

## LA MESURE DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

Christian Perrin de Brichambaut<sup>†</sup> et Michel Leroy<sup>(1)</sup>

(1) Météo-France

*Service des équipements et des techniques instrumentales  
de la météorologie (SETIM)*

*7, rue Teisserenc-De-Bort*

*B.P. 202*

*78195 Trappes*

### RÉSUMÉ

Après avoir rappelé les divers modes d'échange de chaleur entre un corps solide et le milieu environnant (rayonnement, conduction, convection, changements d'état), cet article décrit les qualités que doit posséder l'abri météorologique dans lequel s'effectue la mesure de la température de l'air. Les divers types d'abris professionnels utilisés à Météo-France sont ensuite présentés, avec leurs avantages et inconvénients respectifs. Enfin, un schéma de nouvel abri simplifié, répondant cependant à la plupart des exigences métrologiques, est proposé.

### ABSTRACT

This paper recalls the different ways by which a solid body can exchange heat with its environment (radiation, conduction, convection and change of state). It then describes the qualities needed for a good screen designed for air temperature measurement. Then the different kinds of professional screens used by Météo-France are described, together with their respective advantages and disadvantages. Finally, the design of a new simplified screen is proposed, satisfying most of the metrological constraints.

### RAPPELS

Selon le *Larousse* en trois volumes, la température est définie comme le « degré de chaleur », et la température de l'air comme « l'ensemble des conditions atmosphériques variables, traduites par l'homme en sensations relatives de chaud ou de froid, et dont l'appréciation exacte est fournie par l'observation du thermomètre »... Par la suite, il est dit que « c'est une grandeur définie par un phénomène mesurable qui varie dans le même sens que la température ».

Bref, la notion de température est avant tout fondée sur des sensations de chaud et de froid, même si, dans le cadre de la théorie cinétique des gaz, elle est liée à la vitesse moyenne des molécules d'air, paramètre que l'on ne peut guère mesurer directement. Il faut par ailleurs rappeler que, dès qu'il existe entre deux corps ou entre les diverses parties d'un même corps une différence de température, il y a tendance à égalisation des températures par échange de chaleur.

Mais, l'expérience le montre tous les jours, les sensations de chaud et de froid dépendent d'autres facteurs : au sortir d'un bain, l'évaporation produit une sensation de froid, éventuellement en partie compensée par un fort ensoleillement ; par temps froid, le vent accroît les pertes thermiques de l'homme et la sensation de froid est plus forte que par vent calme ; les plantes et les animaux réagissent aux mêmes facteurs annexes : vent, rayonnement, évaporation... et l'on peut s'interroger sur l'utilité pratique de la mesure de la seule température de l'air, du moins à des fins biologiques ou physiologiques.

En fait, il s'agit avant tout d'une grandeur fondamentale qui caractérise l'état physique d'un gaz comme l'air, au même titre que la pression. Toute la thermodynamique, avec ses applications multiples, en découle... et la météorologie est évidemment concernée par cette grandeur, dont la mesure a été rendue possible par divers procédés thermométriques, associés à la définition d'une échelle thermométrique de référence.

En France, on utilise normalement l'échelle Celsius, dans laquelle le 0° correspond à la température de la glace fondante, et le degré 100 à celle de l'eau bouillante sous la pression atmosphérique normale (1 013,25 hPa) : la température est alors exprimée en °C.

L'échelle absolue de température, ou échelle Kelvin, couramment employée par les physiciens, correspond à l'échelle Celsius décalée de 273,15 degrés : le 0 absolu, ou 0 K, se trouve à -273,15 °C ; pratiquement, la température exprimée en degrés Kelvin (K) correspond à sa valeur exprimée en degrés Celsius (°C) et augmentée de 273 :

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273$$

Enfin, pour ce qui concerne les unités de chaleur, il convient d'écarter l'ancienne calorie et de ne retenir que le joule, habituelle unité d'énergie : rappelons seulement que la calorie vaut 4,186 joules. L'unité de puissance correspondante est le watt, défini comme 1 joule/seconde.

## ÉLÉMENTS SENSIBLES THERMOMÉTRIQUES

Les propriétés physiques de tous les corps, solides, liquides ou gazeux, dépendent de leur température ; ce sont d'ailleurs les changements d'état physique de l'eau (glace, liquide ou vapeur) qui servent de référence aux échelles thermométriques.

Leur dilatation est ainsi un moyen d'apprécier leur température ; c'est sur cette propriété physique que s'appuient les thermomètres bimétalliques, à bilame, ou les thermomètres habituels à mercure, à toluène ou à alcool dans le verre.

La variation de tension de vapeur d'un corps en fonction de sa température est également utilisable pour déterminer sa température ; ainsi, la tension de vapeur de l'eau pure est de 6 hPa à 0 °C, de 123 hPa à 50 °C, de 700 hPa à 90 °C (ébullition à l'altitude de 3 000 m environ), de 845 hPa (1 500 m) à 95 °C, et de 1 013,25 hPa à 100 °C. Inversement, la mesure de la température d'ébullition de l'eau permet d'évaluer la pression atmosphérique et d'estimer l'altitude ; un capteur fonctionnant sur ce principe s'appelle un **hypsomètre**.

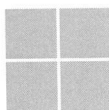
Par ailleurs, le rayonnement d'un corps est directement lié à sa température superficielle : il varie en fonction de la puissance 4 de sa température absolue et une mesure, toujours délicate, de cette émission permet d'estimer sa température de surface.

Mais surtout, les caractéristiques électriques de nombreux corps, comme les semi-conducteurs, varient fortement avec la température : la mesure de leur résistance ohmique, par exemple, dans le cas des fils de platine ou des thermistances, permet de déterminer leur température.

On dispose ainsi de nombreuses possibilités de convertir, sous forme mécanique ou électrique, une caractéristique thermométrique d'un corps convenablement choisi pour couvrir la gamme des températures que l'on cherche à mesurer. Moyennant un étalonnage soigneux du système de mesure et d'affichage, on peut alors lire directement, à l'aide d'un index, d'une aiguille ou d'un affichage numérique, la température du corps utilisé comme élément sensible.

Pour ce qui concerne la température de l'air, les valeurs extrêmes sur Terre semblent comprises entre -88 °C et +58 °C ; en France, ces limites se situent vers -33 °C et +44 °C. Pratiquement, un domaine de mesure de l'ordre de 100 degrés, entre -50 °C et +50 °C, couvre la gamme normale des températures de l'air au voisinage du sol dans la plus grande partie des régions de la Terre.

Mais, pour mesurer cette température de l'air, il faut s'assurer que la température de l'élément sensible (celle qui est mesurée et affichée) correspond correctement à celle de l'air qui l'entoure et dont la température doit être identique à celle de l'air libre, à la même hauteur au-dessus du sol ; c'est là que divers problèmes apparaissent...



Pour comprendre la nature de ces problèmes, examinons les processus physiques liés à l'échange de chaleur : le rayonnement, la conduction, la convection et les changements d'état.

## LES RAYONNEMENTS SOLAIRE ET TERRESTRE

Tout corps soumis à un rayonnement électromagnétique, le rayonnement solaire ou le rayonnement propre des corps environnants par exemple, en diffuse ou en réfléchit une partie, en absorbe une autre et transmet le reste. La partie absorbée est transformée en une autre forme d'énergie : électrique, chimique ou plus habituellement thermique. C'est cette dernière forme que nous considérons ici, sans tenir compte des problèmes spécifiques posés par les longueurs d'onde des rayonnements considérés, sinon en distinguant nettement deux types de rayonnement :

- le rayonnement solaire, provenant du Soleil, le jour,
- le rayonnement terrestre, dit aussi de grandes longueurs d'onde ou rayonnement thermique, émis par tous les corps terrestres.

### Le rayonnement solaire

Il est émis par le Soleil, à une température d'environ 5 800 K. À sa traversée de l'atmosphère, il est partiellement absorbé et diffusé par les molécules des gaz atmosphériques, et parvient au sol à la fois sous forme de rayonnement solaire direct, provenant du disque solaire, et de rayonnement diffus, provenant de la voûte céleste. Au voisinage du sol, après filtrage par l'atmosphère, les longueurs d'onde énergétiquement significatives sont pratiquement situées entre 0,3 et 4  $\mu\text{m}$  et comprennent les longueurs d'onde visibles entre 0,4 et 0,8  $\mu\text{m}$  (figure 1).

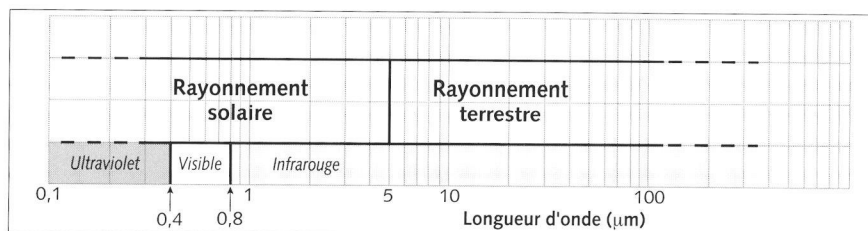


Figure 1 - Les rayonnements solaire et terrestre. Bien que l'appellation « rayonnement terrestre » utilisée dans cet article soit consacrée par l'usage, elle peut prêter à confusion : il s'agit du rayonnement thermique émis par les corps de la planète, l'atmosphère y comprise, à leur température habituelle. Il existe donc un rayonnement terrestre émis par la surface de la Terre vers l'espace et un rayonnement terrestre émis par l'atmosphère à la fois vers la surface terrestre (rayonnement descendant) et vers l'espace (rayonnement montant). (NdIrl)

Soumise au rayonnement solaire, la surface d'un corps solide quelconque réfléchit ou diffuse une partie de ce rayonnement incident : la proportion correspondante est désignée sous le terme d'**albedo**. De l'ordre de 0,2 pour les surfaces naturelles de terre ou d'herbe, l'albedo peut dépasser 0,9 pour des surfaces très diffusantes et blanches (plâtre, chaux) ou très réfléchissantes (métaux polis) ; il peut au contraire descendre jusqu'à 0,05 pour des surfaces très absorbantes, peintes en noir mat (voir encadré ci-après).

