

LA MESURE DE LA TEMPERATURE

La mesure de la température s'effectue à l'aide d'un thermomètre ou plus exactement d'une sonde thermométrique. Il s'agit d'un instrument permettant de repérer la température du milieu avec lequel il doit être en équilibre thermique. Un thermomètre utilise une grandeur thermométrique dont les variations associées à une échelle de mesure permettent de repérer des températures.

Historique du thermomètre

C'est au début du XVII^{ème} siècle que Galilée comprend au cours d'une expérience sur la chaleur que l'air se dilate quand il s'échauffe et qu'il se contracte quand il se refroidit. Le thermomètre à air a été repris par Santorre Santorio (1561-1636), couramment appelé Sanctorius. Il fut l'inventeur du premier instrument gradué sensible à la température, appelé thermoscope. Cet appareil possède uniquement trois graduations : la température de l'air refroidi par la neige, la température de l'air réchauffé par la flamme d'une bougie et le point médian. L'inconvénient majeur des thermoscopes est qu'ils sont sensibles à la pression atmosphérique.

En 1641, les premiers thermomètres à tube scellé contenant du liquide voient le jour, sous l'impulsion de Ferdinand II, grand duc de Toscane. Les savants et constructeurs ne cessent par la suite de perfectionner le thermomètre à dilatation de liquide, avec notamment le choix du liquide thermométrique le plus adapté. Ainsi, le mercure remplace progressivement l'eau et l'alcool comme liquide thermométrique. A noter que de nos jours, le mercure, un métal sous forme liquide à température ambiante, ne doit plus être utilisé car il est toxique ; il est remplacé de nos jours par différents liquides organiques.

Au cours du XVIII^{ème} siècle, les études se multiplient au sujet de l'échelle thermométrique à utiliser. Les échelles les plus connues sont regroupées dans le tableau suivant :

Nom de l'échelle	Auteur	Date de création	Température de la glace fondante	Température d'ébullition de l'eau à la pression atmosphérique normale
Echelle Fahrenheit	David Fahrenheit	1724	32°F	212°F
Echelle Réaumur	Antoine Ferchault de Réaumur	seconde moitié du XVIII ^{ème} siècle	0°R	80°R
Echelle Celsius	Anders Celsius	1742	0°C	100°C
Echelle centigrade usuelle	Jean-Pierre Christin	1743	0°C	100°C

Les premiers thermomètres à minimum et à maximum sont fabriqués dès le milieu du XVIII^{ème} siècle. Le thermomètre à minimum de l'époque est similaire à celui qui est encore utilisé de nos jours dans les postes climatologiques non automatisés. L'instrument actuel du thermomètre à maximum a été inventé en 1852.

A la fin du XVIII^{ème} siècle, des thermomètres bimétabliques, utilisant la déformation des métaux par la chaleur, et des thermomètres enregistreurs à tube de Bourdon, aussi appelés thermographe sont inventés. Un thermographe est un instrument de mesure composé d'un cylindre et d'un stylet qui enregistrent mécaniquement les variations de température sur un diagramme.

Avec l'avancée de la technologie et de l'acquisition numérique, l'instrument de mesure de la température, utilisé de nos jours dans les stations automatiques de Météo-France, est la sonde thermométrique à résistance de platine.



Photo 1 : *Thermomètres à minimum et maximum (en haut) et thermographe dans l'abri Stevenson* © Météo-France



Photo 2 : *Sonde thermométrique Pt100* © Météo-France

Définition de la température

La température mesurée en météorologie ne correspond pas à la température physique ressentie. Il s'agit par définition de la mesure de la température de l'air sous abri, à une hauteur de 1,5 m du sol.

Unité de la température

Dans le paragraphe « Historique de l'instrument de mesure » sont citées différentes échelles thermométriques créées au fil du temps. Ces échelles sont empiriques et dépendent de la grandeur thermométrique utilisée, c'est à dire du paramètre physique du corps (solide, liquide ou gazeux) utilisé variant en fonction de la température. Il apparaît alors la nécessité de trouver une échelle thermométrique indépendante des propriétés de la substance utilisée.

