

Dispositifs Médicaux de Mesure des signaux physiologiques

Pr. Norbert Noury

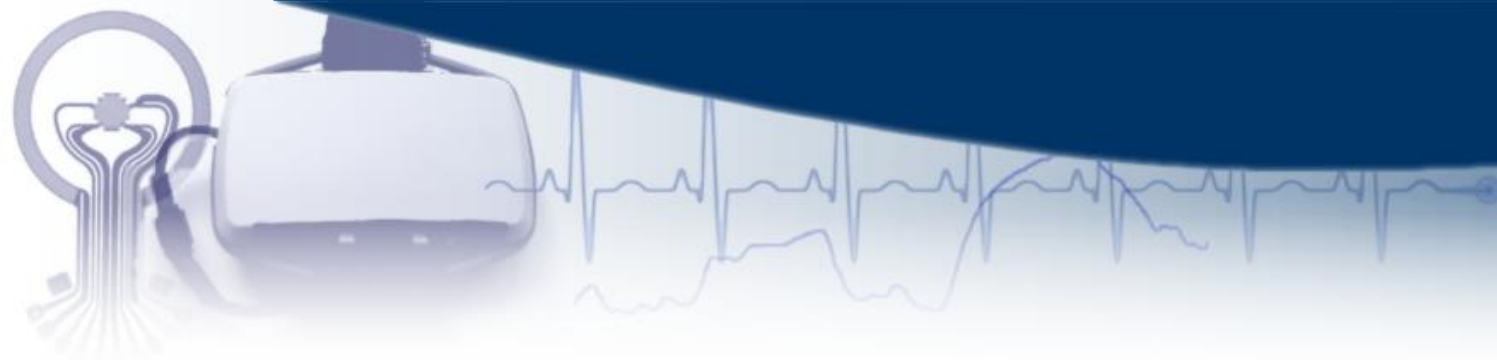


Université Claude Bernard



Lyon 1





5C

Mesure de température humaine

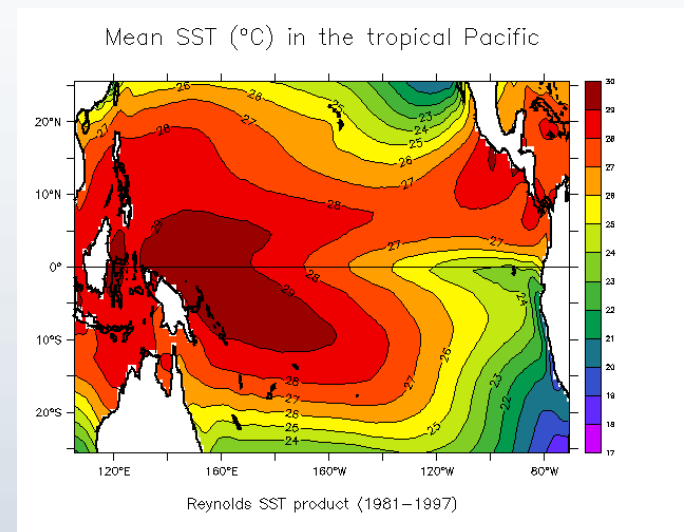
Historique; Flux thermique; thermistances; mesure de température pseudo profonde par compensation de flux thermique

Mesures thermiques

la température : interne, pseudo-interne, superficielle

le flux de chaleur à travers les tissus biologiques.

Mesurée à l'aide de thermistances (contact) ou de capteurs Infrarouges (sans contact)



La mesure des paramètres physiologiques



- En 400 av. J.-C. le médecin grec Hippocrate a placé la main sur le front d'un de ses patients pour en estimer la température corporelle



Jusqu'au XVII^{ème} siècle, les seuls outils de diagnostic du médecin furent ses 5 sens, avant l'utilisation d'un thermomètre

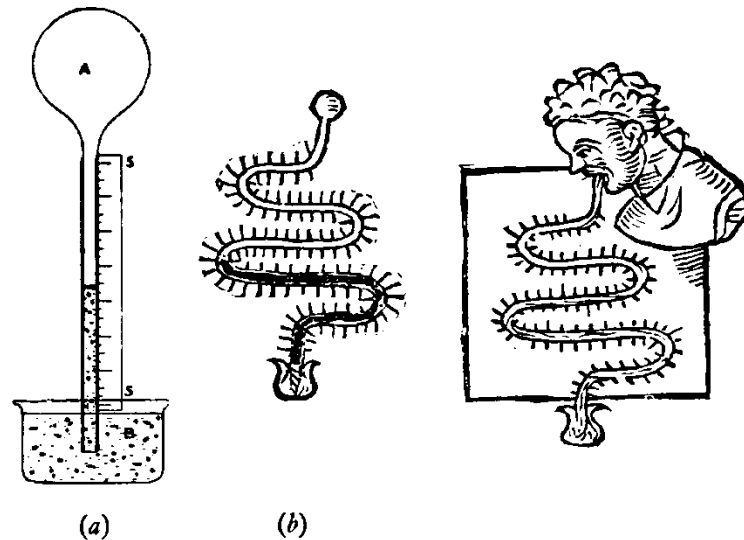
- Au XX^{ème} siècle les capteurs ont permis la quantification précise et répétable d'une grandeur mesurée sur le corps humain pour :

- caractériser et suivre l'état d'un patient pour le **médecin**
- comprendre le fonctionnement du corps humain pour les **chercheurs**



La mesure des paramètres physiologiques

- **XVII^{ème} siècle : Le thermomètre**
- Thermomètre de Galilée adapté par Sanctorius (1612)



