

**Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute**

Zürich

Nr. 135

CORRECTION DES DONNEES AEROLOGIQUES BRUTES
DU RADIOSONDAGE DE PAYERNE

par

Jean Rieker, Payerne
Jürg Joss, Locarno-Monti

Décembre 1985

Radiosonde	551.508.822
Température	551.524
Pression	551.54

Résumé

Tandis que la correction d'inertie de l'hygromètre est restée inchangée depuis 14 ans environ, de nouvelles corrections de température et de pression ont été introduites dans le radiosondage de Payerne dès le 13 mai 1980 à 12h TU. Sans être parfaite, la réadaptation est néanmoins cohérente avec la théorie et les expériences de laboratoire. On peut en outre conclure que des erreurs d'humidité et des écarts modérés de ventilation par rapport à l'expression analytique standard proposée sont sans effets sensibles sur la détermination de la température et du géopotential.

Zusammenfassung

Während die Korrekturen betreffend die Trägheit des Hygrometers seit ca. 14 Jahren unverändert beibehalten werden, wurden neue Korrekturen für Temperatur und Druck auf die Radiosondierungsdaten von Payerne, gültig ab 13. Mai 1980, 1200 UT, eingeführt. Ohne Anspruch auf Vollkommenheit stellt die neue Anpassung nichtsdestoweniger eine volle Uebereinstimmung mit der einschlägigen Theorie und Laborversuchen dar. Es kann somit ohne grössere Einschränkung gesagt werden, dass die Restfehler bezüglich Temperatur und Feuchte, herrührend von nachträglichen Korrekturen auf die Feuchte und Ventilation, von untergeordneter Bedeutung für die Temperatur und das Geopotential sind.

Riassunto

Mentre la correzione dell'inerzia dell'igrometro è rimasta incambiata da circa 14 anni, nuove correzioni della temperatura e della pressione sono state introdotte nel radiosondaggio di Payerne dal 13 maggio 1980 alle 1200 TU. Senza essere perfetta, la riadattazione è coerente con la teoria e le esperienze del laboratorio. Si può inoltre concludere che gli errori dell'umidità e le deviazioni moderate di ventilazione in rapporto all'espressione analitica standard proposta sono senza effetto sensibile sulla determinazione della temperatura e del geopotenziale.

Summary

From May 13, 1980 at 12 UT, new corrections of temperature and pressure have been included in the radiosoundings of Payerne, while the humidity correction remained unchanged for about 14 years. Without being perfect, this new fit is however coherent with theory and laboratory experiments. Furthermore it can be concluded that humidity errors and moderate deviations of ventilation with respect to the proposed standard analytical equation have little significance on the temperature and geopotential heights.

TABLE DES MATIERES

	Page
1. Introduction	1
2. Correction de rayonnement ΔT de la température	3
2.1 Paramètres quantifiables agissant sur le terme correctif de température	3
2.1.1 Pression atmosphérique P	3
2.1.2 Ventilation v du thermomètre	4
2.1.3 Radiations solaires incidentes de courtes longueurs d'onde	6
2.1.3.1 Mesures en laboratoire	6
2.1.3.2 Comparaison entre les radiosondages diurnes et nocturnes	6
2.1.3.3 Angle d'incidence α du rayonnement solaire	10
2.1.4 Rayonnement du bimétal dans le domaine des grandes longueurs d'onde	10
2.1.5 Propriétés instrumentales	10
2.1.6 Facteur de nébulosité N	11
2.1.7 Mouillage et gel du thermomètre	11
2.1.8 Inertie du thermomètre	12
2.2 Premier résultat analytique concret de la correction de température ΔT	13
3. Correction de pression ΔP	13
3.1 Expression générale	13
3.2 Détermination de la correction de pression ΔP	14
3.2.1 Coefficients de température C_{Ti}	14
3.2.2 Température t_{ER} des capsules anéroïdes pendant l'étalonnage	16
3.2.3 Température t_{AR} des capsules anéroïdes pendant le radiosondage	17
3.2.4 Température initiale t_o	17
3.3 Expression "définitive" de la correction de pression	18

	Page
4. Correction d'inertie ΔU de l'hygromètre	19
5. Analyse et adaptation de la correction de température ΔT	21
5.1 Première version adoptée le 24 avril 1980 à 12h TU	21
5.2 Deuxième version appliquée le 1er mai 1980 à 12h TU	22
5.3 Version "définitive" adoptée le 13 mai 1980 à 12h TU	22
5.4 Influence de la ventilation v sur le terme correctif ΔT de rayonnement	24
6. Conclusions	27
Annexe 1	29
Références	30
Figures 1 à 10	32 à 41

1. Introduction

La sonde aérologique suisse est une sonde mécanique fonctionnant selon le principe d'Olland. Le capteur de température est constitué d'un bimétal en forme de ruban rectangulaire, enroulé en spirale (137 x 4 x 0,3 mm) argenté, très brillant (épaisseur de l'argent 5 μm); le capteur de pression, de deux paires de capsules anéroïdes autonomes, l'une travaillant du sol à 95 hPa, l'autre de 95 hPa à 10 hPa; le capteur d'humidité, d'une baudruche circulaire. Chaque capteur actionne un levier d'amplification.

Comme les sondes sont étalonnées sans boîtier dans une enceinte climatique, les conditions d'environnement sont notablement différentes pour chacune d'elles dans l'atmosphère libre. C'est la raison pour laquelle des corrections sont appliquées aux mesures des paramètres météorologiques.

Les températures diurnes, mesurées au cours d'un radiosondage, sont en effet entachées d'une composante due au rayonnement solaire qui n'existe pas à l'étalonnage et qu'il s'agit de compenser par une correction. Il faut, de plus, introduire une correction de pression pour tenir compte des différences de températures des capsules anéroïdes et des transducteurs métalliques durant l'étalonnage et le radiosondage.

L'étalonnage du capteur d'humidité, loin d'être rigoureux, puisqu'il est exécuté à la température ambiante, donc constante, dans une enceinte appropriée, de 10% à 100% d'humidité relative U, ne reflète pas les conditions naturelles d'un radiosondage, caractérisées par une diminution de la pression avec l'altitude et, jusqu'à la tropopause, de la température.

Si la mesure de l'humidité relative effectuée au cours d'un radiosondage avec la méthode indiquée peut satisfaire le prévisioniste en général, il n'en est pas de même du physicien de l'atmosphère qui désire connaître

avec précision la masse d'eau par unité de volume d'air le long de la courbe d'état de l'atmosphère. En fait, la seule correction opérée depuis plus d'une dizaine d'années ne concerne que l'inertie de l'hygromètre.

Les altitudes des inversions de température et d'humidité, des sautes brusques de vent et des niveaux standard de pression, exprimées en mètres géopotentiels (gpm), sont fonction de la pression P, de la température T et de l'humidité U. Des erreurs de mesures P, T, U, ont donc des répercussions directes sur l'exactitude des altitudes calculées (Rieker, 1976 a).

L'approche suivie pour établir les corrections des données aérologiques ne devient compréhensible qu'en fonction de développement historique du système de radiosondage de Payerne. Dès le 5 juin 1975, le radiosondage est automatisé, une seule personne assure le gonflage du ballon et supervise l'ensemble des opérations. Jusqu'à cette date, l'automatisation fut menée progressivement, selon les développements les plus récents de la technologie électronique et informatique du moment, tout en respectant les contraintes budgétaires et celles qu'exigeait la poursuite de l'exploitation des radiosondages. Il fallait conserver l'infrastructure générale au sol, à l'origine non conçue pour un usage automatique. Pour des raisons de compatibilité, ont été adaptés le système de réception au sol, l'émetteur 400 MHz de la sonde et son boîtier en polyester.

Une année environ après l'introduction des radiosondages automatiques, une fois les problèmes d'émetteurs résolus et effectué le réglage de l'antenne, suite à sa révision du 19 août au 10 octobre 1975, il fut possible de recueillir un nombre suffisant de données cohérentes dans la stratosphère.

La comparaison des données aérologiques effectuées du 10 au 13 avril 1976 à Payerne avec les systèmes suisses BASORA (Ruppert, 1979) et finlandais CORA corroborait la présomption que les sondages suisses étaient systématiquement trop froid de 0,7°C environ depuis leur automatisation. La

cause, décelée au niveau de la programmation dans le procédé d'acquisition des données, fut éliminée dès le 18 mai 1976 au radiosondage de 12h TU (Rieker, 1976 b).

Plus tard, les résultats de la comparaison des radiosondages ASOND-78 (Philipps et al. 1980/81) du 9 au 20 octobre 1978 à Payerne, prélude à la comparaison internationale SONDEX-81 (Philipps et al. 1983) du 13 au 29 avril 1981 à la station aérologique et à la période d'observations intensives SOP du programme ALPEX (mars et avril 1982), montraient, tant en ce qui concernait les radiosondages que les expériences en laboratoire conduite à l'Osservatorio Ticinese et à Payerne, que les corrections d'antant (Ackermann, 1968) devaient être adaptées aux nouvelles conditions (Joss, 1980).

Comme la sonde suisse est fondamentalement mécanique, il est peu probable qu'une correction type des données de l'un de ces capteurs s'adapte à chacune d'elles. Les tolérances de fabrication et les conditions d'ascension chaque fois différentes ont plutôt tendance à agir dans le sens d'une dispersion du terme correctif. C'est pourquoi, il importe de mettre en évidence les paramètres perturbateurs significatifs et indépendants, capables de jouer un rôle prépondérant sur le terme correctif, et d'en connaître leurs tailles respectives, pas toujours déterminées sans erreurs résiduelles. Il en résulte que le procédé opérationnel doit être aussi simple que possible. Seuls sont à considérer les paramètres dont les effets sont univoques et dont les valeurs peuvent être facilement trouvées. Si tel n'était pas le cas, elles devraient être remplacées par des quantités expérimentales moyennes. Un procédé simple de correction permet toujours, selon les besoins, de revenir facilement aux données brutes non corrigées.

2. Correction de rayonnement ΔT de la température

2.1 Paramètres quantifiables agissant sur le terme correctif de température

2.1.1 Pression atmosphérique P

Si la radiation et la conduction sont négligées, la pression atmosphérique agit sur le terme correctif ΔT selon la loi:

$$\Delta T \sim \frac{1}{\sqrt{P}} \quad (1)$$

L'erreur de température est donc dix fois plus grande à 10 hPa qu'à 1000 hPa. Comme la pression est mesurée par la sonde au cours de son ascension, son introduction dans le terme correctif ne pose pas de problème.

2.1.2 Ventilation v du thermomètre

Le deuxième paramètre important, la ventilation v du thermomètre, identifié comme étant la vitesse relative de la sonde par rapport à l'air ambiant (à ne pas confondre avec sa vitesse ascensionnelle, qui est la vitesse ascendante du ballon par rapport au sol) agit sur le thermomètre comme une résistance à la transmission de chaleur. Le terme correctif ΔT est lié à la ventilation par la loi bien connue:

$$\Delta T \sim \frac{1}{\sqrt{v}} \quad (2)$$

Une bonne estimation de la ventilation n'est cependant pas évidente. La composante verticale des courants, la forme du ballon, la technique de mesure de la pression de la sonde suisse (méthode de balayage) sont autant de facteurs, parfois mal connus, qui altèrent le calcul de la ventilation.

En fait, on peut admettre que la ventilation, le long d'un profil vertical, est sensiblement la même d'un radiosondage à l'autre. La méthode utilisée a donc consisté à calculer une ventilation moyenne sur un ensemble de 25 radiosondages exécutés pendant la comparaison ASOND-78 en divisant l'atmosphère concernée en 4 tranches, délimitées par les surfaces de pressions 900; 300; 100; 30 et 10 hPa.

Comme les mesures PTU de la sonde suisse sont effectuées toutes les 30 secondes, à chaque groupe de mesures correspond un temps exprimé en minutes et demi-minutes, dont l'origine (temps zéro) est fixé par l'instant du lâcher. Par interpolation, on détermine les temps que met la sonde pour atteindre successivement les 5 niveaux standard de pression délimitant les 4 tranches définies ci-avant.

Pour chacun des 25 radiosondages on calcule la vitesse à laquelle la sonde traverse la tranche considérée. Les 4 vitesses par radiosondage ainsi

déterminées sont assignées à la pression moyenne de la tranche, selon l'expression:

$$P_m = e^{\frac{\ln P_1 + \ln P_2}{2}} \quad (3)$$

où P_1 et P_2 sont respectivement les niveaux de pression inférieur et supérieur de la tranche considérée (tableau 1).

