

Principes physiques employés pour la mesure de la température

2024/03/29

L. Marié (lmarie@ifremer.fr)

Principes physiques utilisés

- A distance : mesure infrarouge
- En contact :
 - Principes physiques basés sur la dilatation.
 - Thermocouples
 - Sondes platine (RTD)
 - Thermistances (CTN)

En préambule de tout ceci, **merci wikipédia** ! ChatGPT, j'ai pas fait (j'aurais peut-être dû...)

Mesure à distance par radiométrie infrarouge (1)

- Le principe : tout corps interagit avec le rayonnement électromagnétique qui l'entoure. La situation la plus simple, c'est quand il est noir : il absorbe tout le rayonnement qui arrive sur lui, et il renvoie la chaleur qu'il absorbe sous forme de rayonnement, qui a une forme spectrale bien connue : le spectre de Planck, qui dépend de sa température absolue.

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

$B_\nu(T)$ is the spectral radiance (the power per unit solid angle and per unit of area normal to the propagation) density of frequency ν radiation per unit frequency at thermal equilibrium at temperature T . Units: power / [area \times solid angle \times frequency].

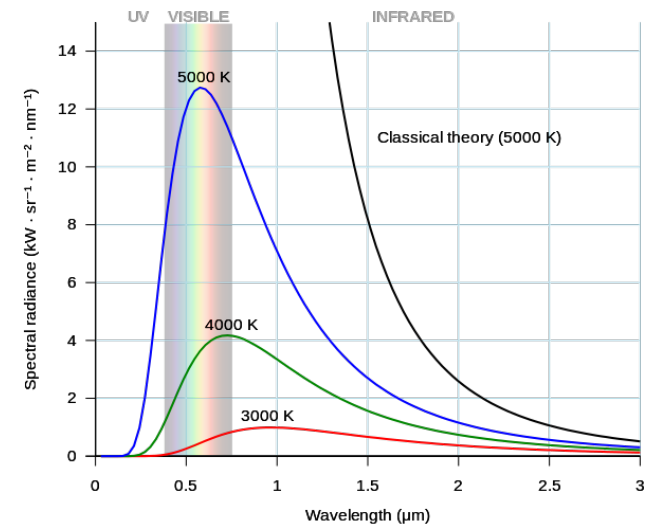
h is the Planck constant;

c is the speed of light in vacuum;

k is the Boltzmann constant;

ν is the frequency of the electromagnetic radiation;

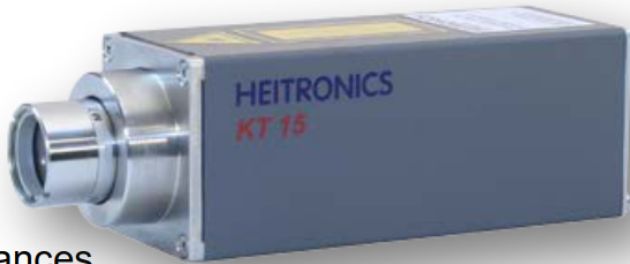
T is the absolute temperature of the body.



Comment est-ce exploité ? : un capteur optique a un objectif avec un filtre qui laisse passer une bande spectrale bien précise (IR 10-12 μm habituellement). Derrière, il y a un capteur (dont j'ignore la nature) qui donne un signal électrique proportionnel au rayonnement qu'il reçoit. On inverse la loi de Planck (LUT, relation de calibration) pour remonter à la température absolue du corps.

→ principe de fonctionnement des capteurs satellite, caméras IR, pyromètres optiques, thermomètres sans contact, etc.

Mesure à distance par radiométrie infrarouge (2)



distances

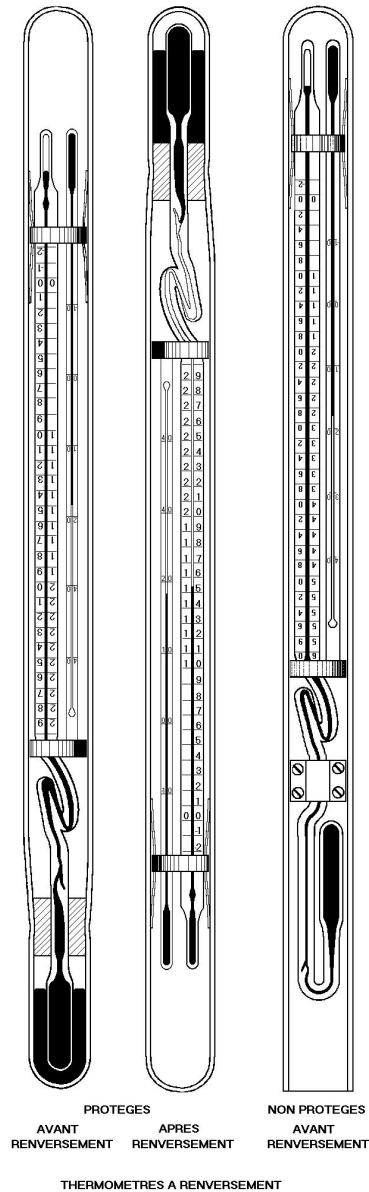


Remarque : si le corps n'est pas noir à la longueur d'onde utilisée, on récupère un mélange du rayonnement qu'il émet et du rayonnement de l'environnement qui se réfléchit dessus → mesure un peu perturbée (mais pour de l'eau de mer à $12\ \mu\text{m}$ en incidence à peu près normale ça marche très bien)