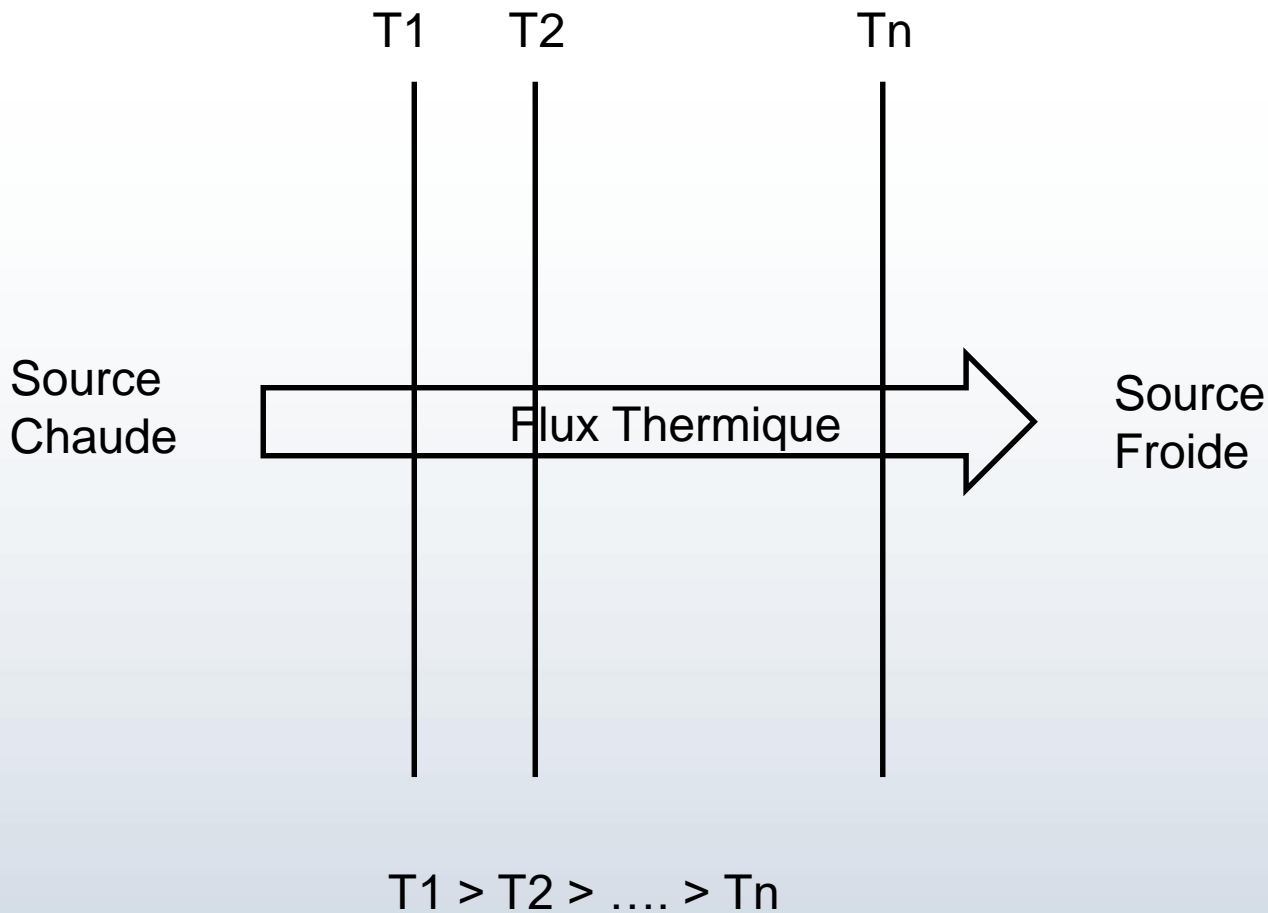
Thermometer

(a) The principle of Galileo's thermometer. The bulb *A* is inverted over the mercury bath *B*. A rise in air temperature causes expansion of the air in *A* and a fall in the mercury level in the tube, and vice versa. The readings are inaccurate since the instrument acts both as a thermometer and a barometer, and the atmospheric pressure therefore influences the result.

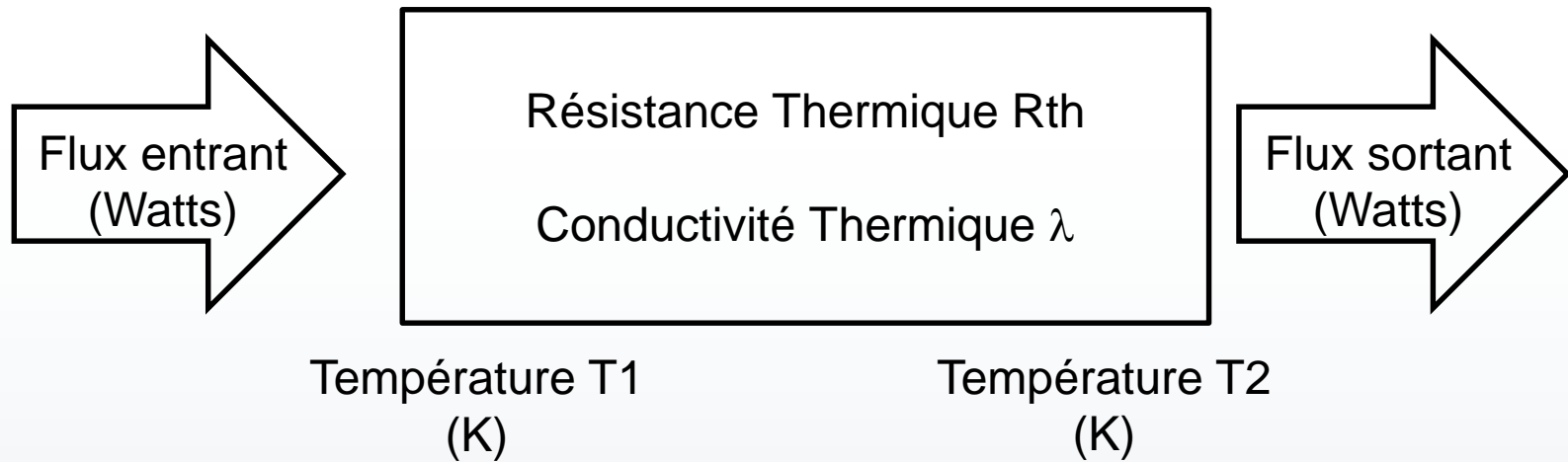
(b) Galileo's thermometer as adapted by Sanctorius.

(c) The Sanctorius instrument used as a clinical thermometer.

Flux et isothermes



Conductivité/Résistivité Thermique



Loi d'ohm thermique

$$\Delta T = R_{th} \cdot \Phi = \frac{1}{\lambda} \cdot \Phi$$

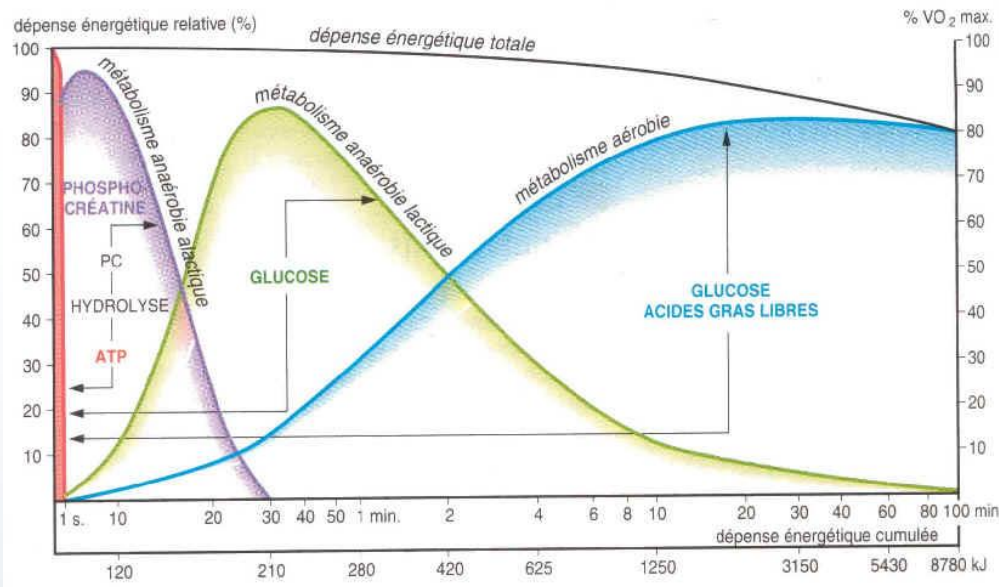
I. Mesure des bio-sigaux thermiques

- Thermique du corps humain
- Transducteurs thermiques → électriques
- Circuits de conditionnement