Le polynôme de régression du 3ème degré v , exprimé en fonction du $\ln P$, devient:

$$v = 4,15 \cdot \ln^3 P - 49,3 \cdot \ln^2 P + 124,3 \cdot \ln P + 397 \quad (4)$$

On assimile la vitesse v à la ventilation du thermomètre.

Tableau 1

ASOND-78: vitesse ascensionnelle du ballon			
niveau de pression P (hPa)		vitesse ascensionnelle v	
milieu des tranches P_m	limites des tranches	absolue m/min	relative à 519.6 hPa facteur
	10		
17.32		445 ± 16%	1.63
54.8	30	377 ± 11%	1.38
173.2	100	287 ± 4.2%	1.05
519.6	300	273 ± 3.7%	1.00
	900		

2.1.3 Radiations solaires incidentes de courtes longueurs d'onde

2.1.3.1 Mesures en laboratoire

Les mesures faites en laboratoire montrent que la hauteur α du soleil joue un rôle important en raison de la géométrie du capteur de température. Elles ont en plus confirmé la théorie de la couche limite de la transmission de chaleur. Il ressort que l'erreur de température due au rayonnement dépend de la pression et de la ventilation, mais que sa dépendance par rapport à la température de l'air ambiant peut être négligée; il a été possible également de déterminer, dans le cas d'une seule spirale, la dépendance du rayonnement en fonction de l'angle d'incidence de la lumière et d'estimer l'ordre de grandeur de l'erreur attendue dans la nature. La simulation de la ventilation naturelle à l'aide d'un ventilateur, qui provoque généralement un courant d'air relativement turbulent, et celle de la lumière solaire par une lampe de projecteur, sont des sources d'inexactitude dont il faut tenir compte. Toujours est-il que, entre certaines limites escomptées, les mesures opérées en laboratoire correspondent assez bien à celles faites dans l'atmosphère (Joss et al., 1978, 1979, 1980).

On voit donc que l'ampleur de l'erreur due au rayonnement n'est pas déterminée de façon univoque. Il faut admettre que les capteurs de température, bimétal en forme de spirale, absorbent l'énergie de rayonnement de manière différenciée, selon leur géométrie (tolérance de fabrication) et selon les multiples réflexions variables qui en résultent, conditionnées par l'angle d'incidence du rayonnement solaire.

2.1.3.2 Comparaison entre les radiosondages diurnes et nocturnes

Comme la position géographique de Payerne est telle que les heures des radiosondages de 00h TU et de 12h TU coïncident sensiblement avec le milieu de la nuit et du jour, le refroidissement nocturne de l'atmosphère et son réchauffement diurne, qui atteignent leur maximum respectivement au lever du soleil et en fin d'après-midi, sont à mi-course à 00h TU

et à 12h TU. Conséquemment, dans une même masse d'air, mis à part les effets de rayonnement et de convection dans les trois premiers kilomètres, les températures d'une même tranche d'atmosphère, notamment dans la stratosphère, devraient être sensiblement égales à minuit et à midi d'un même jour.

La température virtuelle moyenne \bar{T}_v [K] d'une tranche d'atmosphère délimitées par les surfaces de pression P_1 et P_2 ($P_1 > P_2$) est donnée par

$$\bar{T}_v = \frac{T_{v1} + T_{v2}}{2} = (h_2 - h_1) \frac{g}{R} \cdot \frac{1}{\ln \frac{P_1}{P_2}} \quad (5)$$

où

T_{v1} et T_{v2} [K] sont les températures virtuelles aux niveaux h_1 et h_2 [m] des surfaces de pression P_1 et P_2 [hPa],

$g = 9,80665 \text{ ms}^{-2}$ est l'accélération de la pesanteur

$R = 287,05 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ la constante des gaz parfaits pour l'air sec.

Au-dessus du niveau de pression de 400 hPa, on peut admettre que $T_v \approx T$ (T température de l'air).

L'estimation de la température de rayonnement, concernant la tranche d'atmosphère 20/10 hPa, a été entreprise en comparant les différences de température moyenne "midi" moins "minuit" à partir de l'équation (5), de 1634 paires de radiosondages de 1976 à 1979. Les moyennes des différences "midi" moins "minuit" sont classées selon l'angle d'élévation α du soleil (fig. 1). Confrontées aux mesures faites en laboratoire (ASOND-78), les courbes sont similaires, mêmes emplacements des maxima, mais différentes en ampleur.

Le fait, qu'à partir des maxima vers les angles d'élévation croissants, les valeurs déduites des 1634 paires de radiosondages diminuent plus lentement que celles mesurées en laboratoire, peut provenir de:

- 1) l'influence du ballon
- 2) la comparaison des températures "jour/nuit", seul moyen expérimental disponible, mais invérifiable

- 3) la dispersion des valeurs mesurées dans l'atmosphère libre qui donne un élargissement systématique
- 4) les erreurs de mesure en laboratoire ou modèle utilisé erroné
- 5) l'oscillation de la sonde au-dessous du ballon
- 6) la contribution des erreurs dues aux capsules anéroïdes
- 7) la contribution irréaliste de l'hygromètre (baudruche) dans le calcul de la température virtuelle pour de faibles pressions.

Comme la ficelle tenant la sonde a une longueur de 30 m au moins, l'influence du ballon sur le thermomètre peut certainement être négligée aussi bien de nuit que de jour (refroidissement nocturne du ballon par rayonnement ou son réchauffement diurne par les rayons solaires, agissant dans les deux cas sur la température ambiante de l'air dans son voisinage immédiat).

L'oscillation de la sonde au-dessous du ballon, inversement proportionnelle à la longueur de la ficelle, est aussi négligée, bien qu'elle puisse altérer, dans une moindre mesure, la valeur de l'angle d'élévation α du soleil.

En revanche, les contributions des erreurs en provenance des capsules anéroïdes et notamment de l'hygromètre peuvent jouer des rôles non négligeables.

Il faut mentionner à cet égard, que la mesure de l'humidité relative U , servant au calcul de la température virtuelle

$$T_v = T \left[1 + \frac{0,164525}{P} U e^{(17,78 - \frac{5390}{T})} \right] \quad (6)$$

où U [%]; P [hPa] et T [K],

utile elle même pour déterminer l'épaisseur d'une tranche d'atmosphère

$$h_2 - h_1 = \frac{R}{g} \bar{T}_v \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{voir éq. 5}), \quad (7)$$

en l'occurrence 20/10 hPa, n'est plus prise en considération dès que la pression est inférieure à 200 hPa depuis le 14 septembre 1978 à 12h TU, car le comportement de l'hygromètre mécanique (baudruche) n'est pas connu

dans la haute atmosphère. En d'autres termes, on admet que l'air y est pratiquement sec ($U = 0\%$).

A titre d'illustration, la figure 2 montre le comportement de

$$\Delta T_v = \Delta U \cdot f_1 (P; T) \quad (8)$$

déduit de l'équation (6) et où:

$$\Delta U = 50\% \quad \text{et} \quad f_1 (P; T) = T \frac{0,164525}{P} e^{(17,78 - \frac{5390}{T})};$$

ΔT_v , qui peut être assimilé à la différence:

$$T_v - T = U \cdot f_1 (P; T) \quad (8a)$$

dérivée de l'équation 6 également, décroît rapidement de 1000 hPa à 200 hPa, pour augmenter par la suite, notamment à partir de 40 hPa. Tandis que l'erreur ΔU augmente du sol avec l'altitude, ses conséquences sur la température virtuelle s'amointrissent jusque vers 200 hPa en raison de la forte décroissance des températures. Une erreur réaliste de $\Delta U = 15\%$ du sol à 700 hPa représente $0,2^\circ\text{C}$ et une erreur $\Delta U = 50\%$ de 700 à 400 hPa représente approximativement $0,15^\circ\text{C}$.

On peut donc conclure que, dans la troposphère, les erreurs de mesure de l'humidité relative n'ont que peu d'influence sur la température virtuelle. C'est par températures positives qu'elles sont maximales, mais c'est aussi le domaine où l'hygromètre travaille le mieux.

En revanche dans la stratosphère, où la pression est faible et où généralement la température augmente, notamment entre 30 et 10 hPa, les erreurs d'humidité jouent un rôle important sur le comportement de la température virtuelle. Les conséquences peuvent être de l'ordre du degré ou plus en été, puisque les températures sont voisines de -45°C à 20 hPa et de -30°C à 10 hPa, et dans certaines situations hivernales de "réchauffements brusques". A cela s'ajoute une correction d'inertie de l'hygromètre (voir § 4: Correction d'inertie ΔU de l'hygromètre). Objectivement parlant, les mesures de l'humidité

peuvent prendre toutes les valeurs irréalistes possibles. C'est probablement une des raisons de l'écart observé entre les mesures de laboratoire et celles déduites des radiosondages 1976/1979: ces dernières sont de 20% environ plus élevées que celles résultant des 12 paires jour/nuit de radiosondages de la campagne ASOND-78 pour laquelle la contribution de l'humidité avait déjà été supprimée dès 200 hPa.

2.1.3.3 Angle d'incidence α du rayonnement solaire

Comme les mesures en laboratoire le confirme donc, l'angle d'élévation α du soleil joue un rôle non négligeable. Vu l'analogie des courbes résultant des expériences en laboratoire et de la comparaison des radiosondages jour/nuit (période 1976/1979), on adopte un facteur s , fonction de l'angle d'élévation α , qui a la forme générale

$$s = \sin [2,5(\alpha+6)] \quad (9)$$

avec trois domaines distincts pour α :

1. $s = 0$ pour $\alpha < -6^\circ$
2. $s = \sin [2,5(\alpha+6)]$ pour $-6^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$
3. $s = 1$ pour $\alpha > 30^\circ$

2.1.4 Rayonnement du bimétal dans le domaine des grandes longueurs d'onde

Comme l'argent réfléchit presque intégralement le rayonnement infrarouge incident et, par conséquent, ne rayonne pratiquement rien vers l'extérieur, le refroidissement du bimétal par radiation peut être négligé pendant la nuit, de telle sorte qu'aucune correction nocturne de température n'est effectuée.

2.1.5 Propriétés instrumentales

Ici sont englobées des influences dues, par exemple, à la qualité de l'argenture de la spirale du bimétal, de sa géométrie et du contact

calorifique de la spirale à son support.

Parmi les sources possibles de perturbations, seule la qualité de l'argenture du bimétal en est indubitablement la principale.

Les propriétés instrumentales peuvent être cernées au mieux, si elles sont considérées dans leur ensemble. Les sondes doivent être étalonnées, préparées pour le vol et lâchées dans les mêmes conditions, donc, autant que possible, traitées selon des procédés identiques.

2.1.6 Facteur de nébulosité N

Comme la radiosonde ne reçoit qu'une fraction du rayonnement solaire en traversant des couches plus ou moins épaisses de nuages, on intervient sur la correction par un facteur de nébulosité N chargé d'en opérer une réduction systématique moyenne et permanente.

Ce facteur N augmente de 0,3 à 1000 hPa jusqu'à 1 à 500 hPa selon la relation:

$$\text{pour } P > 500 \text{ hPa } N = 1 - 0,7 \cdot \left(\frac{P}{500} - 1 \right) \quad (10)$$

$$\text{et pour } P \leq 500 \text{ hPa } N = 1$$

2.1.7 Mouillage et gel du thermomètre

Il a été démontré (Joss et al. 1979; Philipps et al. 1980/81), notamment dans les cas d'inversion, que des écarts de températures peuvent être provoqués par un dépôt d'eau sur le capteur de température. L'eau retenue par la spirale provoque un effet psychrométrique qui fausse la mesure des températures.

L'ampleur de cette erreur dépend grandement de la quantité d'eau retenue par le thermomètre, qui est fonction de sa géométrie et de ses caractéristiques de surface. L'erreur de température ainsi produite ne joue pourtant qu'un rôle minime sur l'exactitude du calcul de l'altitude des niveaux standard. En revanche, le gel complet d'un bimétal

préalablement mouillé a des conséquences beaucoup plus graves.

Il arrive, en moyenne une dizaine de fois par année, que le thermomètre soit bloqué par le gel immédiatement après le franchissement du niveau de congélation, cet accident se manifestant par forte turbulence, notamment dans le voisinage d'un front froid (orage, forte averse de pluie). Le grippage du thermomètre rend illusoire toute poursuite du radiosondage au-delà du niveau de congélation. Aucune action spéciale n'est requise dans ces cas, sinon la prise en considération des données aérologiques jusqu'au niveau de congélation uniquement ou, dans la mesure des possibilités, le lâcher d'une deuxième radiosonde après l'averse ou l'orage.

