

Université Paris VII

Systeme de Sondage Radioacoustique RACES

NOTE TECHNIQUE N°2 CONCERNANT LA MODELISATION DU PROFIL
D'HUMIDITE

Réalisée dans le cadre du projet Lagrangex

Financement :

- contrat C.E.E. 02 200
- contrat Ministère de l'Environnement
- subside I.N.A.G.

P. RAVUSSIN

Ch. BERGER

Juin 1982

1. INTRODUCTION

Cette note a pour but de déterminer les profils verticaux des températures réelles, à partir de ceux des températures virtuelles soniques, mesurées par le système RACES.

Lors de la précédente note technique (1) il a été établi la relation exprimant la température réelle en fonction de la température virtuelle sonique, et de l'humidité. On a donc élaboré plusieurs modèles de profils verticaux d'humidité dans les basses couches de l'atmosphère, calés sur la valeur de l'humidité au sol. Ces modèles ont été testés sur des mesures simultanées de profils verticaux de température et d'humidité.

2. MODELES D'HUMIDITE

2.1. Rapport de mélange constant

Nous envisageons deux cas :

2.1.1. Lorsque l'air n'est pas saturé :

$$r(z) = r(z_0)$$

avec (1) $r = \frac{\rho_e}{\rho_a} = \frac{\mu_e}{\mu_a} \frac{e}{p-e} = 0,622 \frac{e}{p}$

soit (2) $e = \frac{e_0}{p_0} p$

nous admettons une décroissance linéaire de la pression avec l'altitude :

$$(3) \quad p = p_0 \left(1 - \frac{(z - z_0)}{H} \right) \quad (z - z_0) \ll H \quad H = \frac{RT}{\mu_a g} *$$

r : rapport de mélange

z : altitude

ρ_e, ρ_a : masses volumiques, resp. de la vapeur d'eau et de l'air sec

(1) Note technique N° 1 concernant l'influence de l'humidité sur la mesure de température.

e : pression de vapeur d'eau

R : constante des gaz parfaits

T : température réelle

μ_e, μ_a : masses molaires resp. de l'eau et de l'air sec

g : accélération de la pesanteur

L'indice 0 se référant au niveau du sol.

* Ce modèle, ainsi que les suivants ont été testés sur des sondages de températures réelles ; ensuite, lors de l'utilisation du modèle on peut écrire :

$$H = \frac{R(T_v)}{\mu_a g} \quad T_v : \text{Température virtuelle (mesurée)}$$

L'erreur commise étant négligeable.

2.1.2. Lorsque l'air est saturé

$$r = r_{sat} = 0,622 \frac{e_{sat 1}}{P - e}$$

$e_{sat 1}$: pression de vapeur saturante de l'eau à la pression atmosphérique P

$$\text{On a} \quad e_{sat 1} = \frac{e_{sat}}{P_s} P$$

e_{sat} : pression de vapeur saturante de l'eau à la pression atmosphérique standard P_s .

Lors des tests, on utilisera les approximations

$$e_{sat 1} = e_{sat} \quad \text{et} \quad r = r_{sat} = 0,622 \frac{e_{sat}}{P}$$

2.2. Humidité relative constante

$$u(z) = u(z_0)$$

avec $u = \frac{e}{e_{sat_1}(T)}$ **

et (4) $e_{sat_1}(T) = Ae^{-\frac{B}{T}}$ (A et B coefficients pour l'air sec)

soit (5) $e = \frac{e_0}{e_{sat_0}} e_{sat_1}(T)$

u : humidité relative

** Lors de l'utilisation du modèle, on ne peut pas faire l'approximation

$$e = \frac{e_0}{e_{sat_0}} e_{sat}(T_v)$$

Il faut alors procéder par itération :