La fraction du rayonnement solaire incident absorbée en surface (appelée **absorptance**) par les **corps non transparents** peut ainsi varier entre 10 et 95 % selon la couleur et l'état de surface de ces corps : généralement de l'ordre de 75 à 80 % pour les surfaces naturelles de terre ou d'herbages, cette absorptance peut décroître jusqu'à 65 ou même 60 % dans le cas de sable clair. L'albedo d'une peinture blanche ou d'une couche de neige fraîche est d'environ 0,8 : une telle surface n'absorbe donc que 20 % du rayonnement solaire incident, dans une couche superficielle plus ou moins épaisse, de quelques microns pour la peinture ou de quelques décimètres pour la neige. L'énergie correspondante sert à chauffer cette couche, puis, par conduction, la masse entière du corps récepteur, provoquant éventuellement des changements d'état physique : évaporation de l'eau, fusion de la glace...

Les **corps transparents**, gazeux (air), liquides (eau) ou solides (verre), transmettent la plus grande partie du rayonnement incident, et n'en absorbent ou diffusent qu'assez peu, quelques pour cent seulement : ils ne s'échauffent donc que relativement peu sous l'effet du rayonnement solaire.

## Quelques caractéristiques d'un corps matériel vis-à-vis du rayonnement

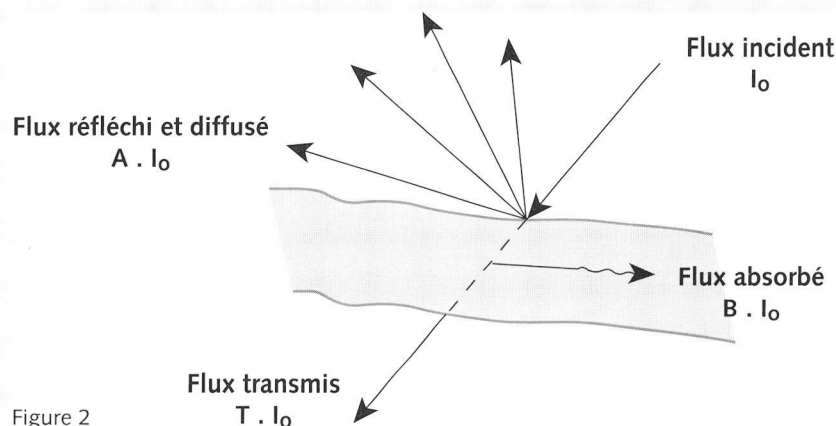


Figure 2

Par **flux**, on entend ici la puissance énergétique du rayonnement par unité de surface, en  $\text{W.m}^{-2}$ , encore appelée **éclairement énergétique**.

A est l'**albedo** du corps,

B son **absorptance**,

T sa **transmittance**.

On a les relations suivantes entre ces quantités :

A, B, T compris entre 0 et 1

$$A + B + T = 1$$

Pour un corps opaque,  $T = 0$ ,  $A + B = 1$

Pour un corps transparent,  $A \neq 0$ ,  $B \neq 0$ ,  $T \neq 1$

A, B et T varient en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ . Si  $\varepsilon$  est l'**émissivité** du corps,  $\varepsilon(\lambda) = B(\lambda)$ .

*Autres définitions :*

**Corps noir** : concept désignant un corps matériel idéal, parfaitement absorbant et parfaitement émissif.

**Luminance énergétique** (en un point d'une surface et dans une direction) : quotient de l'éclairement énergétique reçu (ou émis) par une surface, dans un cône infiniment petit axé sur la direction envisagée, par l'angle solide de ce cône ( $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ ).

De façon pratique, voici quelques ordres de grandeur des éclairements énergétiques du Soleil, du ciel et du sol :

- En plein soleil, une surface orientée perpendiculairement aux rayons peut recevoir jusqu'à  $1\,100 \text{ W.m}^{-2}$  lorsque le Soleil est suffisamment haut dans un ciel bien pur.
- Par ciel sans nuage, mais aussi par ciel couvert, le rayonnement diffus du ciel peut apporter environ  $250 \text{ W.m}^{-2}$  sur une surface réceptrice plane et horizontale, pour un angle solide de  $2\pi$  stéradians.
- Dans le cas de vastes masses nuageuses fortement éclairées par le Soleil, le rayonnement diffus qui parvient du ciel nuageux peut dépasser  $600 \text{ W.m}^{-2}$ , toujours pour ce même angle solide de  $2\pi$  correspondant à une surface plane exposée à ce rayonnement diffus.
- Enfin, le rayonnement solaire réfléchi ou diffusé par le sol représente en moyenne 15 à 25 % du rayonnement solaire global<sup>(1)</sup> incident :  $250 \text{ W.m}^{-2}$  sont ainsi un ordre de grandeur de ce rayonnement maximal diffusé par le sol, en sachant cependant que la neige fraîche, de fort albedo (0,8), peut donner des valeurs atteignant  $800 \text{ W.m}^{-2}$ , et que la réflexion diffuse par le sable clair peut atteindre  $400 \text{ W.m}^{-2}$ .

(1) Le rayonnement solaire global est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.



Nous retiendrons finalement comme valeurs maximales liées au rayonnement solaire :

- éclairement global incident sur un plan :  $1\,100\text{ W.m}^{-2}$  ;
- luminance énergétique diffuse du ciel ou du sol :  $50\text{ W.m}^{-2}\text{.sr}^{-1}$ , exceptionnellement  $150\text{ W.m}^{-2}\text{.sr}^{-1}$ .

## Le rayonnement terrestre

Il est émis naturellement par tous les corps de notre planète, y compris l'atmosphère, aux températures que l'on y rencontre normalement, et ses longueurs d'onde sont comprises entre 5 et  $100\text{ }\mu\text{m}$  ; c'est un rayonnement infrarouge (figure 1).

La surface d'un corps reçoit et absorbe ce rayonnement électromagnétique, de plus grandes longueurs d'onde que le rayonnement solaire, provenant de tous les corps naturels environnants ; et la surface de ce corps émet elle-même un rayonnement terrestre, fonction de sa température et de son **émissivité**. Cette émissivité est en grande partie dictée par la nature et l'état de la surface du corps : par exemple, elle tend vers l'unité lorsque des irrégularités microscopiques facilitent cette émission propre, naturelle et inévitable ; par contre, les métaux finement polis ne présentent pas de telles irrégularités de surface et leur émissivité est alors réduite (c'est-à-dire qu'ils émettent sensiblement moins que ne le ferait un corps noir idéal), alors que l'eau ou n'importe quelle surface humide provoque une émission de rayonnement terrestre très voisine de celle du corps noir. La puissance rayonnée par un corps est donnée par la formule de Stefan-Boltzmann :

$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_s + 273)^4$ , où  $T_s$  est la température de surface exprimée en  $^{\circ}\text{C}$ ,  
 $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  pour  $E$  exprimé en  $\text{W.m}^{-2}$ ),  
 et  $\epsilon$  l'émissivité de surface du corps ( $\epsilon = 1$  pour le corps noir).

Pour la plupart des corps naturels, l'émissivité  $\epsilon$  est d'environ 0,90 à 0,95 : nous retiendrons 0,92 comme valeur moyenne, sauf pour les métaux polis et propres dont l'émissivité peut descendre à 0,10. Ajoutons qu'à une longueur d'onde fixée, l'émissivité d'un corps est égale à son absorptance. Ainsi, la neige est un corps noir dans l'infrarouge (exemple spectaculaire de variation des caractéristiques radiatives d'un corps en fonction de la longueur d'onde).

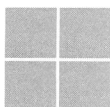
Quelques valeurs montrent l'influence de la température sur l'émission du corps noir :

à  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  :  $190\text{ W.m}^{-2}$  ; à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  :  $320\text{ W.m}^{-2}$  ; à  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  :  $420\text{ W.m}^{-2}$  ; à  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  :  $620\text{ W.m}^{-2}$ .

Quand il s'agit d'un volume gazeux, plus ou moins absorbant pour le rayonnement terrestre, son émission est plus délicate à estimer, surtout si sa température n'est pas homogène. Dans le cas de l'atmosphère, le rayonnement terrestre qui en parvient, au sol, par ciel pur et clair, peut être évalué par la température d'un corps noir donnant la même luminance énergétique : pour une atmosphère normalement humide, cette **température équivalente** est toujours inférieure à celle de l'air et d'environ  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  plus basse, dans les conditions moyennes de la basse atmosphère. Cependant, par temps froid et sec, surtout en altitude, la température équivalente du ciel peut descendre jusqu'à  $30$  ou  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  au-dessous de celle de l'air. Ce n'est que par ciel couvert de nuages bas que la température équivalente du ciel s'approche de la température de l'air.

La présence de nuages, plus émissifs que l'air, se traduit par un rayonnement atmosphérique descendant supplémentaire de  $40$  à  $90\text{ W.m}^{-2}$  selon l'altitude et la température de la couche nuageuse couvrant complètement le ciel : on peut prendre une valeur moyenne supplémentaire de  $70\text{ W.m}^{-2}$  pour une couverture nuageuse totale, et la multiplier par la fraction de ciel couverte par les nuages dans le cas d'un ciel partiellement nuageux.

Nous retiendrons donc une différence moyenne, négative, de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre la température de l'air et la température équivalente du ciel pour évaluer la luminance énergétique due au rayonnement terrestre, diffus, provenant du ciel clair, le jour comme la nuit. Ainsi, une surface noire située près du sol et dont la température est égale à celle de l'air émet vers le ciel plus de rayonnement terrestre qu'elle n'en reçoit. Cela correspond à une perte énergétique d'environ  $100$  à  $130\text{ W.m}^{-2}$  pour une surface plane noire orientée vers le ciel clair, soit  $20\text{ W.m}^{-2}\text{.sr}^{-1}$  par unité d'angle solide, en moyenne, dans les régions tempérées (figure 3).