2.1.8 Inertie du thermomètre

En complément aux études faites jusqu'ici sur l'inertie du thermomètre dans le cadre des colloques scientifiques de l'ISM et des projets ASOND, de nouvelles mesures en laboratoire furent effectuées dans une soufflerie construite à cet effet dans des conditions aussi naturelles que possible.

La constante de temps τ du bimétal déduite est:

$$\tau = 3,9 \text{ s}$$

à la pression de 970 hPa et pour une ventilation v de 4,5 m/s. A partir de cette valeur au sol, la théorie permet d'extrapoler l'inertie jusqu'à 10 hPa où elle atteindrait 28,1 s. Entre 500 et 100 hPa, elle varie de 5,2 s à 10,6 s (Joss et al. 1979).

Les résultats montrent conséquemment qu'on peut pratiquement négliger l'inertie en raison:

- du rythme lent des mesures (toutes les 30 secondes)
- de sa faible valeur dans la troposphère (réaction relativement rapide du thermomètre)
- de la faible variation de température au-dessus de la tropopause.

2.2 Premier résultat analytique concret de la correction de température ΔT

Les mesures réalisées en laboratoire servent avant tout à la bonne compréhension des processus physiques à l'origine des erreurs, mais moins à la détermination rigoureuse de leur ampleur. La théorie permet d'expliquer la nature des paramètres mesurés dans l'atmosphère et en laboratoire. Il est évident que le terme correctif de rayonnement déduit d'une série restreinte de radiosondages exécutés pendant ASOND-78, a été appelé à être confirmé. Dans un premier temps, pour concrétiser la formule analytique, les valeurs de base suivantes ont été adoptées au niveau de pression de 10 hPa:

Correction de rayonnement $\Delta T = 6,2$ K et

Ventilation $v = 472$ m/min

Appuyées par la théorie et confirmées par les mesures de laboratoire, les corrections ΔT ont été dérivées jusqu'au sol, selon l'expression ci-après, fonction univoque de la pression:

$$\Delta T \text{ [K]} = \left[\sin 2,5(\alpha+6) \right] \cdot \left[1 - 0,7 \left(\frac{P[\text{hPa}]}{500} - 1 \right) \right] \cdot \frac{6,2}{\sqrt{v \text{ [m/min]} \cdot \frac{P[\text{hPa}]}{4730}}} \quad (11)$$

où $v = 4,15 \cdot \ln^3 P - 49,3 \cdot \ln^2 P + 124,3 \cdot \ln P + 397$

$s = 0$ pour $\alpha < -6^\circ$

$s = \sin [2,5(\alpha+6)]$ pour $-6^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$

$s = 1$ pour $\alpha > 30^\circ$

L'angle d'élévation α du soleil est calculé d'après la formule analytique donnée par McInturff et al. (1979, p.10), selon l'annexe 1.

et $N = 1 - 0,7 \left(\frac{P}{500} - 1 \right)$ pour $P \geq 500$ hPa

$N = 1$ pour $P < 500$ hPa

3. Correction de pression ΔP

3.1 Expression générale

Dans le cas de la radiosonde conventionnelle suisse, une correction de

pression se justifie en raison des températures différentes que prennent pendant l'étalonnage et le radiosondage les capsules anéroïdes et leurs leviers d'amplification. Cette différence, multipliée par les coefficients de températures des capsules anéroïdes couplées à leur transducteur, donne une approximation de la correction de pression cherchée.

La pression corrigée est définie comme étant:

$$P^* = P_b + \Delta P \quad (12)$$

où P_b est la pression brute mesurée pendant le radiosondage
 ΔP la correction appliquée à la mesure brute.

3.2 Détermination de la correction de pression ΔP

L'expression classique de ΔP est donnée par:

$$\Delta P_i = C_{Ti} \cdot (t_{ER} - t_{AR}) \quad (13)$$

où $t_{ER} - t_{AR}$ sont les différences de température des capsules anéroïdes pendant l'étalonnage (t_{ER}) et le radiosondage (t_{AR}), C_{Ti} les coefficients de température respectifs des capsules anéroïdes et de leurs leviers d'amplification, $i = 1$, pour la première paire du sol à 90 hPa et $i = 2$, pour la deuxième paire de 90 à 10 hPa.

3.2.1 Coefficients de températures C_{Ti}

Les 18 et 19 décembre 1979, le comportement de la pression de trois sondes complètes choisies au hasard fut étudié à Payerne dans une enceinte climatique spéciale pour 5 températures ambiantes:

+20°C; 0°C; -20°C; -40°C. et -60°C

Une fois la température de l'enceinte climatique stabilisée à l'une des 5 températures définies ci-avant, on abaisse la pression de

L'enceinte jusqu'à 5 hPa, tout en mesurant la pression de référence $P_{réf}$ et les pressions brutes P_b fournies par les deux baromètres de chacune des 3 sondes.

Tandis que les pressions P_{b2} (2ème paire de capsules anéroïdes) sont toujours inférieures aux pressions de référence entre 100 et 10 hPa pour la plage de températures choisies entre +20°C et -60°C, les pressions P_{b1} (1ère paire de capsules anéroïdes) sont inférieures aux pressions de référence jusque vers 221,7 hPa, puis supérieures de 221,7 à 90 hPa. En d'autres termes, l'ensemble du dispositif mécanique de mesure de la pression P_{b1} est compensé à 221,7 hPa.

Le coefficient de température représente la variation de pression par degré centigrade ou Kelvin de l'ensemble du dispositif mécanique de mesure de la pression P_1 ou P_2 .

$$C_{T_{1;2}} \quad \left[\frac{\text{hPa}}{\text{K}} \right]$$

$$\text{à } +20^\circ\text{C} : \quad \Delta P_{1;2}^{20} = P_{réf}^{20} - P_{1;2}^{20}$$

$$\text{à } 0^\circ\text{C} : \quad \Delta P_{1;2}^0 = P_{réf}^0 - P_{1;2}^0$$

$$\text{à } j^\circ\text{C} : \quad \Delta P_{1;2}^j = P_{réf}^j - P_{1;2}^j$$

d'où, quelle que soit la combinaison envisagée, on calcule

$$C_{T_{1;2}} = \frac{\Delta P_{1;2}^{20-j} - \Delta P_{1;2}^{0-j}}{(20-j) - (0-j)} \quad \left[\frac{\text{hPa}}{^\circ\text{C}} \right]$$

par exemple

$$C_{T_{1;2}} = \frac{\Delta P_{1;2}^{20} - \Delta P_{1;2}^0}{20}$$

Les coefficients de température $C_{T_{1;2}}$ peuvent être développés selon des polynômes de régression du 1er degré en fonction de la pression:

$$C_{T_1} = \frac{1}{1000} (0,433 \cdot P - 96) \left[\frac{\text{hPa}}{\text{°C}} \right] \quad (14)$$

$$C_{T_2} = \frac{1}{1000} (0,531 \cdot P + 5,2) \left[\frac{\text{hPa}}{\text{°C}} \right] \quad (15)$$

Les équations (14), (15) et les valeurs expérimentales sont représentés dans la figure 3.

3.2.2 Température t_{ER} des capsules anéroïdes pendant l'étalonnage.

L'étalonnage, par lot de 4 sondes, est exécuté dans une enceinte climatique où sont simulées au mieux les conditions d'un radiosondage dans l'atmosphère libre. A partir des conditions initiales ambiantes, on abaisse simultanément la pression P et la température T jusqu'à 5 hPa et -66°C , de manière continue, selon un programme automatique bien défini. Les capteurs de température, formés d'un bimétal en spirale, sont plongés dans un bain d'huile de silicone dont la propriété est de rester fluide jusque vers -90°C . Le thermomètre de référence est placé dans leurs voisinages immédiat.

Comme les conditions d'environnement des sondes sont pratiquement identiques d'un étalonnage à l'autre, seul suffit de connaître la série de mesures de température des capsules anéroïdes t_{ER} d'une sonde unique. Cette opération fut conduite le 20 mars 1979.

Vu que les coefficients de température C_{T_i} sont exprimés en fonction de la pression, il est rationnel d'exprimer aussi t_{ER} en fonction du même paramètre. Les mesures et le polynôme de régression cubique correspondant:

$$t_{ER} = 0,1938 \cdot \ln^3 P - 1,769 \cdot \ln^2 P + 7,76 \cdot \ln P - 13,3 \quad (16)$$

sont représentés dans la figure 5.

3.2.3 Température t_{AR} des capsules anéroïdes pendant le radiosondage

Pour procéder correctement, il faudrait exécuter la série complète des mesures de température des capsules anéroïdes au cours de chaque radiosondage. Malheureusement, vu les difficultés techniques d'une telle procédure, il a fallu la simplifier. La température des capsules anéroïdes a été mesurée au cours de deux radiosondages, les 29.8.78 à midi et 19.10.78 à minuit. Elles sont représentées, en fonction des températures de l'atmosphère et de la pression dans la figure 4. Bien que les lâchers eurent lieu à des époques et heures différentes, les températures des capsules sont pratiquement les mêmes à haute altitude (voisines de -26°C) en raison de l'isolation thermique du boîtier en polyester protégeant la sonde et l'émetteur, mais différentes au moment du lâcher.

En d'autres termes, quelle que soit la température initiale t_0 des capsules anéroïdes avant le lâcher, leur température finale aboutit à -26°C environ. La température des capsules anéroïdes pendant le radiosondage est aussi représentée par un polynôme de régression développé en fonction de la pression, en tenant compte de la température initiale t_0 des mêmes capsules au moment du lâcher.

Cette expression a la forme:

$$t_{AR} = t_A \frac{t_0 + 26}{47} - 26 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (17)$$

avec

$$t_A = -0,3444 \cdot \ln^4 P + 6,368 \cdot \ln^3 P - 38,62 \cdot \ln^2 P + 95,03 \cdot \ln P - 81,1$$

Sont représentées dans la figure 5 les fonctions $t_{AR}(t_0)$, pour t_0 égal à 20°C ; 18°C ; 8°C ; -2°C et -7°C .

3.2.4 Température initiale t_0

Les sondes étalonnées sont entreposées dans une armoire hygrométrique

à température ambiante, comprise généralement entre 23 et 28°C, jusqu'au moment où elles sont préparées pour le radiosondage. La sonde est alors mise dans un boîtier en polyester blanc avec l'émetteur chargé de transmettre les données au sol. Cette opération est faite en salle dans les mêmes conditions de température que celles régnant dans l'armoire hygrométrique. L'ensemble est ensuite testé pendant 10 à 15 minutes dans un abri météorologique spécial en plein air, doté d'un grand ventilateur placé sous le toit et engendrant un courant d'air de 5 m/s, correspondant approximativement à la ventilation du thermomètre pendant le radiosondage.

Comme la sonde est isolée thermiquement par son boîtier protecteur, la température des capsules anéroïdes et des transducteurs ne saurait varier beaucoup au cours des 10 à 15 minutes pendant lesquelles elle est restée à l'air libre.

A vrai dire cette hypothèse n'a pas fait l'objet d'une vérification. En tout état de cause t_0 a été fixé à 18°C.

3.3 Expression "définitive" de la correction de pression

La figure 6 représente les ΔP_1 et ΔP_2 calculés d'après l'équation générale (13) et les expressions (14; 15; 16 et 17), en fonction de la pression et selon les paramètres $t_0 = 28^\circ\text{C}$, 18°C , 8°C et -7°C . En définitive, les corrections appliquées sont décrites par les équations (18).

$$\begin{aligned}\Delta P_1 &= \frac{1}{1000} (0,433 \cdot P - 96) (t_{ER} - t_{AR}) \\ \Delta P_2 &= \frac{1}{1000} (0,531 \cdot P + 5,2) (t_{ER} - t_{AR})\end{aligned}\quad (18)$$

où

$$t_{ER} = 0,1938 \cdot \ln^3 P - 1,769 \cdot \ln^2 P + 7,76 \cdot \ln P - 13,3$$

$$t_{AR} = t_A \frac{t_0 + 26}{47} - 26$$

avec

$$t_A = -0,3444 \cdot \ln^3 P + 6,368 \cdot \ln^2 P - 38,62 \cdot \ln P + 95,03 \cdot \ln P - 81,1$$

et $t_0 = 18^{\circ}\text{C}$

4. Correction d'inertie ΔU de l'hygromètre

La seule correction appliquée à la mesure de l'humidité relative concerne l'inertie de l'hygromètre dont l'équation a la forme générale:

$$\Delta U = U - U_b = \beta \frac{dU_b}{dZ} \quad (19)$$

où

U est l'humidité relative réelle de l'atmosphère

U_b l'humidité relative indiquée par l'hygromètre

β le coefficient d'inertie de l'hygromètre exprimé en temps (minutes ou secondes)

$\frac{dU_b}{dZ}$ la variation de l'hygromètre par rapport au temps.