+ : ça marche bien, sur une gamme étendue.

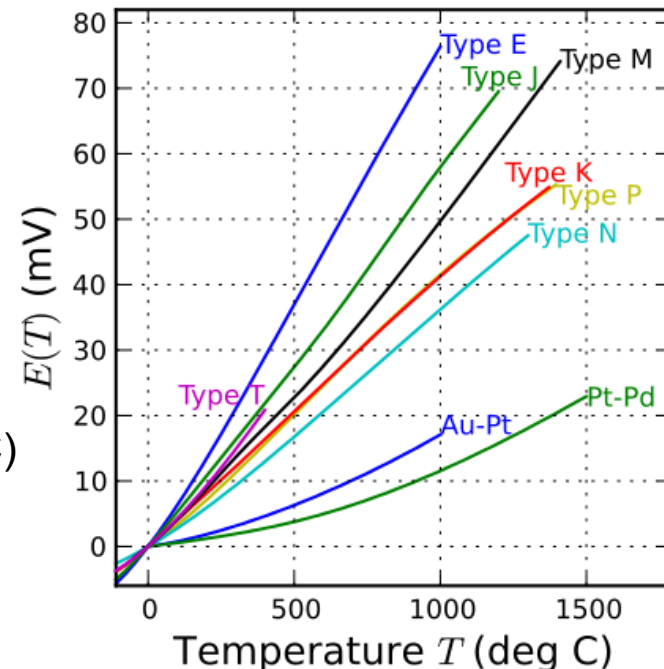
- : ça ne donne accès qu'à l'extrême surface (qqs μm), et la précision absolue n'est pas évidente à obtenir.

Au contact : principes basés sur la mesure de la dilatation



Au contact : thermocouples

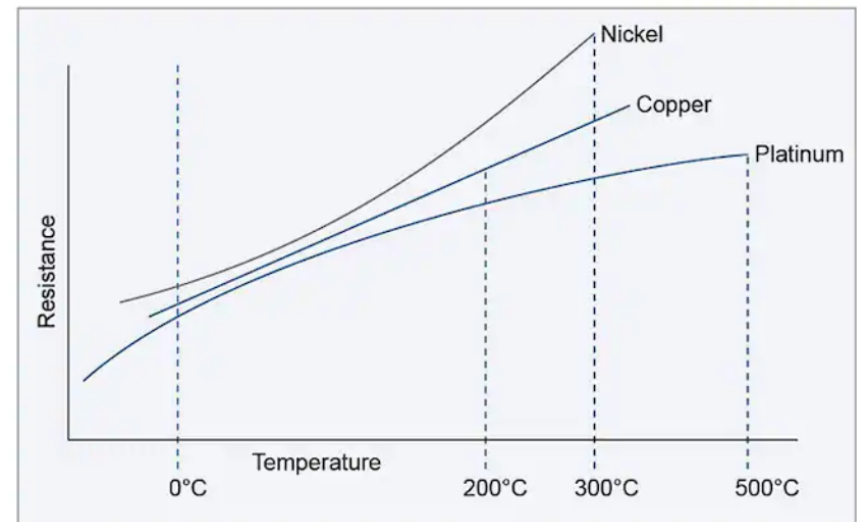
- Le principe : Si on met deux métaux en contact, il se crée entre les deux une différence de potentiel, qui dépend de la température (en gros, les électrons vont se sentir mieux dans l'un que dans l'autre, mais ils se mettent vite en équilibre : il y a une ddp qui s'établit entre les deux). C'est l'effet Seebeck.
- En pratique : On prend deux fils qui ont des effets Seebeck assez forts et de sens opposés, et on les soude entre eux. On mesure la ddp aux autres bouts des deux fils, avec un voltmètre qui a une impédance d'entrée assez forte (sinon les électrons passent au travers du voltmètre et ils s'équilibrent par ce bout-là). Il faut compenser la ddp qu'il y a entre les deux fils au niveau où on branche l'instrument (« jonction froide »).
- Différents couples de métaux ont été standardisés.
- Les + : coût très faible, T très élevées possibles.
- Les - : les ddps produites sont très faible (~50 mV à 1500°C)
→ électronique pas évidente, facilement bruitée, précision meilleure qu'1°C pas facile à obtenir.