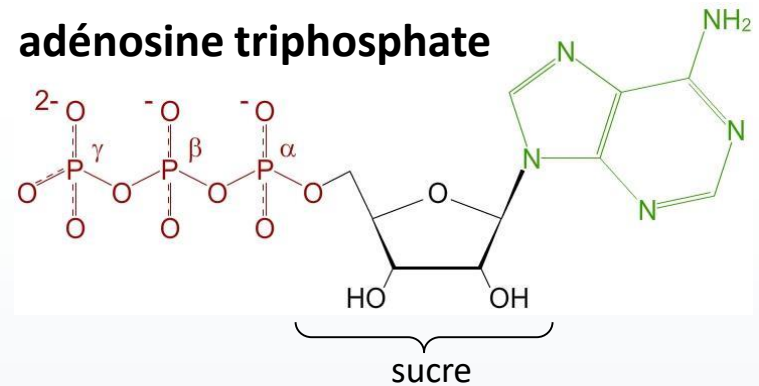
Sources de chaleur du corps humain

L'alimentation permet de stocker de l'énergie dans le corps sous forme **chimique**

RÉGÉNÉRATION DE L'ATP



adénosine triphosphate

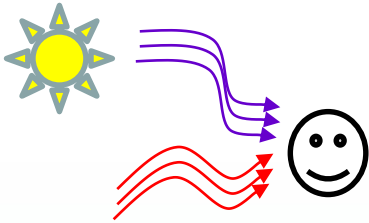


- Les cellules (musculaires et autres) transforment cette énergie chimique sous forme d'énergie **mécanique (20%)** et **thermique (80%)**

Sources de chaleur du corps humain

L'environnement est une source de chaleur du corps :

– Par rayonnement



Le rayonnement UV solaire et IR de la terre échauffent les molécules du corps humain

– Par convection

La température ambiante est essentiellement inférieure à celle du corps humain (en France !)

Le chauffage ne « réchauffe » pas le corps, mais limite son « refroidissement » !

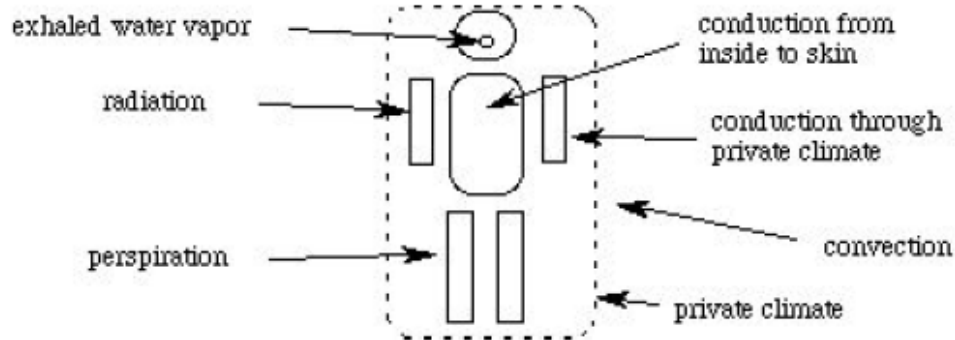
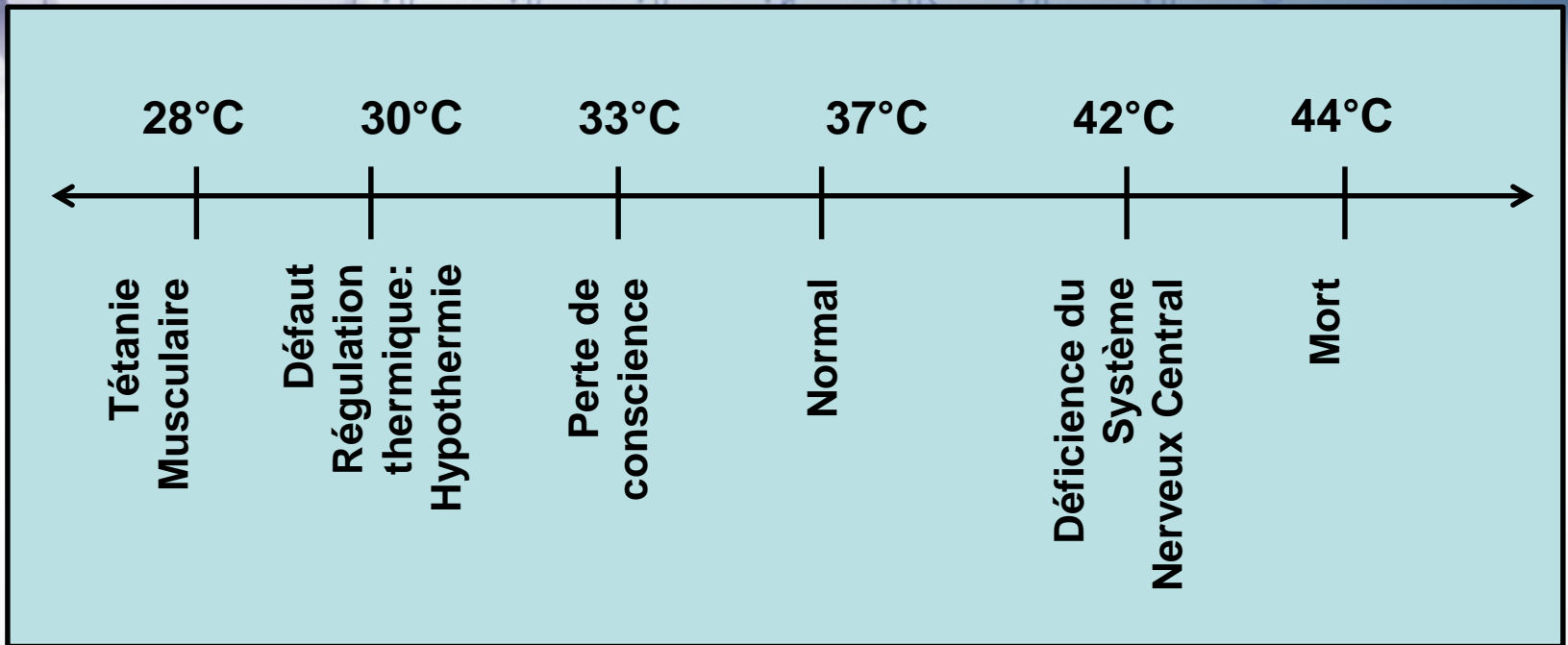


Le corps humain régule sa température interne grâce au métabolisme et aux échanges de chaleurs

Une température comprise entre 36,5° et 37,5° Celsius est nécessaire au fonctionnement des organes vitaux (cerveau, cœur, poumons, etc.)