Dans le cas de la sonde conventionnelle suisse où les mesures se font selon des cycles des 30 secondes, on a

$$\frac{dU_b}{dZ} = \frac{U_{h_2} - U_{h_1}}{Z_2 - Z_1}$$

où

U_{h_1} et U_{h_2} sont les indications successives de l'hygromètre aux niveaux h_1 et h_2 correspondant respectivement aux instants Z_1 et Z_2 , tels que $Z_2 - Z_1 = 0,5 \text{ min.}$

Le coefficient d'inertie, fonction de la température, exprime le temps qu'il faut à l'hygromètre pour indiquer pleinement une variation instantanée d'humidité.

Le coefficient d'inertie utilisé pour la sonde conventionnelle suisse a été déterminé expérimentalement il y a une quinzaine d'année. La cor-

rection appliquée est

$$\Delta U = \frac{2}{6,6} \cdot \frac{293-T}{10} \cdot \frac{U_{h2} - U_{h1}}{Z_2 - Z_1} \approx \frac{2}{3,3} 2^{-t/10} \cdot \frac{U_{h2} - U_{h1}}{Z_2 - Z_1} \quad (20)$$

où

$$t \text{ [}^\circ\text{C]}; T \text{ [K]}; Z_2 - Z_1 \text{ [}\frac{1}{2}\text{min]}.$$

Elle est utilisée uniquement dans le cas d'une augmentation de l'humidité $U_{h2} > U_{h1}$ en raison de l'hystérésis de l'hygromètre. En outre $U \leq 100\%$.

On trouve dans la littérature des valeurs expérimentales analogues (Hesse, 1961, p. 420; Sonntag 1966/68, p. 525) qui peuvent être exprimées analytiquement par les expressions

$$\log \beta \approx 3,05 \cdot 10^{-2} (43-t) \quad (21a)$$

où

$$\beta \approx 10^{\frac{316-T}{33}} \quad (21b)$$

Nolte (1967, p.9) donne un diagramme $\beta=f(t)$ qui peut être représenté par

$$\log \beta \approx 3,58 \cdot 10^{-2} (35,5-t) \quad (22a)$$

où

$$\beta \approx 10^{\frac{308,5-T}{28}} \quad (22b)$$

La figure 7 visualise le comportement de ces différents coefficients d'inertie, après l'adaptation du coefficient utilisé à Payerne en unité de secondes, selon le procédé suivant:

$$\beta_{\text{PAY}} \quad \text{en unité de demi-minute}$$

devient

$$\beta_{\text{PAY}} \cdot \frac{1}{2} \quad \text{en unité de minute}$$

où

$$P_{\text{PAY}} \cdot \frac{1}{2} \cdot 60 \quad \text{en unité de seconde}$$

D'une manière générale, on constate que les coefficients d'inertie β sont encore compris entre 2,5 et 3,5 minutes à -30°C , et augmentent ensuite rapidement quand la température diminue.

5. Analyse et adaptation de la correction de température ΔT

5.1 Première version adoptée le 24 avril 1980 à 12h TU

Dès le 24 avril 1980 à 12h TU, les corrections ΔT (éq. 11, § 2.2); ΔP_1 et ΔP_2 (éq. 18; § 3.3) ont été appliquées aux données aérologiques de Payerne, la correction ΔU (éq. 20; § 4) étant restée la même depuis sa mise en vigueur il y a une quinzaine d'années.

L'analyse des cartes synoptiques des niveaux standard de pression 850, 700, 500, 400, 300, 200 et 100 hPa a d'emblée montré qu'à minuit les données de Payerne s'intégraient parfaitement dans les champs d'altitude et de température des stations aérologiques voisines de Payerne, époque où la correction ΔT est nulle puisque l'angle d'élévation α est inférieur à -6° .

En revanche, à midi, l'altitude et la température présentaient des différences systématiques négatives par rapport aux champs correspondant, qui augmentaient de 850 à 200 hPa, dernier niveau disponible des cartes synoptiques de 12h TU.

Ces résultats ne sont pas surprenants, si l'on considère:

- que, la correction $\Delta T = 6,2\text{K}$ à 10 hPa est déduite des 1634 paires de données (minuit, midi), fonction des anciennes corrections de température et de pression, appliquées par Ackermann (1968), et
- que les corrections ΔT sont dérivées jusqu'au sol, avec comme appui les mesures de laboratoire et la théorie.

Une adaptation urgente du terme correctif de température (éq. 11), se révélait donc de toute nécessité.

5.2 Deuxième version appliquée le 1er mai 1980 des 12h TU

Le terme correctif de rayonnement fit l'objet de fébriles tentatives d'amélioration du 24 au 30 avril 1980. En désespoir de cause, puisqu'il fallait agir au plus vite, la constante 6,2 (éq. 11) fut remplacée par 5,2 le 1er mai 1980. En d'autres termes on portait la correction de 6,2°C à 5,2°C au niveau de 10 hPa.

L'équation (11) devenait donc

$$\Delta T = s \cdot N \frac{5,2}{\sqrt{\frac{v \cdot p}{4730}}} \quad (23)$$

avec $s = \sin [2,5(\alpha+6)]$ et $N = 1 - 0,7 \left(\frac{P}{500} - 1 \right)$

$s = 0$ pour $\alpha < -6^\circ$

$s = 1$ pour $\alpha > 30^\circ$

5.3 Version "définitive" adoptée le 13 mai 1980 à 12h TU

L'analyse des cartes synoptiques des niveaux standard de pression et, compte tenu de l'évolution météorologique, la comparaison des épaisseurs des tranches d'atmosphère 850/700; 700/500; 500/300; 300/200; 200/100 hPa, de nuit et de jour, montraient qu'une légère amélioration avait été atteinte, mais qu'elle était encore insuffisante. Il fallait agir plus vigoureusement sur le terme correctif de rayonnement de 500 à 100 hPa, la température étant encore trop fortement corrigée à midi.

Pour ce faire, seul le facteur de nébulosité N entra en considération. Du 1er mai au 12 mai 1980, la correction ΔT , par le truchement de son facteur de nébulosité N, fit l'objet d'investigations poussées.

Finalement, l'expression "définitive" (éq. 24) fut appliquée dès le 13 mai 1980 à 12h TU.

$$\Delta T = \underset{s}{\sin [2,5(\alpha+6)]} \underset{N}{(1-0,37 \cdot \ln \frac{P}{70})} \frac{5,2}{\sqrt{\frac{p \cdot v}{4730}}} \quad (24)$$

où p [hPa]
 v [m/min] = $4,15 \ln^3 P - 49,3 \ln^2 P + 124,3 \ln P + 397$
 $s = 0$ pour $\alpha < -60^\circ$ (α = angle d'élévation du soleil)
 $s = 1$ pour $\alpha > 30^\circ$ (pour le calcul de α voir annexe 1)
 N (facteur de "nébulosité" = 1 pour $p < 70$ hPa.

La figure 8 résume les étapes suivies pour améliorer le terme correctif de rayonnement ΔT (éq. 11; 23 et 24 pour $s = 1$).

Suite à l'introduction du dernier terme correctif de température (éq. 24), l'analyse du comportement des températures d'un radiosondage au suivant a permis d'en vérifier l'efficacité, en calculant la moyenne δ des différences "nuit" moins "jour" des températures moyennes des tranches correspondantes d'atmosphère de deux radiosondages consécutifs pour la période du 1er juin 1980 au 31 décembre 1983, étant admise l'hypothèse que, sur une longue période, les moyennes respectives des températures nocturnes et diurnes, par rapport à un même niveau de pression, sont sensiblement les mêmes. Les résultats sont résumés dans le tableau 2 (Rieker, 1984, p. 8, Table 1).

Tableau 2

tranches hPa	1.6.80/31.12.83			1.1.81/31.12.83		
	n	$\delta T^\circ C$	$\sigma(\delta T)^\circ C$	n	$\delta T^\circ C$	$\sigma(\delta T)^\circ C$
850/700	1302	+0.1	2.5	1091	+0.1	2.5
700/500	1295	+0.1	2.6	1084	+0.1	2.6
500/300	1290	+0.1	2.3	1079	+0.1	2.3
300/200	1284	0.0	2.3	1074	+0.1	2.3
200/100	1274	-0.1	2.1	1067	-0.1	2.1
100/ 50	1209	-0.4	1.2	1008	-0.4	1.2
50/ 30	1116	-0.2	1.3	924	-0.2	1.4
30/ 20	990	+0.1	1.8	814	+0.1	1.8
20/ 10	562	+1.0	2.2	494	+1.2	2.1

où n est le nombre de paires de radiosondages consécutifs "nuit", "jour" considérées. Pour éviter toute équivoque, $\delta(T)$ remplace ΔT utilisé précédemment par Rieker (1984) et signifie donc la moyenne des différences "nuit" moins "jour" des températures moyennes des tranches correspondantes d'atmosphère de deux radiosondages consécutifs.

Au vu des résultats présentés, la correction de température paraît satisfaisante, bien qu'elle soit un peu trop accentuée entre 100 et 30 hPa et trop faible entre 20 et 10 hPa.

5.4 Influence de la ventilation v sur le terme correctif de rayonnement

Les notions de ventilation du thermomètre et de vitesse ascensionnelle du ballon sont difficilement dissociables (§ 2.1.2). Telle qu'elle est calculée entre les niveaux de pression 900/300; 300/100; 100/30 et 30/10 hPa, la vitesse ascensionnelle est identifiée à la ventilation. Dans le mode de calcul présenté au § 2.1.2, comment connaître au juste la part effective de la ventilation, en d'autres termes, de la vitesse ascensionnelle de la sonde par rapport à la composante verticale du mouvement de l'atmosphère? L'ascendance ou la descendance (turbulence à grande extension verticale) des masses d'air dans une des tranches d'atmosphère considérées, contribuera à augmenter ou à diminuer la vitesse ascensionnelle de la sonde, bien que la ventilation soit peut-être la même qu'en l'absence de courants verticaux.

Par ailleurs, variables d'une ascension à l'autre, la forme du ballon et le dépôt de précipitation ou d'humidité sur sa surface, par ciel bouché ou nuageux, joueront un rôle non négligeable sur la valeur réelle de la ventilation.

On voit que ce problème complexe n'a pas de solutions satisfaisantes et que la méthode préconisée n'est, en fait, qu'un palliatif commode. C'est pourquoi, étant admise la fonction $v = f(P)$, ventilation standard (éq. 4) appliquée uniformément à tous les radiosondages

par le truchement de la correction ΔT (éq. 24), la question se pose de savoir dans quelle mesure un écart systématique par rapport à cette ventilation standard, influence la correction de température ΔT et par voie de conséquence l'altitude des niveaux de pression.

Dérivée par rapport à v , l'équation (24) devient:

$$\frac{d(\Delta T)}{dv} = - \Delta T \frac{1}{2v} \quad (25)$$

ou, pour des accroissements finis

$$\delta(\Delta T)_{\Delta v} = \Delta T \left(- \frac{1}{2} \frac{\Delta v}{v} \right) \quad (26)$$

$\frac{\Delta v}{v}$ s'exprimant en pour-cents.

Par analogie à l'équation (7), on peut écrire

$$\Delta H = \frac{R}{g} \overline{\Delta T} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (27)$$

où

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2}$$

ΔT_1 et ΔT_2 représentent les corrections de température de rayonnement aux niveaux de pression P_1 et P_2 au cours d'un même radiosondage.

L'influence d'un écart de ventilation Δv sur l'altitude devient:

$$\delta(\Delta H)_{\Delta v} = \frac{R}{g} \ln \frac{P_1}{P_2} \frac{\delta(\Delta T_1) + \delta(\Delta T_2)}{2}$$

et exprimée en fonction de v :

$$\delta(\Delta H)_{\Delta v} = - \frac{R}{g} \ln \frac{P_1}{P_2} \frac{\Delta T_1 \frac{1}{2} \frac{\Delta v}{v} + \Delta T_2 \frac{1}{2} \frac{\Delta v}{v}}{2} \quad (28)$$

On peut choisir un écart systématique tel que:

$$\frac{\Delta v_1}{v_1} = \frac{\Delta v_2}{v_2} = \frac{\Delta v}{v} \quad [\%]$$

de tel sorte que l'équation (28) devient:

$$\delta(\Delta H)_{\Delta v} = -\frac{R}{g} \ln \frac{P_1}{P_2} \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2} \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta v}{v}\right) \quad (29)$$

ou a l'aide de l'équation (27)

$$\delta(\Delta H)_{\Delta v} = -\Delta H \frac{1}{2} \frac{\Delta v}{v} \quad (30)$$

Dans les équations (26) et (30), l'indice Δv de $\delta(\Delta T)_{\Delta v}$ et de $\delta(\Delta H)_{\Delta v}$ signifie que les accroissements se rapportent à l'écart de la ventilation Δv .

