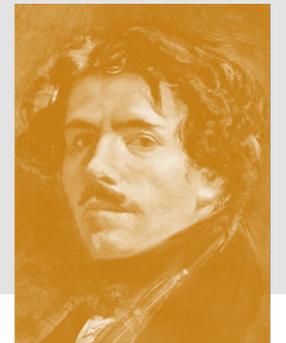
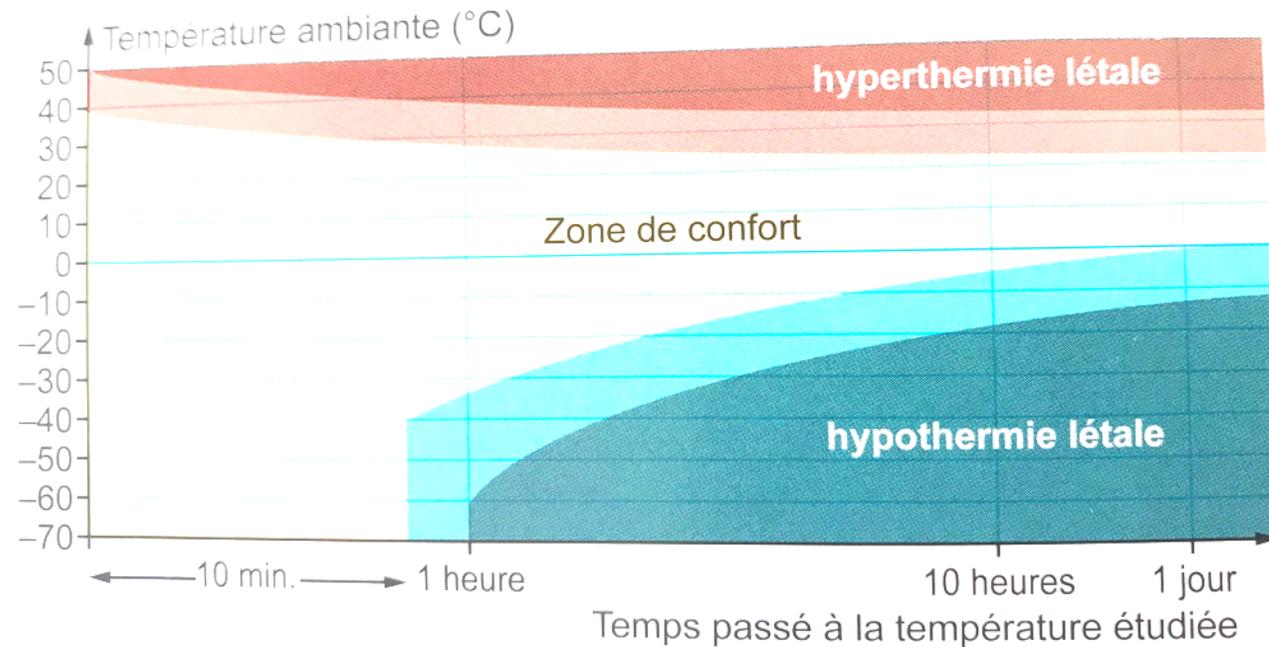


## 2.4 - Le bilan thermique du corps humain



L'homme un organisme homéotherme (cf bon fonctionnement des organes – des enzymes)

- Température environnementale fluctue sur qq minutes, une heure, un jour... or  $T^{\circ}\text{C}$  corporelle est constante



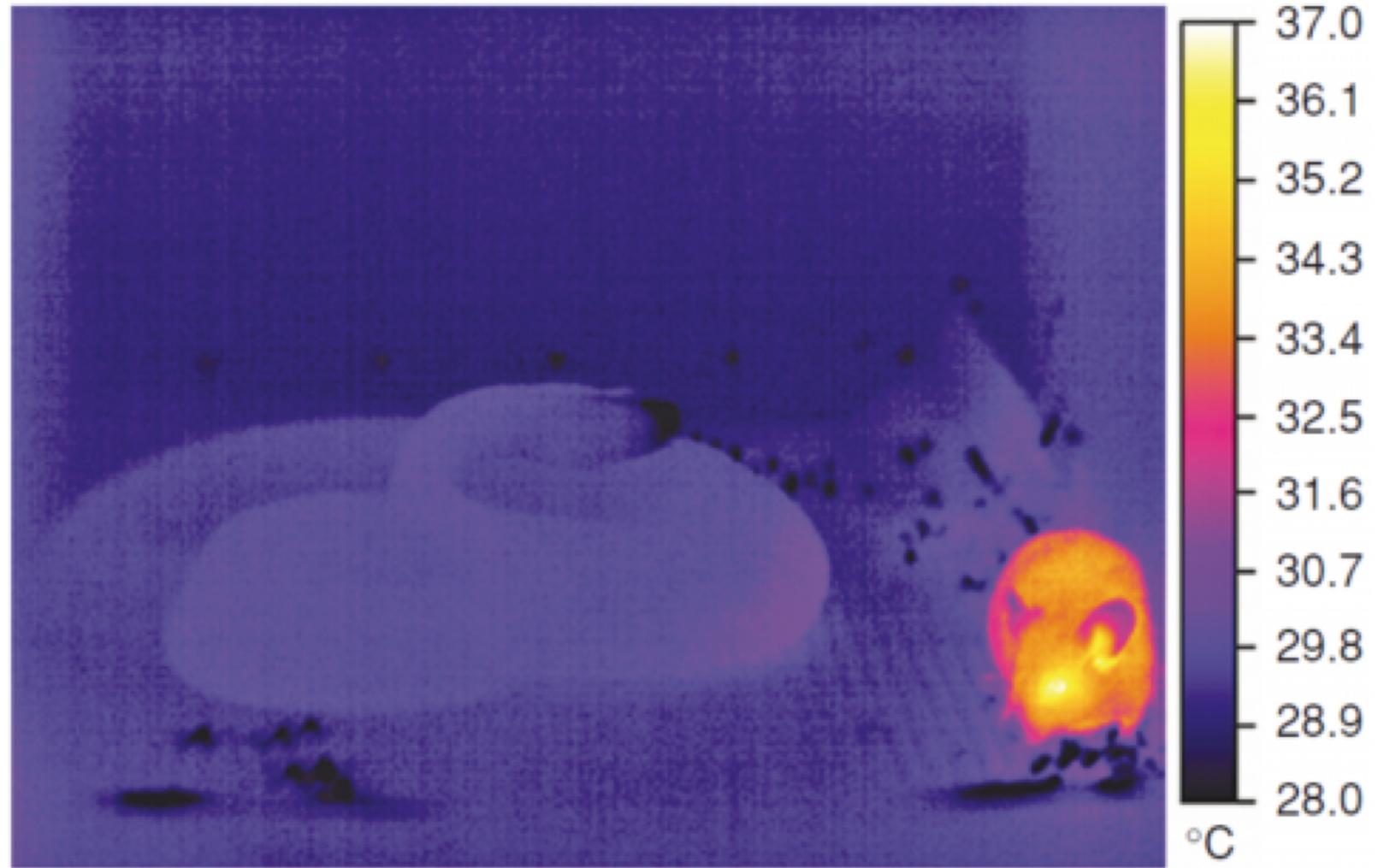
▲ Effet des variations de la température extérieure sur l'organisme.

Organismes  
endothermes  
(ou  
homéothermes)

Organismes  
ectothermes (ou  
poïkilothermes)