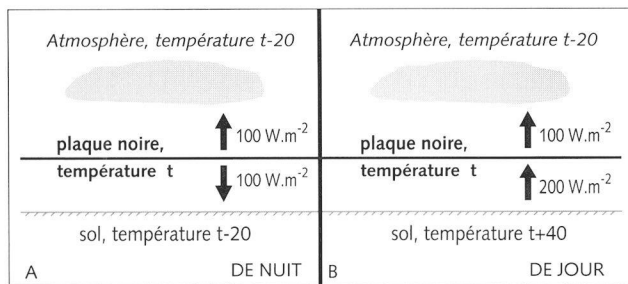


Figure 3 - Bilan du rayonnement terrestre pour une plaque noire horizontale, de nuit (A) et de jour (B).

Quant au rayonnement terrestre, supposé uniforme, émis par la surface du sol, il correspond à celui d'un corps presque noir (émissivité 0,95) dont la température d'émission serait celle de la couverture végétale : plus élevée que celle de l'air, le jour, par suite du rayonnement solaire incident, et surtout si le vent est nul, elle peut lui être au contraire inférieure et voisine de la température équivalente du ciel clair, la nuit, par vent nul, pour des végétaux secs.

Si l'on considère ainsi que, le jour, la température de surface du sol peut dépasser de 40 °C celle de l'air, on peut calculer que les échanges de rayonnement terrestre entre la surface du sol et une surface noire horizontale dirigée vers le sol se traduisent par un apport énergétique à cette surface d'environ 200 W.m<sup>-2</sup> pour un angle solide de  $2\pi$ , soit 35 W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>. La nuit, au contraire, les pertes de ce plan par échange de rayonnement terrestre avec la surface du sol, supposée à la même température que celle du ciel, ne doivent guère dépasser 120 W.m<sup>-2</sup> pour le même angle solide, soit 20 W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>.

Ainsi, la température d'équilibre d'un corps récepteur solide, opaque et sec, plongé dans l'air, n'est atteinte que lorsque l'énergie absorbée à sa surface, provenant des rayonnements solaire et terrestre incidents, est compensée par son émission propre de surface, mais aussi, et pour une part voisine, par les transferts de chaleur vers l'air environnant, par convection, ou vers des corps en bon contact thermique avec lui, par conduction. Si ce corps récepteur est un capteur de température destiné à mesurer la température de l'air, il convient de veiller à ce que son bilan radiatif (total des apports et des pertes énergétiques par rayonnement) soit aussi voisin que possible de zéro, afin d'éviter que le capteur ne s'échauffe ou ne se refroidisse par rayonnement.

## CONDUCTION ET CONVECTION

### La conduction

En dehors des échanges par rayonnement et des changements d'état, les échanges thermiques entre un corps et l'atmosphère peuvent se produire par conduction ou par convection.

Il est nécessaire ici de considérer deux types assez différents de conduction :

- la conduction moléculaire gazeuse qui se produit entre la surface du corps et l'air, au sein de la très fine (0,1 mm) couche limite d'air immobile, presque collée à la surface, qui joue un rôle d'écran à la transmission de chaleur entre le corps et l'air libre environnant ;
- la conduction solide (ou liquide) qui permet à la chaleur de se propager au sein du volume limité par la surface du corps considéré, sans mouvements moléculaires sensibles.

Ces deux aspects de la conduction peuvent d'ailleurs être traités de manière similaire.

Dans le cas le plus courant de la conduction au sein d'un solide, les corps naturels sont caractérisés par leur **conductivité thermique**, K, qui les groupe en bons conducteurs de la chaleur, comme les métaux, en conducteurs médiocres, comme la pierre ou le bois, et en isolants, comme la laine ou l'air.

Avec les unités du système international, voici quelques valeurs de la conductivité thermique K, exprimée en W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> :

- bons conducteurs (métaux) : cuivre, 390 ; aluminium, 200 ; tôle de fer, 63 ;
- conducteurs médiocres : verre, 0,6 ; pierre, 1,7 ; bois, 0,2 ;
- isolants : 0,02.

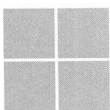
De ces valeurs de K, découle la résistance thermique P d'une plaque d'épaisseur e (exprimée en m) :

$$P = e/K$$

ainsi que la densité de flux thermique (en W.m<sup>-2</sup>) traversant cette plaque :

$$F = (T_1 - T_2)/P$$

T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub> étant les températures respectives des deux faces de la plaque considérée.



Notons cependant que, dans le cas d'une plaque plongée dans l'air sur ses deux faces, il faut tenir compte des interfaces air-plaque et de la couche limite d'air pratiquement immobile qui recouvre chaque paroi et où ne joue que la conduction gazeuse.

## La conduction gazeuse

Des transferts de chaleur se produisent en effet naturellement au sein de cette couche limite, par diffusion thermique dans le gaz : cette conduction gazeuse est notablement plus faible que la conduction par un métal ou par l'eau, mais ne doit pas être négligée.

Comme pour tous les phénomènes de conduction, la quantité de chaleur échangée fait appel à la notion de **diffusivité thermique**, liée aussi bien à la conduction moléculaire qu'à la capacité thermique des corps en contact. Ainsi, la conductivité thermique de l'hydrogène est sensiblement plus forte que celle de l'azote ou de l'air, et beaucoup plus faible que celle des solides, surtout des métaux, ou même de la plupart des liquides, alors que c'est l'inverse pour leurs diffusivités thermiques : la diffusivité de l'air est voisine de celles de nombreux métaux, et elle croît rapidement lorsque la pression diminue.

Dans le cas d'un corps solide plongé dans l'air, les transferts thermiques dus à la conduction gazeuse restent exclusivement dictés par la différence de température entre le corps thermométrique et l'air supposé parfaitement immobile : ils sont de l'ordre de  $0,4 \text{ W.m}^{-2}$  pour une différence de température de  $1^\circ\text{C}$  et restent proportionnels à cette différence sur une plage assez importante d'écart. Il s'agit là d'échanges de chaleur généralement négligeables devant ceux qui sont liés à la convection naturelle.

On doit par ailleurs noter que la conduction dans les liquides est aussi souvent supplantée par la convection naturelle, permise par la fluidité du milieu liquide mais en partie contrariée par sa viscosité, plus grande que celle de l'air ; pour l'eau, par exemple, la conductivité thermique est vingt-cinq fois plus élevée que celle de l'air, mais l'eau reste un médiocre conducteur de la chaleur tant que la convection, naturelle ou forcée, n'intervient pas.

## La convection naturelle

Il apparaît très difficile, expérimentalement, de maintenir l'air parfaitement immobile au contact d'une surface de température différente ; il se crée alors en effet, au voisinage même de la surface, des petits mouvements, des microturbulences, qui renouvellent l'air en contact et accroissent ainsi les échanges. C'est là la base du phénomène de convection naturelle, dont l'origine est essentiellement thermodynamique.

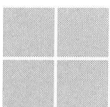
Ainsi, en l'absence de toute ventilation, les pertes énergétiques d'une surface plus chaude que l'air dépendent de l'orientation de cette surface et de la différence de température entre celle-ci et l'air ambiant. Dans le cas d'un plan vertical ou pour la face supérieure d'un plan horizontal, on peut retenir un échange proportionnel à la puissance 1,25 de l'écart de température et égal à  $2 \text{ W.m}^{-2}$  pour un écart de  $1^\circ\text{C}$  :

$$CV_{nat} = 2 \cdot (T_s - T_{air})^{1,25}$$

où  $CV_{nat}$  est la puissance échangée ( $\text{W.m}^{-2}$ ) et où  $T_s$  et  $T_{air}$  sont respectivement les températures de la surface du corps et de l'air.

Pour la face inférieure de ce plan plus chaud que l'air, ou pour la face supérieure d'un plan plus froid que l'air, ces pertes sont pratiquement réduites de moitié : le coefficient 2 doit être remplacé par 1,2 ou même moins (0,5) dans le cas de vastes surfaces horizontales, comme celle du sol, par vent nul.

Par ailleurs, si l'on considère, par exemple, la surface du sol et ses échanges thermiques par convection naturelle avec l'atmosphère lors d'une journée sans vent, on voit aussitôt que ceux-ci sont beaucoup plus importants lorsque la surface du sol est plus chaude que l'air (cas d'un fort ensoleillement, de jour), que dans le cas contraire (gelées nocturnes par vent nul). Ce phénomène est dû à la dilatation de l'air chauffé, le jour, tendant à le faire monter par convection naturelle et provoquant les turbulences d'origine thermique ; l'air refroidi au contact du sol, la nuit, tend au contraire à y stagner et à se stratifier sans engendrer de mouvements turbulents, et le transfert de chaleur se fait sur une très petite épaisseur.



## La convection forcée

Si, par contre, le renouvellement de l'air au contact de la surface est provoqué par une ventilation artificielle, la dissymétrie des échanges selon l'orientation de la surface disparaît et les éventuelles corrections liées aux dimensions de la surface de contact peuvent être totalement négligées : les paramètres déterminants deviennent la vitesse de ventilation, bien entendu, mais aussi la forme et la rugosité de la surface, génératrice des turbulences d'origine dynamique.

Par l'effet du vent ou du souffle d'un ventilateur, les échanges convectifs sont en effet fortement accrus et deviennent à peu près proportionnels à la différence de température et à la vitesse de ventilation, pour des surfaces de faibles dimensions. En utilisant toujours la densité de puissance CV exprimée en  $W.m^{-2}$ , on obtient alors, pour de tels échanges convectifs :

$$CV = 6,5 \cdot V \cdot (T_s - T_{air})$$

où V est la vitesse de ventilation exprimée en  $m.s^{-1}$ .