Si $\Delta v > 0$, l'équation (26) montre que $\delta(\Delta T)_{\Delta v} < 0$ donc que $\Delta T_{v+\Delta v} < \Delta T_v$, et par conséquent que $T_{v+\Delta v} > T$, puisque $T_v = T_{v+\Delta v} + \delta(\Delta T)_{\Delta v}$.

En vertu de l'équation (7), $H_{v+\Delta v} > H$, puisque l'altitude est proportionnelle à la température. On en déduit que $H_v = H_{v+\Delta v} + \delta(\Delta H)_{\Delta v}$, donc que $\delta(\Delta H)_{\Delta v} < 0$, conformément à l'équation (30).

Réciproquement, si $\Delta v < 0$, les signes $>$ et $<$, $-$ et $+$ sont inversés.

Sont représentées:

- dans la figure 9, outre les fonctions v (éq. 4), $v+\Delta v$, et $v-\Delta v$ (Δv représentant un écart systématique, tel que $\frac{\Delta v}{v} = 20\%$), les fonctions ΔT (éq. 24), $\Delta T - \delta(\Delta T)$ et $\Delta T + \delta(\Delta T)$, le facteur s étant choisi égal à 1 par commodité.

- dans la figure 10, les fonctions $\Delta v = 0,2 \cdot v$, $\delta(\Delta T)$ (éq. 26) et la sommation $\Sigma \delta(\Delta H)$ effectuée sur des tranches d'atmosphère suffisamment fines.

Une erreur systématique de 20% engendre donc une erreur $\delta(\Delta T)$ de la correction de température ΔT de zéro degré au sol, voisine de 0,09°C à 200 hPa, de 0,34°C à 30 hPa et de 0,52°C à 10 hPa.

Exprimée en terme d'altitude, l'erreur $\Sigma \delta(\Delta H)$ représente 0,9 m à 200 hPa, 13,1 m à 40 hPa et 26,4 m à 10 hPa.

6. Conclusions

Les corrections de température, de pression et d'humidité relative, adoptées sans modification depuis le 13 mai 1980 à 12h TU sont formulées, concernant:

- la température, par les équations (24), § 5.3, la correction étant nulle pour des angles d'élévations du soleil inférieurs ou égaux à -6° ,
- la pression, par les équations (18), § 3.3,
- l'humidité relative jusqu'à 200 hPa, par l'équation (20), § 4.

Connaissant les données corrigées de température et de pression, on peut retrouver leur valeur brute en toutes occasions à partir des corrections. En revanche, ce n'est pas le cas pour l'humidité relative, en raison de la correction d'inertie appliquée, étayée sur la différence de deux mesures brutes consécutives.

Quant à la ventilation, une erreur comprise entre $\pm 20\%$ (§ 5.6) par rapport à la ventilation standard (éq. 4), n'affecte que peu la correction de température au cours d'un radiosondage se déroulant dans des conditions normales. Il peut arriver cependant, en raison de conjonctures météorologiques défavorables ou lors d'une défectuosité du ballon (fuite d'hydrogène), que la force ascensionnelle soit accidentellement amoindrie et, par conséquent, que la ventilation devienne insuffisante.

C'est pourquoi la vitesse ascensionnelle de 120m/min, choisie comme limite, joue un rôle de seuil de discrimination au-dessous duquel le programme annule le cycle de mesure P,T,U, correspondant. En cas de plafonnement du ballon, cela signifie l'arrêt du radiosondage.

Par ailleurs, à titre d'information et conformément aux directives de l'Organisation Météorologique Mondiale, la constante de la gravitation g a été modifiée le 1er mai 1984 à 00h TU. De $9,8 \text{ ms}^{-2}$ qu'elle était, elle est devenue $g = 9,80665 \text{ ms}^{-2}$. En fonction de l'équation (7), cette adaptation donne une altitude qui diffère de celle obtenue avec l'ancienne valeur.

La différence:

$$\Delta H = -H \frac{\Delta g}{g}$$

ou $\Delta H \text{ [m]} = -H \text{ [km]} \cdot 0,678571$

est, par exemple, de - 3.4 m à 5 km et de - 26 m à 31 km.

* * * * *

* * * *

A N N E X E 1

Extrait de: McInturff et al. 1979, P. 10

APPENDIX: COMPUTATION OF SOLAR ELEVATION ANGLE

The solar elevation angle α is calculated for the time at which the radiosonde balloon passes through each mandatory level at 100 mb and above. It is found from the formula:

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos h \cos \delta$$

where ϕ is station latitude, δ is solar declination angle, and h is solar hour angle. The angle δ is obtained by ¹

$$\sin \delta = \sin (23^{\circ}26'37.8'') \sin \sigma,$$

where σ is in degrees and is given by

$$\sigma = 279.9348 + d + 1.914827 \sin d - 0.079525 \cos d \\ + 0.019938 \sin 2d - 0.001620 \cos 2d;$$

d is the number of the day in the year minus one, multiplied by the constant 0.98565; e.g., for January 30, $d = 29 \times 0.98565$. The solar hour angle h , the angular (longitudinal) distance of the sun from the observation point, can be expressed in terms of time of observation and longitude relative to Greenwich. The relation takes the form

$$h \text{ (deg.)} = 15 (C + H - M) - L$$

where M , the time of meridian passage or true solar noon, is given by

$$M \text{ (hr.)} = 12 + 0.123570 \sin d - 0.004289 \cos d \\ + 0.153809 \sin 2d + 0.060783 \cos 2d,$$

with d as defined above; C (in hours) is a function of the difference between actual radiosonde release time and nominal observation time; and also of balloon ascent rate (table 25); H is nominal observation time, expressed as the number of hours after 0000 GMT; L is longitude of station in degrees and tenths, counted positive west of Greenwich.

Since station latitude and longitude are known, and solar declination angle and time of meridian passage can be determined with high precision, the only source of uncertainty in the calculation of solar elevation angle is the time of radiosonde arrival at each mandatory level. As no indication of this parameter is given in the coded rawinsonde message, an approximate release time and ascent rate must be assumed. From an inspection of individual station records, "normal" release times, to the nearest quarter hour, and typical rates of ascent have been determined for North American stations. However, since these records are not available for most of the remaining stations in the Northern Hemisphere, a release time of 20 minutes prior to nominal observation time is utilized.

¹Relations involving δ and σ were derived from information provided by the U.S. Naval Observatory, Washington, D.C.

Références:

- Ackermann, P. (1968): Die neue Radiosondenstation Payerne der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Nr. 12, 1968
- Hesse, W., (1961): Handbuch der Aerologie, Akademische Verlagsgesellschaft, Geest & Portig K.-G., Leipzig 1961
- Joss, J. and Th. Gutermann (1978): Temperaturmessung mit Radiosonden, Meteorologische Zentralanstalt, Abt. Forschung, Wissenschaftliches Kolloquium, 20.12.1978, S. 26-30
- Joss, J. and Th. Gutermann (1979): Temperaturmessung mit Radiosonden, 2. Teil, Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, Abt. Forschung, Wissenschaftliches Kolloquium, 28.8.1979, S. 31-37
- Joss, J. and Rieker, J. (1980): Neue Strahlungskorrektur der schweizerischen Radiosonde, Schweizerische Meteorologische Anstalt, Abt. Forschung, Wissenschaftliches Kolloquium, 23.3.1980, S. 38-46
- McInturff, R.M.; F.G. Finger; K.W. Johnson and J.D. Laver (1979): Day-night differences in radiosonde observations in the stratosphere and troposphere, NOAA Technical Memorandum NWS NMC 63, Washington, D.C., sept. 1979
- Nolte, K. (1967): Feuchtmessung durch Radiosonden, Meteorologische Abhandlungen, Bd. 74, Heft 3 Institut für Meteorologie und Geophysik der Freien Universität Berlin
- Phillips, P.D.; H. Richner; J. Joss and A. Ohmura (1980/81): ASOND-78-An Intercomparison of Väisälä, VIZ and Swiss Radiosondes PAGEOPH, Vol. 119 (1980/81), p. 259-277
- Phillips, P.D. and H. Richner (1983): SONDEX - The ALPEX Radiosonde Intercomparison, Fifth Symposium Meteorological Observations and Instrumentation, Toronto, Ont. Canada, April 11-15, 1983, p. 141-147
- Rieker J., (1976a): Influences des erreurs de température et de pression sur la détermination du géopotentiel entre deux surfaces de pression constante et sur l'altitude d'un corps spatial dans l'atmosphère, Rapport de travail no. 65 de l'Institut suisse de météorologie, novembre 1976

- Rieker, J. (1976b): Comparaison des données de radiosondages effectués en avril 1976 à Payerne avec les systèmes suisses "BASORA" et finlandais "CORA", Rapport de travail no. 66 de l'Institut suisse de météorologie, novembre 1976
- Rieker, J. (1984): Contrôle de l'efficacité de la correction de température de rayonnement du sondage aérologique de Payerne, appuyé par les données de la campagne SOP du programme ALPEX, Rapport de travail no. 126 de l'Institut suisse de météorologie, septembre 1984
- Ruppert, P., (1979): Das Radiosondierungssystem BASORA 400, Schweizerische Technische Zeitschrift, STZ Nr. 15, 26. Juli 1979, S. 942-948
- Sonntag, D., (1966/68): Hygrometrie, Akademie Verlag Berlin, 1966-1968

Adresse des auteurs:

Dr. Jean Rieker
Station aérologique
CH-1530 PAYERNE

Dr. Jürg Joss
Osservatorio Ticinese
CH-6605 Monti della Trinità

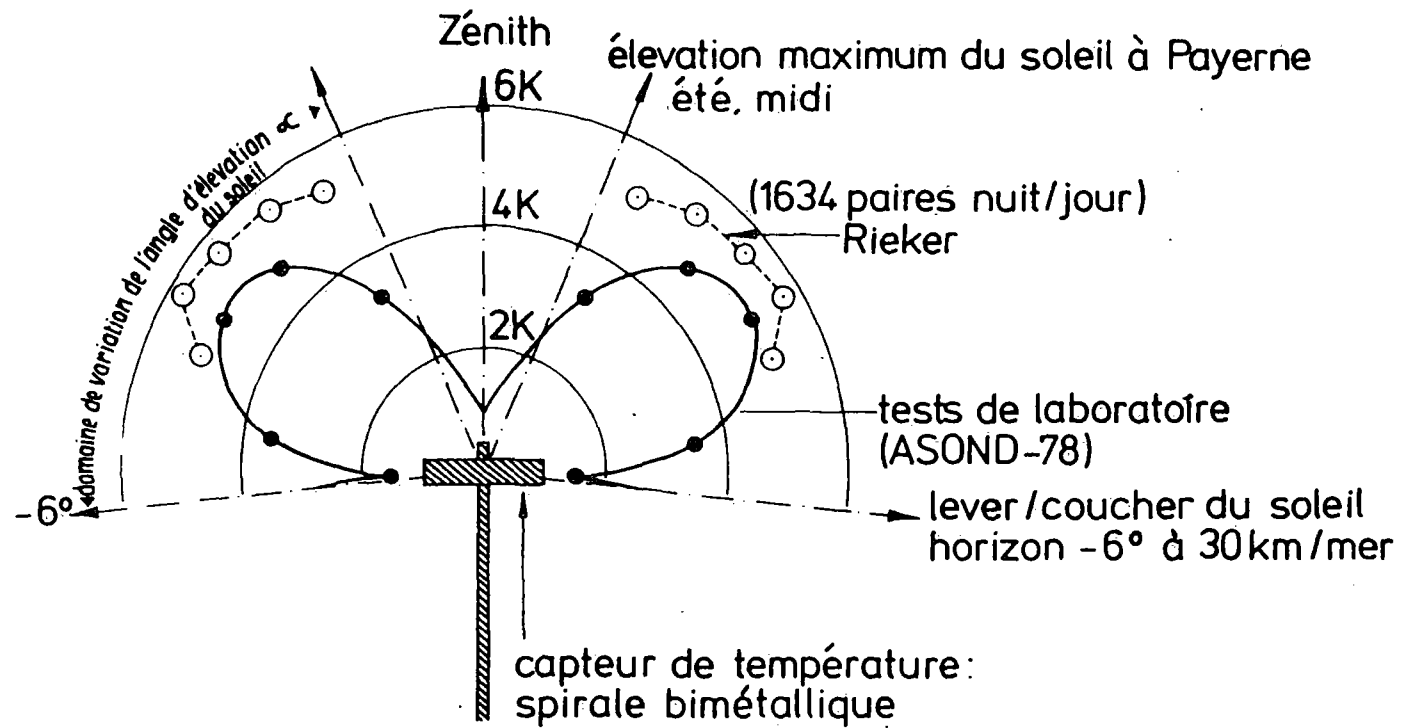


Figure 1

Effet du rayonnement solaire sur le thermomètre bimétallique en forme de spirale de la sonde suisse, en fonction de l'angle d'élevation α du soleil. Sont représentés, en trait continu, les tests de laboratoire (ASOND-78); en pointillé, les différences des températures moyennes (jour/nuit) dans la tranche d'atmosphère 20/10 hPa de 1634 paires de radiosondages des années 1976/1979.