# Endothermes vs ectothermes

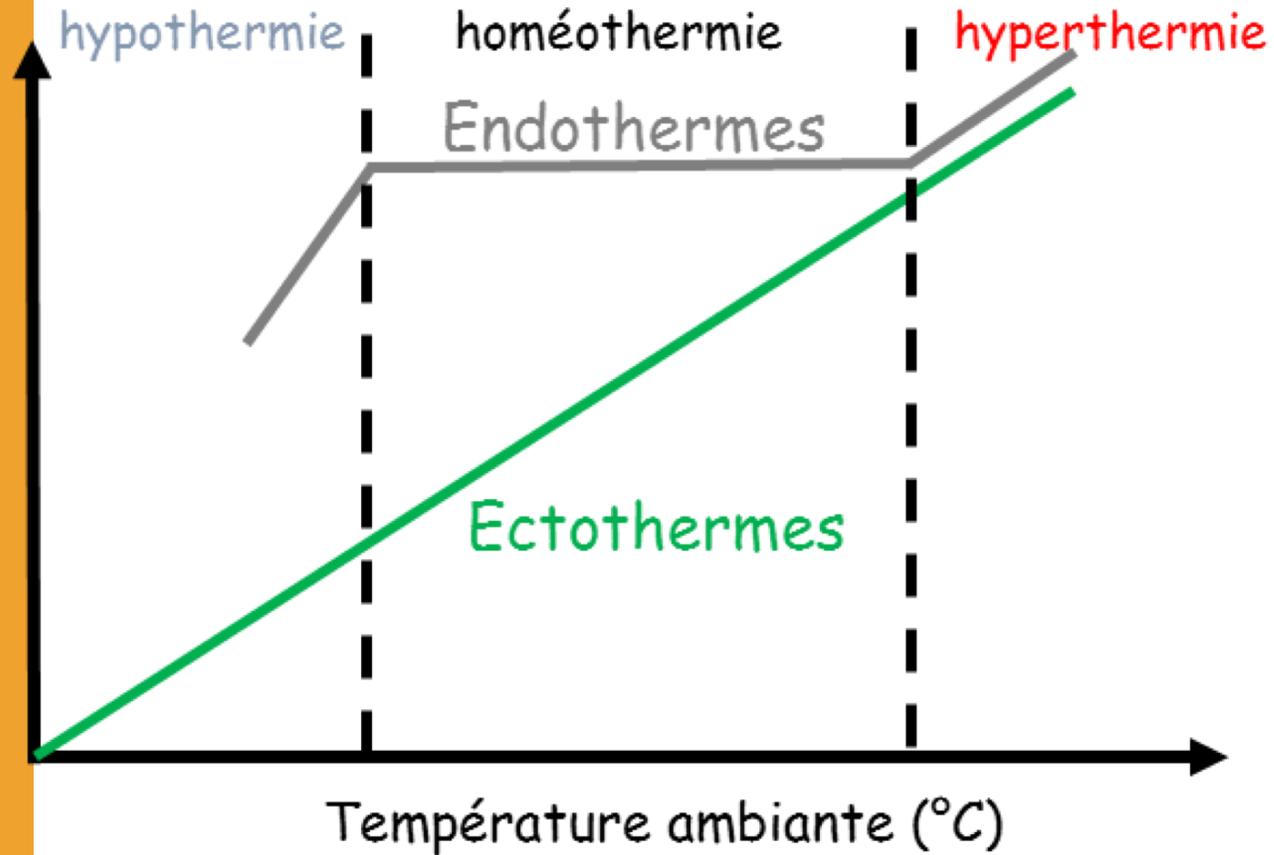


- Image thermique d'un crotale et d'une souris placés à 30°C

# Ectothermes



Température corporelle

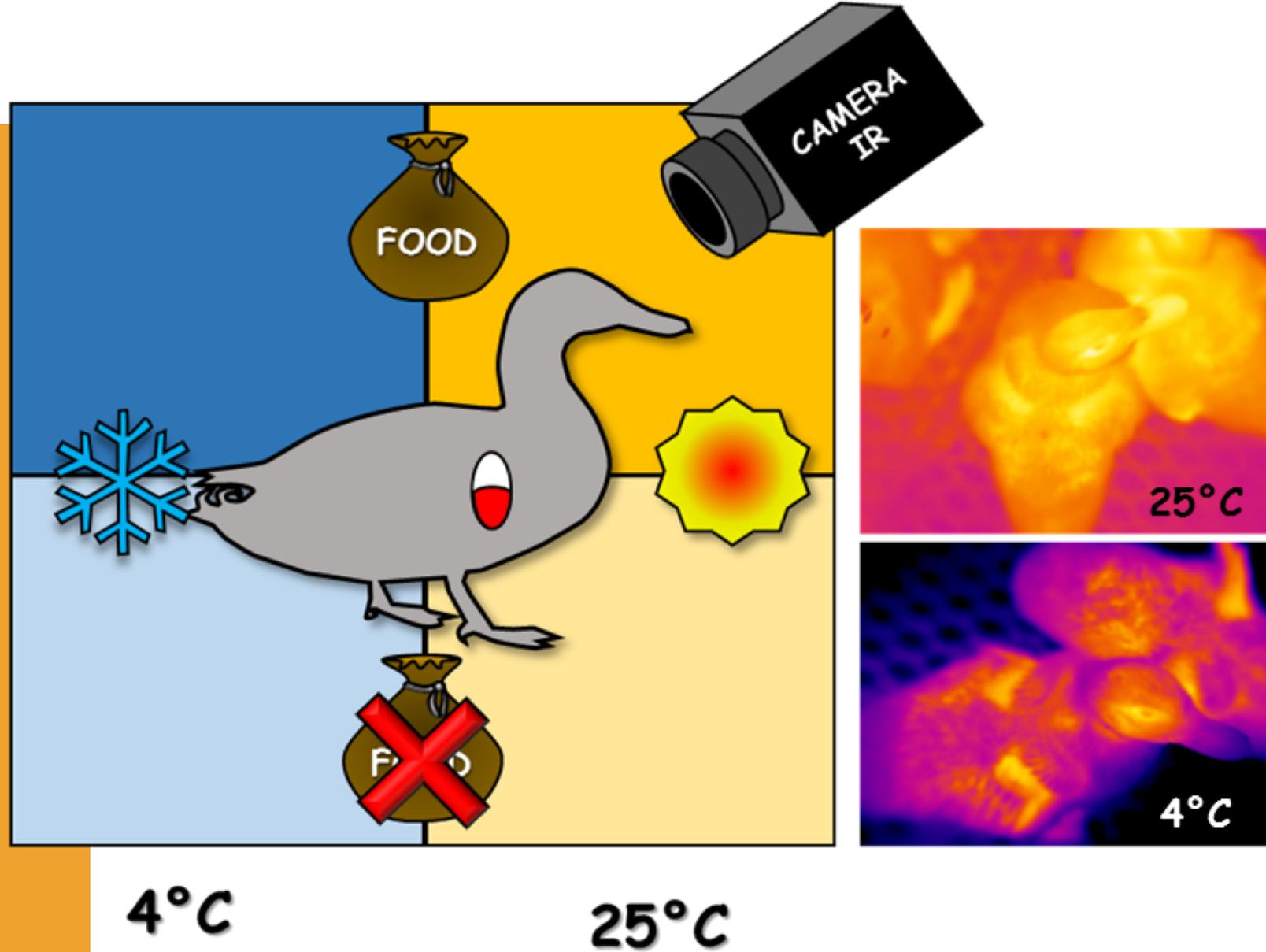


# Endothermes



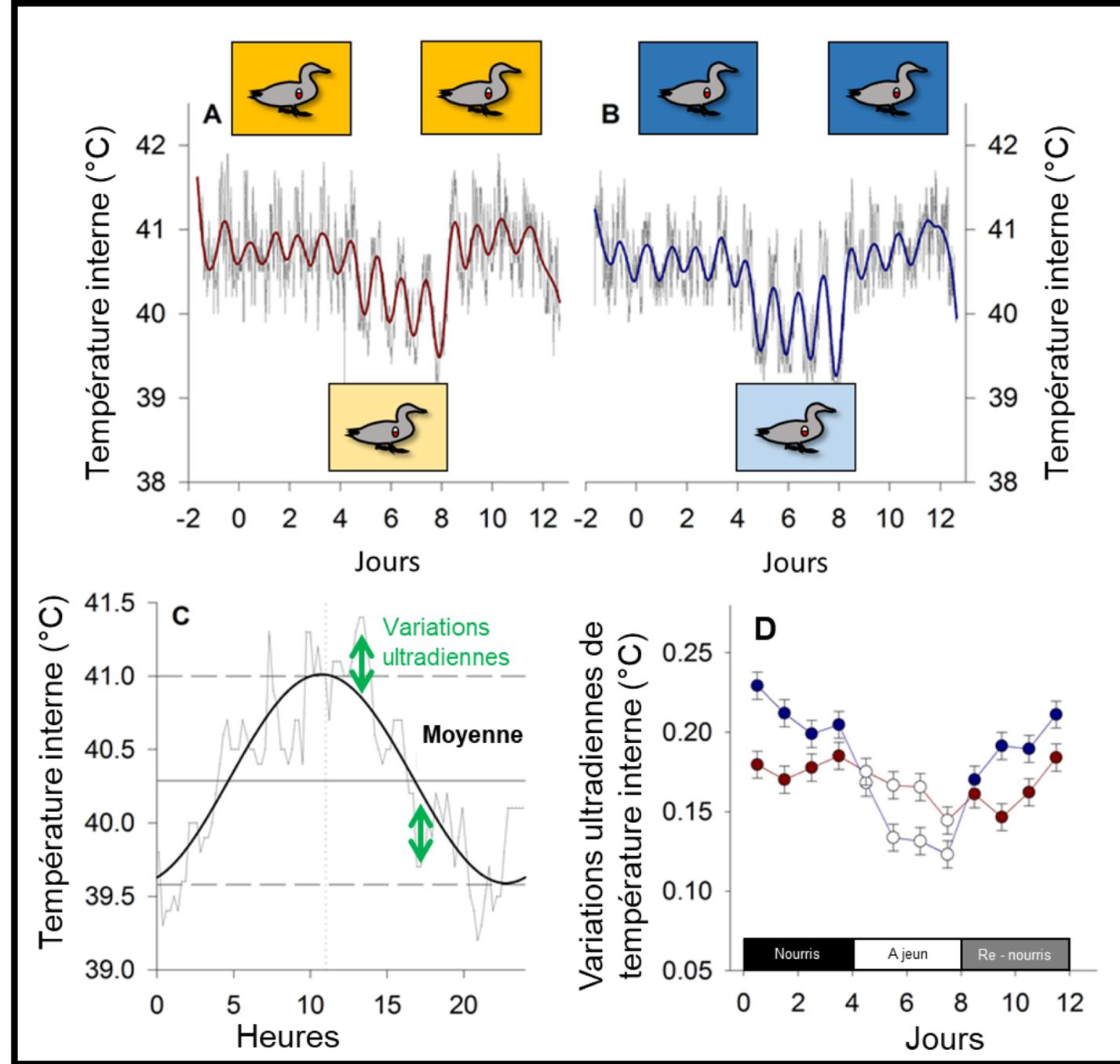
Nourris

A jeun

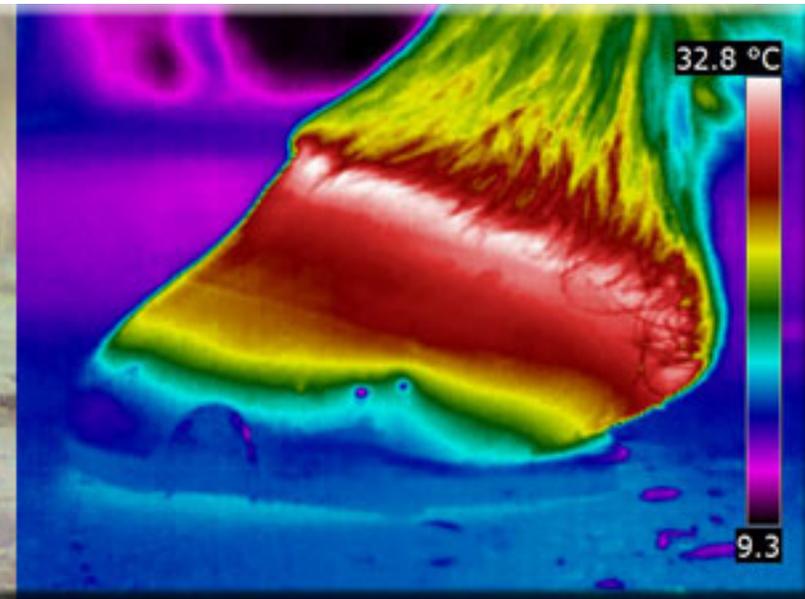
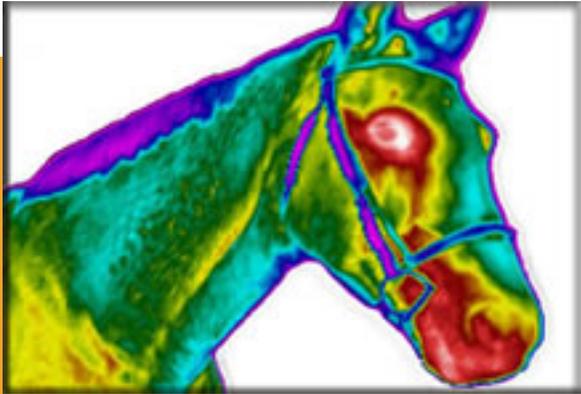


Deux conditions ont été croisées : la température (4 °C, bleu ou 25 °C, orange) et la disponibilité en nourriture. La température corporelle a été mesurée à