

## **PACES**

### **UE 3 Organisation des **appareils** et systèmes**

# **Régulation du milieu intérieur et des espaces hydriques et thermorégulation**

*Pr. J. Regnard*

*Physiologie*

2012 – 2013

# Thermorégulation

du grec : **thermos** = chaleur et  
**regylas** = maintenir un équilibre  
(en adaptant des fonctions)

Voir aussi **homéostasie**  
(*homeo* = identique, constant et *stasis* = arrêt, maintien)

## Pour compléter

Physiologie humaine – H Guénard - *Editions Pradel*, 2009

Physiologie Humaine – D Unglaub Silverton – *Pearson Education*, 2007

Précis de physiologie médicale – AC Guyton & JE Hall – *Piccin*, 2003

Physiologie humaine – LL Sherwood – *De Boeck*, 2006

# Plan (1)

**1. Chaleur et température** définitions, relations

**2. La thermorégulation**

- pourquoi
- chez qui ectothermes et endothermes
- où *noyau, enveloppe, écorce* de l'organisme
- Sources de chaleur: métabolisme basal & autres

**3. Echanges de chaleur**

- dans l'organisme
- avec l'ambiance modalités, T opérative

**4. Réponses thermorégulatrices**

- conservation – dissipation de la chaleur

## **Plan (2)**

- appareil récepteurs, centres,
- réponses centrales, locales
  - rétrocontrôles ( boucles de régulation )
  - intégration de signaux multiples

### **5. Réponses intégrées**

la fièvre

### **6. Réponses modifiées**

médicaments

acclimatements

## **Récapitulations**

fonctions physiologiques concernées  
par la thermorégulation

# Chaleur et température (1)

- **Chaleur** = énergie d'agitation (J) [*1J = 4,18 cal*]
  - Mouvement de particules (gaz, liquides)
  - vibration des atomes dans un cristal
  - zéro absolu (0° K) absence d'agitation

# Chaleur et température (1)

- **Chaleur** = énergie d'agitation (J) [*1cal = 4,18 J*]
  - Mouvement de particules (gaz, liquides)
  - vibration des atomes dans un cristal
  - zéro absolu (0° K) absence d'agitation

• **quantité** de chaleur = quantité d'énergie

$$= \mathbf{m} \times \mathbf{c} \times \mathbf{T}$$

quantité de matière x chaleur spécifique x température

- augmente (**gain**) ou diminue (**perte**) - *bilan* -

# Chaleur et **température** (2)

- **Température** = grandeur intensive (échelle)
- Identique pour **quantités** de chaleur différentes  
mêmes températures (centrale, cutanée)

37 °C

33 °C

pour

nourrisson 5 kg et adulte 70 kg

Même ordre de grandeur pour souris et éléphant

# Thermorégulation (1)

- **Maintien** à proximité d'une valeur « **choisie** »
- Car valeur **optimale** pour fonctions biologiques (réactions enzym., protéines membranaires...)
- Face à **facteurs de modification** (gain / perte)
  - internes : production / dissipation de chaleur
  - externes : ambiances chaudes / froides
- face à modification de « **consigne** », c-à-d « nouveau réglage du thermostat »



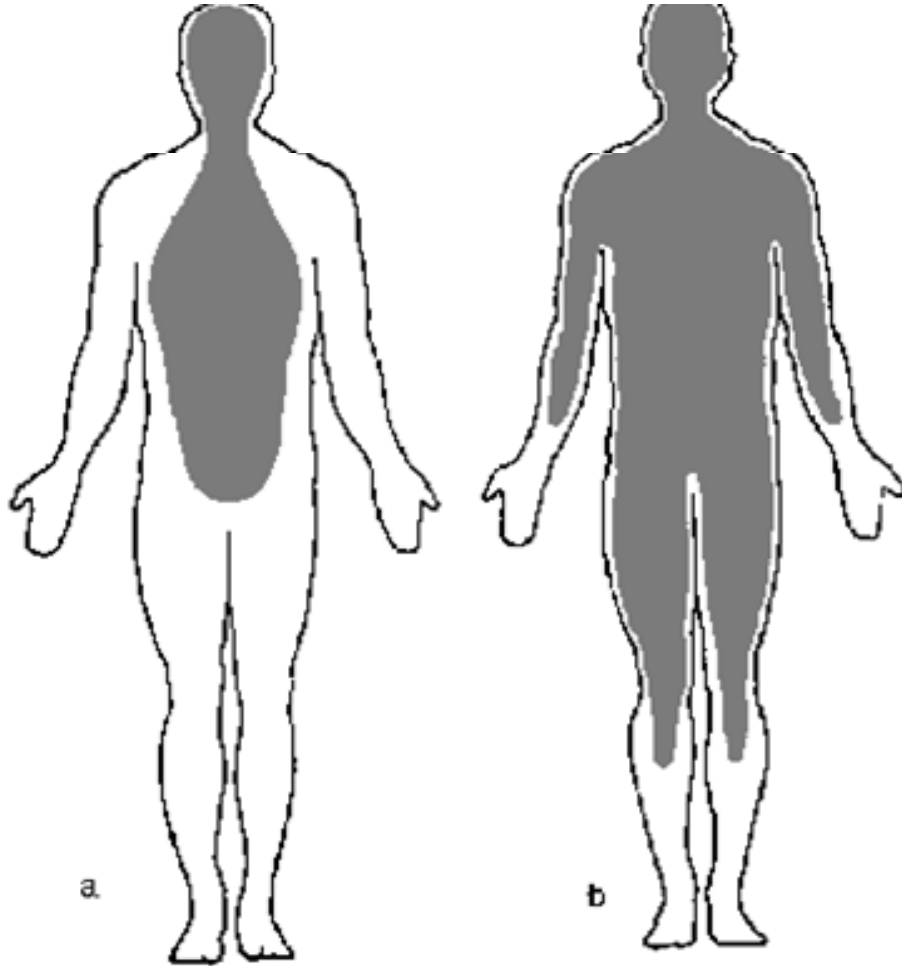
# Thermorégulation (2)