Les membres périphériques peuvent fonctionner à des températures différentes

La vie n'est possible que dans une étroite gamme de températures

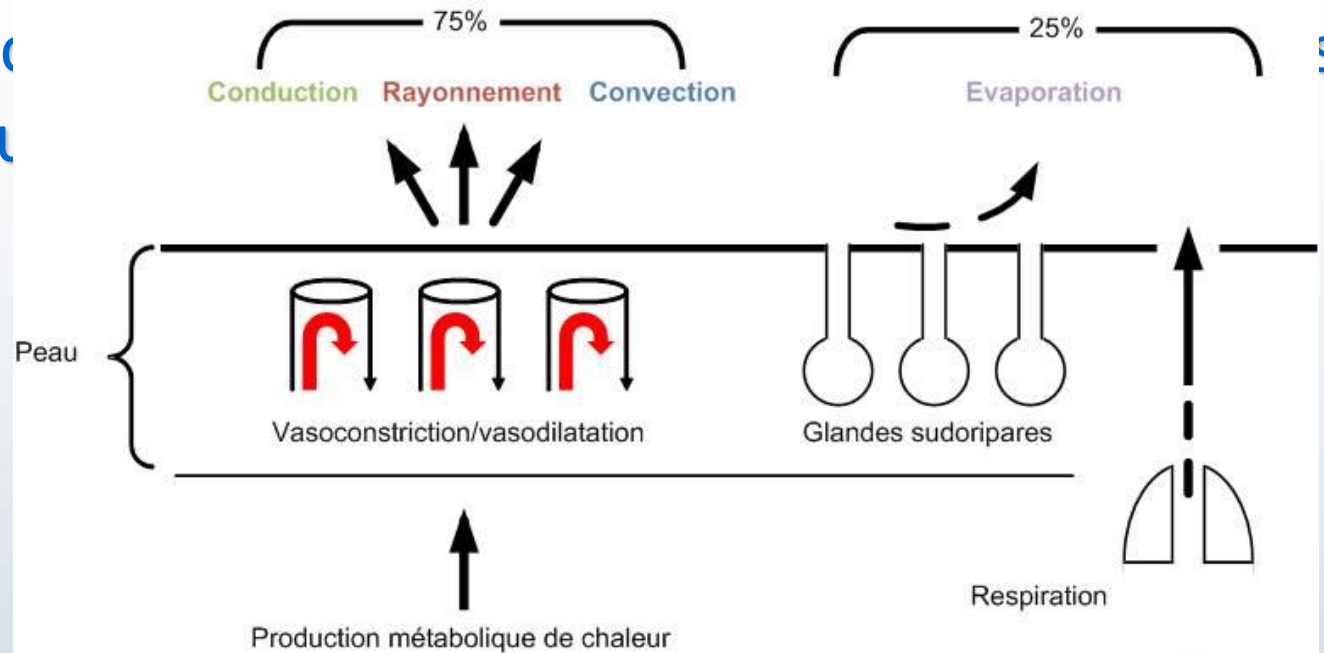


Various modes of heat transfer

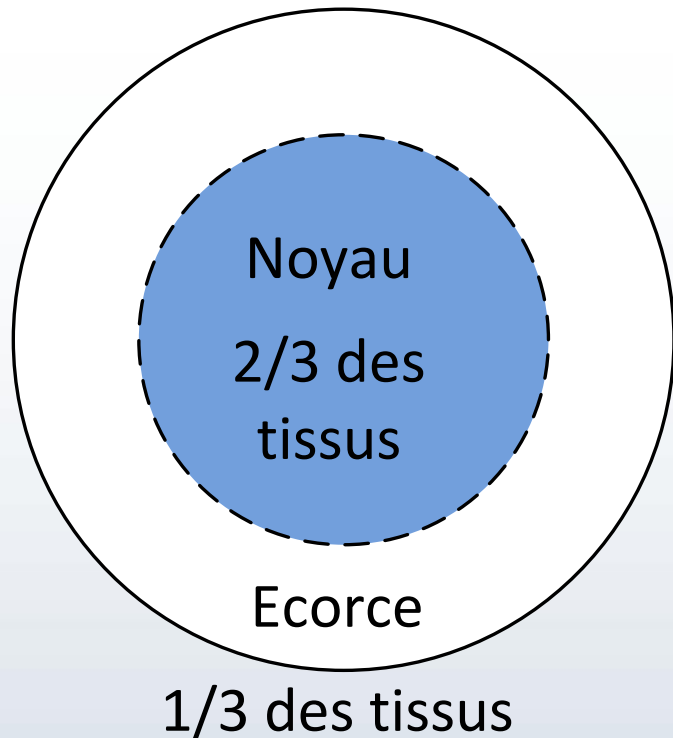
Pour maintenir une température interne stable, l'**hypothalamus** agit comme **thermostat** de la centrale de chauffage corporelle

Il contrôle la sudation ainsi que l'afflux sanguin (vasoconstriction périphérique)

Pour un homme nu :
85% des échanges au niveau de la peau
15% restant par les voies respiratoires



Modèle thermique simple noyau-écorce : température quasi constante dans le noyau et variable dans l'écorce en fonction des conditions extérieures.



Noyau : température centrale ou interne
→ **maintenue à un niveau quasi constant**, même sur une plage étendue de température ambiante – entre 13°C et 60°C – en condition d'air sec pour un individu en bonne santé.

Ecorce : température variable en fonction des conditions extérieures (température, humidité, etc.)
→ température cutanée
→ conditionne les pertes thermiques vers l'environnement extérieur.

La sudation :

En ambiance chaude : mécanismes vasomoteurs insuffisants pour maintenir l'équilibre thermique.

→ **sudation** : moyen important d'évacuer la chaleur (seul moyen de régulation lorsque la température cutanée et la température ambiante sont égales).

La sueur absorbe la chaleur latente à l'endroit où se produit l'évaporation, ce qui entraîne une baisse locale de la température.

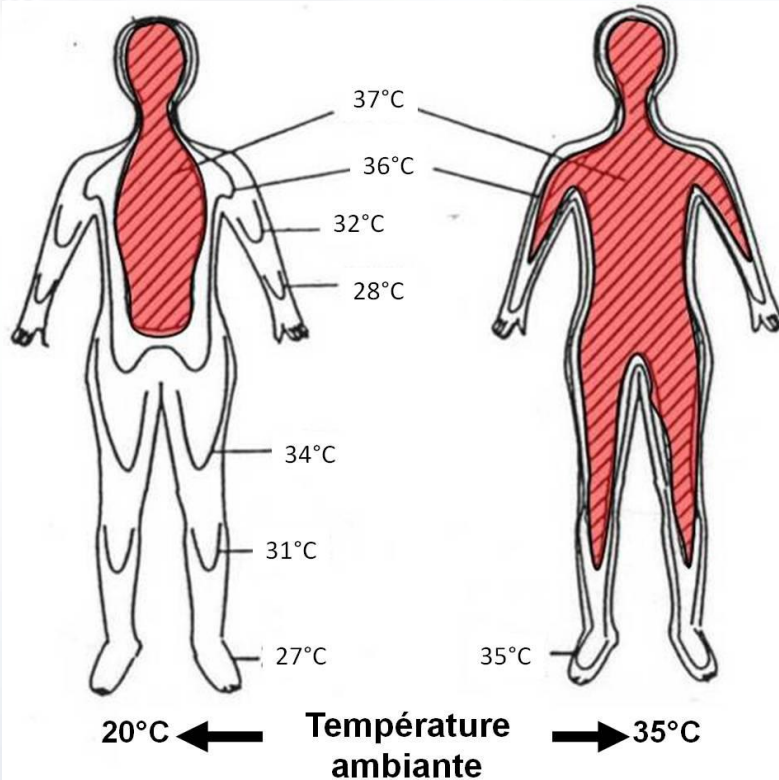


La sudation est déclenchée par la libération d'acétylcholine, qui augmente la sensibilité des récepteurs situés sur les cellules sécrétrices des glandes sudoripares.