l'aide de capteurs présents dans le gésier et d'une caméra infrarouge. À droite, deux images thermiques de canetons prises à 25 °C et à 4 °C.

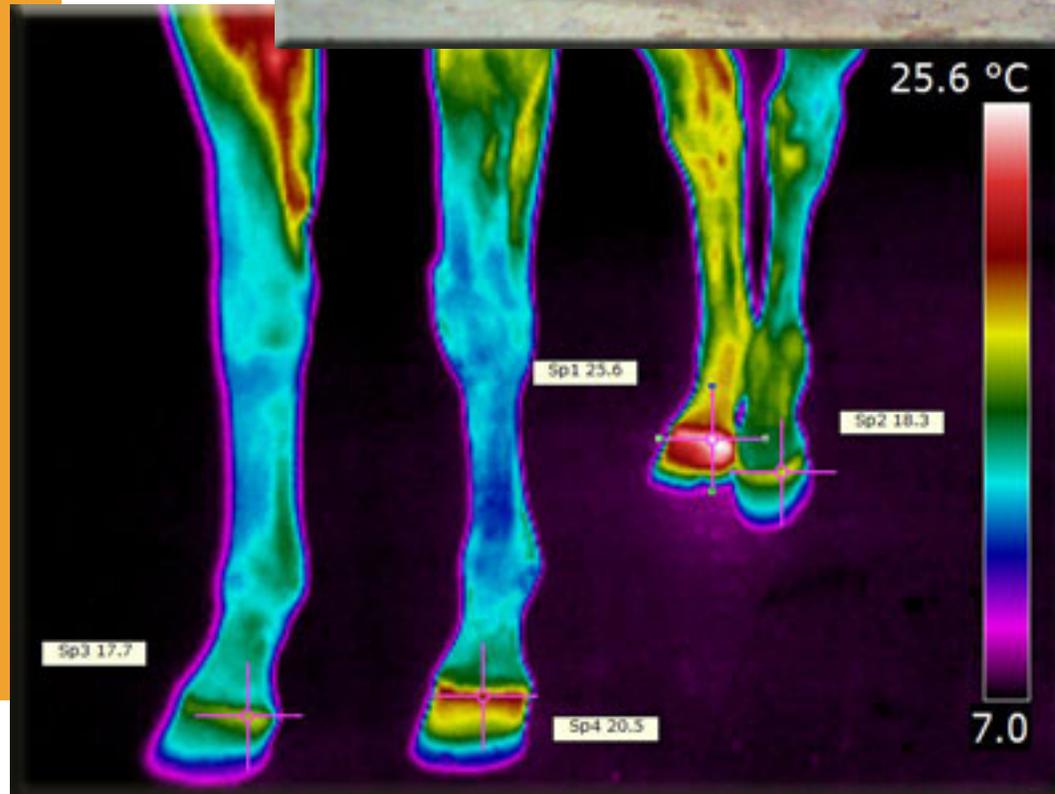
Suivi de température interne sur 14 jours chez des canetons à thermoneutralité (jaune, A) ou à 4 °C (bleu, B). Représentation de la variation de température interne d'un caneton élevé à thermoneutralité sur 24 h (C) et évolution de l'amplitude des variations ultradiennes de température interne en fonction de l'accessibilité à la nourriture (D).