- **Le mieux régulé** (défendu) : la T° du noyau  
Médiastin + foie + encéphale hypothalamus
- Enveloppe (muscles) **et écorce** (peau & s/s peau)  
moins bien protégées contre variations de T°
- *Homéothermes* (oiseaux et mammifères) et
- *Poïkilothermes* (batraciens, reptiles, poissons, invertébrés...) : **Tnoyau réglée aussi**, mais sans moyens propres : eux aussi capables de **fièvre**  
(= réglage plus haut du « choix » de T° interne - profonde)
- ***Endothermes / ectothermes***



# Répartition des régions proches de la température centrale

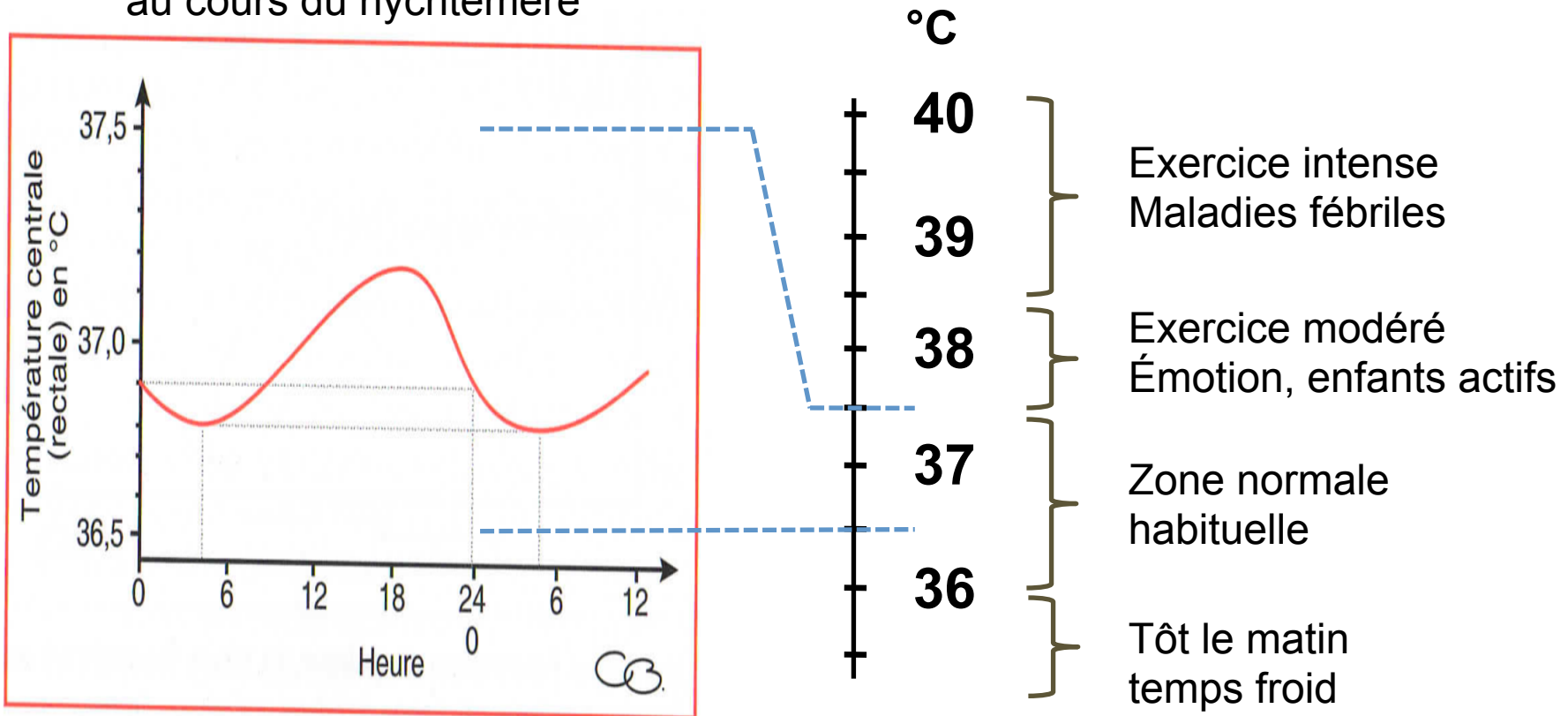
ambiance froide / ambiance chaude



# Thermorégulation (3)

Température centrale (Thypoth, TAP, Tœs, Tre)

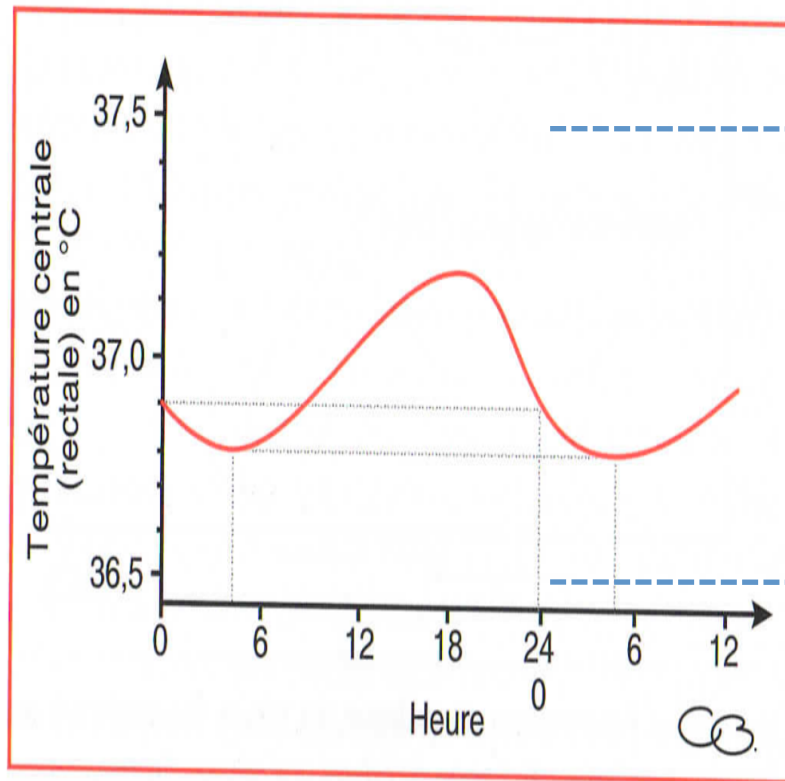
Variation de la température centrale au cours du nyctémère