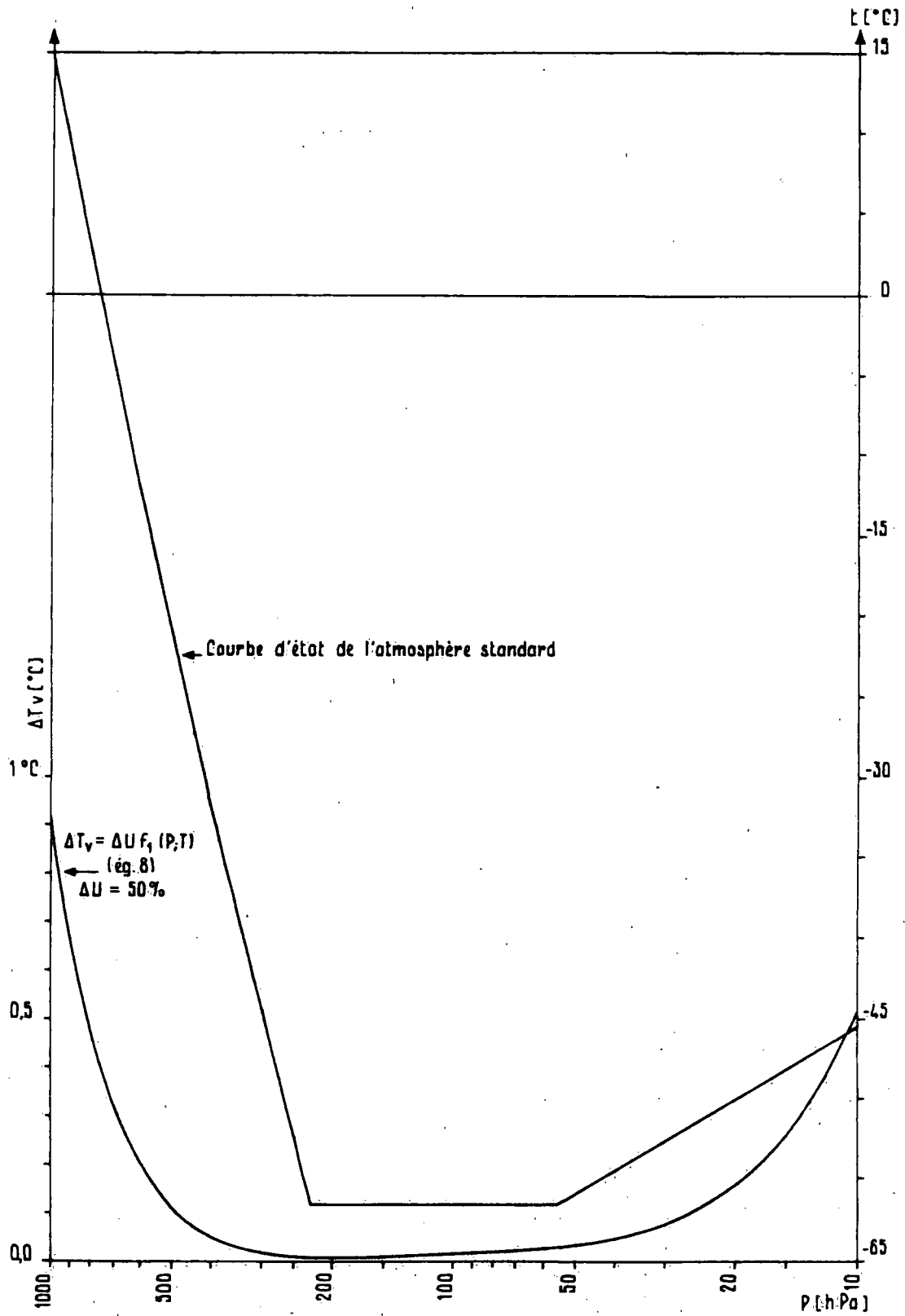


Figure 2

Influence d'une erreur d'humidité relative $\Delta U = 50\%$ (ég. 8) sur la température d'une atmosphère standard.

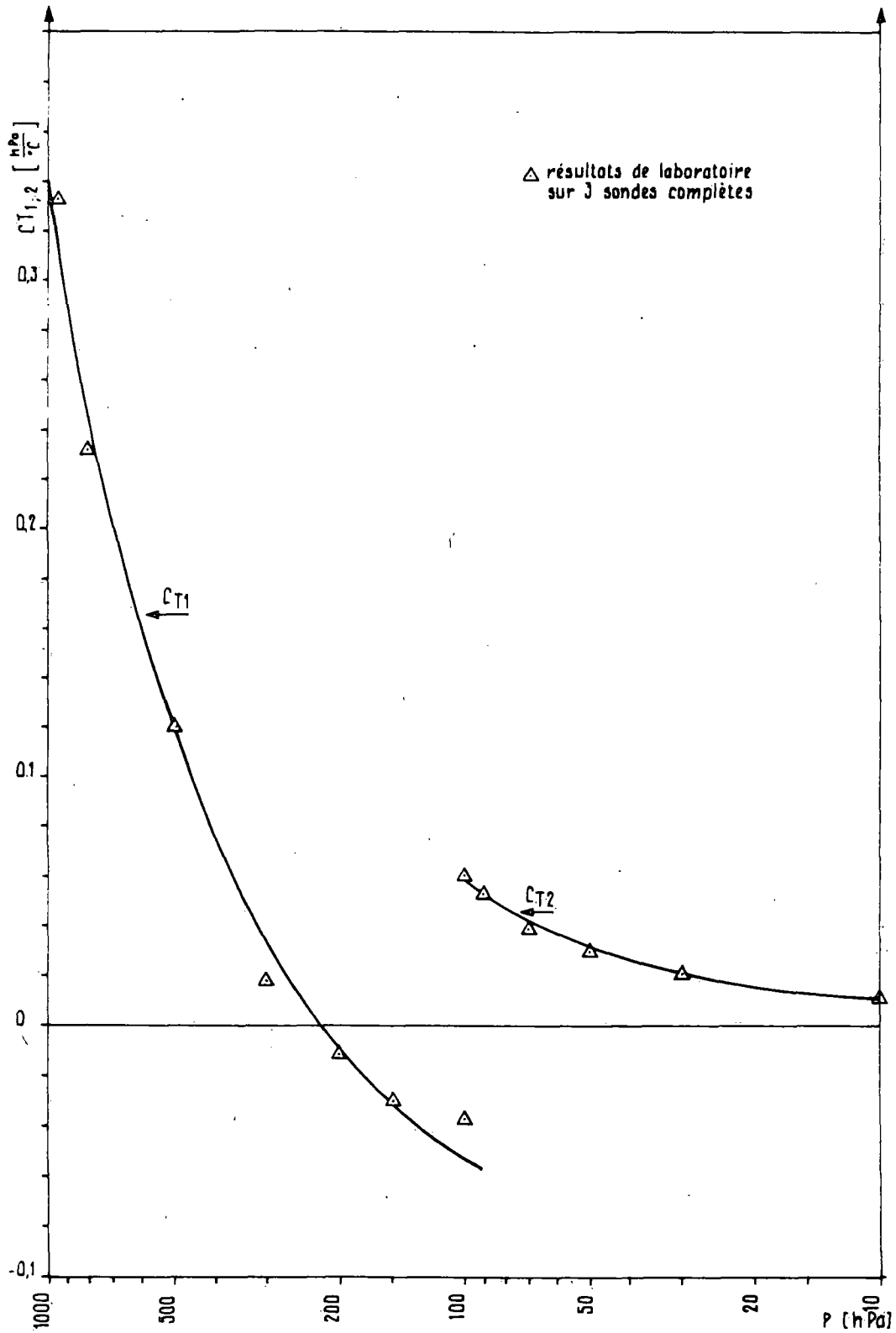


Figure 3

Coefficients de températures CT_1 et CT_2 des deux paires de capsules anéroïdes et de leurs leviers d'amplification en fonction de la pression (éq. 14 et 15). Les résultats expérimentaux Δ ont été déduits à partir des mesures effectuées dans une enceinte climatique sur trois sondes complètes, les 18 et 19 décembre 1979.

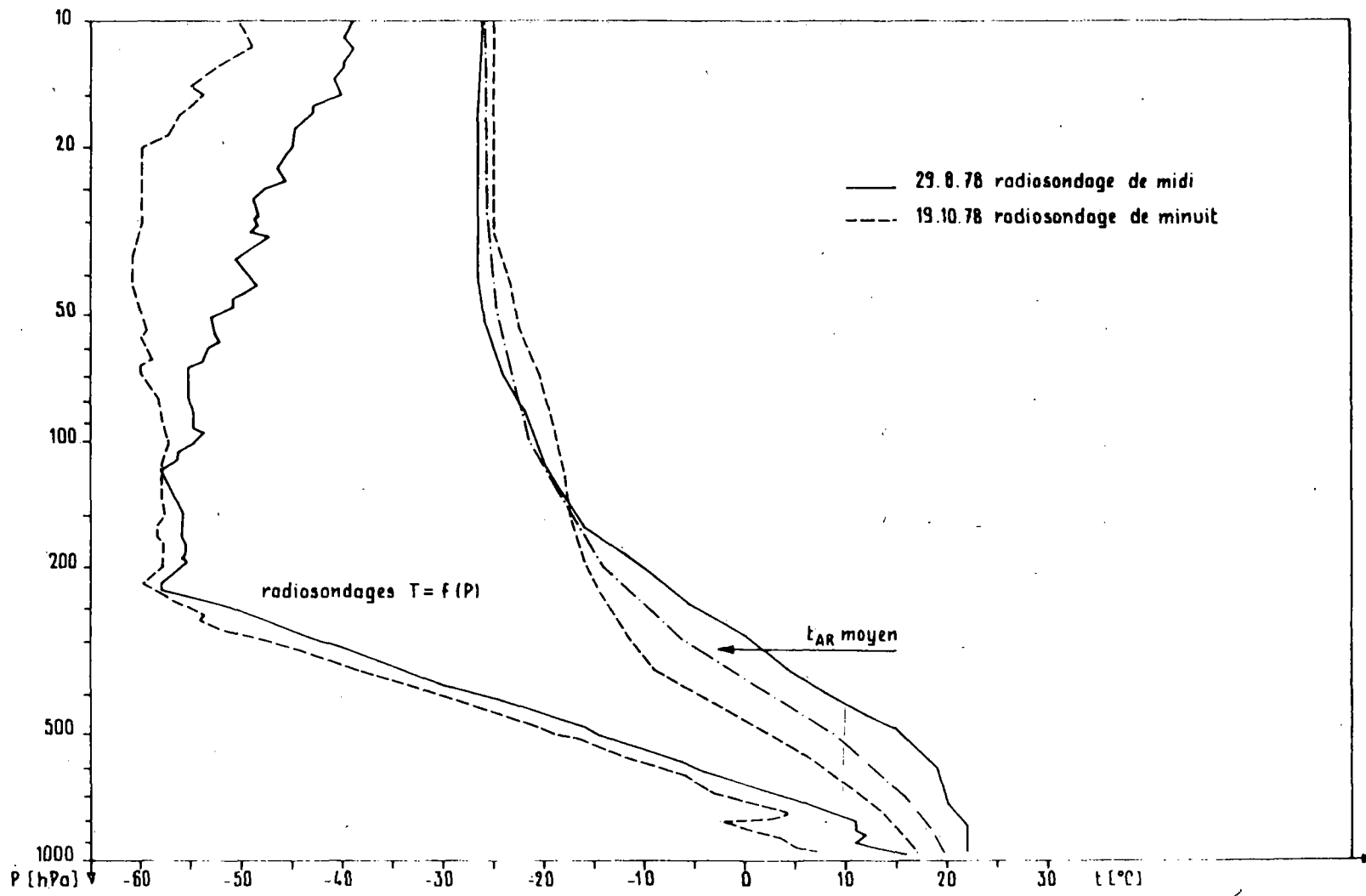


Figure 4

Mesure des températures des capsules anéroïdes t_{AR} pendant les radiosondages des 29.8.78 à midi (trait continu) et 19.10.78 à minuit (traitillé), et courbes d'état $T = f(P)$ de l'atmosphère correspondante