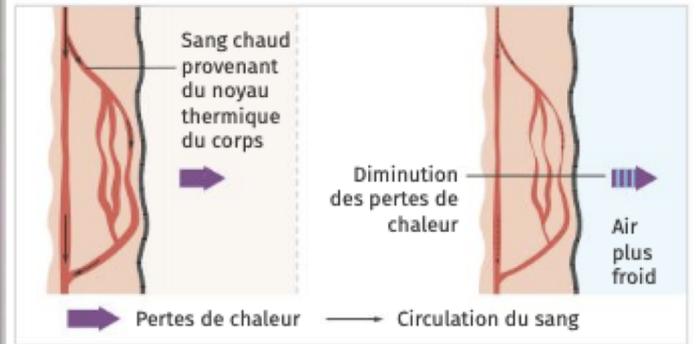
Adapté de Tattersall et al., 2016



Thermographie  
chevaline  
perte de chaleur  
par  
rayonnement  
(IR) 60%

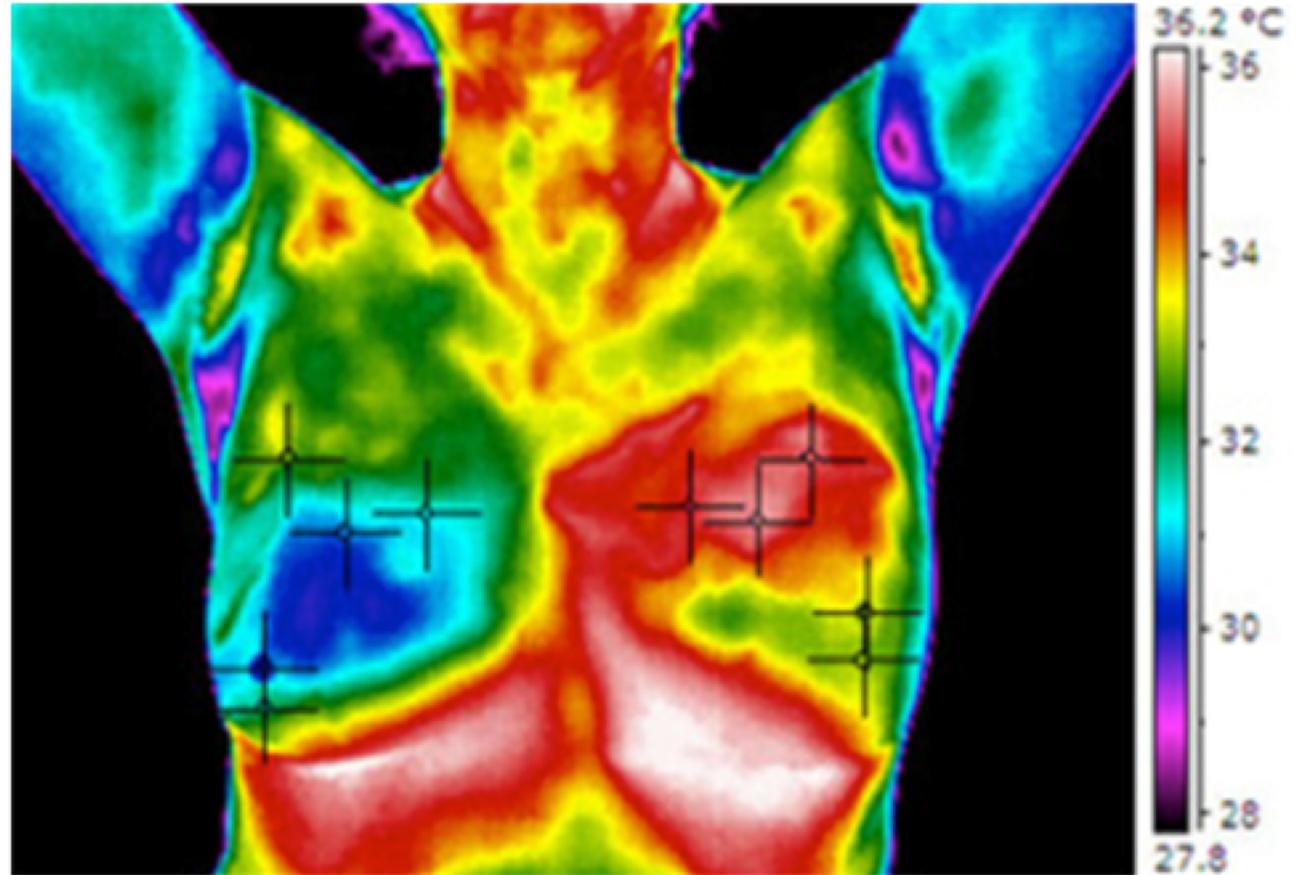


**Doc. 6 La vasoconstriction**

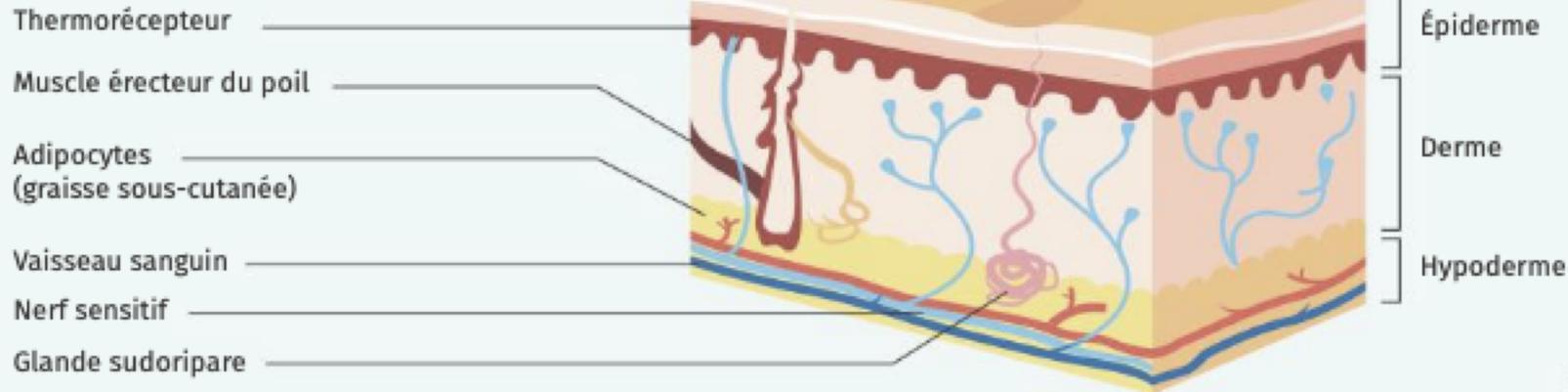


La réduction du diamètre des vaisseaux sanguins sous la peau permet de diminuer le débit de sang y circulant et les échanges thermiques avec l'extérieur sont ainsi ralentis. La chaleur du noyau thermique est mieux conservée, mais l'enveloppe thermique se refroidit d'autant plus vite. Un des effets visibles de cette réaction physiologique est le blanchiment de la peau.

Utilisation de  
la  
thermographie  
pour  
diagnostiquer  
une tumeur

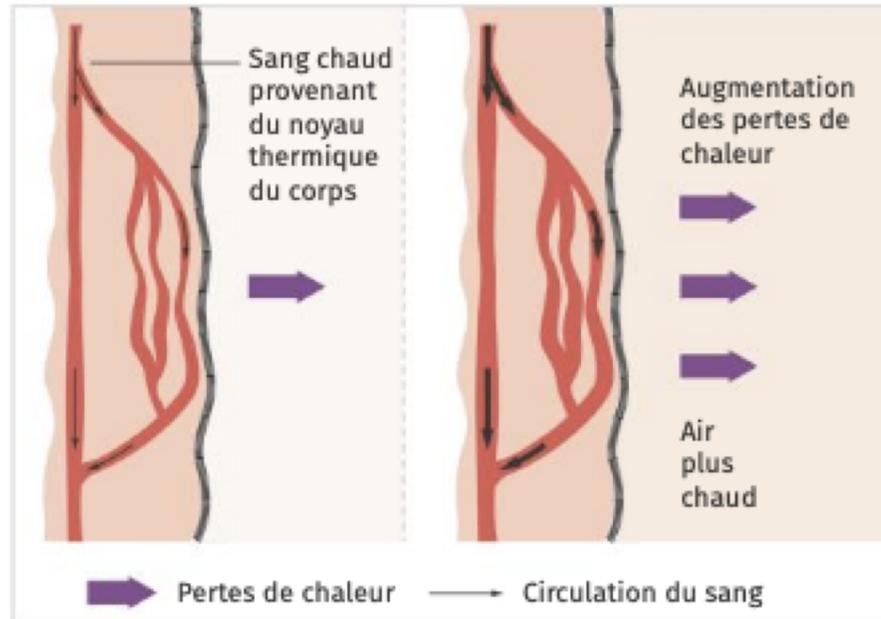


## Doc. 1 La peau, organe de la thermorégulation



Des thermorécepteurs, dont les terminaisons nerveuses sont situées dans l'épiderme, envoient un signal de température à une région du cerveau, l'hypothalamus, qui intègre cette information et déclenche des réactions physiologiques et comportementales.

## Doc. 2 La vasodilatation



L'augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins sous la peau permet d'augmenter le débit de sang et donc les échanges thermiques avec l'extérieur. Un des effets visibles de cette réaction physiologique est le rougissement.

*D'après le livrescolaire.1ES, ed 2019, p118*

Le sang est un fluide caloporteur

# Évaporation (20%)

- Sueur = solution d'eau et de sels minéraux produite par les cellules des glandes sudoripares. Lorsque sueur s'évapore (L-> G) => changement d'état // chaleur latente de vaporisation = consommation d'énergie calorifique

## Doc. 3 La sudation (ou transpiration)

La sudation, ou transpiration, est une réaction physiologique où de l'eau est excrétée à la surface de la peau par les glandes sudoripares. Cette quantité importante d'eau en s'évaporant va faire diminuer la température de surface.



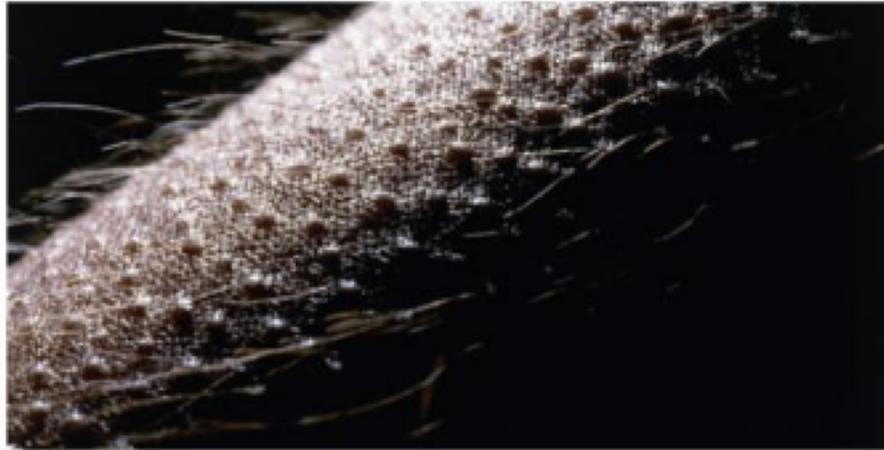
## Doc. 4 Les réactions comportementales

Lorsque la thermogenèse est supérieure à la thermolyse, différents comportements typiques sont observés : se dévêtir, se couvrir avec des tissus clairs, s'humidifier la peau ou s'exposer à un courant d'air.