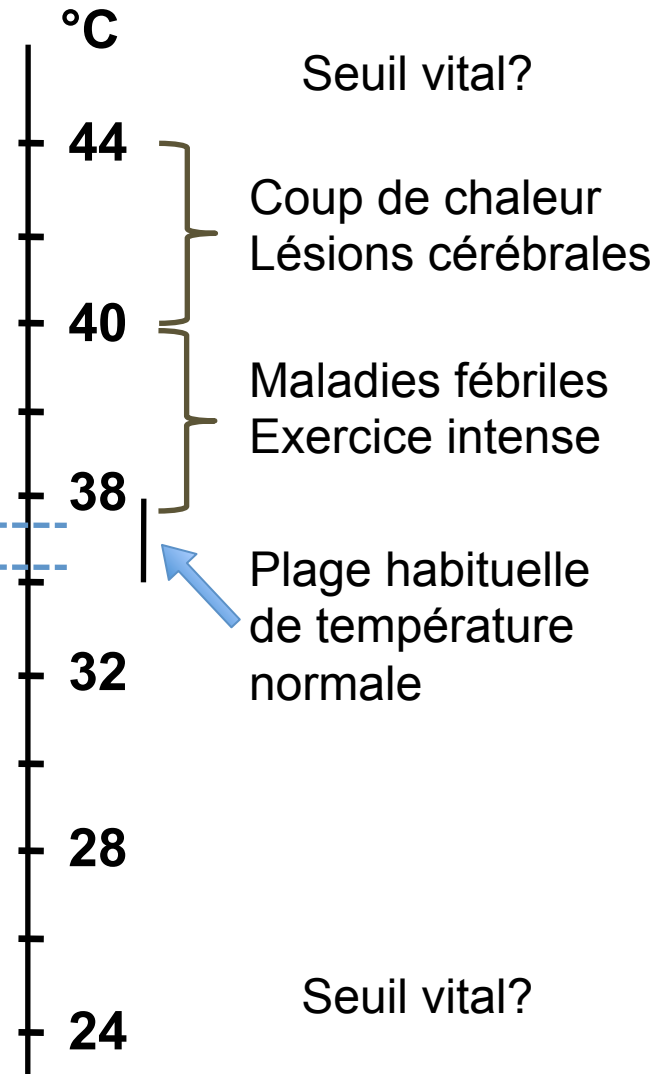
D'après Guénard, 2009

# Thermorégulation (4)

Température centrale



D'après Guénard, 2009



# Dépense d'énergie et chaleur

- Réactions métaboliques exothermiques
- **Métabolisme basal** (fonctionnement tous organes)  
 $f(\text{âge, taille, poids, sexe})$  à 20 ans: 5500 – 6500 kJ/24h  
**70 W (J/s)**
- M de repos  $\pm$  thermorégulation (selon ambiance...),
- M d'activité musculaire, digestive, cérébrale
- Exemples :
  - suivre un cours en amphi : 100 – 150 W
  - course à pied à 10 km/h : 800 W
  - athlète ski de fond : 1 600 W (x 22 MB)

# Production endogène de chaleur

- Réactions métaboliques **exothermiques**
- Activité des organes : **chaleur = sous-produit**
  - contractions cardiaques, intestinales (digestion),
  - transformations métaboliques hépatique, rénale
  - activité musculaire: **rendement mécanique = 20-25%**

**75 – 80% de l'énergie utilisée → chaleur !**

Exercice = source thermique +++ (frisson)

- Thermogénèse facultative : **tissu adipeux brun**

Utilisation de substrats énergétiques et d'O<sub>2</sub> découplée de l'activité métabolique, **→** uniquement **chaleur**

# Transferts de chaleur internes

- **Conduction** : dans et entre solides

*L'agitation moléculaire se propage de proche en proche*

- dans chaque organe
- aux tissus voisins et vers la peau (interface avec l'ambiance)

Échanges de chaleur **lents**

- **Convection sanguine** transferts de chaleur **rapides**

Sang = liquide caloporteur (eau du chauffage central)