Au contact : sondes « platine », RTD (1) (tiré de l'[AN](#) sur le site de [TE connectivity](#))

- Le principe : La résistance de certains métaux « simples » varie assez linéairement en fonction de la température → si on prend un fil de section connue et de longueur connue, et on le bobine suffisamment bien pour que sa température soit homogène, la résistance mesurée de bout en bout est reliée assez linéairement à la température.
- Pt, Ni, Cu existent. La plus répandue est la « Pt100 », qui a une résistance de 100Ω à 0°C et qui varie de 0.385Ω par $^\circ\text{C}$.

0°C	Ohms
0	100.00
10	103.90
20	107.79
30	111.67
40	115.54
50	119.40
60	123.24
70	127.07
80	130.89
90	134.70
100	138.50

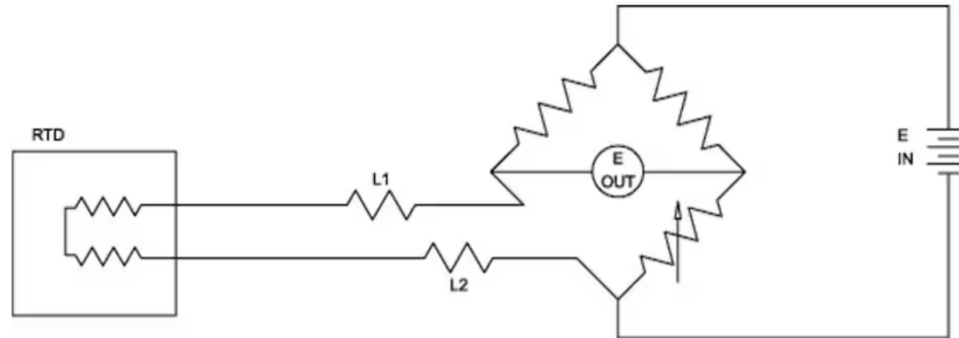


RTD Resistance versus Temperature

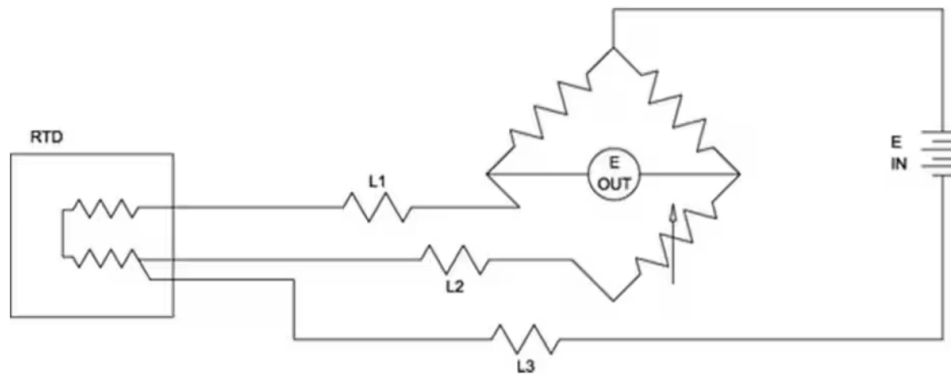
- Les + : la variation est linéaire. Donc le signal de R est facile à convertir en T° .
- Les - : la variation est faible, la valeur des résistances standardisées est faible. Si on met des courants un peu forts, on a une dissipation dans la résistance qui la chauffe. Donc besoin d'une électronique un peu propre.

Au contact : sondes « platine », RTD (2) (toujours tiré de l'[AN sur le site de TE connectivity](#))

- Le montage : montage en pont de Wheatstone, pour minimiser la plage dynamique nécessaire pour le voltmètre.



- **Mais** les variations de résistance sont si petites que la résistance des fils de branchement peut polluer la mesure compte → **Astuce** : montage à 3 fils, qui permet de mettre un des fils dans la branche de référence du pont. Malin !