# Convection (15%)

- Importance de la couche pileuse de surface = > limite la convection
- sac de couchage en plume, doudoune uniqlo
- Température ressentie est fonction du vent

**Doc. 5** La « chair de poule »



Chez les mammifères à fourrure, une réaction physiologique au froid consiste à hérissier les poils, qui constituent alors une couche isolante plus épaisse et donc plus efficace. Chez l'Homme, la densité pileuse n'est pas assez importante pour que ce mécanisme soit efficace d'un point de vue thermique. Cependant, cela constitue un caractère hérité de nos lointains ancêtres mammifères à fourrure.

**Doc. 7** Les réactions comportementales



► Famille inuit à l'abri dans un igloo, près d'un feu, et couverte de vêtements de peau épais et isolants.

# Conduction (5%)

- La conduction est un mode de transfert de chaleur sans déplacement de matière, uniquement par contact. Chez l'Homme la perte d'énergie thermique par conduction passe essentiellement par les pieds en contact avec le sol.
- Perte de chaleur de l'individu au contact de l'environnement « solide »: pied sur le sol . Fonction de la rugosité de l'environnement: exemple dans une pièce table en marbre plus froide que table en bois
- Ce mode de transfert est très important lorsque nous nous baignons (grande perte de chaleur du corps vers l'eau).



Les différentes pertes thermiques du corps humain: ne pas confondre les paramètres température (°C) et chaleur (en J)

- **Rayonnement** IR= 60% des pertes thermiques

$$R = h_r \cdot F_{\text{vet}} \cdot (T_{\text{peau}} - T_{\text{ext}})$$

R: flux thermique par radiation en  $W \cdot m^{-2}$

$h_r$ : coefficient de rayonnement en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

$F_{\text{vet}}$ : facteur de réduction dû aux vêtements (sans unité)

- **Conduction thermique**: 3% des pertes thermiques du corps humain  $Cd = k \cdot (T_{\text{peau}} - T_{\text{ext}})$

Cd : flux thermique par conduction en  $W \cdot m^{-2}$

k: conductance thermique en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

T: température en K

- **Convection thermique**: 15% des pertes thermiques

$$Cv = h_c \cdot F_{\text{vet}} \cdot (T_{\text{peau}} - T_{\text{ext}})$$

Cv: flux thermique par convection en  $W \cdot m^{-2}$

$h_c$ : coefficient de convection en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

$F_{\text{vet}}$ : facteur de réduction dû aux vêtements (sans unité)

- **Évaporation**: 22% des pertes thermiques

$$E = h_e \cdot F_{\text{vet}} \cdot (P_{\text{vext}} - P_{\text{vpeau}})$$

$h_e$ : coefficient d'évaporation en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

$P_{\text{vext}}$ : pression de vapeur d'eau extérieure en Pa

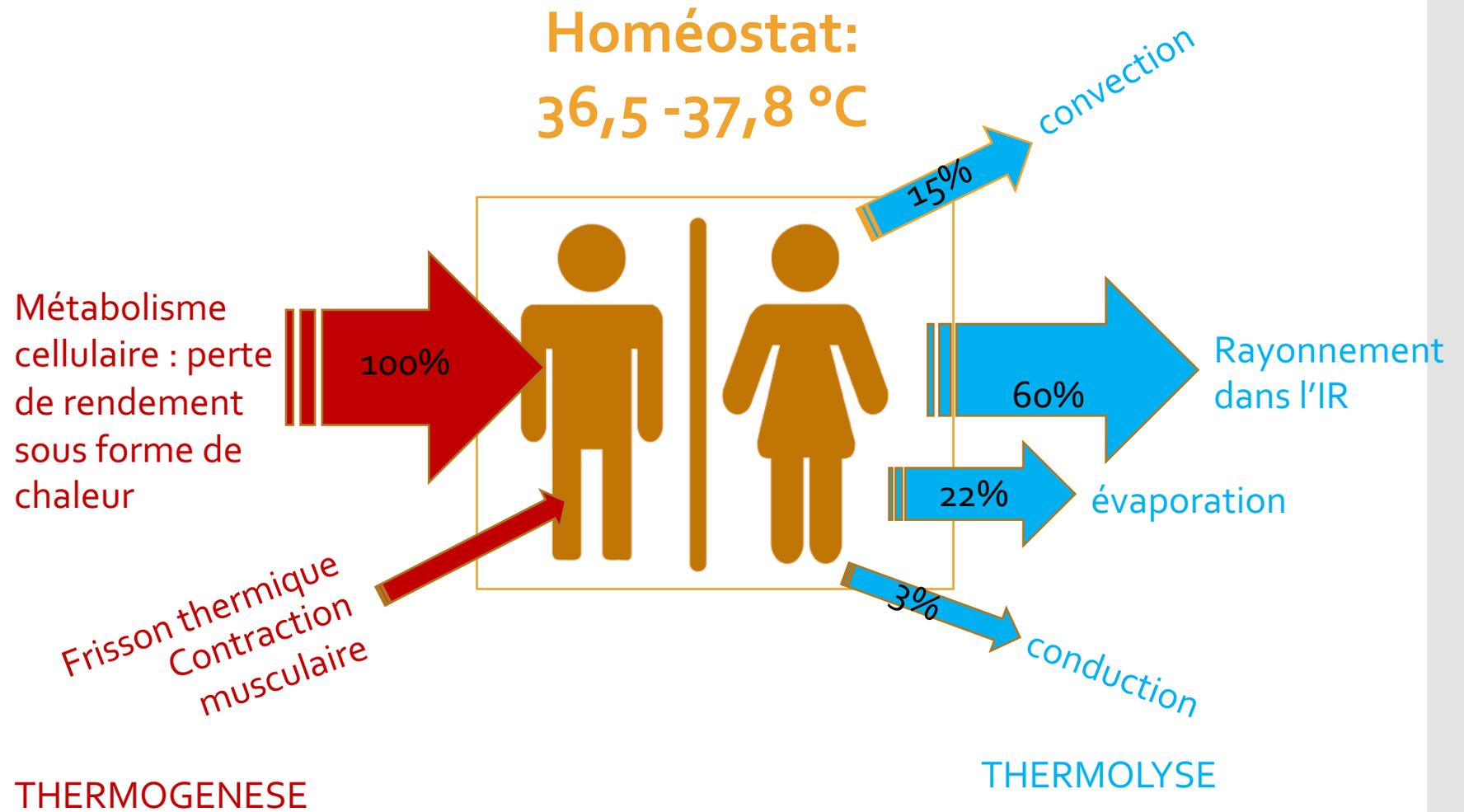
$P_{\text{vpeau}}$ : pression de vapeur saturante de la peau en Pa

$F_{\text{vet}}$ : facteur de réduction dû aux vêtements (sans unité)

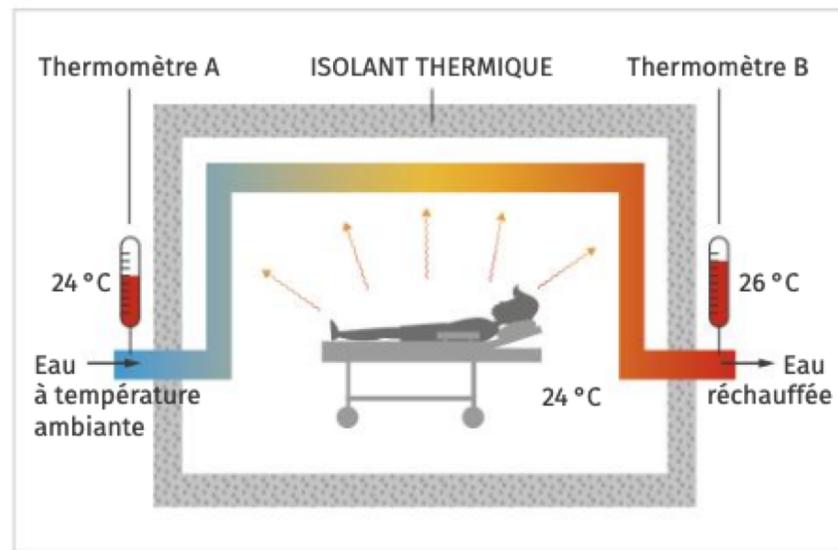
## 2 postulats

- Tout solide échange de l'énergie thermique avec son milieu; la chaleur est toujours transférée du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid
- La température d'un corps ne reste constante que si le flux thermique global est nul => pertes thermiques compensées par thermogénèse (production de chaleur)

# Bilan thermique du corps humain



# Mesure du flux de chaleur produit par un être humain: la calorimétrie



Principe d'une mesure en chambre calorimétrique.