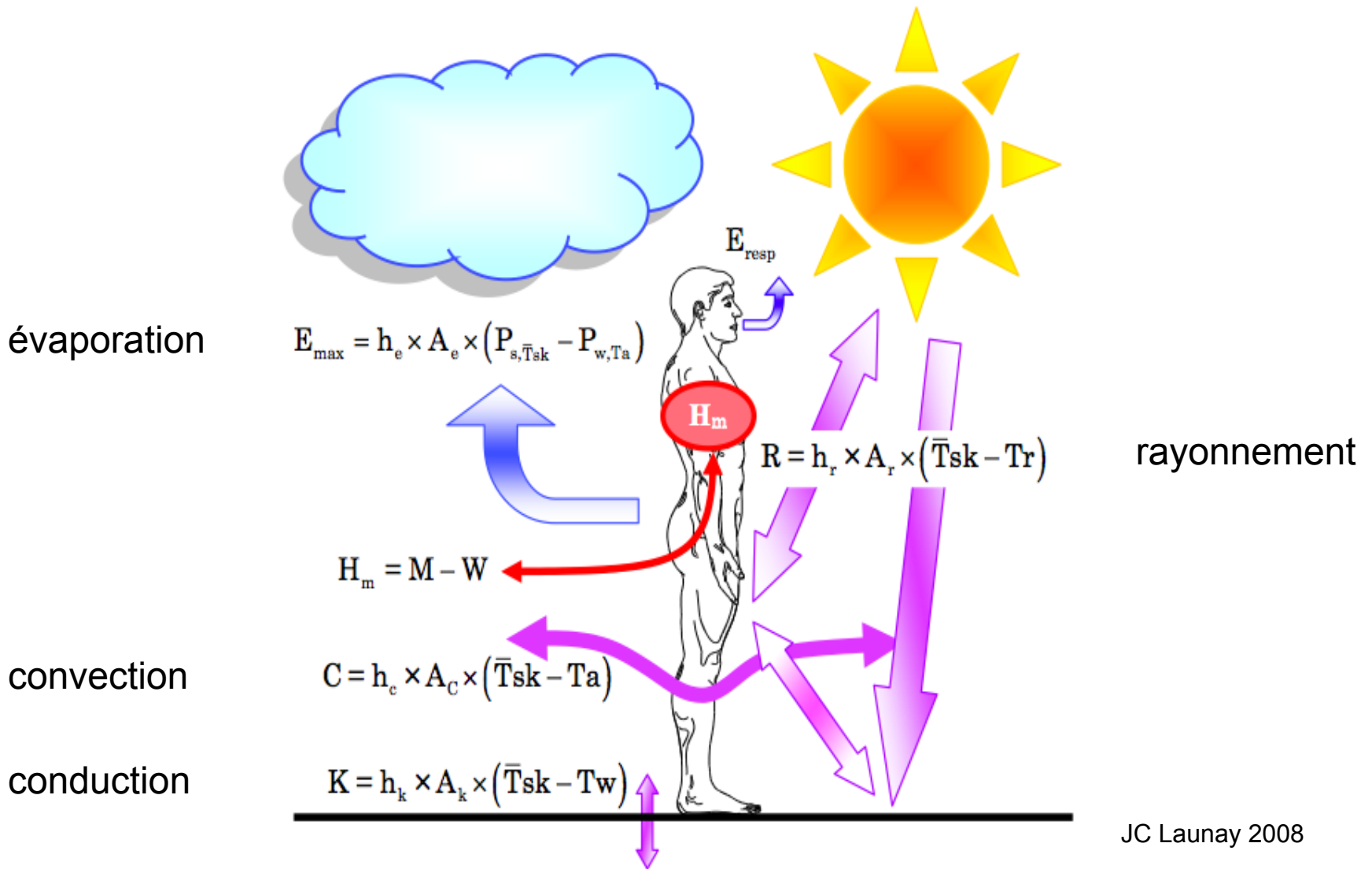
- réchauffé dans les organes chauds
- cède la chaleur dans les régions froides
- transporte la chaleur entre « le noyau » et la peau

# Facteurs thermiques d'ambiance et modalités d'échanges avec le corps

- Apports ou dissipation de chaleur (énergie) :
  - ± **Rayonnement** : sans support matériel IR-UV- $\gamma$ ...  
solaire, sources thermiques : feu, radiateur, lampe
  - ± **Conduction** : contact entre solides échange  $\epsilon$  vibr.
  - ± **Convection** : contact avec renouvellement de molécules au contact de la peau : **fluides** (gaz, liquide)  
qui augmente le débit d'échanges
  - **Evaporation** : changement d'état eau  $\implies$  vapeur



# Échanges d'énergie entre le corps et l'ambiance



# Ambiance thermique

- Température ambiante ( $T_a$ )
- Gain ou perte par rayonnement ( $\dot{R}$ )
- Gain ou perte par conduction ( $\dot{K}$ )
- Gain ou perte par convection ( $\dot{C}$ )
- Perte par évaporation ( $\dot{E}$ )

Température opérative ( $T_o$ )

$$T_o = T_a + \text{effets de } \dot{R}, \dot{C}, \dot{E}$$

*exemple* :  $T_a = -5 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $T_o = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  (sans vent + gd soleil)

Pouvoir de refroidissement (PR)  $T_a + \dot{C}$

# Température équivalente (ressentie) en cas de vent

## Température d'air sous abri

°C km/h	4	- 1	- 4	- 9	- 15	- 21	- 30
8	3	- 3	- 6	- 11	- 17	- 24	- 33
15	- 2	- 9	- 13	- 19	- 26	- 33	- 43
30	- 8	- 16	- 20	- 27	- 36	- 43	- 55
50	- 11	- 19	- 24	- 32	- 41	- 50	- 63
65	- 12	- 21	- 26	- 34	- 43	- 54	- 65