La sécrétion d'acétylcholine est due à l'augmentation de température. Ce n'est pas la température cutanée qui contribue à la transpiration mais la température corporelle (rapport 1/10).

Vasoconstriction et vasodilatation

Etendue du noyau thermique en fonction de la température externe



Réponses vasomotrices permettent de faire varier le débit sanguin qui afflue vers la peau

→ variation de la résistance thermique cutanée

→ variations des pertes depuis la peau.

En ambiance froide : les membres périphériques sont « sacrifiés » pour conserver la chaleur.

En ambiance chaude : le noyau est largement étendu dans les membres périphériques

Le frisson :

Production de chaleur par **succession de contractions non coordonnées** des muscles squelettiques.

En ambiance froide : le frisson devient **le moyen le plus important de production de chaleur** (seule méthode de régulation de la température centrale en ambiance froide pour un sujet nu, en l'absence d'exercice physique).



Lors de l'activité musculaire :

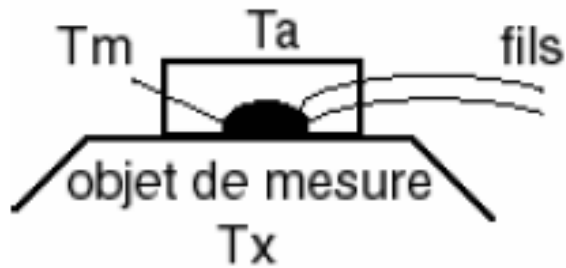
- libération de chaleur par les muscles

➔ maintient de la température interne ou limitation de sa baisse.

Le frisson a une efficacité mécanique nulle, c'est-à-dire que la totalité de l'énergie consommée par les muscles est convertie en chaleur (aucune action mécanique).

Grâce au frisson, la production de chaleur peut plus que quadrupler.

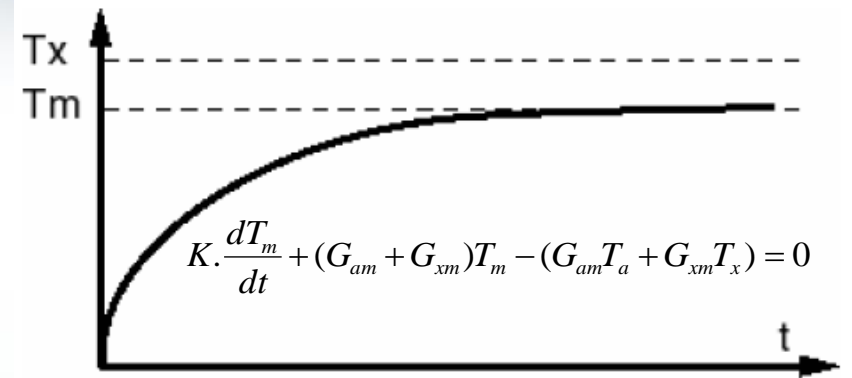
Mesures thermiques



T_x : température réelle à mesurer

T_m : température du capteur

T_a : température ambiante



Puissance fournie par l'objet de mesure à la thermistance (transmission de chaleur par conduction) : $P_x = G_{xm} (T_x - T_m)$

avec G_{xm} : conductance thermique entre capteur et objet de mesure

Puissance thermique fournie par le milieu ambiant (convection) : $P_a = G_{am} (T_a - T_m)$

avec G_{am} : conduction thermique entre milieu ambiant et capteur

Évolution temporelle dynamique -> Système du 1^{er} ordre

$T_x - T_m$ est minimum si :

- G_{am} est faible → bien isoler le capteur
- G_{xm} est forte → améliorer le contact thermique

Thermomètres à dilatation de liquide dans le verre

Thermomètres à cristaux liquides

Thermomètre à résistance

- Métallique / Resistance Temperature Detector (RTD)
- Thermistance

Thermocouple

Thermopile

Thermomètre Infrarouge

Thermomètre à circuit intégré

Fluxmètres

Capteurs à annulation de flux

Thermomètres à dilatation de liquide dans le verre

Thermomètres à cristaux liquides

Thermomètre à résistance

– Métallique / Resistance Temperature Detector (RTD)

– **Thermistance** → **Domaine Biomédical**

Thermocouple

Thermopile

Thermomètre Infrarouge

Thermomètre à circuit intégré

Fluxmètres

Capteurs à annulation de flux

Résistances thermiques et thermistances

Variation de la résistance en fonction de la température :

$$R = R_0 f(T - T_0), \text{ pour } T = T_0, f(T - T_0) = 1$$

f est en général une fonction non-linéaire :

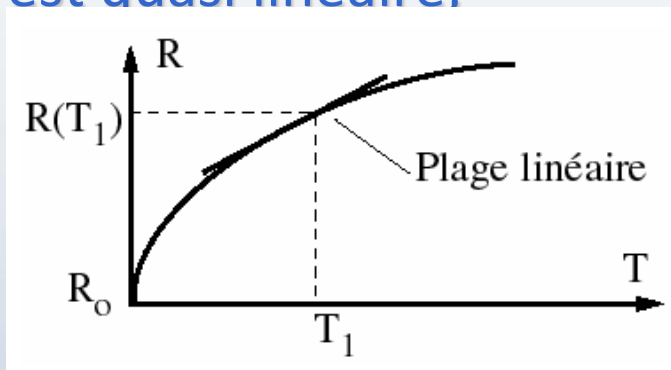
- Résistance métallique (exemple Platine) :

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + a \cdot (T - T_0) + b \cdot (T - T_0)^2 + c \cdot (T - T_0)^3]$$

- Oxyde semi-conducteur (exemple thermistance):

$$R(T) = R_0 \cdot e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

La relation est non linéaire \rightarrow plage limitée où la caractéristique est quasi linéaire.



$$R(T_1 + \Delta T) = R(T_1) \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T}$$



Transducteur thermique → électrique

Résistance formée de semi-conducteurs et d'oxydes dopés qui varie fortement et inversement proportionnellement à sa température

$$R(T) = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

T , température en K.

R_0 , résistance nominale, à la température T_0 (le plus souvent à 25°C).

β , indice de sensibilité thermique, caractéristique du matériau de la thermistance, en K.

Le coefficient de température α s'exprime en %/°C et peut atteindre -6000 ppm/°C.

Les thermistances les plus courantes ont des coefficients de température de l'ordre de -4,5%/°C. Il est relié à la sensibilité β par la relation : $\alpha = -\beta / T^2$. Valeurs nominales des thermistances varient de 100Ω à 1MΩ.