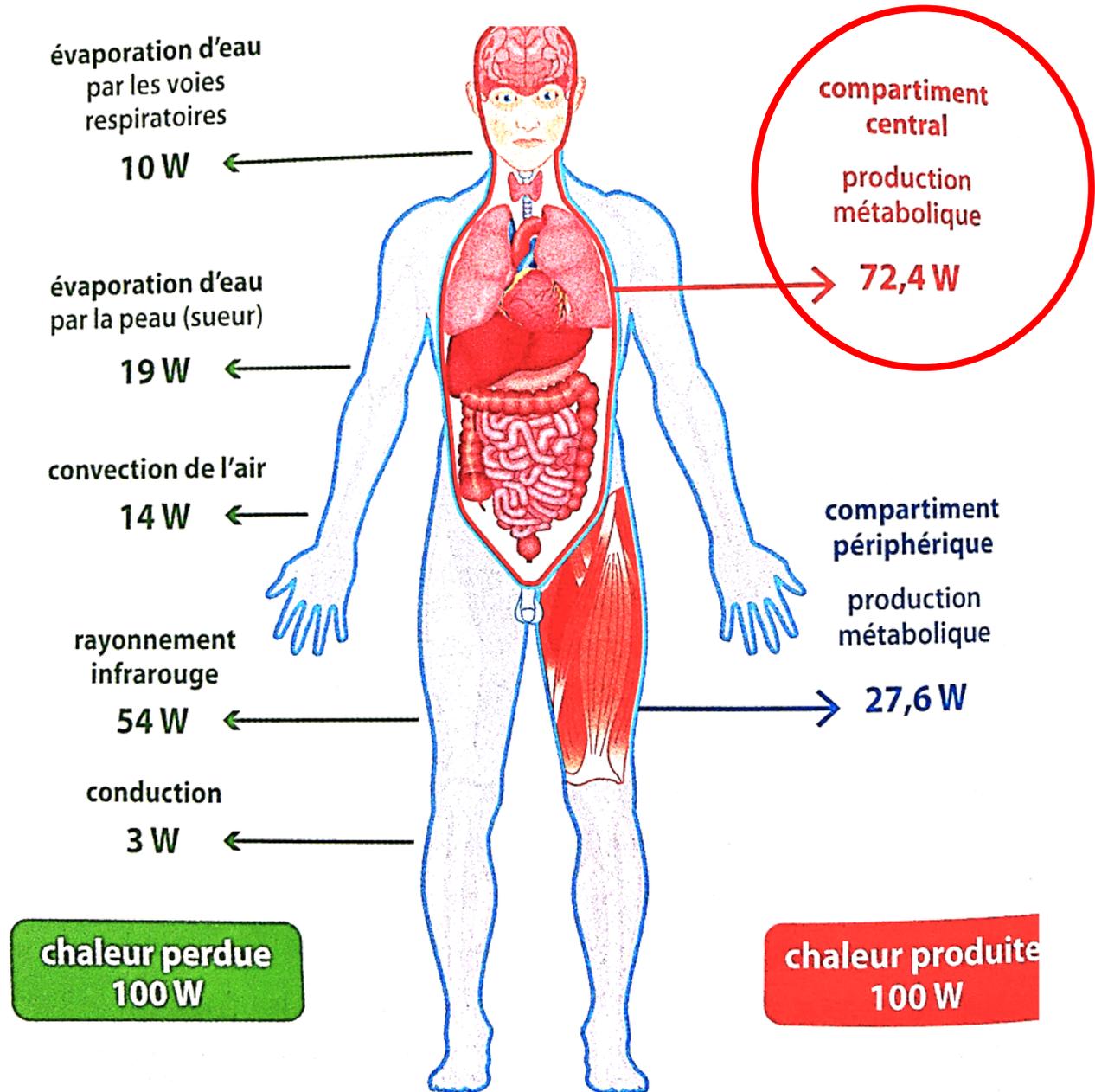
*D'après le livrescolaire.1ES, ed 2019, p115*

Principe du calorimètre: personne allongée dans une chambre dont parois parcourus par de l'eau froide. Chaleur du corps transmise à l'eau froide => augmentation de la température de l'eau associée à une augmentation de  $T^{\circ}\text{C}$ .

Augmentation de  $1^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 1 \text{ calorie} = 4,186 \text{ J}$

**Au repos: corps humain libère 100 W**

Thermogenèse : ensemble des processus produisant de l'énergie thermique



# homéothermie

- Pertes thermiques cf diapositive précédente
- Production thermique: métabolisme respiratoire essentiellement

$$M_{\text{met}} = R + E + C_v + C_d$$

# Définition du métabolisme

- Ensemble des réactions chimiques ayant lieu au sein d'une cellule, basées sur des transformations de matière (oxydation de glucides et/ou des lipides, fermentation) et d'énergie (libération d'énergie lors de la respiration, de la fermentation).

Equation bilan de la respiration:



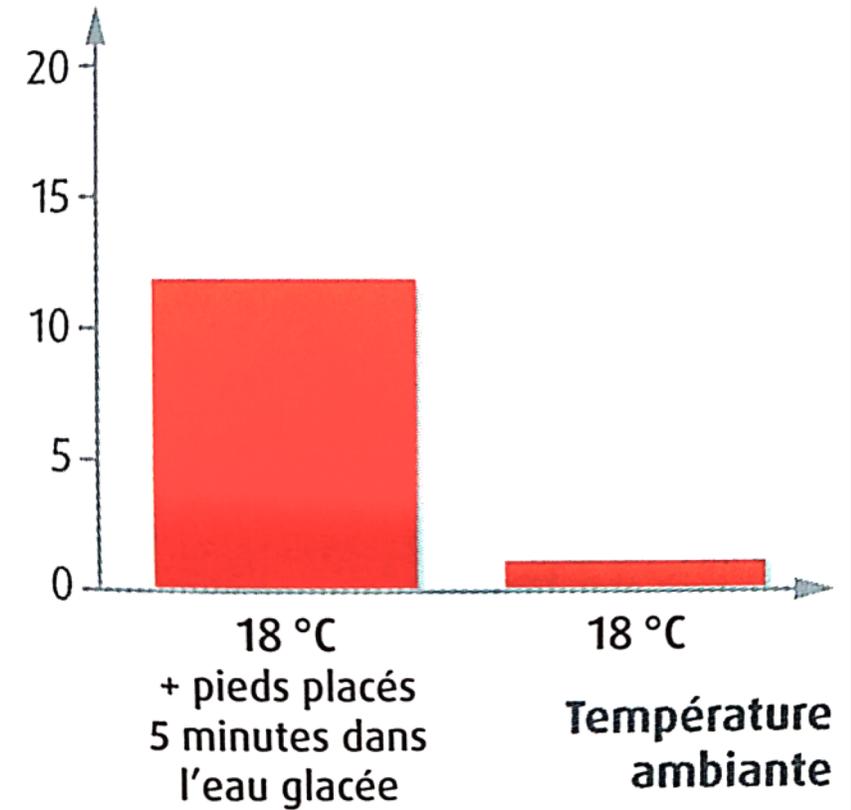
Énergie (travail + chaleur)

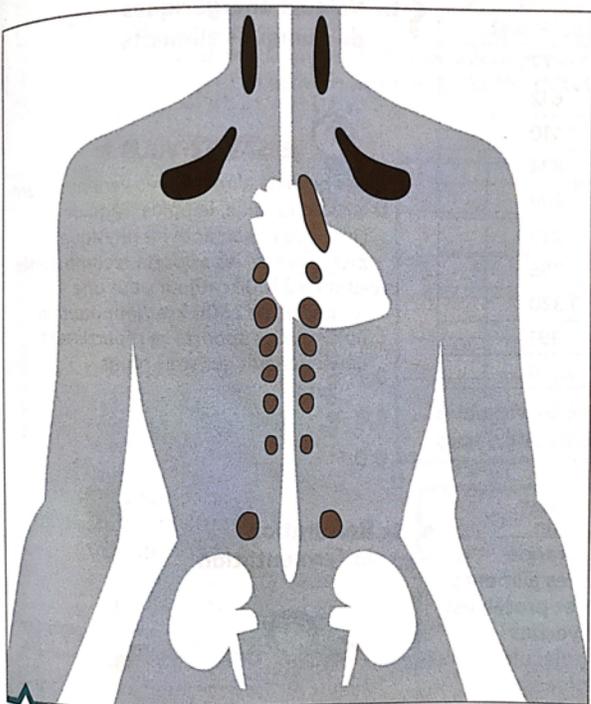
Equation bilan de la fermentation lactique:



Énergie (travail + chaleur)