## Vitesse du vent

# Calcul des échanges d'énergie

- Convection :  $C = h_c \times A_c \times (T_{sk} - T_a)$

C = énergie transférée par convection

$A_c$  = surface,  $T_{sk}$  = T° de peau,  $T_a$  = T° ambiante

$h_c$  = coefficient d'échanges convectifs

$h_c =$  air calme 2,5 W.m<sup>-2</sup>.°C<sup>-1</sup>

eau calme 45 W.m<sup>-2</sup>.°C<sup>-1</sup>

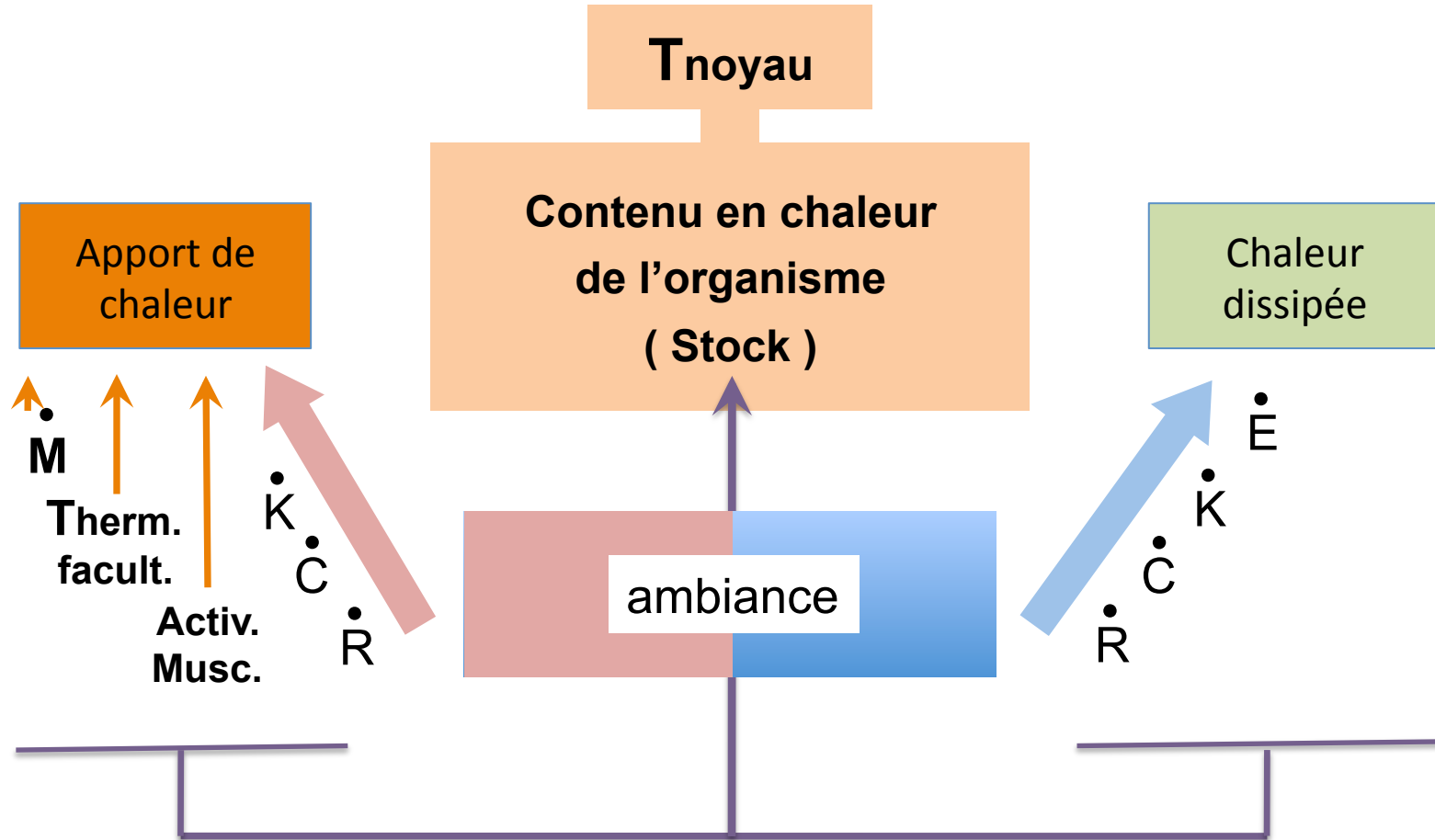
eau froide (+mvt) 100 – 200 W.m<sup>-2</sup>.°C<sup>-1</sup>

- Conduction :  $K = h_k \times A_k \times (T_{sk} - T_w)$

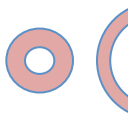
- Radiation :  $K = h_r \times A_r \times (T_{sk} - T_r)$

$$\dot{M} \text{ (oblig. + facult. + act.musc.)} \pm \dot{R} \pm \dot{K} \pm \dot{C} - \dot{E} - \dot{W} = \dot{S}$$