Lors du premier passage dans la boucle, on prend :

$$e = \frac{e_0}{e_{sat_0}} e_{sat}(T_0) \quad T_0 : \text{température réelle au sol}$$

$$T_1 \text{ est alors calculée} \quad T_1 : \text{température réelle à l'altitude } z$$

au deuxième passage :

$$e = \frac{e_0}{e_{sat_0}} e_{sat}(T_1)$$

conduisant au calcul de T_2

au 3ème passage :

$$e = \frac{e_0}{e_{sat_0}} e_{sat}(T_2)$$

d'où T_3 , etc... jusqu'à $|T_{j+1} - T_j| < 0,001$

2.3. Moyenne des hypothèses 2.1. et 2.2.

On effectue la moyenne des deux pressions de vapeur déduites des deux hypothèses précédentes, soit :

$$e = \frac{1}{2} \left(\frac{e_0}{P_0} P + \frac{e_0}{e_{sat_0}} e_{sat} \right)$$

2.4. Humidité relative constante, relativement à un profil adiabatique humide de température

Ce modèle ne dépend que des mesures du sol.

$$u(z) = u(z_0)$$

$$\text{avec } u = \frac{e}{e_{sat_1}(T_{ah})}$$

$$\text{soit (6) } e = \frac{e_0}{e_{sat_1,0}} e_{sat_1}(T_{ah})$$

T_{ah} : température correspondant à un profil adiabatique humide, calé sur la température au sol

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{ah} = -0,0097 + (0,0097 - 0,0065) \frac{e_0}{e_{sat_0}}$$

$$\text{soit : } T_{ah}(z) = T_0 + \left(\frac{dT}{dz}\right)_{ah} (z - z_0)$$

On peut montrer, par un calcul différentiel, et par les tests, qu'utiliser l'expression simplifiée :

$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{ah} = -0,0065$ conduit à la même correction de la température virtuelle pour obtenir la température réelle.

3. TEST DES MODELES

3.1. Mesures basses couches

La validité des modèles a été testée sur deux séries de mesures basses couches :

- . sondages "basses couches" EDF effectués durant l'hiver 1977 et présentant de nombreuses inversions.
- . mesures de l'observatoire atmosphérique de Boulder (BAO, USA) datant d'Août 1979, les températures étant de l'ordre de 28°C

Série EDF: ($z_{\max} - z_0 = 1000$ m)

Cuisery 12/77

Lyon-Satolas 11/77 et 12/77

Nîmes-Courbessac 11/77 et 12/77

Orange 12/77

Série Boulder du 8/79 ($z_{\max} - z_0 = 300$ m)

La procédure de comparaison était la suivante :

- . Calcul de la température virtuelle sonique, à partir des mesures de température T_{mes} , et de pression de vapeur e_{mes} .
- . Calcul de la température T_{cal} , à partir de la température virtuelle et de la pression de vapeur e_{cal} calculée selon le modèle d'humidité.
- . Comparaison finale de T_{cal} et T_{mes} .

3.2. Test du modèle 2.1

Les relations (2) et (3) expriment la décroissance de e avec l'altitude suivant celle de P . La confrontation de cette hypothèse avec les sondages montre que dans tous les cas (inversion ou non) : $e_{\text{cal}} > e_{\text{mes}}$

C'est à dire que la décroissance de P n'est pas suffisante pour décrire celle de e .

EDF: Electricité de France (note de l'éditeur)

3.3. Test du modèle 2.2.

La relation (5) impose comme variation de e avec z , celle de $e_{sat}(T)$; c'est à dire, d'après (5) :

$$\begin{array}{l} T \uparrow \quad e \uparrow \quad (\text{inversions}) \\ T \downarrow \quad e \downarrow \end{array}$$

La comparaison entre les sondages, et les calculs suivant ce modèle, montre que :

$$\text{si } T \uparrow \quad e_{cal} > e_{mes}$$

$$\text{si } T \downarrow \quad e_{cal} < e_{mes}$$

3.4. Test du modèle 2.3.

3.4.1. Les résultats des tests 3.2. et 3.3. ont suggéré l'idée d'effectuer la moyenne des pressions de vapeur obtenues selon les modèles 2.1 et 2.2

- pour les températures décroissantes, on obtient ainsi un bon résultat : la décroissance trop rapide de $e_{sat}(T)$ est compensée par la décroissance trop lente de $P(z)$.
- pour les températures croissances, la décroissance de P ne compense pas la croissance trop rapide de e_{sat} , et lors des grandes inversions de température, on observe des écarts, croissants avec l'altitude, entre e_{cal} et e_{mes} .