L'état de surface et l'échelle des rugosités interviennent quelque peu pour moduler cette valeur en fonction de la vitesse de ventilation, mais nous n'en tiendrons pas compte faute de pouvoir les apprécier avec précision. On peut enfin remarquer que, pour de faibles écarts de température, la convection naturelle correspond à une ventilation forcée de  $0,3 m.s^{-1}$  environ.

## LES CHANGEMENTS D'ÉTAT

Lorsque l'air est relativement sec, une surface mouillée perd son eau par évaporation : ce changement d'état de l'eau absorbe de la chaleur, environ 2 600 joules par gramme d'eau liquide évaporée. Ainsi, l'évaporation de 1 mm d'eau réclame 260 joules par  $cm^2$ . Selon la vitesse d'évaporation, déterminée à la fois par le déficit de saturation de l'air et par la vitesse de ventilation, la puissance consommée par ce phénomène est évidemment variable : si ce millimètre d'eau est évaporé en une heure, la puissance moyenne absorbée est de  $720 W.m^{-2}$  ; elle est donc importante vis-à-vis des autres échanges énergétiques. C'est d'ailleurs par la mesure de la température d'un thermomètre mouillé que l'on peut, indirectement et sous réserve d'une ventilation bien contrôlée, déterminer l'humidité de l'air par la méthode psychrométrique.

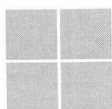
Inversement, dans le cas où le corps considéré est plongé dans une atmosphère très humide et se trouve, par exemple la nuit et par ciel clair, à une température inférieure à celle du point de rosée, il est le siège d'un dépôt de buée, de rosée, de microgouttelettes d'eau liquide, dont la condensation apporte une quantité d'énergie importante, tendant à compenser les pertes par rayonnement terrestre vers le ciel sans modifier la température de surface : dans des conditions moyennes de ciel clair et de vent nul, pour un rayonnement terrestre vers le ciel de  $120 W.m^{-2}$ , le dépôt de rosée peut atteindre au maximum 165 g par  $m^2$  en une heure, soit  $0,16 mm.h^{-1}$ .

Le même type de phénomène, consistant à absorber ou à dégager de la chaleur sans modifier les températures, est réalisé pour tout changement d'état physique d'un corps : la condensation de 1 g d'eau dégage autant de chaleur que ce qui est nécessaire à son évaporation (2 600 joules) ; de même, la congélation de l'eau liquide dégage environ 335 joules par gramme, à  $0^\circ C$ , tandis que la fusion de la glace nécessite l'apport de la même énergie, et cela toujours sans que la température ne se modifie.

## NÉCESSITÉ DE L'ABRI MÉTÉOROLOGIQUE

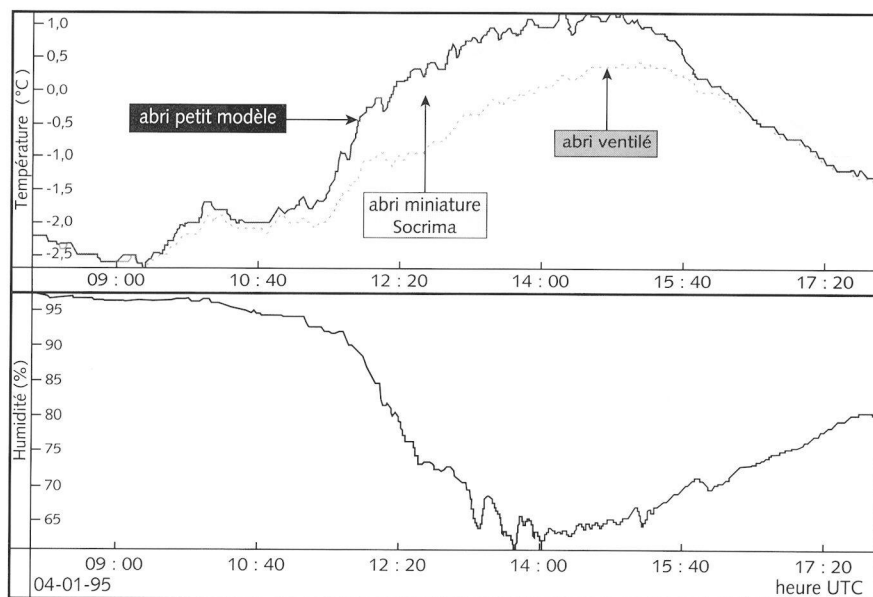
Une mesure de la température de l'air ne peut évidemment avoir de sens que si le capteur thermométrique est effectivement à la même température que l'air dans lequel il baigne : pour cela, il faut que les échanges énergétiques par convection entre ce capteur et l'air qui l'entoure soient prédominants et permettent de négliger tous les autres échanges de chaleur que nous venons de passer en revue, mais aussi que la température de l'air environnant le capteur soit la même que celle de l'air libre, à la même hauteur.

Un bon système de mesure de la température de l'air implique ainsi le prélèvement de l'air à une hauteur déterminée, par aspiration dans l'atmosphère libre, en assurant une bonne ventilation forcée du capteur thermométrique ; celui-ci doit être disposé à l'abri du rayonnement solaire dans une enceinte fermée, bien ventilée par l'air prélevé et bien isolée : il s'agit là d'une installation de référence,



souvent coûteuse, mais indispensable pour juger de la précision des mesures de la température de l'air, en particulier dans les stations météorologiques. Il faut noter cependant que, malgré ces précautions, des erreurs persistent parfois, par exemple en cas de brouillard, lorsque des gouttelettes sont aspirées et se déposent sur le capteur, puis le refroidissent en s'évaporant (figure 4). Des problèmes annexes d'ordre aérodynamique se posent également lorsqu'on veut éviter de récupérer l'air aspiré, puis éventuellement quelque peu réchauffé par son passage sur le ventilateur, lors de son rejet dans l'atmosphère libre.

Figure 4 - Mise en évidence d'un refroidissement parasite créé dans l'abri ventilé par évaporation : à la fin de l'épisode de brouillard, vers 12 h UTC, la baisse de l'humidité de l'air se traduit par un effet psychrométrique dans l'abri ventilé qui est mouillé. Le refroidissement est de l'ordre de 1 °C.



C'est pourquoi les abris ventilés sont souvent de forme allongée (figure 5).

Ce type d'abri ventilé est utilisé au Setim, à Trappes, pour effectuer des essais comparatifs d'abris. Il n'est pas encore employé dans le réseau opérationnel de Météo-France, à cause de son coût et de ses contraintes d'entretien. Il est toutefois probable que son utilisation devienne souhaitable sur les sites où l'on désire disposer d'une mesure de haute qualité de la température de l'air, afin de surveiller les évolutions climatiques.

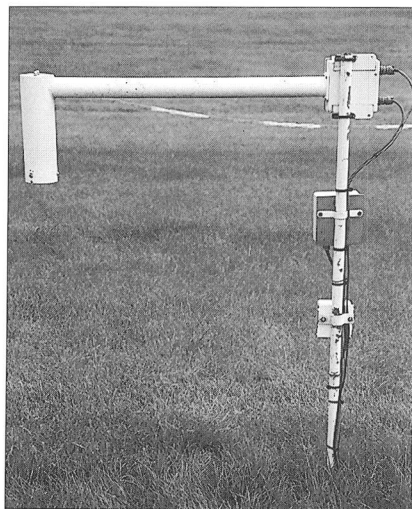


Figure 5 - Abri ventilé Qualimetrics.  
(Photo Météo-France)

Pour concevoir rationnellement une enceinte destinée à réduire au minimum les causes d'erreur lors de la mesure de la température de l'air, c'est-à-dire pour définir techniquement un **abri thermométrique** adapté à un capteur de caractéristiques données, on est ainsi amené à respecter plusieurs spécifications :

- L'abri ne doit pas modifier la température de l'air libre : il doit lui permettre de pénétrer facilement sans le forcer à un contact direct avec des orifices de ventilation risquant de se trouver à des températures différentes de celle de l'air libre ; il doit donc comporter des ouvertures suffisamment larges et dégagées, abritées au mieux des rayonnements parasites, en vue de faciliter le passage de l'air assurant la ventilation de l'intérieur de l'abri sans en modifier la température. Une autre solution est de minimiser la différence de température entre les parois et l'air libre, à l'aide d'un système de double paroi.
- L'abri doit protéger au mieux le capteur du rayonnement solaire, direct et diffus, mais aussi du rayonnement terrestre du sol et de l'atmosphère : les fractions de ciel et de sol visibles depuis le capteur doivent donc être aussi faibles que possible, et le capteur ne doit en aucun cas pouvoir être éclairé directement par le Soleil.
- L'abri doit éviter au capteur thermométrique toute projection d'eau liquide (pluie) ou solide (neige) : les ouvertures doivent être conçues pour que le capteur ne puisse pas être mouillé par rejaillissement de la pluie, par arrosage ou par ruissellement de la rosée.
- L'abri doit avoir une inertie thermique aussi faible que possible, et doit être réalisé de manière à réduire au minimum les écarts de température entre ses parois et l'air, de jour comme de nuit : les parties opaques des parois, le toit en particulier, doivent donc être peintes en blanc, au moins à l'extérieur, et bien isolées thermiquement à



l'intérieur par une mousse plastique de faible densité, de faible conductivité et de faible masse spécifique, ou par un système de double paroi.

- Enfin, en cas de fort ensoleillement et de vent très faible, la forme même de l'abri devrait pouvoir engendrer une ventilation interne naturelle afin d'accroître les échanges par convection ; elle ne doit pas non plus freiner le passage de l'air dans les conditions de vent habituelles, et cela quelle que soit la direction du vent.