Le physicien anglais William Thomson, plus connu sous le nom de Lord Kelvin, introduit en 1848 une échelle absolue de température. Par cette nouvelle échelle, la notion de zéro absolu est établie comme étant la température à laquelle plus aucune chaleur ne peut être tirée du corps étudié. Il s'agit de la température la plus basse qu'il puisse exister dans l'univers et correspond à l'arrêt de l'agitation moléculaire. Par convention, le zéro absolu est égal à 0 K. L'actuelle unité internationale de température est le Kelvin (K). L'échelle absolue ne fait intervenir qu'un seul point de référence : la valeur particulière du point triple de l'eau 273,16 K. Le point triple de l'eau correspond aux conditions dans lesquelles coexistent les trois états (liquide, solide et gazeux). Le Kelvin est donc la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

Afin d'obtenir une échelle centésimale et permettre d'avoir toujours le même intervalle de température pour une même valeur numérique dans les deux unités, l'unité Celsius a été définie comme égale à la température absolue diminuée de 273,15, correspondant à la température de fusion de la glace à pression atmosphérique normale.

$$\theta(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$$

Unités	Point de congélation de l'eau	Point d'ébullition de l'eau
Kelvin (K)	273,15	373,15
Celsius ($^{\circ}\text{C}$)	0	100

L'unité Celsius est utilisée couramment de nos jours. On conserve ainsi 100 unités entre le point de congélation de l'eau et le point d'ébullition de l'eau.

Fonctionnement du capteur

Météo-France utilise, dans ses stations automatiques, des thermomètres fondés sur la variation de résistance d'un conducteur électrique en fonction de la température.

Principe de la mesure

La mesure de la température s'effectue ainsi à l'aide d'une sonde thermométrique à résistance de platine, généralement nommée Pt100. Ce type de thermosonde est destiné à la mesure de la température de l'air à différents niveaux : sous abri, à 10 et 50 cm au-dessus du sol mais également la température de la surface du sol, et du sol à différentes profondeurs. Pour la mesure de la température de l'air, la thermosonde est normalement disposée dans un abri météorologique et doit supporter des températures comprises entre - 40 $^{\circ}\text{C}$ et + 60 $^{\circ}\text{C}$.

Le principe de la mesure de la température à l'aide d'une sonde Pt100 est basé sur un montage en 4 fils.

Il est important de noter que la variation de la température des câbles entraîne dans tout montage une variation de leurs résistances électriques. En effet, la résistance d'un câble est liée entre autres à sa longueur mais aussi à la température du câble :

$$R = \rho * \frac{l}{S}$$

avec R : la résistance en Ω , ρ : la résistivité en $\Omega.m$ pour une température donnée,
 l : la longueur du câble en m et S : la section du conducteur en m^2 .

Il faut donc un montage qui n'inclut pas dans la mesure les résistances dues à la longueur des câbles.

Le montage particulier en 4 fils permet de rendre négligeable l'influence des résistances de ligne. Deux fils servent à la circulation du courant et les deux autres à la mesure de la tension aux bornes de la sonde. Les 4 fils ayant la même longueur, ils ont tous la même résistance de ligne, notée R sur le schéma.

Le schéma du montage se trouve ci-dessous :