**Consommation de glucose**  
( $\mu\text{mol}/100 \text{ g}$  de tissu adipeux/min)

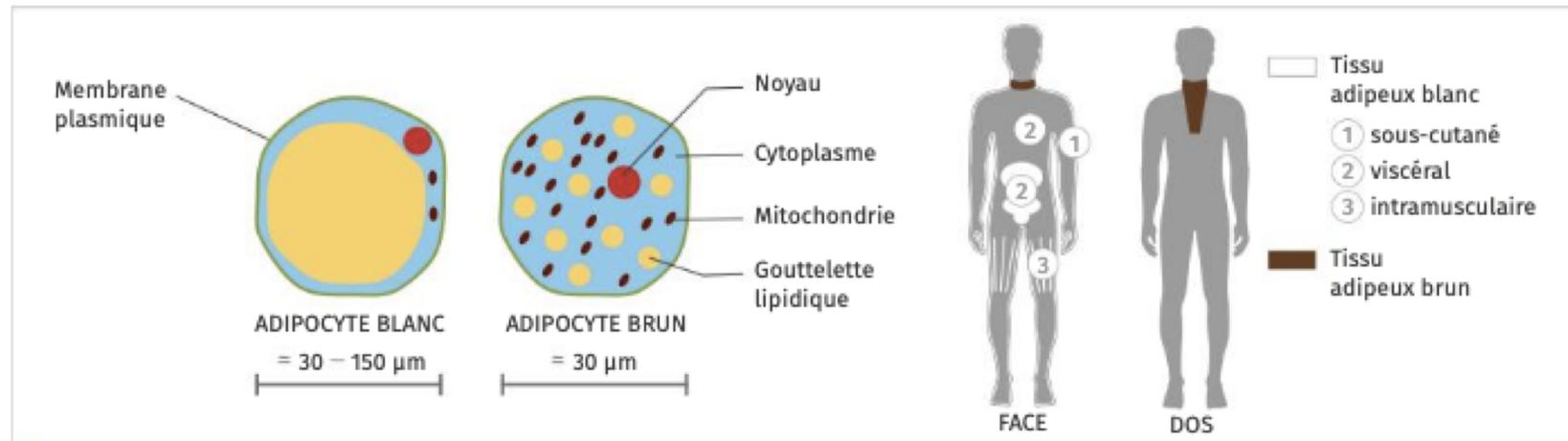




**d. Localisation du tissu adipeux brun**

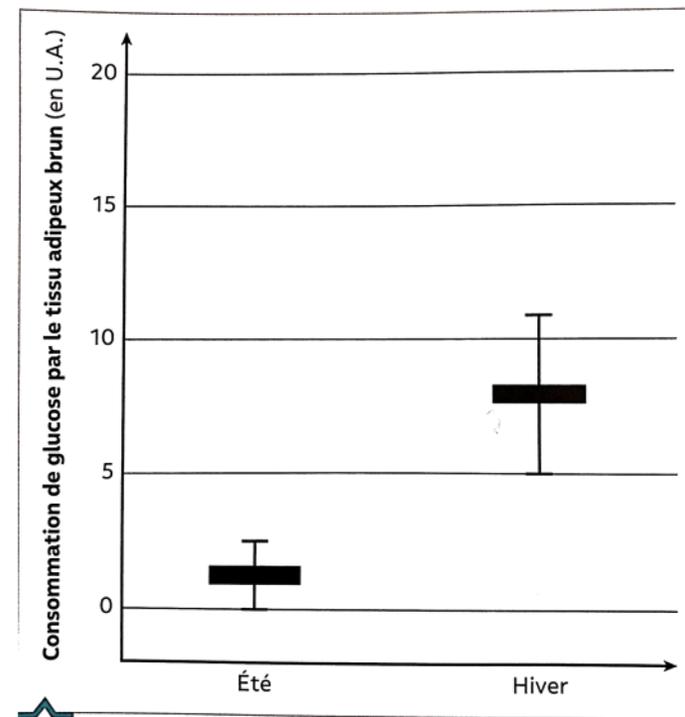
Une partie de la population humaine possède du tissu adipeux brun, dont les cellules convertissent l'énergie chimique des nutriments en énergie thermique.

# Thermogénèse par le tissu adipeux brun



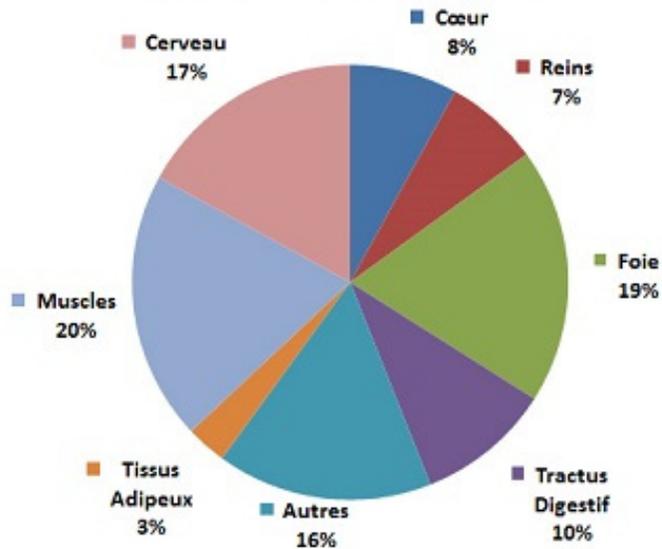
**● Schémas comparatifs de l'organisation et de la localisation des adipocytes blancs et bruns.** Dans une cellule, les mitochondries sont les organites responsables de la respiration cellulaire.

- Graisse brune peu présente chez l'adulte (très présente chez le nourrisson et chez les Mammifères hibernant): le métabolisme au sein des adipocytes bruns est particulier: la thermogénine présente dans les mitochondries induit une production d'énergie uniquement sous forme de chaleur (aucun ATP produit permettant un travail cellulaire)



**e. Consommation moyenne de glucose par le tissu adipeux brun de 8 sujets différents, en été et en hiver**  
Les barres verticales représentent les écarts types.

## Métabolisme de base



Le métabolisme basal: quantité minimale d'énergie dépensée par jour

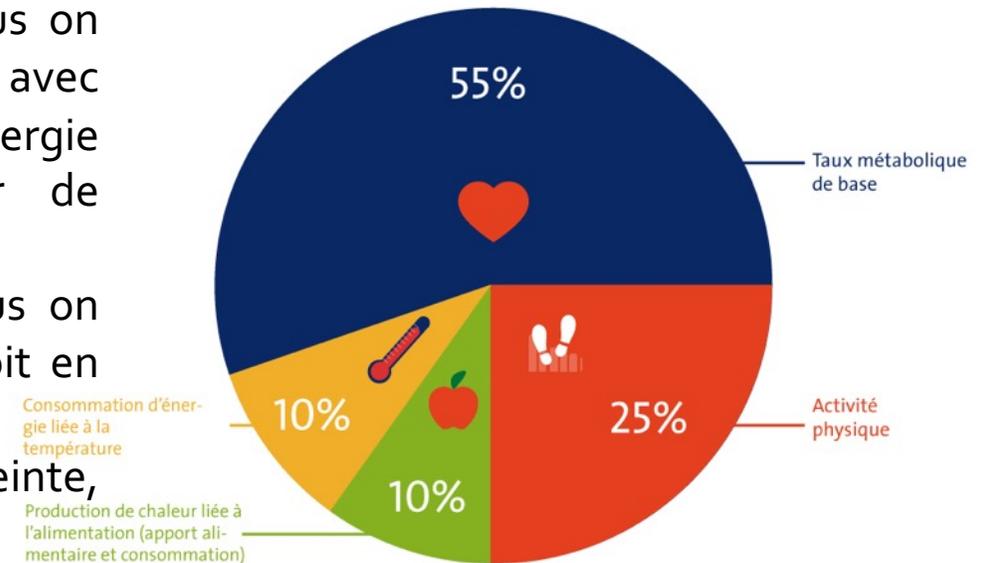
- Le métabolisme basal (MB) au repos est dû aux dépenses énergétiques occasionnées par les battements cardiaques, mouvements de la cage thoracique, fonctionnement cérébral, veille immunitaire, communication hormonale, tonus musculaire de base.

La valeur du métabolisme basale dépend :

- De l'âge (le métabolisme diminue avec l'âge, les personnes « chauffent » moins)
- Du sexe (la thermorégulation passe par un centre de contrôle l'hypothalamus sous influence hormonale)
- De la taille (plus on est grand, plus on augmente la surface de contact avec l'environnement, plus on perd d'énergie donc plus on doit consommer de l'énergie)
- De la masse (plus on est fort, plus on dépense d'énergie donc plus on doit en consommer)
- De l'état physiologique (enceinte, allaitement, maladie)

Il faut ajouter à ce MB les dépenses énergétiques quotidiennes (se déplacer, manger...) qui dépendent du mode de vie (sédentaire, sportif, environnement chaud/froid...)

