25	2.60	2.47	3.14	2.58	3.79
Region 9	2.04	2.69	2.21	3.27	2.51	3.77	2.66	4.18
Region 10	2.18	2.65	2.38	3.19	2.73	3.73	2.91	4.13
Region 14	1.98	2.66	2.21	2.82	2.26	3.11	2.35	3.61

Figure 18 Bilan statistique du deuxième programme pour une période opérationnelle entre le 1 février et le 30 août 1993.

## 6 Améliorations et développements

Plusieurs possibilités sont offertes pour améliorer la qualité de corrections :

D'une part en introduisant d'autres prédicteurs tels que les températures en air libre (850 hPa par exemple), d'autre part en choisissant des paramètres variables du filtre spécifiques à chacune des stations pour différentes saisons ou périodes de l'année. Ces types de compléments demandent une étude sur une période de plusieurs années et ne sont à notre avis nécessaires que pour les stations d'altitude, pour les stations de plaine les améliorations escomptées seront très faibles.

De plus les résultats obtenus avec le deuxième programme sont très prometteurs grâce notamment à la proximité temporelle des observations et des prévisions, ainsi qu'aux prédicteurs utilisés (températures extrêmes), surtout pour les corrections des températures maximales.

On pourrait également introduire d'autres paramètres, tels que la couverture du sol, présence d'inversion, indices en prévision, ... qui pourraient soit être calculés indirectement à partir de valeurs prévues par le modèle, soit se baser sur des mesures, comme la somme locale de précipitations.

## 7 Conclusion

Ce travail a mis en évidence l'efficacité d'un traitement à l'aide d'un filtre de Kalman. Au point de vue statistique, la réduction des erreurs quadratiques moyennes et l'absence de biais est remarquable. En plus, l'adaptivité rapide de ce traitement convient parfaitement à des données météorologiques, telle que la température à 2 mètres.

Les premiers résultats obtenus lors d'une première période d'exploitation en routine sont très prometteurs et comparables aux résultats de Cacciamani [11] pour une application semblable à des stations de plaine hors relief.

La nouvelle version du programme a montré qu'il était possible d'accroître le nombre de stations suisses relativement facilement et sans une longue étude préalable. Un complément est sans doute nécessaire pour les sites au-dessus de 1500m d'altitude. Un bilan plus complet ainsi que des comparaisons avec la première version du programme seront réalisées dans un proche avenir.

Il faut toutefois rester prudent en utilisant les valeurs filtrées, car si le filtre apprend très bien une situation, un changement brusque peut ne pas être convenablement perçu. Par exemple prenons la puissante descente d'air arctique prévue par le modèle pour le 22 février 93, après une période d'inversion à Genève;

	19.2.93	20.2.93	21.2.93	22.2.93
Genève Tn corrigé	0.0	2.9	1.0	0.8
Pt(1) Tn	-1.5	-0.4	-1.1	-3.7
T air libre 850mb	-3	-6	-4	-12

Tableau 3 Températures minimum pour Genève corrigées par le filtre basé sur les valeurs du point de grille Pt(1), ainsi que les température en air libre à 850mb. Modèle initialisé le 17 février 12z.

Les valeurs corrigées restent pratiquement stationnaires les 21 et 22 alors qu'une pénétration d'air très froid est planifiée par le modèle.

Dans ce cas tout comme lorsque des données sont manquantes plusieurs jours, les fluctuations sont probables et entraînent des erreurs supplémentaires. Il convient donc de rester attentif pour exploiter au mieux les valeurs livrées par le traitement statistique de Kalman.

Pour terminer signalons les prévisionnistes du centre météorologique de Genève (CMG) ont utilisé ces données filtrées comme guide à la prévision, ils sont d'ores et déjà acquis à ce nouveau produit numérique.

### Adresse de l'auteur

Daniel Cattani  
 Centre Météorologique de Genève  
 Case Postale 312  
 CH-1215 Genève 15

### Remerciements

Ce projet encouragé par J. Ambühl a été mené à terme grâce à l'appui essentiel de P.Eckert (MET), qui a construit les fichiers de travail et s'est occupé de la partie opérationnelle en routine.

## 8 Bibliographie

- [1] Persson A.  
*Kalman filtering, a new approach to adaptive statistical interpretation of numerical meteorological forecasts*  
ECMWF Newsletter N°46 june 1989 p.16-20
- [2] Kalman R.E. (1960)  
*A new approach to linear filtering and prediction problems*  
Jour. of Basic Engineering (Trans. ASME series D) 82 p.35-45
- [3] Kalman R.E. and Bucy R.S. (1961)  
*New results in linear filtering and prediction theory*  
Jour. of Basic Engineering (Trans. ASME series D) 83 p.93-105
- [4] Leach B.W.  
*An application of Kalman filtering to airborne wind measurement*  
Journal of Atmospheric and Oceanic Vol.8 p.51 (1991)
- [5] Steven G.F.  
*Kalman filtering*  
Electronics & wireless word (nov.1988) p.1083
- [6] Albert A.E., L.A. Gardner  
*Stochastic approximation and non-linear regression*  
Research monograph 42 MIT-Press Cambridge Massasuchets p.183
- [7] A. Priestley  
*Spectral analysis and time series*  
Vol.2 Academic Press (1981) p.807
- [8] Davis M.H.A. and Vinter R.B.  
*Stochastic modelling and control*  
Monograph on statistics and applied probability, Chapman and Hall ed.  
p.117-124
- [9] Mélard G.  
*Analyse de données chronologiques*  
Ed. Science programmes NATO p.112-122
- [10] Persson A.  
*Kalman filtering, a new approach to adaptive statistical interpretation of numerical meteorological forecasts -and- Programme Fortran version dec. 1991*
- [11] Cacciamani C.  
*Minimum temperature forecasts at the regional meteorological service of Emilia Romagna by application of the Kalman filter technique*  
ECMWF Newsletter N°60 1992 p.9