Ce sont là des conditions multiples qui ne peuvent être satisfaites que par des compromis techniques, éventuellement liés aux climats locaux déterminant les sources d'erreurs les plus importantes ou les plus fréquentes. De nombreux types d'abri ont ainsi été dessinés et réalisés par les services météorologiques : leur efficacité, leur complexité technologique, leurs dimensions, leur coût de fabrication et d'entretien diffèrent parfois notablement, sans qu'une solution universelle ait pu être généralisée et rendue à la fois accessible à tous et adaptée à toutes les conditions météorologiques et climatiques.

Si des solutions relativement simples conviennent souvent aux régions inter-tropicales (vaste toit isolant), il n'en est pas de même aux latitudes moyennes ou élevées où les trajectoires annuelles du Soleil se révèlent plus complexes et les gammes de température à mesurer plus étendues. Le problème est encore plus délicat à traiter en montagne par suite de la neige et du givrage. Néanmoins, diverses solutions ont été proposées ; le choix dépend du budget disponible, du type de capteur thermométrique utilisé et de la précision des mesures souhaitée. Ce dernier point mérite d'être approfondi : des solutions complexes et coûteuses, comme celles mises en œuvre pour les installations de référence, ne sont généralement pas justifiées pour la plupart des applications. Avant toute chose, il convient d'étudier l'adéquation entre la représentativité spatio-temporelle de la température de l'air et l'utilisation de telles données thermométriques.

## REPRÉSENTATIVITÉ ET VARIABILITÉ DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

Les conditions de mesure les plus défavorables sont généralement associées à un vent très faible ou nul et à un fort ensoleillement, de jour, ou bien à un fort refroidissement, par ciel clair et sec, la nuit : c'est dans de telles conditions que les erreurs expérimentales sont les plus grandes.

Pour les abris professionnels les plus élaborés, mais sans ventilation forcée et auxiliaire, les écarts avec l'abri de référence atteignent alors souvent 1 °C par fort ensoleillement ou peuvent même temporairement dépasser cette valeur, le jour, par vent faible ; les différences de température au sein même de l'abri, entre partie haute et partie basse par exemple, restent du même ordre de grandeur. Les parois face au soleil peuvent subir un échauffement de l'ordre de 2 °C par rapport à la température de l'air mesurée au centre de l'abri. De nuit, par ciel clair et sec, et pour les abris les plus courants, ces écarts restent environ deux fois plus faibles et de signe opposé : les températures minimales mesurées sont alors inférieures aux températures vraies de l'air au même niveau. Ces différences de température, dues aux effets radiatifs, n'apparaissent réellement que lors des conditions de vent très calme. La figure 6 montre un effet d'échauffement le matin en l'absence de vent. Dès l'apparition d'un souffle d'air, l'échauffement disparaît.

Par ailleurs, l'expérience montre que la température de l'air varie assez rapidement dans le temps, en particulier lors des journées ensoleillées et par vent calme : des fluctuations de l'ordre de  $\pm 1$  °C peuvent être relevées pour des mesures répétées toutes les 20 secondes avec un capteur de faible inertie thermique. Par contre, la nuit, lorsqu'une stratification horizontale se produit par vent nul, ces fluctuations deviennent pratiquement inexistantes, mais la hauteur de mesure intervient fortement et l'on trouve des différences de 1 °C pour des variations de hauteur de quelques dizaines de centimètres.

Ces erreurs, surtout caractéristiques des valeurs extrêmes, c'est-à-dire des températures maximales et minimales, se manifestent également et de manière plus importante pour les températures dites « instantanées », à cause des constantes de temps du capteur et de l'abri lui-même : il apparaît ainsi que le temps de réponse le plus élevé de ceux des divers éléments de la chaîne de mesure détermine la valeur de l'inertie thermique de l'ensemble, et que les

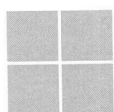
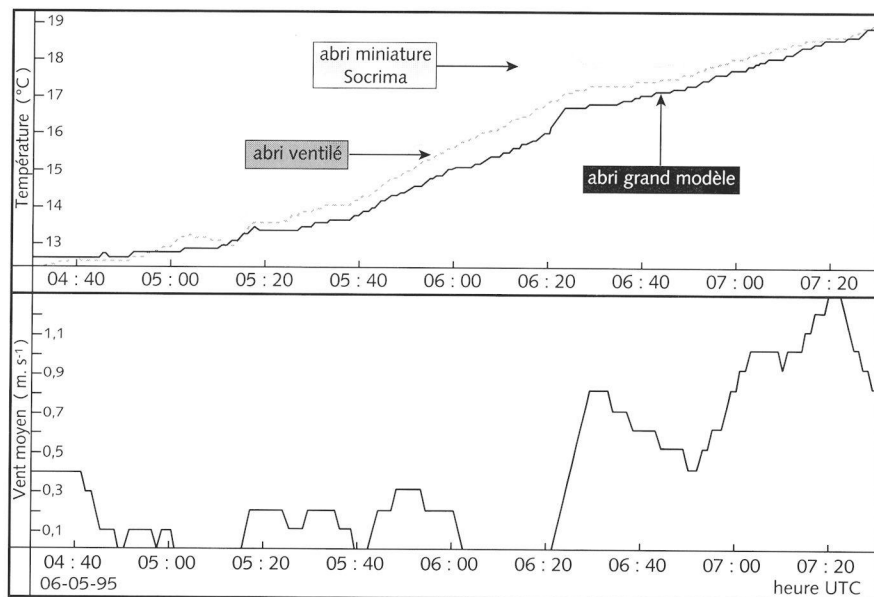




Figure 6 - Comparaison de l'échauffement induit par trois abris différents en période matinale. Avec un vent nul et un rayonnement solaire global de l'ordre de  $250 \text{ W.m}^{-2}$ , l'abri miniature s'échauffe de  $2^\circ\text{C}$  vers 6 h UTC. L'apparition d'un vent faible de  $1 \text{ m.s}^{-1}$  fait disparaître cet échauffement.



constantes de temps des divers éléments de cet ensemble doivent être voisines si l'on veut obtenir des données cohérentes et comparables dans toutes les conditions météorologiques. Ainsi, et très particulièrement lors de la comparaison de plusieurs types de thermomètres ou d'abris, il apparaît nécessaire d'harmoniser au mieux les temps de réponse des chaînes de mesure comparées, sous peine d'écarts non négligeables, à la fois pour les températures instantanées et pour les températures extrêmes.

Les constantes de temps des abris classiques utilisés dans les réseaux de Météo-France (décrits page suivante) ont été étudiées. Elles sont fortement dépendantes de la vitesse du vent, ces abris étant à ventilation naturelle.

En l'absence de vent, la constante de temps d'un abri grand modèle peut atteindre 20 minutes. Celle de l'abri miniature est de l'ordre de 5 minutes. En présence de vent (à partir de  $2 \text{ m.s}^{-1}$ ), la constante de temps du grand modèle descend aux environs de 5 minutes, et celle de l'abri miniature aux environs de 2 minutes.

Par ailleurs, la constante de temps de la thermosonde utilisée par Météo-France est voisine de 20 secondes.

Indépendamment de l'influence de la vitesse du vent, la fonction de transfert d'un abri n'est pas simple. Malgré son inertie thermique, l'abri grand modèle laisse voir les fluctuations rapides de la température, mais en les atténuant par un facteur 2 à 3 (Destruel et Leroy, 1995).

Si l'abri de mesure de la température est également utilisé pour la mesure de l'humidité de l'air, cette remarque doit être étendue au temps de réponse du capteur d'humidité : dans ce cas, les constantes de temps des éléments thermométriques et hygrométriques doivent être aussi proches que possible, ce qui reste toujours difficile à assurer par suite des variations notables, avec la température, du temps de réponse du capteur hygrométrique, d'une part, et de la présence elle-même de l'abri, d'autre part.

Des études du Setim ont montré en effet que la constante de temps de l'abri est différente selon que l'on s'intéresse à la température ou à l'humidité. De fait, l'inertie introduite par l'abri pour la mesure de température ne se retrouve pas pour le contenu en eau de l'atmosphère. L'abri se révèle plus « transparent » pour la vapeur d'eau (sauf en présence d'eau sur ou dans les parois). Ainsi, les fluctuations rapides de température du point de rosée (ou de pression partielle de vapeur d'eau) sont visibles à l'intérieur de l'abri. Ce phénomène introduit une perturbation de la mesure de l'humidité relative par la nature de l'abri. En effet, l'humidité relative est essentiellement une fonction de la température et de la température du point de rosée. Or, dans l'abri, la température est aussi fonction de l'inertie thermique de cet abri, alors que ce n'est pas le cas de la température

du point de rosée. L'abri, bien que nécessaire, introduit ainsi une perturbation sur la mesure de l'humidité relative, pouvant atteindre 5 % lors de fluctuations rapides. Les « petits » abris sont moins perturbateurs pour la mesure de l'humidité relative.

Pour tempérer cette perturbation de l'abri, il faut remarquer que des fluctuations rapides de l'humidité relative sont possibles dans l'atmosphère (10 % en une minute). Ainsi, l'utilisateur doit réfléchir à l'utilisation de la mesure et, si nécessaire, en effectuer une moyenne sur quelques minutes, afin de faire disparaître ces fluctuations rapides.

Il faut enfin signaler l'influence que peuvent avoir, tant sur les mesures de température que sur celles d'humidité, les caractéristiques hygroscopiques des matériaux constituant l'abri : le temps de réponse lié à l'absorption et, surtout, à la désorption de la vapeur d'eau par les parois de l'abri entraîne en effet une double source d'erreur sur les mesures, à la fois pour la température de l'air, par suite des chaleurs latentes de changement d'état qui modifient la température des parois de l'abri, et pour son humidité relative, à cause de ce décalage des températures et en fonction de l'apport de vapeur d'eau parasite éventuellement dégagée par les parois.