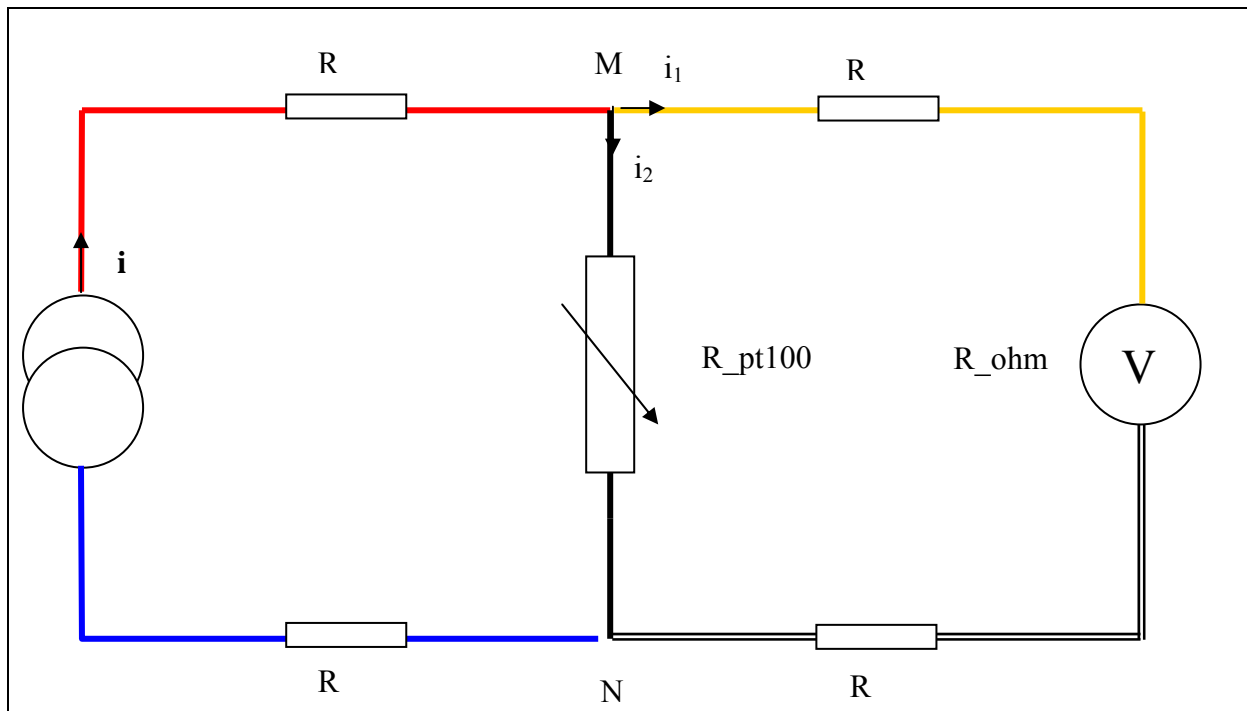


Figure 1 : Montage en 4 fils © Météo-France, Arnaud Méquignon

On injecte un courant $i = 1mA$ dans le circuit. D'après la loi des nœuds : $i = i_1 + i_2$.

Comme l'on mesure la différence de potentiel entre les bornes MN, la tension U_{MN} est la même dans les deux branches (d'après la loi des mailles). On utilise alors la loi d'ohm :

Dans la branche comportant le voltmètre, on a : $U_{MN} = (2R + R_{ohm}) * i_1$

Dans la branche comportant la sonde Pt100, on a : $U_{MN} = (R_{pt100}) * i_2$

La résistance du voltmètre étant très élevée, le courant circulant dans sa branche est très faible. Il est donc négligeable par rapport à i_2 .

$i_1 \ll i_2$ et donc $i \approx i_2$ On obtient ainsi : $R_{pt100} = \frac{U_{MN}}{i}$

La mesure de la tension permet de déterminer la valeur de la résistance de la Pt100 sans aucune autre influence.

Les sondes de platine utilisées à Météo-France possèdent les caractéristiques suivantes :

$$R(0^{\circ}C) = 100.\Omega$$

$$R(\theta) = R(0^{\circ}C).(1 + a\theta + b\theta^2 + c\theta^3(\theta - 100))$$

Les coefficients sont donnés par une norme internationale. Cela permet d'utiliser des sondes thermométriques interchangeables. b et c étant très faibles, on a la relation suivante :

$$R(\theta) = R(0^{\circ}\text{C}).(1 + a\theta)$$

avec $a = +3,90802.10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (valeur donnée par l'EIT90, Echelle Internationale de Température de 1990).

Les systèmes d'acquisition calculent alors la température en fonction de la valeur de résistance mesurée.

Incertitude, sensibilité du capteur

La gamme de mesure de la température de l'air avec une sonde thermométrique à Météo-France est de -30 à $+50^{\circ}\text{C}$.

Cette sonde thermométrique possède une sensibilité égale à $0,39 \Omega.{}^{\circ}\text{C}^{-1}$. Or plus la sensibilité d'un capteur est grande et plus il va être facile de détecter de faibles variations du mesurande (ici, la température). Compte tenu des caractéristiques de la Pt100, une toute petite erreur de mesure de la tension ou de la stabilité du courant généré entraînera une grosse erreur de détermination de la température. Il est donc nécessaire de réaliser un montage très propre, sans interférence des résistances de câblage (d'où le montage en 4 fils).