3.4.2. Ordre de grandeur :

On posera :

$$\Delta T = | T_{cal} - T_{mes} |$$

et

$$DT = T_{\text{sol}} - T$$

- Lors des tests de comparaison avec les sondages effectués en hiver à Orange, Nîmes et Cuisery, on a obtenu :

$$0 \leq z \leq 1000 \text{ m} \quad \Delta T \leq 0,1^\circ$$

par comparaison avec les sondages d'été de Boulder, on a obtenu :

— pour $T \downarrow$

$$z \leq 300 \text{ m} \quad \Delta T \leq 0,1^\circ$$

(soit la même précision que lors des sondages hivernaux).

— pour $T \uparrow$

$$z = 300 \text{ m} \quad \langle \Delta T \rangle = 0,35^\circ$$

mais pour certaines inversions :

$$z = 300 \text{ m} \quad \Delta T = 0,6^\circ$$

$$\text{et } z = 300 \text{ m} \quad (\Delta T)_{\max} = 1,06^\circ$$

alors que $DT = 0,6^\circ$

ce qui n'a plus aucun sens.

3.5. Test du modèle 2.4.

3.5.1. Le mauvais accord entre les mesures et les calculs selon le modèle 2.3., pour les températures croissantes, a conduit à envisager un modèle où les variations de l'humidité et de la température avec l'altitude ne seraient plus directement corrélées ; les variations de l'humidité ont été déduites de celles de la pression de vapeur à une température calculée d'après un profil vertical moyen de température : un profil adiabatique humide.

3.5.2. Ordre de grandeur

- Grange, Nîmes (hiver) :

$$0 \leq z \leq 1000 \text{ m} \quad 0,05^\circ \leq \Delta T \leq 0,1^\circ$$

$$\text{pour } 0,3^\circ \leq DT \leq 0,5^\circ$$

- Boulder (été) :

$$0 \leq z \leq 300 \text{ m} \quad \text{avec} \quad \langle DT \rangle = 1^\circ$$

- pour des profils de température ne présentant pas d'inversions :

$$0,05^\circ \leq \Delta T \leq 0,1^\circ$$

- pour les inversions :

$$\cdot \frac{dT}{dz} \cong 2^\circ/300 \text{ m}$$

$$z = 100 \text{ m} \quad < \Delta T > = 0,1^\circ$$

$$z = 300 \text{ m} \quad < \Delta T > = 0,2^\circ$$

ΔT augmentant avec l'altitude.

$$\cdot \frac{dT}{dz} \cong 4^\circ/300 \text{ m}$$

$$z = 300 \text{ m} \quad < \Delta T > = 0,4^\circ$$

$$\text{et } (\Delta T)_{\max} = 0,6^\circ$$

Dans ces cas de fortes inversions où (ΔT) est important, on observe une décroissance très rapide de la pression de vapeur d'eau (réelle) avec l'altitude, plus rapide que ne le prévoit un profil adiabatique humide. Cependant, ces cas exceptionnels ne justifient pas un traitement particulier des grandes inversions, cet écart entre T_{cal} et T_{mes} lors des grandes inversions n'est pas systématique ; sur certains sondages tels que :

$$\frac{dT}{dz} = + 4^\circ/300 \text{ m, pour } z = 300 \text{ m} \quad \text{on a : } \Delta T = 0,1^\circ$$

d'autre part, sur un sondage tel que :

$$\frac{dT}{dz} = 0 \text{ on a obtenu, pour } z = 300 \text{ m, } \Delta T = 0,6^\circ$$

4. SYNTHÈSE

Le modèle 2.4. est encore plus satisfaisant que le modèle 2.3. ; en moyenne on a :

$$T \downarrow : (\Delta T)_{2.4} \leq (\Delta T)_{2.3} \leq 0,1^\circ$$

$$T \uparrow : (\Delta T)_{2.4} = \frac{1}{2} (\Delta T)_{2.3}$$

dans tous les cas calculés par le modèle 2.4, on a : $\Delta T \ll DT$, condition nécessaire à la validité d'un modèle d'humidité.