Tous ces différents aspects doivent être pris en compte pour le choix, la conception rationnelle et la réalisation pratique d'un abri de mesure de la température de l'air et, éventuellement, de l'humidité. Mais d'autres éléments interviennent pour optimiser la solution à retenir : systèmes de mesure et d'affichage des températures avec ou sans télémesure, budget disponible... mais aussi, et surtout, buts poursuivis et modalités d'exploitation des mesures, encombrement de l'abri et volume intérieur disponible (enregistreurs, sonde électrique), cadence des mesures (selon le temps de réponse du système), affichage et mémorisation des données de mesure (valeurs instantanées, valeurs extrêmes), incertitude admise pour les températures instantanées, extrêmes ou moyennes, sur des périodes s'étendant de quelques minutes à plusieurs jours, durant certaines saisons ou à des périodes déterminantes de l'année, dans un climat défini (montagne, bord de mer, zone fortement polluée), etc.

Pour illustrer de quelle façon on peut concevoir et réaliser des abris répondant, de façon plus ou moins satisfaisante, à ces divers critères, examinons tout d'abord les abris professionnels, tout au moins ceux qui sont utilisés ou testés à Météo-France.



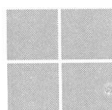
Figure 7 - Abri grand modèle.  
(Photo Météo-France)

## LES ABRIS UTILISÉS À MÉTÉO-FRANCE

Le type d'abri le plus répandu dans le monde est l'**abri de type Stevenson**. Cet abri est en forme de caisse, à côtés ajourés, et possède en général un double toit. Son volume intérieur est assez grand pour contenir des thermomètres et des hygromètres, mais aussi des appareils enregistreurs. Sa ventilation est naturelle. Des essais ont montré que la vitesse de ventilation à l'intérieur d'un tel abri est de cinq à dix fois inférieure à la vitesse du vent au niveau de l'abri. (Ainsi, dans des conditions de vent calme, assez fréquentes sur certains sites, la vitesse de ventilation interne est insuffisante pour assurer le fonctionnement correct d'un psychromètre).

Météo-France utilise deux modèles d'abri de ce type, respectivement appelés **abri grand modèle** et **abri petit modèle** (figures 7 et 8). Initialement réalisés en bois, ces abris sont maintenant en grande partie en plastique, pour des raisons d'économie. L'abri grand modèle est utilisé pour accueillir des appareils enregistreurs. Lorsque la présence de tels enregistreurs n'est pas nécessaire, l'abri petit modèle est employé. Les essais ont montré que ce dernier abri est un meilleur compromis, entre la protection des capteurs contre les échanges parasites de chaleur, d'une part, et l'inertie thermique, d'autre part, que l'abri grand modèle. Il est donc utilisé de façon privilégiée pour toute nouvelle installation nécessitant un bon niveau de qualité. Les enregistrements sont alors assurés par un système d'acquisition automatique. Le capteur de température utilisé est une thermosonde à résistance de platine (résistance classique de 100  $\Omega$  à 0 °C).

Depuis quelques années, de nombreuses stations automatiques ont été installées sur des sites sans observateur. La densité croissante des réseaux a conduit à optimiser les coûts. À cet effet, un abri dit **abri miniature** a été développé par le Setim il y a quelques années (figure 9). Son coût est de trois à quatre fois inférieur à



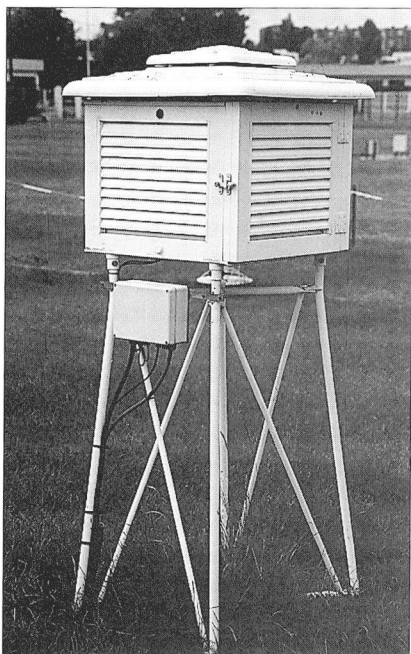


Figure 8 - Abri petit modèle.  
(Photo Météo-France)

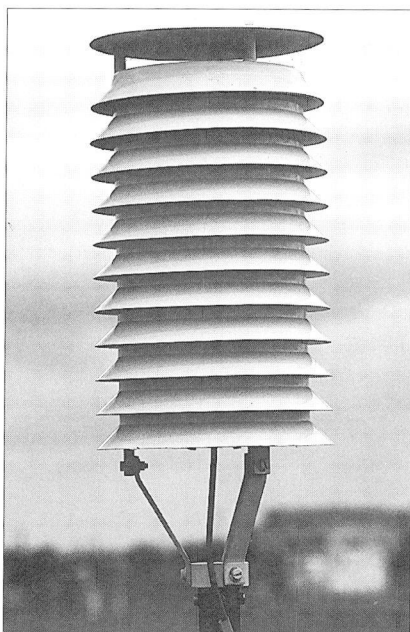
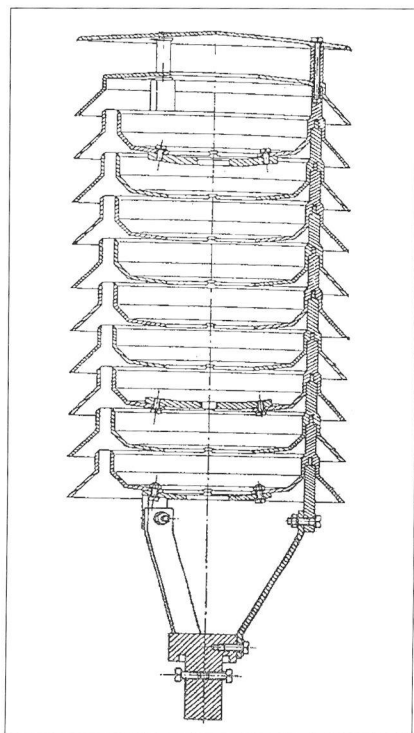
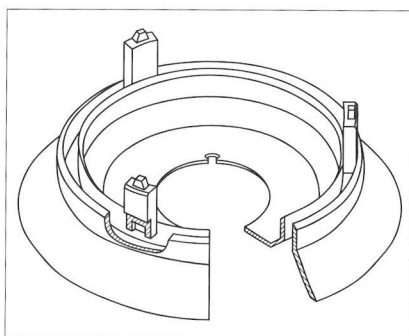


Figure 9 - Abri miniature Socrima.  
La hauteur de l'abri proprement dit est d'environ 50 cm. (Photo Météo-France)

Figure 10 - Schémas de l'abri miniature Socrima. (Documents Météo-France)



a, schéma d'ensemble de l'empilage,



b, schéma d'une pièce élémentaire.

celui d'un abri petit modèle. Son volume réduit ne permet d'accueillir qu'un seul ensemble de capteurs de température (thermosonde) et d'humidité (capteur à variation d'impédance). Cet abri a été conçu pour minimiser le coût de fabrication tout en conservant de bonnes caractéristiques météorologiques. Il est ainsi constitué d'un ensemble de pièces emboîtées de même forme constituant une double paroi (figure 10). La conception de cet abri est brevetée. Il est réalisé par la société Socrima.

La tendance à vouloir diminuer les coûts, en particulier pour les systèmes automatiques, a conduit à utiliser dans de nombreux pays des abris de plus en plus simplifiés, parfois excessivement. En effet, la plupart des études climatiques sur l'évolution de la température sont gênées par ces différences d'abri, souvent plus importantes que d'éventuelles variations climatiques à long terme.

Le Setim a conduit et poursuit des comparaisons d'abri, incluant les abris utilisés par Météo-France (abris grand modèle, petit modèle, miniature), des abris ventilés et des petits abris de fabrication étrangère (Gill), largement utilisés aux États-Unis et dans le monde (figure 11). De ces comparaisons, il ressort qu'un abri ventilé possède les meilleures caractéristiques météorologiques, mais qu'il est parfois gêné par l'effet psychrométrique décrit précédemment.

Parmi les abris de type Stevenson, l'abri petit modèle présente moins d'effet d'échauffement et d'inertie thermique que l'abri grand modèle. C'est le type d'abri aujourd'hui retenu par Météo-France pour ses sites professionnels.

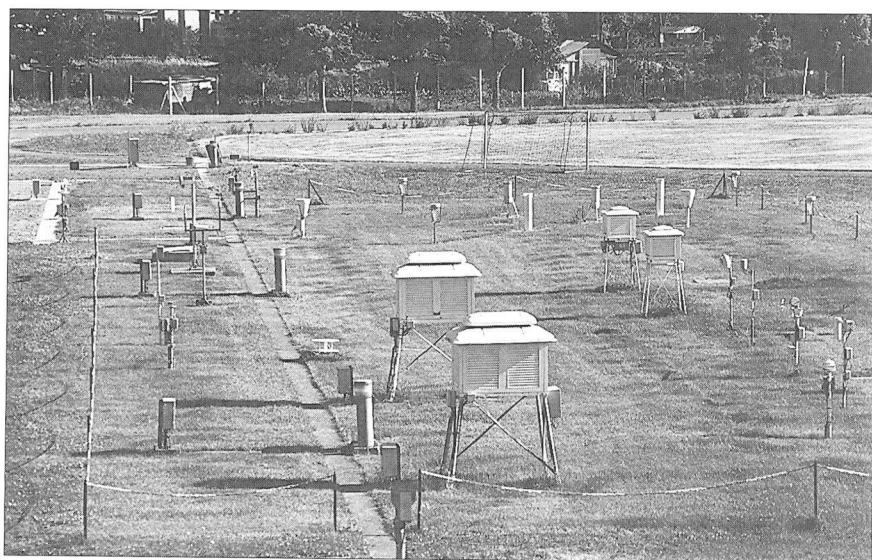


Figure 11 - Le parc à instruments du SETIM, à Trappes, où sont en particulier comparés les divers types d'abris. (Photo Météo-France)

L'abri miniature Socrima, conçu au Setim, présente un faible effet d'échauffement par fort rayonnement et faible ventilation (figure 6), mais reste en moyenne très proche des abris classiques. Par contre, l'effet d'échauffement de l'abri miniature Gill (figure 12) est nettement plus important (jusqu'à 3 ou 4 °C), à cause de sa taille plus réduite et de sa forme plus simple (une seule paroi).