Quelques remarques :

- Le signal mesuré dépend de la température du **transducteur**.
- Il correspond donc à la température de l'élément mesuré si et seulement si l'élément et le transducteur sont à **la même température !**



*« tu ne mesures pas la température de ta poche, mais tu mesures la température du **capteur** placé dans ta poche ! »*

- Les thermistances sont particulièrement adaptées au domaine biomédical pour leur taille ($\varphi=400\mu m$ et $L=3mm$)



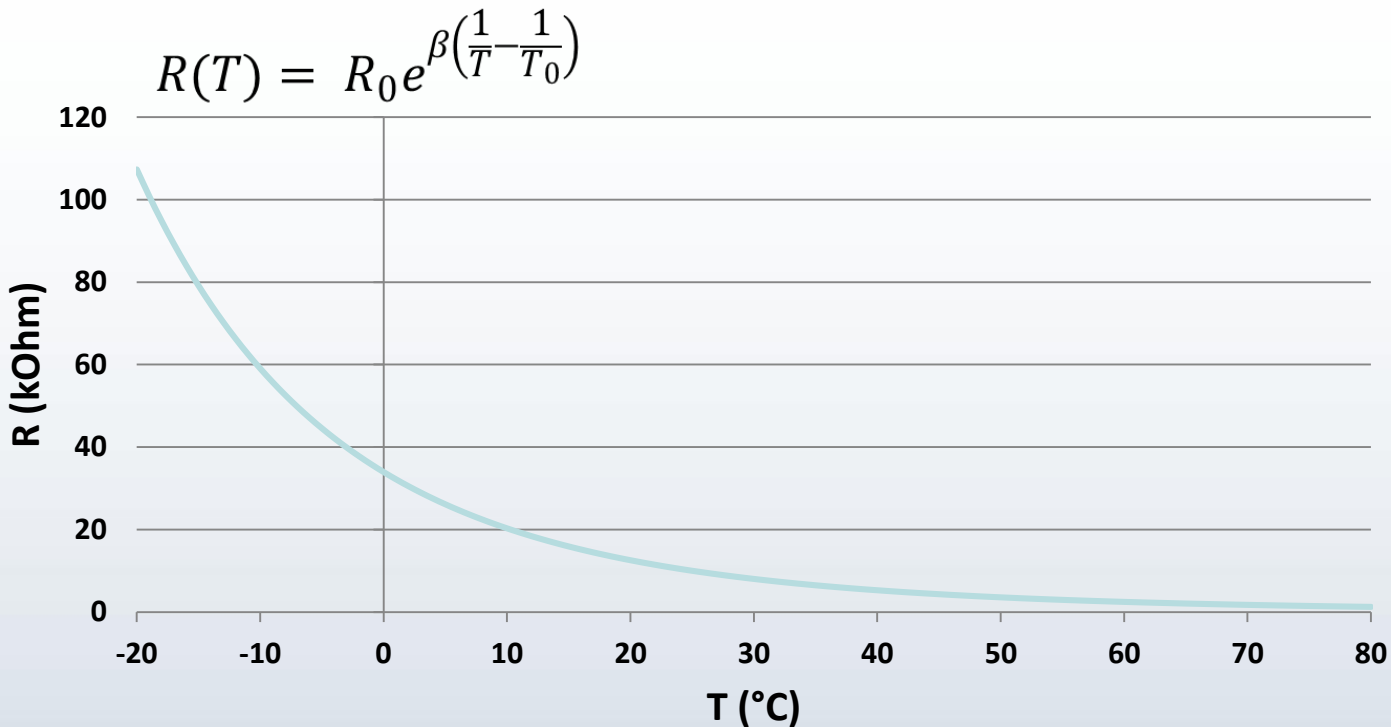
- **La relation précédente est fortement non-linéaire...**



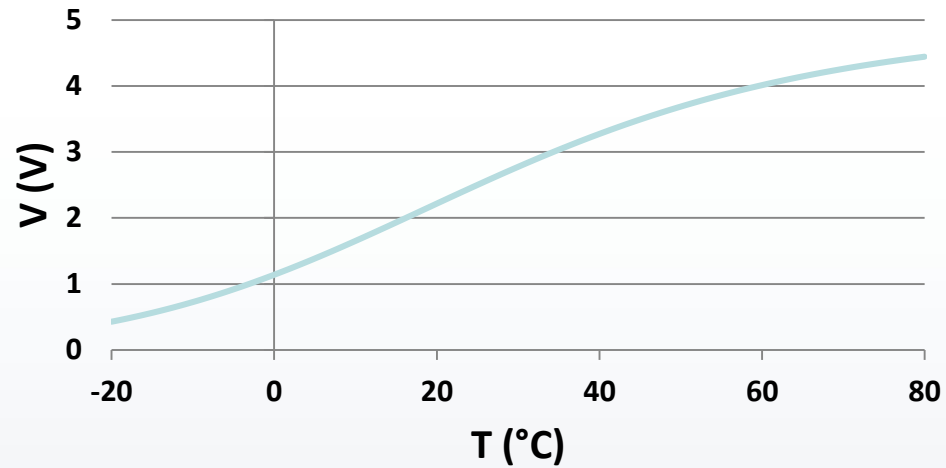
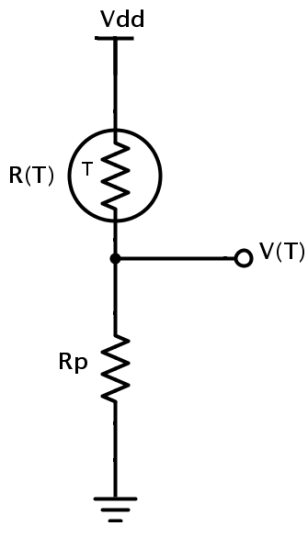
Au fait la thermistance, capteur actif ou passif ?

Exemple : Micro-BetaCHIP Thermistor

Parameter	Unit	Value
Resistance @25°C	Ω	10000
β - value	K	3976
α - value	%/°C	-4,39



Et la linéarisation fût...



Un pont diviseur ???

Conditionnement : amplification et échantillonnage :

- La plage de fonctionnement d'une thermistance est bien souvent beaucoup plus grande que la plage utile
- Dans le domaine médical, les températures mesurées vont varier de :
 - -20 à +50 degrés pour la température ambiante

→ Quid de la linéarisation sur une cette plage ?

Conditionnement : les conditions de mesure

- La plage de fonctionnement d'une thermistance est bien souvent beaucoup plus grande que la plage utile
- Dans le domaine médical, les températures mesurées vont varier de :
 - -20 à +50 degrés pour la température ambiante
 - 10 à 40 degrés pour la température cutanée
 - 35 à 45 degrés pour la température profonde

Amplification et échantillonnage

- ➔ Quel montage de base de l'AOP est le plus approprié ?
- ➔ **Non-inverseur, car aucun courant ne doit être issu de la jonction du pont diviseur !!!**

Conditionnement : les conditions de mesure

- La plage de fonctionnement d'une thermistance est bien souvent beaucoup plus grande que la plage utile
- Dans le domaine médical, les températures mesurées vont varier de :
 - -20 à +50 degrés pour la température ambiante
 - 10 à 40 degrés pour la température cutanée
 - 35 à 45 degrés pour la température profonde

Amplification et échantillonnage

→ Quel doit être le gain de l'amplification ?

→ Juste assez pour que les bornes de la plages de mesures soient ajustées aux limites de sortie de l'AOP (rail-to-rail ?)