La remarque du paragraphe 3.5.1 sur l'aspect décorrélé, a priori, entre l'évolution de la température et de l'humidité avec l'altitude, c'est-à-dire par rapport aux lois de variation de la saturation de vapeur d'eau fonction de la température, est aussi soulignée par la comparaison entre les modèles 2.2 et 2.4 ; en effet, le modèle 2.4 s'identifie au modèle 2.2 mais est basé sur un profil moyen de température, et non sur le profil réel.

CONCLUSION

Le modèle 2.4 stipulant une humidité relative constante, égale à celle mesurée au niveau du sol, relativement à un profil de température suivant un gradient adiabatique humide, lui aussi, calé sur la température mesurée au sol, peut être retenu pour effectuer les corrections des températures virtuelles soniques mesurées par le système RACES.

Sa validité tient à son accord avec les mesures expérimentales. Or, les sondages de Boulder, à des températures de l'ordre de 28°C, permettent d'avoir une grande marge de variation de l'humidité, et donc les erreurs possibles maximales.

Un modèle plus complexe, différenciant des profils de température "types" risquerait de conduire à des erreurs arbitraires (§ 3.5.2.).

ouiserY

4/12/77

92,20 TC

T	TV	R	RES	RCI
-0.37 I	-0.05 I	0.265E-02 I	0.265E-02 I	0.265E-02 I
-0.40 I	-0.12 I	0.235E-02 I	0.265E-02 I	0.265E-02 I
-0.29 I	0.03 I	0.260E-02 I	0.270E-02 I	0.265E-02 I
-0.27 I	0.03 I	0.245E-02 I	0.276E-02 I	0.265E-02 I
1.30 I	1.04 I	0.279E-02 I	0.316E-02 I	0.265E-02 I
0.70 I	1.04 I	0.283E-02 I	0.306E-02 I	0.265E-02 I
0.80 I	1.16 I	0.299E-02 I	0.312E-02 I	0.265E-02 I
3.20 I	3.51 I	0.255E-02 I	0.378E-02 I	0.265E-02 I

P	T	TS	TI
997. I	-0.37 I	-0.37 I	-0.37 I
992. I	-0.40 I	-0.44 I	-0.44 I
984. I	-0.29 I	-0.29 I	-0.29 I
963. I	-0.27 I	-0.31 I	-0.29 I
944. I	1.30 I	1.26 I	1.32 I
933. I	0.70 I	0.67 I	0.72 I
922. I	0.80 I	0.78 I	0.84 I
900. I	3.20 I	3.05 I	3.19 I

P	T	TH	TH	ΔTH
997. I	-0.4 I	-0.4 I	-0.4 I	0.00
992. I	-0.4 I	-0.4 I	-0.43 I	0.03
984. I	-0.3 I	-0.3 I	-0.28 I	0.00
963. I	-0.3 I	-0.3 I	-0.25 I	0.02
944. I	1.3 I	1.3 I	1.37 I	0.07
933. I	0.7 I	0.7 I	0.78 I	0.08
922. I	0.8 I	0.8 I	0.91 I	0.11
900. I	3.2 I	3.1 I	3.28 I	0.08

T : température réelle (°C)

$$\Delta TH = TH - T$$

TV : température virtuelle (°C)

R : rapport de mélange (g/kg)

RES : " " " (hypothèse 2-2)

RCI : " " " (hypothèse 2-1)

P : pression atmosphérique (mb)

TS : température calculée (°C) (hypothèse 2-2)

TI : " " " (" 2-1)

TH : " " " (" 2-3)

2/12/77

46 & 45

I	TV	R	RCS	RCI
5.40 I	5.60 I	0.236E-02 I	0.238E-02 I	0.238E-02 I
3.50 I	3.77 I	0.217E-02 I	0.209E-02 I	0.238E-02 I
1.50 I	1.76 I	0.213E-02 I	0.187E-02 I	0.238E-02 I
4.60 I	4.88 I	0.235E-02 I	0.237E-02 I	0.238E-02 I
6.30 I	6.58 I	0.230E-02 I	0.269E-02 I	0.238E-02 I
5.30 I	5.52 I	0.180E-02 I	0.259E-02 I	0.238E-02 I