## Consommation d'énergie humaine



# L'alimentation et la valeur énergétique des aliments

Nutriment ou énergie	Apport de référence
lipides	70 g
glucides	260 g
protéines	50 g
énergie	8 400 kJ = 2 000 kcal

Aliment	Valeur énergétique (en kJ/100 g)
Tomate, crue	77
Riz blanc, cuit, non salé	612
Frites de pommes de terre, surgelées, cuites en friteuse	1 110
Saumon, élevage, rôti/cuit au four	874
Bœuf, steak haché 15 % MG, cuit	996
Yaourt, lait fermenté ou spécialité laitière, nature	239
Mousse au chocolat (base laitière), rayon frais	756
Tarte aux fraises	1 320
Jus d'orange, maison	191
Eau	0

Extrait de la table Ciqual, base de données de référence sur la composition nutritionnelle des aliments, [www.ciqual.anses.fr](http://www.ciqual.anses.fr).

## Chapitre 2.4. Le bilan thermique du corps humain

### I. Les paramètres, des grandeurs mesurables

Un paramètre est une grandeur mesurable, donc présentant une unité (du SI) et pour lequel on dispose d'un matériel de mesure (thermomètre, mètre, calorimètre,...).

Dans le cas du bilan thermique, on mesure:

- La température en °C, mesurée par un thermomètre. La valeur de référence pour l'espèce humaine homéotherme est de 36°C-37,5°C (compartiment central vs 31 °C en périphérie).
- L'énergie (ici thermique), en Joules ou kJoules, mesurée. L'énergie peut être calorifique, et est mesurée par un calorimètre, en kcal (1kcal = 4,2 kJ).
- Puissance, en Watts (W), correspondant à une variation d'énergie (en J) sur une variation de temps (s): d'où  $1W = 1J.s^{-1}$

Il existe une relation entre T°C et puissance thermique en J.

$$Q = m c \Delta T$$

Q est la quantité d'énergie thermique transférée, m la masse du corps, c sa capacité thermique massique et  $\Delta T$  la variation de température entre la température initiale et finale du corps.

## II. Le corps humain est un système ouvert parcouru de flux d'énergie

### A. Les pertes d'énergie: thermolyse

#### 1. Les quatre modalités de transferts thermiques du corps humain vers l'environnement (air, sol)

L'énergie thermique a tendance à diffuser uniformément dans l'espace selon plusieurs modes de transfert:

- **Le rayonnement dans l'IR** (50 à 60% des pertes thermiques chez l'Homme)
- **L'évaporation**: chaleur latente de vaporisation de l'eau => perte d'énergie calorifique (20% des pertes thermiques chez l'Homme)
- **La convection**: transfert de chaleur avec déplacement de matière, environ 15% des pertes thermiques (dû à la surface de contact peau-air, et des T°C environnementales souvent < 37°C)
- **La conduction**: transfert thermique par contact, sans déplacement: 5% (au niveau des pieds en contact avec le sol).

#### 2. Les déséquilibres possibles des flux sortant:

- Les vêtements : ajout ou retrait ont une influence sur le rayonnement IR (+ ou -) et limite la perte thermique par convection
- L'activité physique: induit une augmentation du rayonnement IR et de l'évaporation (sueur)
- Vent: induit une augmentation de la perte de chaleur par convection (d'où température ressentie plus faible lorsqu'il y a du vent)
- Marcher pieds nus sur du carrelage vs du parquet: plus grande perte par conduction sur carrelage car sol lisse et non rugueux comme le parquet (sauf si parquet bien vitrifié!) d'où plus grande surface de contact et perte par conduction

**BILAN**: en moyenne on estime à **100 W la puissance thermique « perdue » par un homme adulte par jour**. Or notre température corporelle reste autour de 37°C, T°C directement liée à l'énergie thermique. Il existe donc au sein de notre organisme des processus permettant la production d'énergie thermique.



# Traces écrites

## B. La production de chaleur par le corps humain (thermogenèse) repose essentiellement sur le métabolisme cellulaire

### 1. définition de métabolisme

Ensemble des réactions chimiques ayant lieu au sein d'une cellule, basées sur des transformations de matière (oxydation de glucose, fermentation) et d'énergie (libération d'énergie lors de la respiration, de la fermentation).

### 2. la respiration cellulaire: métabolisme majeur producteur de chaleur

La respiration a lieu au sein des mitochondries (organistes cellulaires), et consiste en une oxydation totale du glucose en H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>. C'est le métabolisme le plus énergétique, mais comme toute transformation son rendement énergétique n'est pas de 100%, il existe de pertes sous forme de chaleur. L'énergie libérée par la respiration cellulaire est utilisée pour les travaux cellulaires (synthèse de protéines, sécrétion de molécules, division cellulaire, contraction cellulaire...).

### 3. la fermentation est une autre voie métabolique utilisable par les cellules

La fermentation est une transformation chimique produisant de l'énergie et de la chaleur mais dans des proportions moindres que la respiration. Cette voie est particulièrement utilisée lors d'un exercice musculaire de longue durée.

### 4. un apport en nutriments essentiel à la thermogenèse

Puisque le métabolisme respiratoire repose sur une oxydation de glucose, il est nécessaire de trouver dans notre environnement: du dioxygène (O<sub>2</sub>) et du glucose. L'O<sub>2</sub> est fourni en continu grâce à la ventilation pulmonaire et à la circulation sanguine, qui approvisionne de manière continue les cellules en O<sub>2</sub>.

Quant au glucose, il est apporté par notre alimentation (repas quotidien) et nos organes de stockage (foie, tissu adipeux), et est le résultat d'un processus de simplification moléculaire (digestion chimique dans la bouche, l'estomac et l'intestin).

On considère qu'un gramme de glucide apporte une énergie de 4 kcal.

Or notre repas n'est pas exclusivement composé de glucides (simples ou complexes). En effet, notre appareil digestif est capable de simplifier les molécules plus ou moins complexes ingérées (glucides, lipides, protéines). En outre, après simplification au cours du tractus digestif, les lipides constituent aussi des nutriments utilisables par les cellules par métabolisme respiratoire. Ils sont très énergétiques (1g de lipides libère 9 kcal).

### 5. bilan des besoins énergétiques quotidiens

Le métabolisme basal (MB) représente les pertes énergétiques d'un individu au repos, il est dû aux dépenses énergétiques occasionnées par les battements cardiaques, mouvements de la cage thoracique, fonctionnement cérébral, veille immunitaire, communication hormonale, tonus musculaire de base. A ce MB s'ajoutent les pertes énergétiques quotidiennes (déplacement, thermorégulation, digestion post repas, efforts d'apprentissage des cours de Mme Dalaine...).

On estime à 2600 kcal/jour les apports énergétiques recommandés pour un homme adulte de 70 kg (2100 kcal/j pour une femme). Ces besoins varient selon le sexe, l'âge, la taille, la masse, les activités physiques, l'état physiologique (enceinte, allaitement, maladie).

## 6. d'autres processus secondaires produisant directement ou indirectement de la chaleur

Le réflexe horripilateur (frisson thermique) est un processus libérant de l'énergie. La contraction des fibres musculaires à la base du follicule pileux libère de la chaleur. De plus les poils hérissés forment une couche d'air isolante à la surface de la peau, limitant ainsi les pertes thermiques par convection et diminuant ainsi la thermolyse.

La vasoconstriction des vaisseaux sanguins de la peau diminue le débit sanguin local et avec lui la perte thermique par évaporation (moins de sueur).

L'activité musculaire (sport) augmente le métabolisme énergétique et donc la production de chaleur.

Des déséquilibres hormonaux (ménopause par exemple), engendrent une augmentation du métabolisme respiratoire et ainsi l'émission de chaleur.

Enfin, notons que l'apport de chaleur par l'environnement n'est pas négligeable dans le bilan thermique en termes de ressources thermiques. Le Soleil est notre principale source d'énergie.



## Traces écrites

Conclusion: La température du corps est stable. Cette stabilité résulte d'un ensemble de flux de matière et d'énergie. Ainsi, le corps humain apparaît comme une véritable machine thermique. Il est parcouru de flux énergétiques, tant dans la production (métabolisme respiratoire essentiellement, fermentaire secondairement) que la déperdition (rayonnement IR majoritairement). Notre organisme homéotherme dépense donc une énergie non négligeable à réguler notre température. Cette homéothermie offre un avantage adaptatif: être capable de survivre dans des milieux présentant des fluctuations thermiques (notamment des  $T^{\circ}\text{C} < 0^{\circ}\text{C}$ ), et offrir de l'énergie rapidement utilisable à des fins mécaniques par exemple (vol, course, nage...). En effet, le froid limite les processus enzymatiques et donc limite les fonctions vitales (nutrition, relation, reproduction). Or l'homéothermie permet à certaines espèces (phoques, manchots, cétacés) de vivre dans des milieux aux températures très froides.