**M** = métabolisme-énergie et  $\dot{M}$  = métabolisme-puissance (/s)



# Thermorégulation

- Détecteurs de température : **thermorécepteurs**
- Analyse des signaux et commande : « **centres** »
- Transmission des commandes : **voies nerveuses**
- **Effecteurs** :
  - vaisseaux sanguins contraction / dilatation 
  - glandes sudoripares
  - réserves énergétiques glycogène, lipides
  - tissu adipeux brun
  - commande de la contraction musculaire

# Réponses thermorégulatrices -1

## 1) Face au risque de refroidissement

- Limiter le refroidissement

- **vasoconstriction cutanée** ↓ l'apport de chaleur à la peau, donc ↓  $\dot{R}$  (émission),  $\dot{K}$  contact,  $\dot{C}$  convection commandée par l'activation de **fibres nerveuses sympathiques** : libération de **noradrénaline** (action vasoconstrictrice)

- **Contracture musculaire & frisson**

80 % de l'énergie utilisée pour la contraction muscle → chaleur

Utilise des substrats énergétiques : glucides & lipides

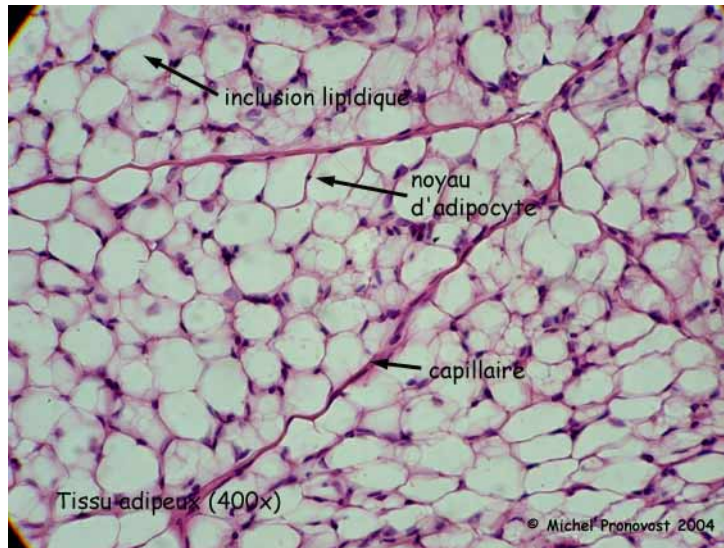
# Réponses thermorégulatrices -2

## 1) Face au risque de refroidissement

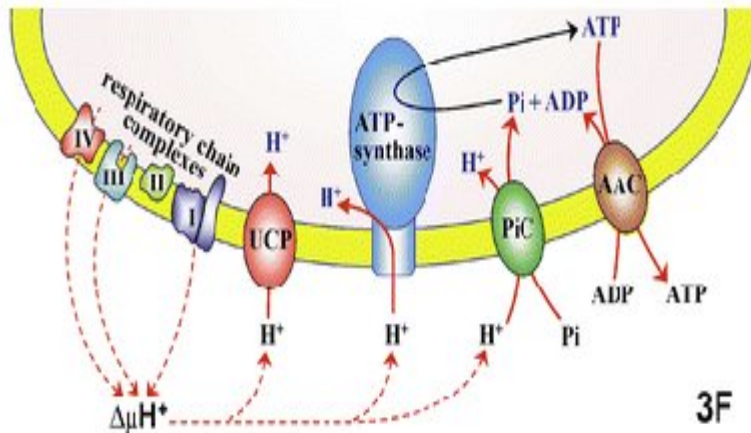
- Augmenter la production de chaleur
  - **thermogénèse sans frisson (facultative)**
  - Tissu adipeux brun - protéine découplante UCP-1  
mitochondrie : arrêt de phosphorylation d'ADP en ATP
  - activée par la noradrénaline (fibres n. sympathiques)
  - La noradrénaline et l'adrénaline libèrent les lipides de réserve (tissu adipeux blanc)
  - Mécanisme non activé en cas de grande dénutrition  
(noradrénaline non libérée )