L'incertitude de la mesure de la température par la sonde Pt100 est de $0,15^{\circ}\text{C}$.

Installation de l'instrument

La température mesurée par un thermomètre ou une sonde thermométrique doit être représentative de celle de l'air : il doit donc exister un équilibre thermique permanent entre le capteur et le milieu ambiant. C'est pour cela que la mesure de la température s'effectue sous abri. Celui-ci protège les différents capteurs des paramètres extérieurs (typiquement des rayonnements solaire et terrestre ainsi que des précipitations) pouvant influencer la qualité de la mesure de la température. Les recommandations d'implantation de l'abri doivent donc être respectées pour avoir une valeur représentative de la température de l'air.

La mesure s'effectue à une hauteur d'environ 1,5 m. Le capteur est suspendu verticalement dans l'abri météorologique, loin des parois. L'abri doit se trouver sur un terrain dégagé (éloigné des bâtiments et des cours d'eau) avec peu de dénivelé, sans ombre portée, et au dessus d'un sol naturel avec de la végétation représentative de la région (souvent de l'herbe).

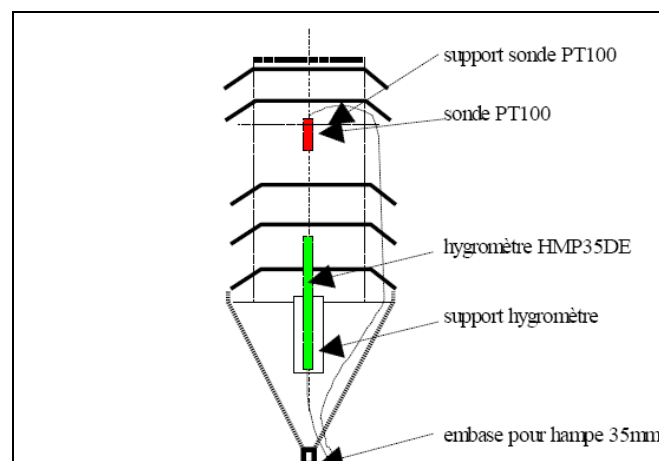


Figure 2 : Positionnement des sondes de température (en rouge et en haut) et d'humidité (en vert et en bas) dans l'abri miniature © Météo-France

Maintenance

Action de maintenance	Périodicité	Matériel nécessaire
Vérifier l'état général	Annuelle	Aucun

Plusieurs éléments sont à vérifier couramment : l'état des connexions dans les différents coffrets de câblage, leur propreté et leur étanchéité.

Remarques :

- La manipulation des sondes n'engendre aucun risque de sécurité.
- Les actions de maintenance de l'abri météorologique doivent être réalisées pour un bon fonctionnement du capteur.

Étalonnage

Une des propriétés remarquables du platine est sa stabilité dans le temps, d'où son emploi comme conducteur électrique. Un étalonnage fréquent des sondes thermométriques n'est donc pas nécessaire. Dès que les équipements seront adaptés pour traiter un grand nombre d'étalonnage par an, les Pt100 sous-abris seront étalonnés tous les 5 ans. Actuellement, elles sont étalonnées avant la première installation puis lors des changements de stations automatiques.

Bibliographie :

JAVELLE, Jean-Pierre, ROCHAS, Michel, PASTRE, Claude et al. *La météorologie : du baromètre au satellite. - Mesurer l'atmosphère et prévoir le temps*. Paris : Edition Delachaux et Niestlé, coll. «La bibliothèque du naturaliste », 2000. 171 p.

DIOT, Eric. *La météo de A à Z*. Paris : Edition Stock, 2006. 124 p.

FRAYARD, Marc. *Cours de Mesure et Capteurs de l'Ecole Nationale de la Météorologie, Météo-France*.

MEQUIGNON, Arnaud. *Cours de Mesure et Capteurs de l'Ecole Nationale de la Météorologie, Météo-France*.

DSO Météo-France. *Cahier des Spécifications Techniques N°T01 5312 B 0000 pour la fourniture de Sonde thermométrique à résistance de platine*. 2006

DSO Météo-France. *Notice du premier degré d'entretien des Sondes Thermométriques*. 2006