P	T	TS	TI
1012. I	5.40 I	5.40 I	5.40
999. I	3.50 I	3.51 I	3.48
971. I	1.50 I	1.53 I	1.47
955. I	4.60 I	4.60 I	4.60
944. I	6.30 I	6.25 I	6.29
913. I	5.30 I	5.20 I	5.23

P	T	TH	TH	ΔTH
1012. I	5.4 I	5.4		
999. I	3.5 I	3.2	3.49	0.01
971. I	1.5 I	1.5	1.50	0.00
955. I	4.6 I	4.6	4.64	0.04
944. I	6.3 I	6.3	6.34	0.04
913. I	5.3 I	5.2	5.30	0.00

ORANGE

7/12/77

7k TU

T	TU	R	RCS	ROI
1.50 I	2.01 I	0.42E-02 I	0.42E-02 I	0.42E-02
4.30 I	4.81 I	0.42E-02 I	0.52E-02 I	0.42E-02
7.50 I	8.18 I	0.53E-02 I	0.66E-02 I	0.42E-02
7.50 I	8.42 I	0.42E-02 I	0.66E-02 I	0.42E-02
8.50 I	8.80 I	0.38E-02 I	0.71E-02 I	0.42E-02
8.40 I	8.82 I	0.34E-02 I	0.72E-02 I	0.42E-02
4.50 I	4.97 I	0.29E-02 I	0.56E-02 I	0.42E-02

P	T	TS	TI
1001. I	1.50 I	1.50 I	1.50
990. I	4.30 I	4.18 I	4.30
980. I	7.50 I	7.35 I	7.64
963. I	7.50 I	7.20 I	7.50
950. I	8.50 I	8.09 I	8.46
934. I	8.40 I	7.93 I	8.30
883. I	4.50 I	4.15 I	4.34

P	T	TH	TH	ΔTH
1001. I	1.5 I	1.5		
990. I	4.3 I	4.2	4.31	0.01
980. I	7.5 I	7.5	7.67	0.17
963. I	7.5 I	7.3	7.56	0.06
950. I	8.5 I	8.3	8.54	0.04
934. I	8.4 I	8.1	8.40	0.00
883. I	4.5 I	4.2	4.52	0.02

21/11/77

11E30 TU

T	IV	R	RCS	RCI
7.50 I	0.08 I	0.46E-02 I	0.46E-02 I	0.46E-02
7.50 I	0.09 I	0.47E-02 I	0.46E-02 I	0.46E-02
6.50 I	7.03 I	0.43E-02 I	0.44E-02 I	0.46E-02
5.90 I	0.32 I	0.34E-02 I	0.42E-02 I	0.46E-02
5.10 I	0.51 I	0.33E-02 I	0.41E-02 I	0.46E-02

P	I	TS	TI
966. I	7.50 I	7.50 I	7.50
960. I	7.50 I	7.51 I	7.52
940. I	6.50 I	6.49 I	6.46
923. I	5.90 I	5.80 I	5.76
910. I	5.10 I	5.01 I	4.95

P	T	TM
966. I	7.5 I	7.5
960. I	7.5 I	7.5
940. I	6.5 I	6.5
923. I	5.9 I	5.8
910. I	5.1 I	5.0

27-8

	ECS	EOI	U	UE	UI
2					
10	10.6	10.6	48	48	48
22	11.7	10.5	40	48	44
50	12.5	10.5	36	48	41
100	12.9	10.4	36	48	39
150	12.7	10.4	35	48	39
200	21.03	10.3	32	48	40
250	21.38	10.3	34	48	40
300	21.14	10.2	33	48	40

TV	T	TN	TS	TI	D1	D2	D3
19.85	18.84	18.84	18.84	18.84	-0.00	1.00	1.00
21.38	20.44	20.31	20.26	20.37	0.13	0.94	1.00
22.50	21.59	21.38	21.28	21.48	0.21	0.91	1.00
23.01	22.07	21.86	21.74	21.98	0.21	0.94	1.00
22.75	21.84	21.61	21.50	21.73	0.23	0.91	1.00
22.46	21.63	21.33	21.22	21.44	0.26	0.87	1.00
22.25	21.39	21.12	21.02	21.23	0.27	0.86	1.00
21.98	21.14	20.86	20.76	20.96	0.28	0.84	1.00