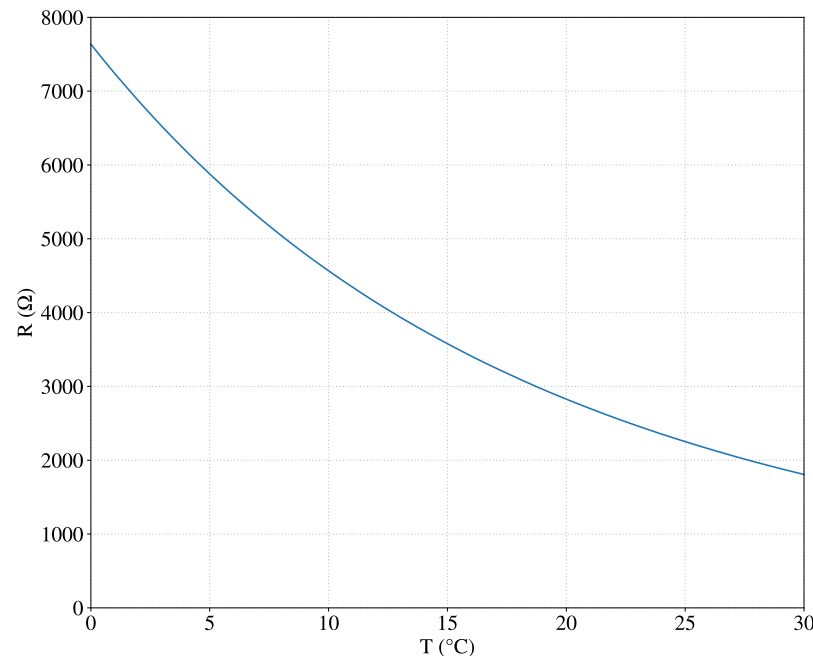
En fait, c'est plutôt une question culturelle : la Pt100 est assez employée en atmosphère, très peu à ma connaissance en océan (question des plages de variation de T° dans les deux milieux, tout de même).

Au contact : « thermistances » (1) (tiré de l'[AN sur le site de betaTherm](#))

- Le principe : Elle sont obtenues par frittage à haute température de poudre d'oxydes métalliques (Fe, Ni, Mn, V, Ti). Leur résistance décroît avec la température suivant la loi théorique :

$$R_T = R_0 \exp(A + \beta/(T+273.15))$$

Ex : Measurement Specialties 44033RC, 2252 Ω à 25°C, $\beta = 3978 \text{ K}^{-1}$.



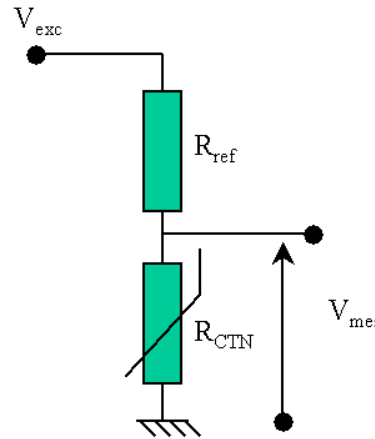
- Les + : la variation est exponentielle, les résistances sont élevées. Donc le signal de R est facile à mesurer, et il n'y a pas de problème de self-heating. Il est plus facile d'obtenir une précision $O(0.1^{\circ}\text{C})$. Pour avoir mieux, il faut soigner la calibration.
- Les - : la variation n'est pas linéaire.

Au contact : « thermistances » (2)

Sea-Bird fournit plutôt une relation inverse, obtenue par calibration en bain pour chaque capteur, qui donne T en fonction de R_T (Loi de Steinhart-Hart):

$$1/(T+273.15) = g + h \ln(R_T/R_0) + i \ln^2(R_T/R_0) + j \ln^3(R_T/R_0) + \dots$$

Montage typique :



$$\frac{V_{exc}}{V_{mes}} = \frac{R_{ref} + R_{CTN}}{R_{CTN}} = 1 + \frac{R_{ref}}{R_{CTN}}$$
$$\Rightarrow R_{CTN} = R_{ref} \frac{V_{mes}}{V_{exc} - V_{mes}}$$

→ Besoin d'une résistance de référence, stable en température, de l'ordre de grandeur de la résistance de la CTN en milieu de gamme.

Au contact : en général

Des trucs auxquels il faut faire attention :

- Problèmes de « self-heating ». Peu sensible pour thermistance, impose $I < 5 \text{ mA}$ pour Pt100.
- Il faut que l'électronique qui fait l'acquisition soit elle-même stable en température. (Ex : si la résistance de référence dans un montage varie en fn de la température, ça ne va forcément pas être très bon. Mais ça vaut aussi pour l'ADC, les sources de tension ou courant, etc...).
- Si elle n'est pas stable, ça peut être corrigé a posteriori si on a des mesures pour différentes températures de l'électronique, et un capteur de température dans le caisson. Mais ça devient délicat.
- Ou alors possibilité de mettre à côté une résistance stable en température et de mesurer les deux pour comparer.
- La résistance de la thermistance dépend de la T° de la thermistance elle-même, **pas** de celle de l'eau.
 - Il faut donc que la température de la thermistance suive au plus près possible celle de l'eau.
 - Il faut donc que la thermistance ait la plus petite inertie thermique possible.
 - Il n'est donc pas bon pour les mesures qu'elle soit trop grosse, ou trop bien protégée mécaniquement (risque d'augmentation du temps de réponse).
→ il faut que la protection ait un coefficient de diffusion de la chaleur important et une capacité thermique faible.

Merci pour votre attention !