Conditionnement : les conditions de mesure

- La plage de fonctionnement d'une thermistance est bien souvent beaucoup plus grande que la plage utile
- Dans le domaine médical, les températures mesurées vont varier de :
 - -20 à +50 degrés pour la température ambiante
 - 10 à 40 degrés pour la température cutanée
 - 35 à 45 degrés pour la température profonde

Amplification et échantillonnage

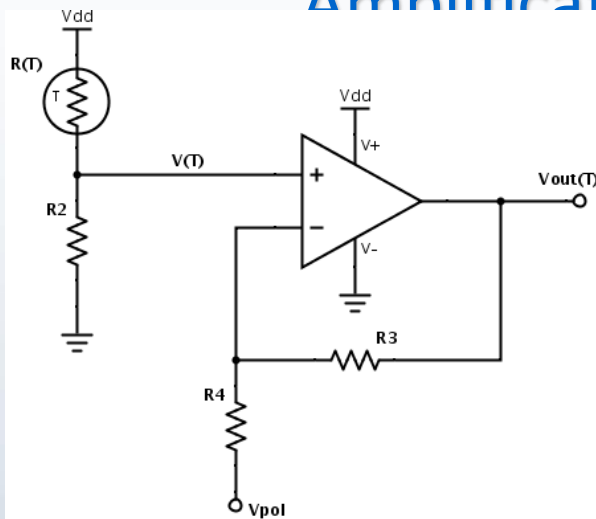
→ Et c'est tout ?

→ Non, il faut aussi centrer la mesure !

Conditionnement : les conditions de mesure

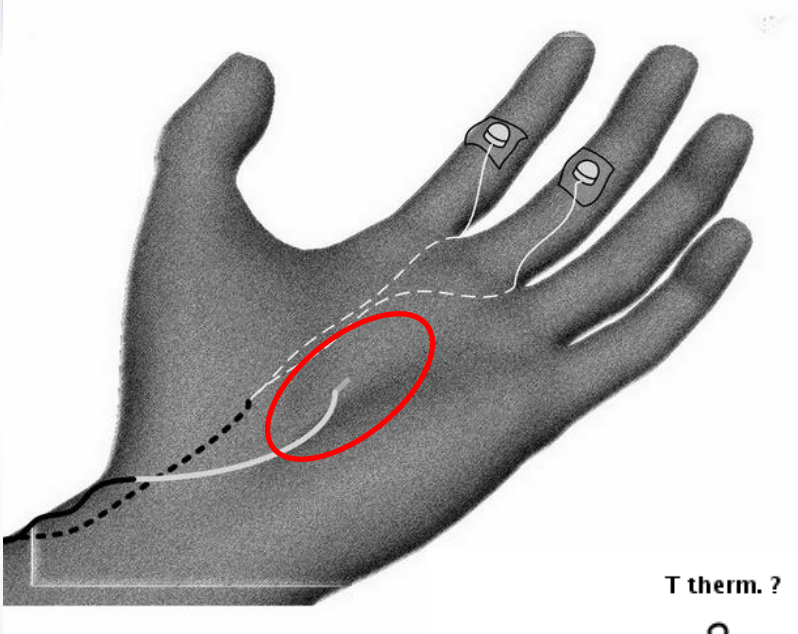
- La plage de fonctionnement d'une thermistance est bien souvent beaucoup plus grande que la plage utile
- Dans le domaine médical, les températures mesurées vont varier de :
 - -20 à +50 degrés pour la température ambiante
 - 10 à 40 degrés pour la température cutanée
 - 35 à 45 degrés pour la température profonde

Amplification et échantillonnage



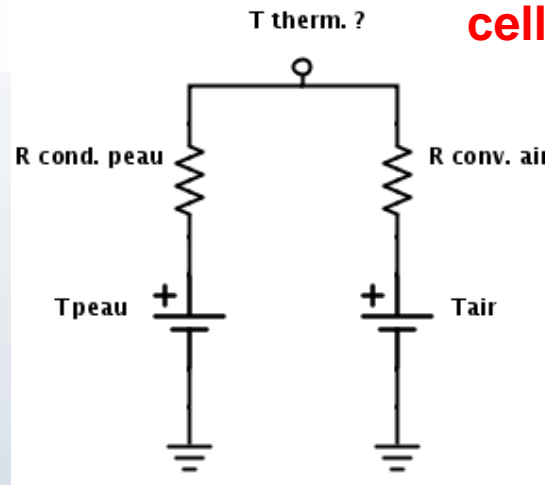
Les sites de mesure de la température

Exemple de positionnement d'une NTC :



La question se pose de connaître quelle est la température réellement mesurée lorsque l'on place une thermistance à la surface de la peau :

→ Par conduction, la température de la thermistance s'approche de celle de la peau, mais par convection, elle se rapproche de celle de l'air (flux thermiques) :



Les sites de mesure de la température

Comment mesurer les températures profondes ?

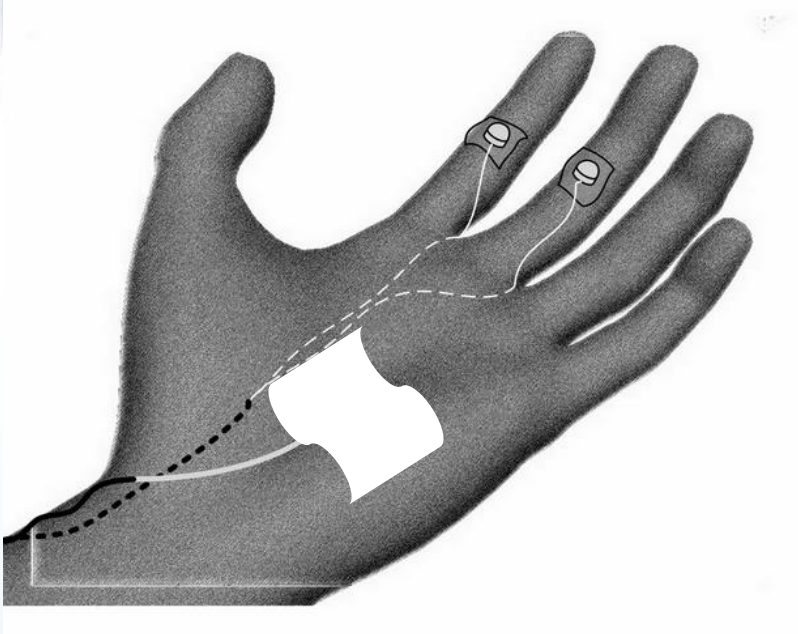
Where ... do you want to put that thermometer ???



- rectale
- buccale
- œsophagienne
- tympanique
- axillaire
- cérébrale

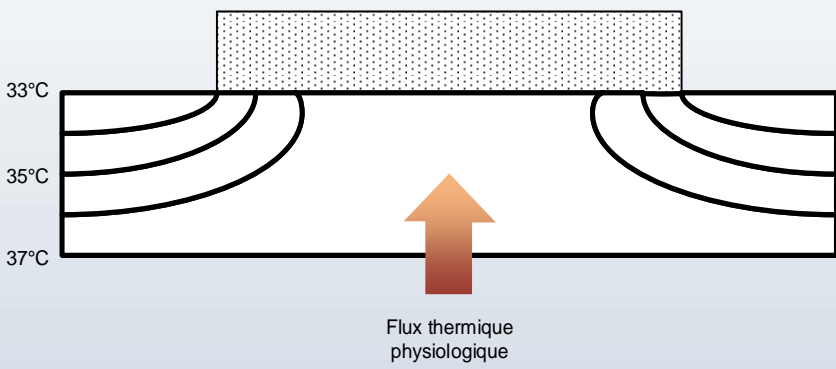
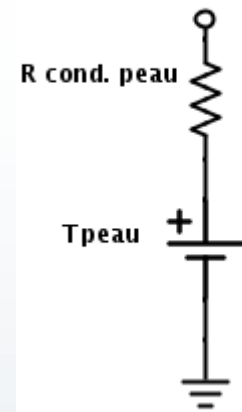
Les sites de mesure de la température

Isolation de la thermistance en surface



Isoler la thermistance grâce à un matériau peu conducteur permet d'empêcher les pertes thermiques par convection dans l'air.