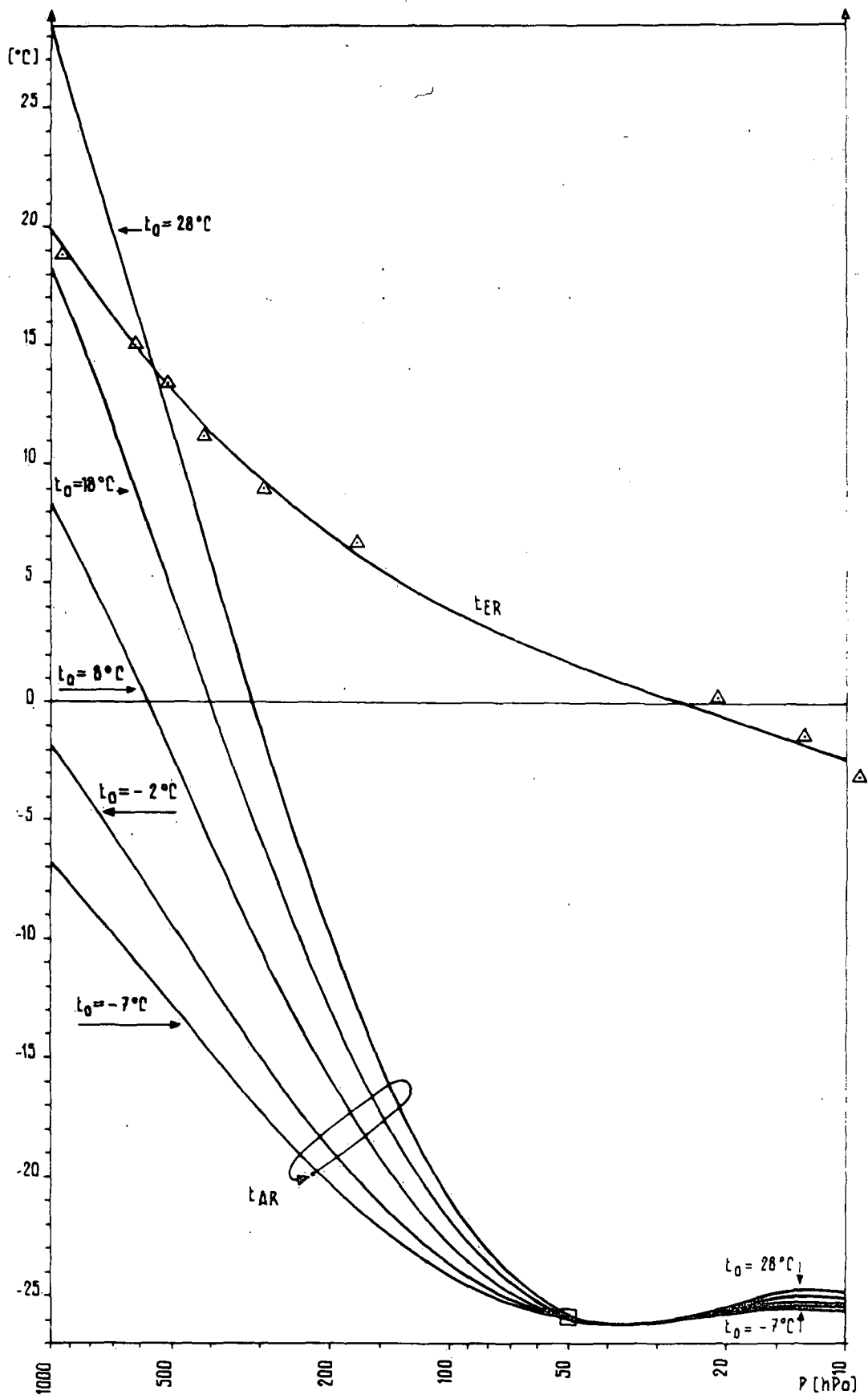


Figure 5

En fonction de la pression sont représentées :

- les mesures des températures des capsules anéroïdes (Δ) pendant l'étalonnage du 20.3.79 et son expression analytique t_{ER} (éq.16)
- les expressions analytiques t_{AR} exprimant la température des capsules anéroïdes pendant le radiosondage pour des valeurs de $t_0 = -7^\circ\text{C}$; -2°C ; 8°C ; 18°C et 28°C (éq.17).

Les différences $t_{ER} - t_{AR}$ peuvent être lues directement sur le graphique.

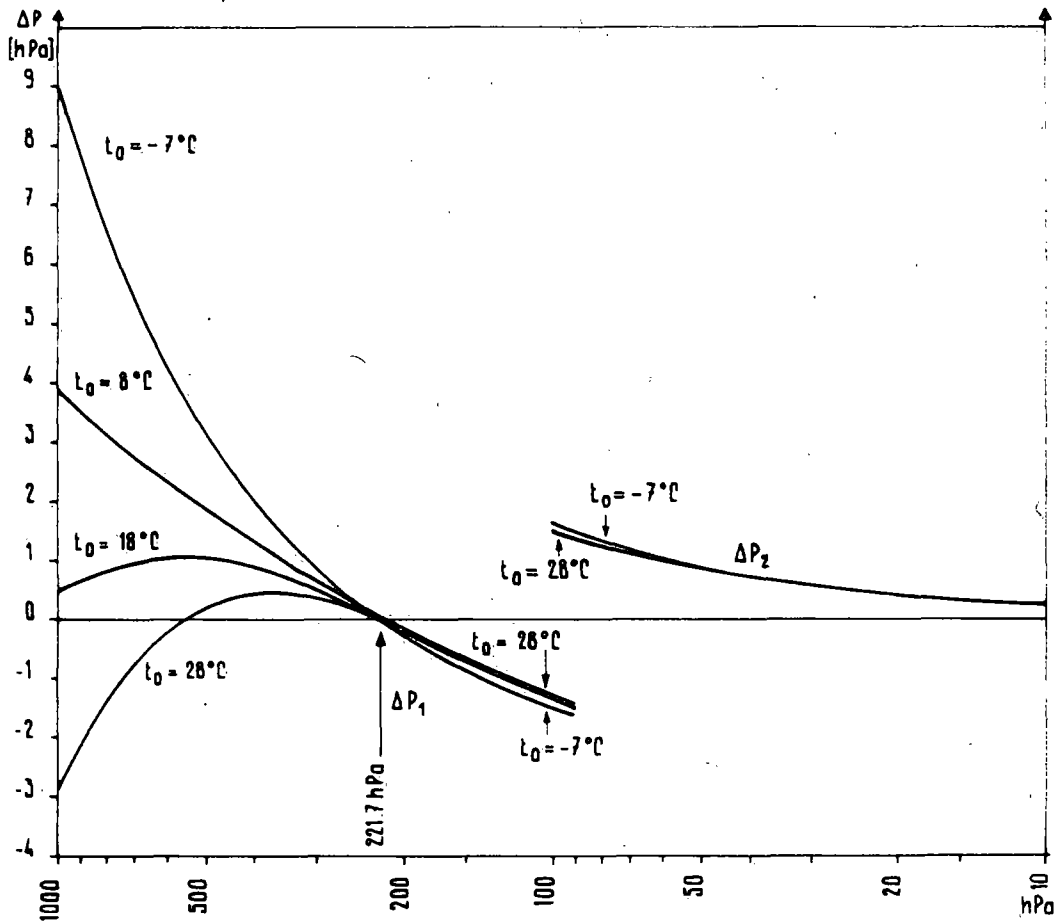


Figure 6

Corrections de pression ΔP_1 et ΔP_2 (éq. 18) en fonction du paramètre t_0 (-7°C , 8°C , 18°C et 28°C)
Entre les extrêmes $t_0 = -7^\circ\text{C}$ et 28°C les différences sont de 12 hPa à 1000 hPa pour ΔP_1 , et de 0,2 hPa à 100 hPa pour ΔP_2 . Quel que soit t_0 , ΔP_1 s'annule à la pression $P = 221,7$ hPa

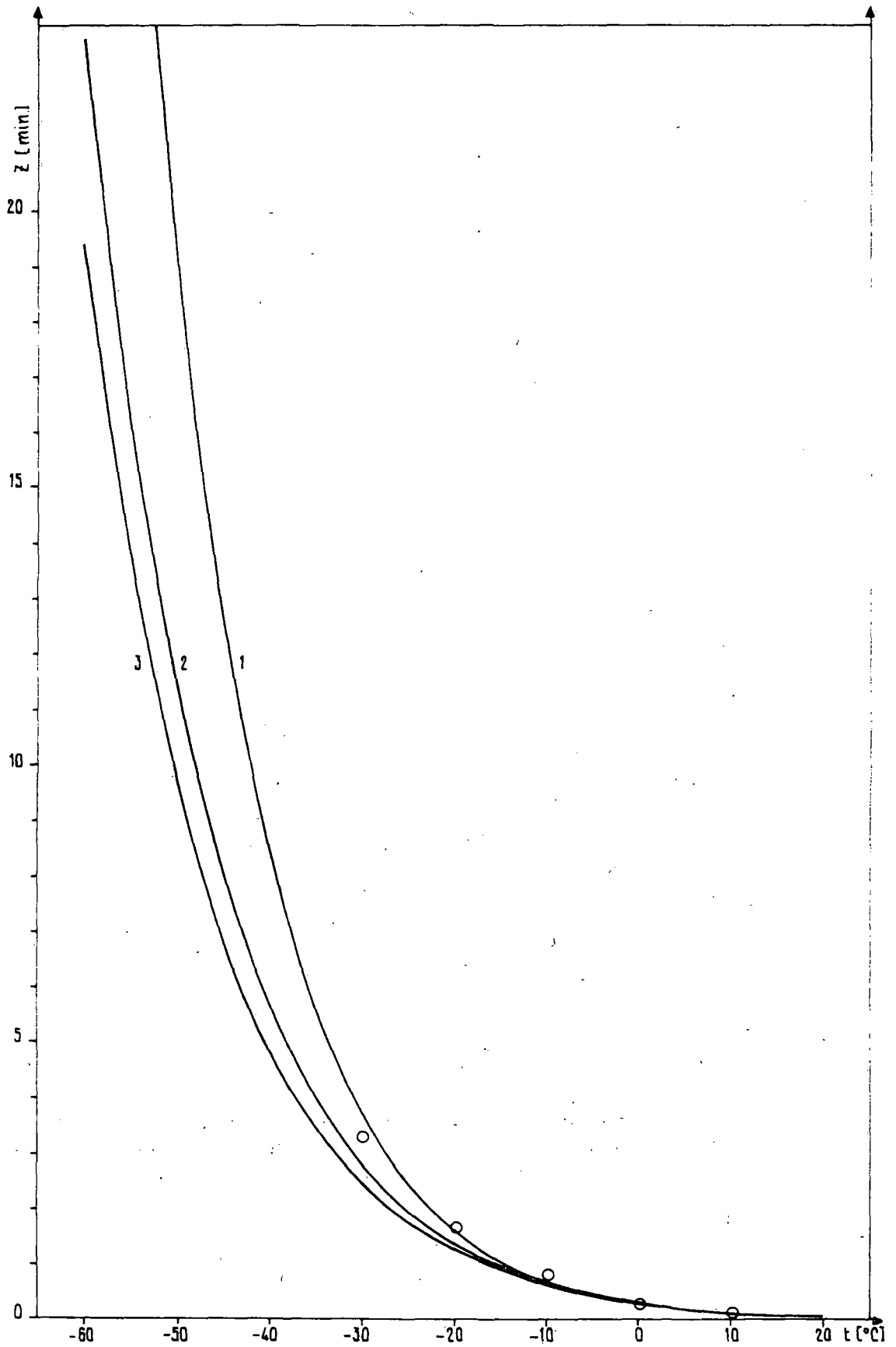


Figure 7

Coefficients d'inertie β de l'hygromètre en fonction de la température:

Courbe 1 : (Nolte (1967, p 9), équation (22b).

Courbe 2 : Valeurs expérimentales de Hesse (1961, p. 420) et de Sonntag (1966/68, p.525) mises en équation (21b)

Courbe 3 : Payerne (éq. 20)

○ : Valeurs expérimentales de Hesse (1967, p. 420).