## PROPOSITION D'ABRI SIMPLIFIÉ

Pour la plupart des applications ne nécessitant pas une mesure de « référence », il paraît raisonnable de retenir une incertitude de mesure de la température de l'air de l'ordre de 1 °C : une erreur moyenne inférieure à 0,5 °C semble suffisante, et une erreur maximale de 2 °C dans les conditions exceptionnelles les plus défavorables paraît acceptable. En retenant cette dernière valeur et l'hypothèse d'une journée de vent calme, par ciel clair, on obtient les données suffisantes pour définir les spécifications techniques minimales guidant la conception générale d'un abri simple et répondant à la majorité des utilisations courantes.

La première question concerne les caractéristiques des parois de l'abri. Pour s'échauffer le moins possible sous un éclairement solaire de 1 000 W.m<sup>-2</sup>, les parois doivent être :

- Soit transparentes, mais le capteur reçoit alors le rayonnement solaire...
- Soit fortement réfléchissantes ou diffusantes ; un miroir ou un métal poli paraissent intéressants, mais leur oxydation ou des dépôts de poussière dégradent rapidement leurs propriétés réfléchissantes ; avec une simple peinture blanche, on peut obtenir un albedo de 0,85, éventuellement réduit à 0,75 par le vieillissement et les salissures.

Nous retiendrons donc, pour la paroi, une peinture blanche et un albedo de 0,75, en vue de calculer sa température d'équilibre dans l'air, supposé à 20 °C, par les seuls effets de la convection naturelle et du rayonnement. Par ciel clair, on peut admettre que la température apparente du ciel est de 20 °C inférieure à celle de l'air, soit 0 °C ; pour une émissivité normale de la peinture de 0,9, on trouve finalement un écart de 16 °C avec l'air, soit 36 °C.

La vérification est simple :

- puissance absorbée :  $1\,000 \cdot (1 - 0,75) = 250 \text{ W.m}^{-2}$
- puissance évacuée par convection naturelle :  $2 \cdot 16^{1,25} = 64 \text{ W.m}^{-2}$
- puissance évacuée par rayonnement :  $0,9 \cdot [(273 + 36)^4 - (273 + 0)^4] = 182 \text{ W.m}^{-2}$

Notons que si l'on avait utilisé de la peinture noire, avec la même émissivité, l'écart aurait été de 64 °C et la température extérieure de la paroi de 84 °C !

Pour ce calcul, nous avons supposé négligeables les transferts thermiques à travers la paroi ; une isolation intérieure est évidemment nécessaire afin d'éviter l'échauffement de l'air intérieur à l'abri. Il convient en effet que la température moyenne des surfaces internes des parois ne dépasse pas celle de l'air intérieur, où est placé le capteur, de plus de 2 °C ; compte tenu du fait que l'éclairement solaire de 1 000 W.m<sup>-2</sup> ne concerne que la moitié au maximum des parois de l'abri, on peut admettre une valeur double, soit un écart de 4 °C, entre la température de la face interne de la paroi ensoleillée et celle de l'air. Pour que cet écart soit dû aux seules pertes par convection naturelle à l'intérieur de l'abri, il faut que la densité de puissance à évacuer par la face interne ne dépasse pas la valeur limite de 11 W.m<sup>-2</sup>. Dans ce but, calculons la résistance thermique P de la paroi isolée nécessaire pour que le flux énergétique F lié à une différence de 16 °C soit de 11 W.m<sup>-2</sup> :

$$F = 16/P = 11 \quad \text{d'où } P = 1,5.$$

En supposant cette paroi en contreplaqué de 5 mm doublé de mousse isolante, on peut calculer les résistances thermiques associées :

- pour le contreplaqué de conductivité K1 = 0,2 :  $P1 = 0,005/0,2 = 0,025$ , donc négligeable,
- pour la mousse de polystyrène, K2 = 0,02 et la résistance correspondante  $P2 = 1,5$ . Comme  $P2 = e/K2$ , on en déduit :  
 $e = K2 \cdot P2 = 0,03 \text{ m}.$

Nous retiendrons ainsi une épaisseur d'isolant de quelques centimètres.

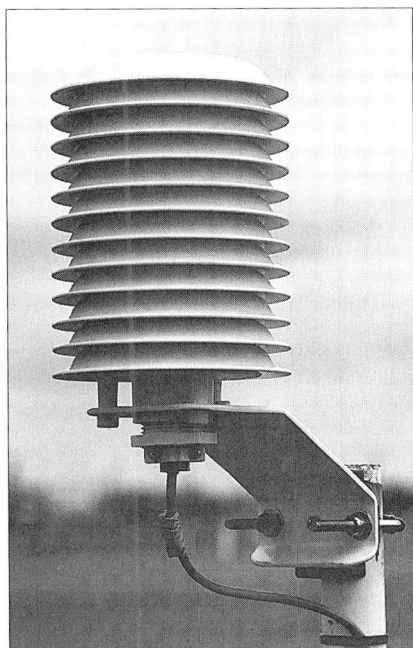
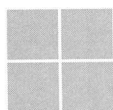


Figure 12 - L'abri miniature Gill.  
La hauteur de l'abri proprement dit est d'environ 20 cm. (Photo Météo-France)





La nuit, les pertes thermiques vers le ciel sont sensiblement plus faibles que le jour ; cette isolation devrait donc être suffisante. Vérifions-le pour une température apparente du ciel inférieure de 20 °C à la température de l'air  $T_{air}$ , comme précédemment. La différence de température  $dT$  entre l'air et la paroi sera telle que :

$$1,2 \cdot dT^{1,25} = \epsilon \cdot \sigma \cdot [(T_{air} - dT)^4 - (T_{air} - 20)^4]$$

Pour  $T_{air} = 10\text{ °C} = 283\text{ K}$ , on trouve  $dT = -13\text{ °C}$  : la température d'équilibre de la face supérieure de la paroi sera alors de  $-3\text{ °C}$  (si l'air est suffisamment sec pour éviter un dépôt de rosée ou de gelée blanche...).

Encore faut-il maintenant dessiner la forme de l'abri pour que le capteur ne soit jamais éclairé par le Soleil à travers les ouvertures de ventilation, quelle que soit l'heure du jour et la déclinaison du Soleil ; la solution est géométriquement simple. Mais il est également souhaitable que l'air intérieur, légèrement échauffé le jour, ait tendance à s'évacuer en déclenchant une ventilation interne, même faible ; la pente du toit devra, autant que possible, favoriser l'évacuation de l'air intérieur plus chaud que l'air ambiant, de même qu'elle devra faciliter l'écoulement de l'air refroidi au contact de la face supérieure du toit, la nuit.

Dans tous les cas, la nécessité d'une ventilation naturelle de l'abri implique l'existence d'ouvertures à travers lesquelles le capteur thermométrique pourra éventuellement apercevoir le ciel ou le sol, à moins de prévoir des persiennes

assez lâches et en chicane. Pour des raisons de simplicité de construction, de simples ouvertures sont évidemment préférables à des volets « persiennés » : le capteur sera donc soumis à des échanges de rayonnement, solaire et terrestre, avec le ciel ou le sol, et il faut évaluer au mieux les limites dimensionnelles de ces « fenêtres » pour que la température du capteur ne soit pas trop perturbée par ces échanges parasites, dans les conditions les plus défavorables.

Prenons le cas d'une thermosonde encapsulée dans une enveloppe étanche cubique de 1 cm d'arête, peinte en blanc. Pour une différence de 1 °C entre la température de cette enveloppe et l'air intérieur de l'abri, le cube dissipe  $10^{-3}\text{ W}$  par simple convection naturelle de ses faces. La face du cube dirigée vers l'ouverture ne doit donc absorber, au plus, que cette puissance : pour un albedo de 0,75, le rayonnement diffus du ciel parvenant à cette face de 1 cm<sup>2</sup> peut alors atteindre 0,004 W. Comme, de jour, la luminance énergétique maximale du ciel (nuageux) ou du sol (neigeux) est de  $150\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ , l'angle solide correspondant est d'environ 0,25 sr : à une distance moyenne de 20 cm, la surface de la fenêtre est ainsi de 100 cm<sup>2</sup> environ (12 cm<sup>2</sup> seulement si le capteur avait été peint en noir mat).

Les échanges énergétiques de rayonnement terrestre, la nuit comme le jour, ne dépassent pas  $35\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ , mais l'émissivité de 0,9 entraîne un gain ou une perte énergétique de la face orientée vers l'ouverture du même ordre que dans le cas du rayonnement solaire, soit environ 0,003 W. Les ouvertures libres vers le ciel ou le sol telles qu'elles viennent d'être calculées sont donc compatibles avec les échanges par rayonnement terrestre entre le capteur et l'atmosphère ou le sol, la nuit.

On peut par ailleurs noter que, de jour et par ciel clair, le rayonnement solaire diffus traversant la fenêtre entraîne un apport d'énergie au capteur thermométrique alors que, simultanément, les échanges de rayonnement terrestre de ce capteur avec le ciel se traduisent par une perte qui diminue le bilan final.

Le schéma général d'abri donné dans l'encadré ci-après tente de matérialiser ces quelques réflexions : sa simplicité de construction et sa rusticité n'excluent pas une précision de mesure de la température de l'air bien adaptée à la plupart des applications autres que l'étude fine de la physique de l'atmosphère. Un tel abri a été réalisé au Setim (figure 13) ; il est actuellement comparé aux abris « classiques » de Météo-France.