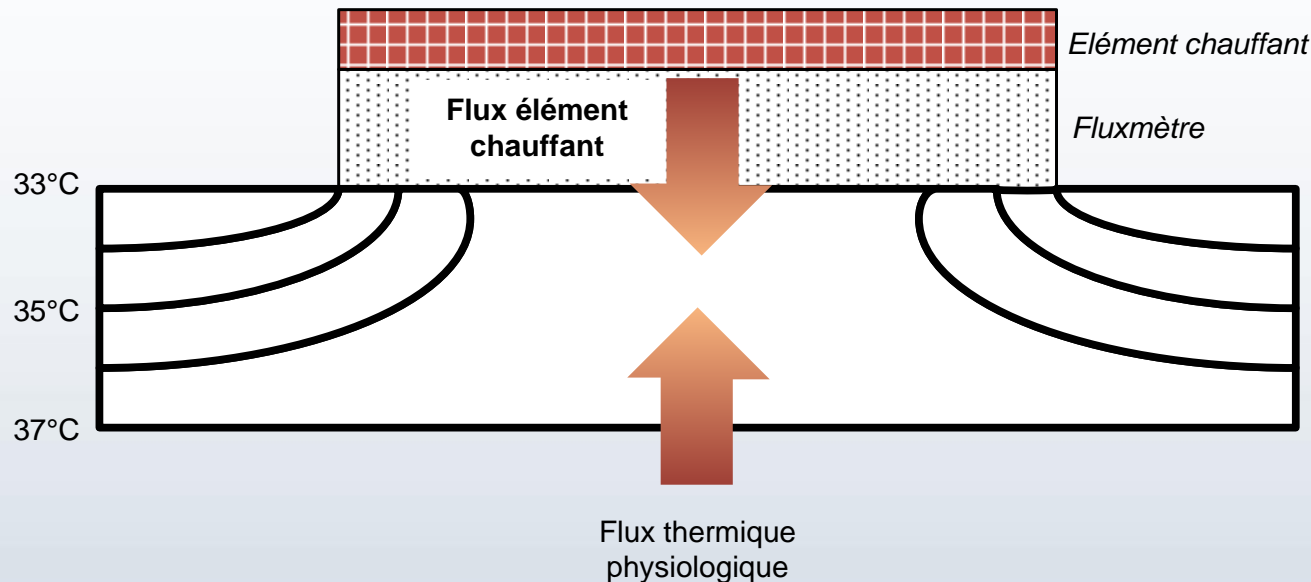
$$T_{\text{therm.}} = T_{\text{peau}}$$



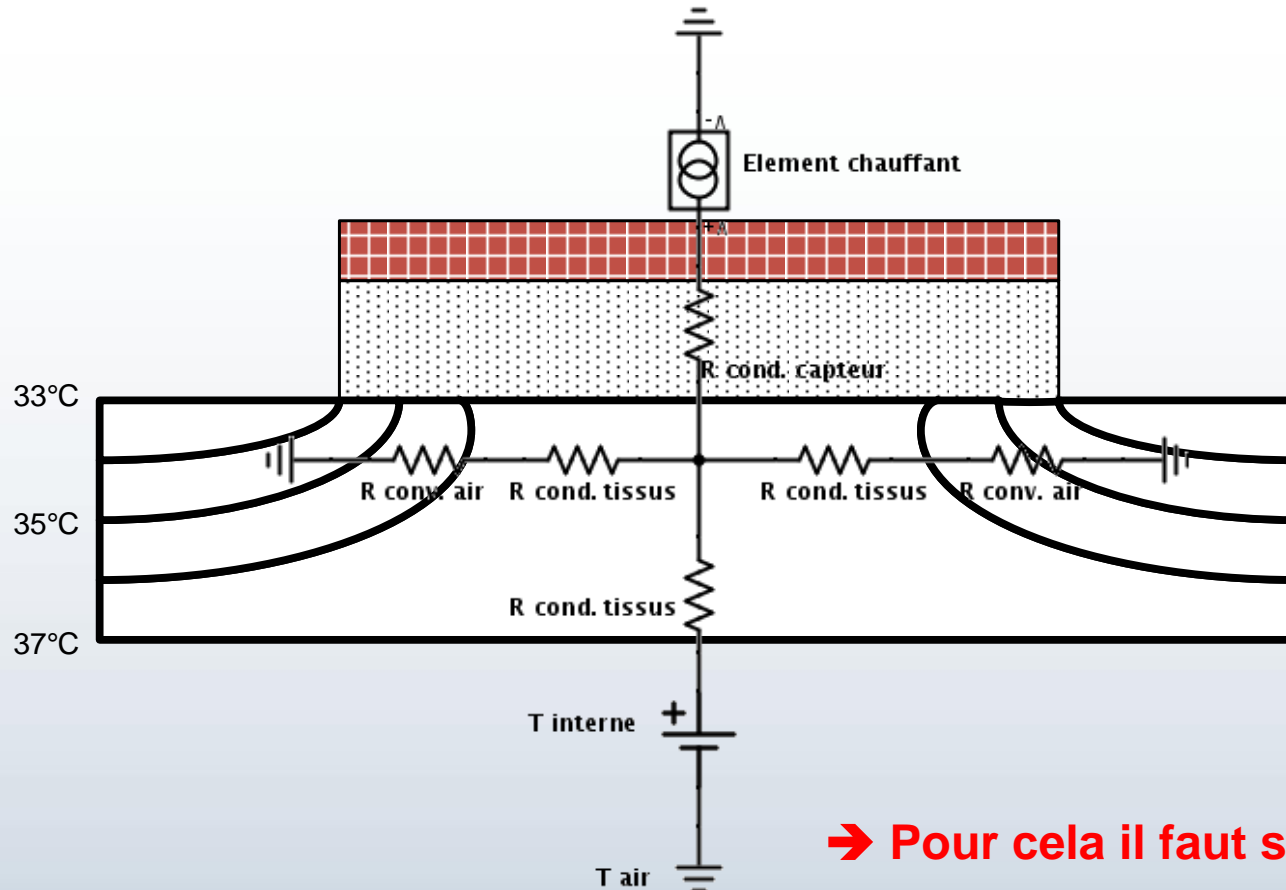
→ **Processus long qui ne compense pas les pertes thermiques de la peau**

Compensation active des pertes thermiques : méthode d'annulation du flux thermique

→ L'élément chauffant accélère l'établissement du champ thermique et permet la compensation des pertes par conduction dans la peau environnante



Compensation active des pertes thermiques : méthode d'annulation du flux thermique



→ Pour cela il faut savoir les évaluer...