Z	TV	TH	DT	ΔTH
1510.	I 19.85	I 18.84	I 1.01	0.00
1522.	I 21.38	I 20.37	I 1.01	0.07
1550.	I 22.50	I 21.49	I 1.01	0.10
1600.	I 23.01	I 22.01	I 1.00	0.06
1650.	I 22.75	I 21.77	I 0.98	0.07
1700.	I 22.46	I 21.49	I 0.97	0.14
1750.	I 22.25	I 21.30	I 0.95	0.09
1800.	I 21.96	I 21.02	I 0.94	0.12

BOULDER

30-8	7:00	8:00	9:00	ECS	ECI	U	US	UI
7	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	54	54	54
10	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	53	54	54
22	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	52	54	54
50	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	48	54	54
100	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	45	54	54
150	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	38	54	54
200	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	41	54	54
250	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	32	54	54
300	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	30	54	54

TV	I	TH	TS	TI	D1	D2	D3
17.94	16.95	16.95	16.95	16.95	0.000	0.000	0.000
17.76	16.78	16.78	16.78	16.78	0.001	0.001	0.001
17.55	16.57	16.57	16.58	16.57	0.004	0.004	0.003
17.83	16.84	16.84	16.83	16.85	0.015	0.014	0.016
18.67	17.64	17.64	17.60	17.68	0.227	0.175	0.280
19.23	18.18	18.18	18.12	18.24	0.221	0.154	0.285
19.57	18.50	18.50	18.42	18.58	0.355	0.255	0.455
19.87	18.78	18.78	18.68	18.87	0.443	0.355	0.555

Z	TV	TH	DT	TH
1510.	I 17.94	I 16.96	I 0.98	0.01
1522.	I 17.76	I 16.78	I 0.98	0.01
1550.	I 17.55	I 16.58	I 0.97	0.03
1600.	I 17.83	I 16.87	I 0.96	0.12
1650.	I 18.67	I 17.72	I 0.95	0.19
1700.	I 19.23	I 18.30	I 0.93	0.09
1750.	I 19.57	I 18.65	I 0.92	0.23
1800.	I 19.87	I 18.96	I 0.91	0.25

Z	T	E	ECS	ECI	U	UE	UI
10	20.00	5.9	6.9	6.9	29	29	29
20	21.00	5.3	7.7	6.9	24	29	26
50	23.01	5.5	8.5	6.9	19	29	23
100	25.04	5.0	9.3	6.8	15	29	21
150	25.02	4.6	9.6	6.8	13	29	20
200	25.04	4.4	9.7	6.7	13	29	20
250	25.28	4.2	9.4	6.7	13	29	20
300	24.00	4.1	9.2	6.6	13	29	20

TV	T	TH	TS	TI	I1	I2	I3
20.75	20.00	20.00	20.00	20.00	0.66	0.65	0.66
22.56	21.00	21.86	21.81	21.90	0.66	0.61	0.71
24.15	23.01	23.40	23.32	23.48	0.61	0.54	0.70
25.54	25.04	24.74	24.62	24.67	0.56	0.53	0.60
26.07	25.02	25.26	25.11	25.40	0.56	0.45	0.62
26.08	25.04	25.26	25.11	25.40	0.56	0.44	0.62
25.70	25.28	24.89	24.75	25.03	0.59	0.42	0.61
25.22	24.00	24.41	24.20	24.54	0.59	0.42	0.60

Z	TV	TH	DT	ΔTH
1510.	I 20.75	I 20.09	I 0.66	0
1522.	I 22.56	I 21.89	I 0.67	0.00
1550.	I 24.15	I 23.49	I 0.66	0.12
1600.	I 25.54	I 24.88	I 0.66	0.16
1650.	I 26.07	I 25.42	I 0.65	0.2
1700.	I 26.08	I 25.44	I 0.64	0.2
1750.	I 25.70	I 25.07	I 0.63	0.24
1800.	I 25.22	I 24.60	I 0.62	0.2