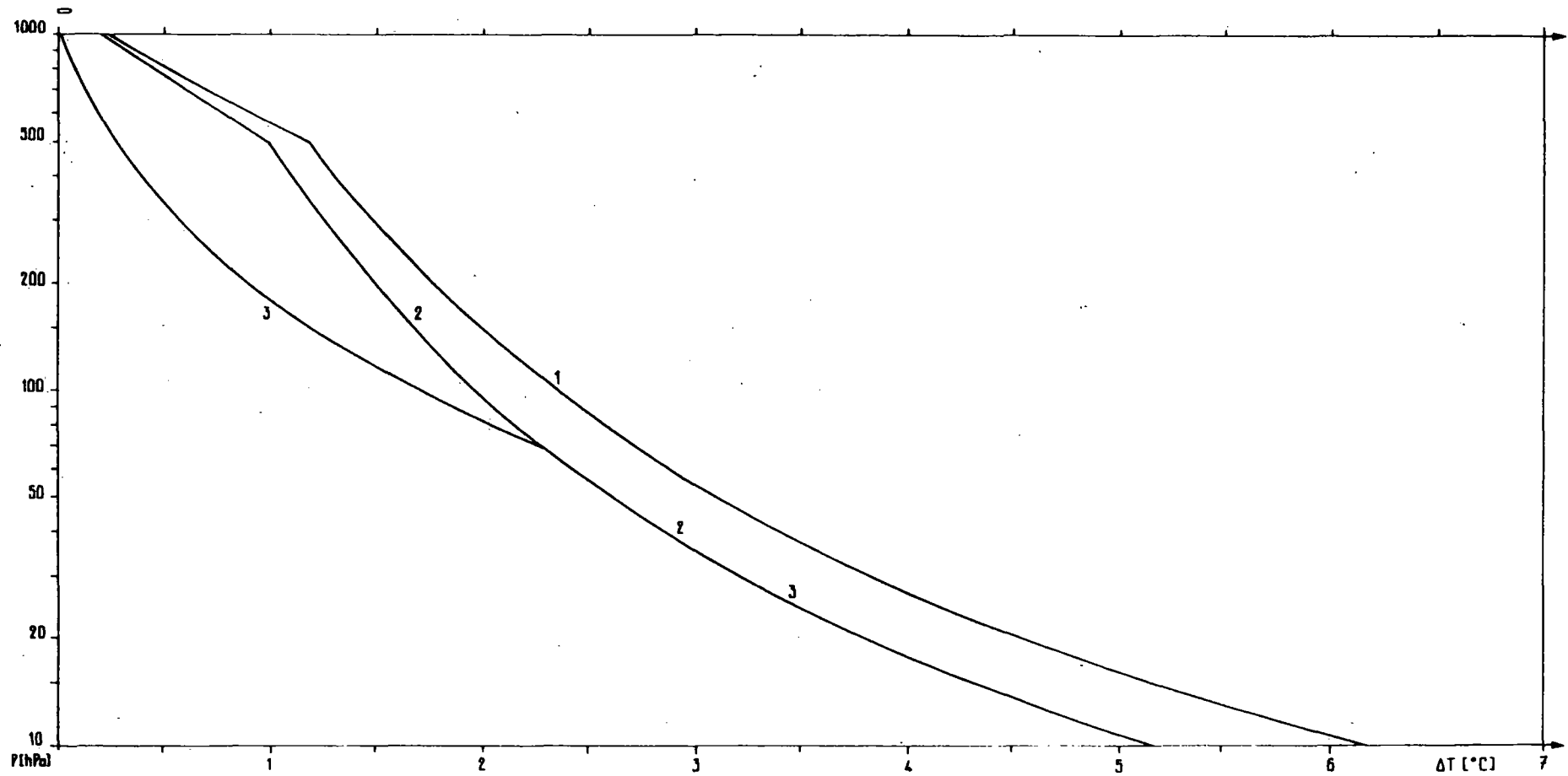


Figure 8

Corrections de rayonnement ΔT de la température en fonction de la pression, le facteur $s = \sin [2.5(\alpha + 6)]$ étant choisi égal à 1

Courbe 1 Première version (éq. 11) appliquée du 24.4.80 au 30.4.80

Courbe 2 Deuxième version (éq. 23) appliquée du 1.5.80 au 12.5.80

Courbe 3 Version "définitive" appliquée à partir du 13.5.80 (éq. 24)

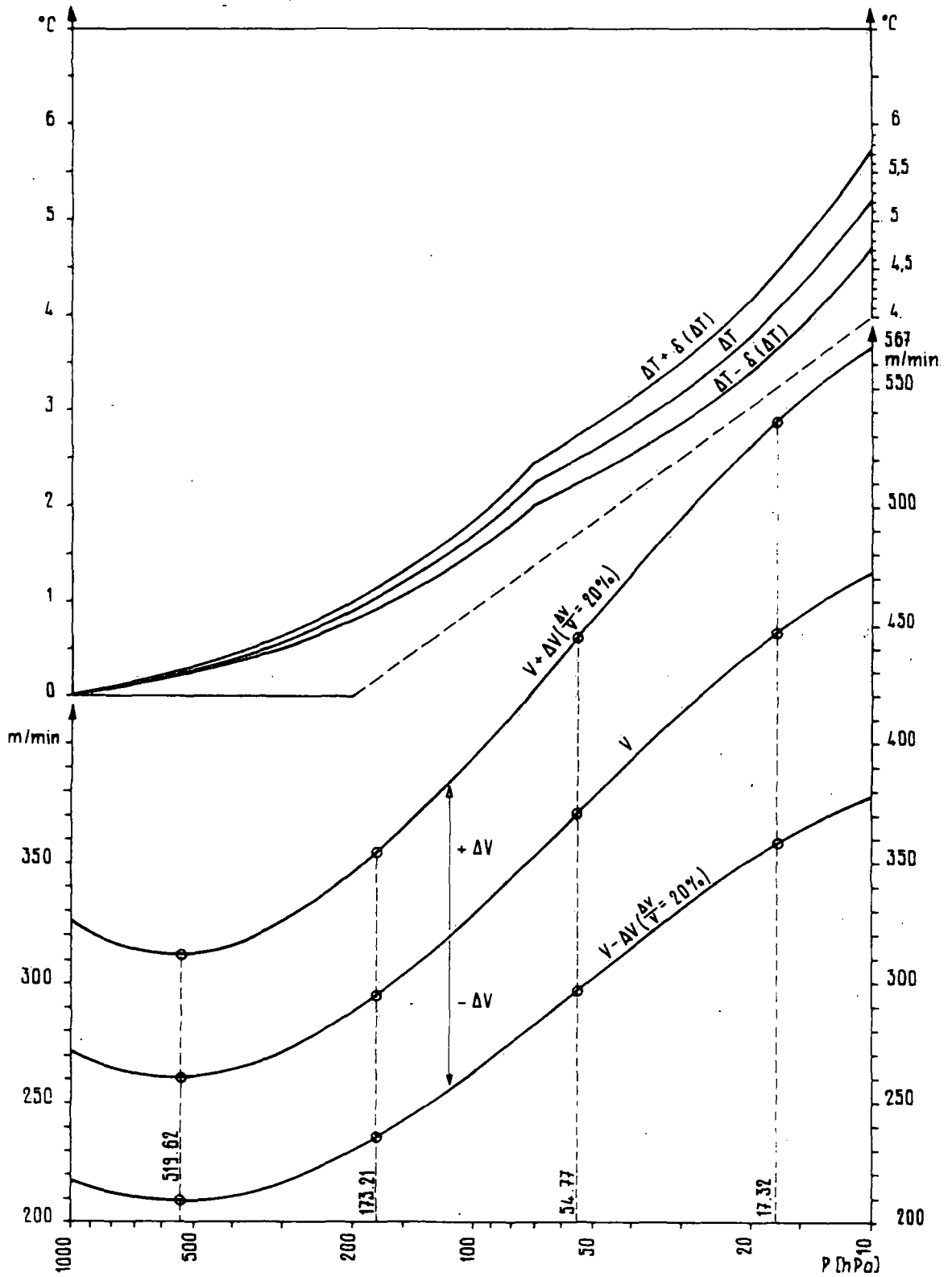


Figure 9

Influence $\delta(\Delta T)$ (éq. 26) d'un écart ΔV de la ventilation standard, tel que $\frac{\Delta V}{V} = 20\%$, sur la correction de rayonnement ΔT de la température. Sont représentées les fonctions $V=f(P)$ (éq. 4); $V+\Delta V$; $V-\Delta V$; $\Delta T=f(P;V)$ (éq. 24); $\Delta T-\delta(\Delta T)$ et $\Delta T+\delta(\Delta T)$ (pour $\delta(\Delta T)$ voir équation 26).

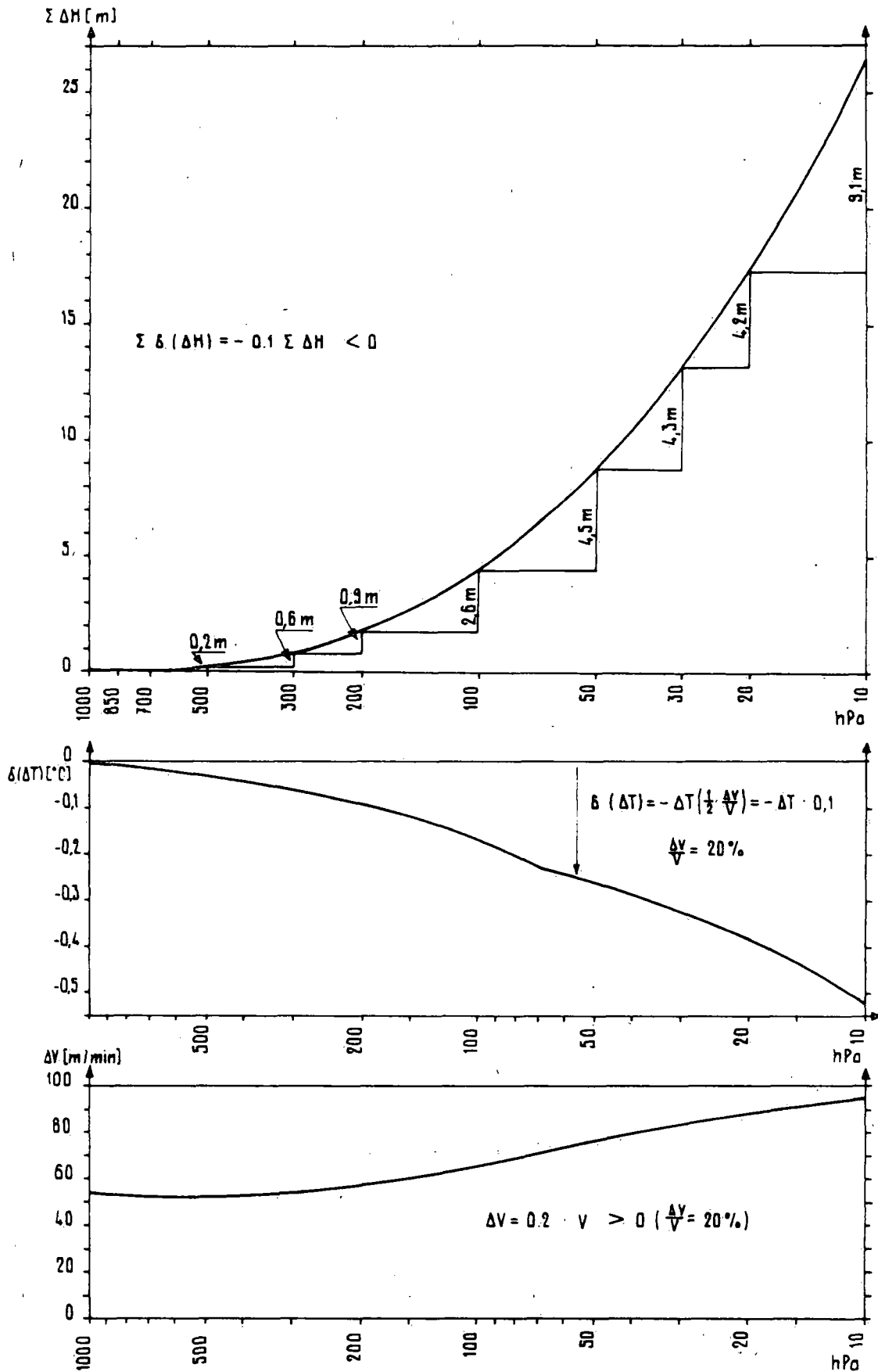


Figure 10

Représentations de $\Delta V > 0$ ($\frac{\Delta V}{V} = 20\%$, ou $\Delta V = 0.2 \cdot V$, éq. 4), de $\delta(\Delta T)$ (éq. 26) et $\Sigma(\Delta H)$, sommation de l'équation (30) pour des tranches d'atmosphère suffisamment fines.