Une solution plus sûre serait évidemment de réaliser une ventilation artificielle du capteur, de l'ordre de quelques m.s<sup>-1</sup> ; on pourrait alors considérablement

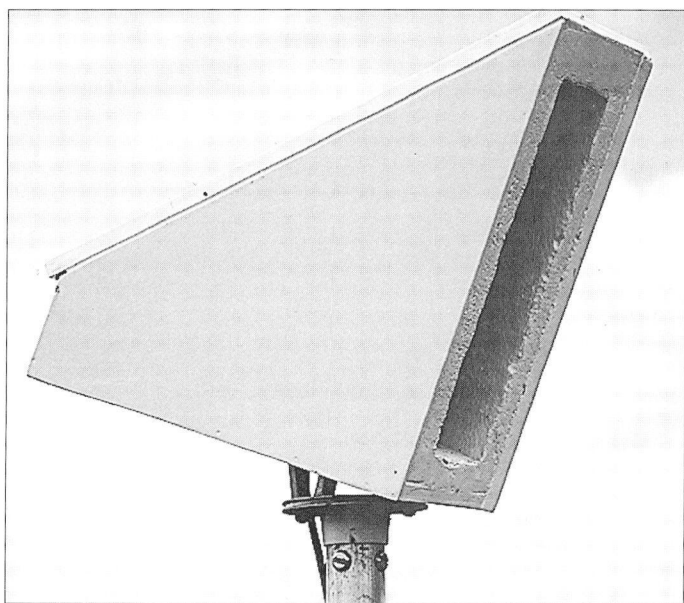
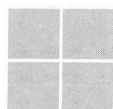
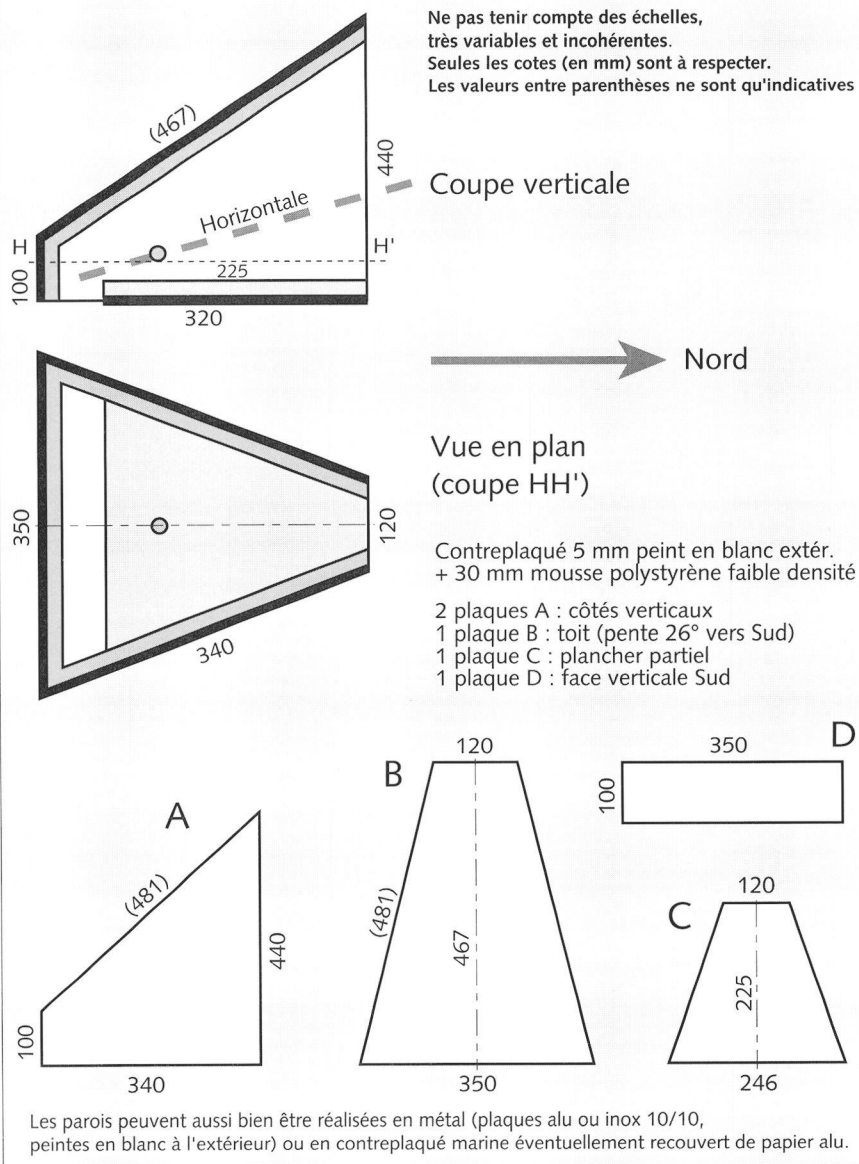


Figure 13 - L'abri simplifié proposé dans cet article et réalisé au SETIM.  
(Photo Météo-France)





## Schéma de l'abri météorologique simplifié



réduire les ouvertures apparentes de ventilation et, ainsi, les échanges parasites de rayonnement entre l'environnement et le capteur. Un ventilateur de faible puissance actionné par des cellules photoélectriques solaires s'impose aussitôt, de jour, comme une solution d'autant plus efficace que la convection forcée ainsi créée serait d'autant plus forte que le rayonnement solaire incident serait plus élevé et les erreurs de mesure induites plus importantes. Cependant, le problème posé par le refroidissement nocturne des parois n'est pas résolu par une telle méthode, mal adaptée à une mesure correcte des températures minimales.

Une autre parade consiste à la fois à accroître l'isolation thermique des parois et à faciliter leur ventilation naturelle, par exemple en les réalisant sous forme de parois multiples, formées de feuilles (même métalliques) minces, suffisamment espacées pour former des barrières successives et même laisser facilement circuler et s'évacuer vers le haut l'air échauffé, le jour, ou vers le bas l'air refroidi, la nuit. Cette solution, couramment adoptée sous la forme voisine du « double persiennage » des abris météorologiques habituels, est également valable de jour et de nuit : son principal inconvénient réside dans le coût final de l'isolation ainsi réalisée, lié à la complexité de fabrication de l'abri et aux difficultés de montage inhérentes à cet emboîtement.

## ET LE CONFORT THERMIQUE ?

Les évaluations et les raisonnements précédents sont immédiatement applicables au confort thermique d'un être vivant placé à l'intérieur d'une pièce d'habitation, sans ventilation, et soumis à un rayonnement solaire généralement négligeable devant les échanges par rayonnement terrestre avec les parois (murs, fenêtres, plafond, sol) et les pertes par transpiration et évaporation. On peut également les appliquer au comportement thermique de tout objet ou être vivant en plein air, mais alors sans négliger le rayonnement solaire ni la vitesse du vent, et en tenant compte de l'isolation apportée par les vêtements ou le pelage ; le confort thermique est alors obtenu lorsque le bilan des échanges par rayonnement et convection avec l'environnement permet d'évacuer sans difficulté la puissance normalement dissipée par le corps, selon l'activité du sujet.

## BIBLIOGRAPHIE

Destrue J.-M. et M. Leroy, 1995 : Caractérisation de la fonction de transfert d'un abri météorologique de mesure de température et d'humidité relative. Note technique n° 28, Météo-France, Trappes.

## POUR EN SAVOIR PLUS

Andersson T. et I. Mattisson, 1991 : A field test of thermometer screens. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, RMK n° 62, 40 p.

Bergstein D. M., 1995 : The reflecting disk shield air temperature monitor. IX<sup>e</sup> symposium sur l'instrumentation et les observations météorologiques, Charlotte, USA.

Brock F. V., S. R. Semmer et C. Jirak, 1995 : Passive solar radiation shields: wind tunnel testing. IX<sup>e</sup> symposium sur l'instrumentation et les observations météorologiques, Charlotte, USA.

Brock F. V., S. J. Richardson et S. R. Semmer, 1995 : Passive multiplate solar radiation shields. IX<sup>e</sup> symposium sur l'instrumentation et les observations météorologiques, Charlotte, USA.

Crescenti G. H., R. E. Payne et R. A. Weller, 1989 : Improved meteorological measurements from buoys and ships (IMET): preliminary comparison of solar radiation air temperature shields. Woods Hole Oceanographic Institution Technical report, WHOI-89-46, 53 p.

Fabry C., 1942 : *Propagation de la chaleur*. Armand Colin, Paris.

Fuchs M. et C. B. Tanner, 1965 : Radiation shields for air temperature thermometers. *J. Appl. Meteor.*, 4, 544-547.

Perlat A. et M. Petit, 1961 : *Mesures en météorologie*. Gauthier-Villars, Paris.

Perrin de Brichambaut C. et G. Lamboley, 1974 : *Le rayonnement solaire au sol et ses mesures*. Cahiers Afedes n° 1, Éditions européennes Thermique et Industrie, Paris.

Perrin de Brichambaut C. et C. Vauge, 1982 : *Le gisement solaire*. Lavoisier, collection « Tec et Doc », Paris.

Richardson S. J., 1995 : Passive solar radiation shields: numerical simulation of flow dynamics. IX<sup>e</sup> symposium sur l'instrumentation et les observations météorologiques, Charlotte, USA.

Richardson S. J. et F. V. Brock, 1995 : Passive solar radiation shields: energy budget - optimizing shield design. IX<sup>e</sup> symposium sur l'instrumentation et les observations météorologiques, Charlotte, USA.

Spark W. R., 1972 : The effect of thermometer screen design on the observed temperature. Document WMO n° 315, OMM, Genève, Suisse.

Zanghi F., 1987 : Comparaison des abris météorologiques. Note technique du SETIM n° 11, Météo-France, Trappes.