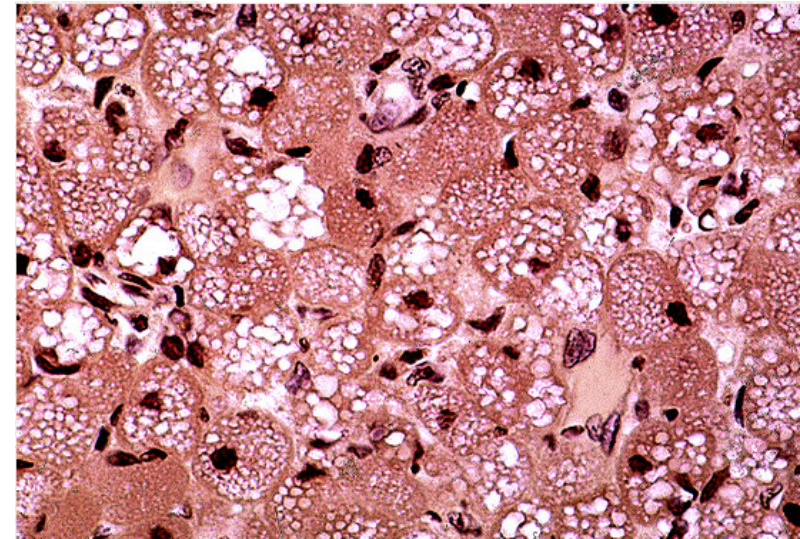
## Tissu adipeux blanc



**une** vacuole lipidique / adipocyte  
**peu** de vaisseaux



## Tissu adipeux brun



- vacuoles petites et nbxes / adipocyte
- nbx vaisseaux autour des adipocytes
- nbxes terminaisons f.n. sympathiques noradrénaline
- **récepteurs  $\beta 3$**  sur adipocytes
- nombreuses **mitochondries** /adipocyte
- sur membrane interne, **UCP-1**



# Réponses thermorégulatrices -3

## 2) Face au risque de **réchauffement**

- Augmenter la dissipation thermique

- **vasodilatation cutanée** 82 kJ/h

augmente le débit sanguin cutané : si l'ambiance peut accepter la chaleur ( $T_a$  et  $C$ ), augmente la thermolyse

- **sudation puis évaporation**

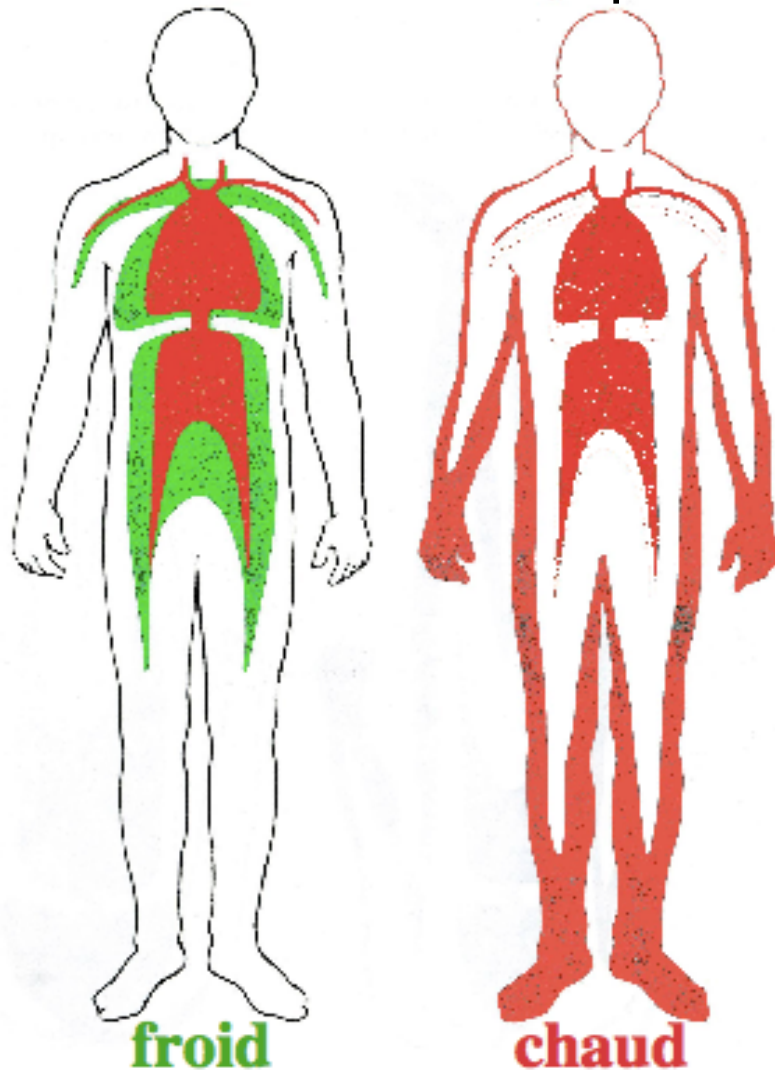
Évaporation de la sueur = thermolyse 1L : 2 500 kJ

- efficace si ambiance sèche, qui peut accueillir de l'eau

- consomme de l'eau (du plasma sanguin) qui doit être remplacée : boire pour éviter la déshydratation

- Évaporation dans les voies aériennes (bronches)

# Répartition du débit et du volume sanguin selon les réponses thermorégulatrices

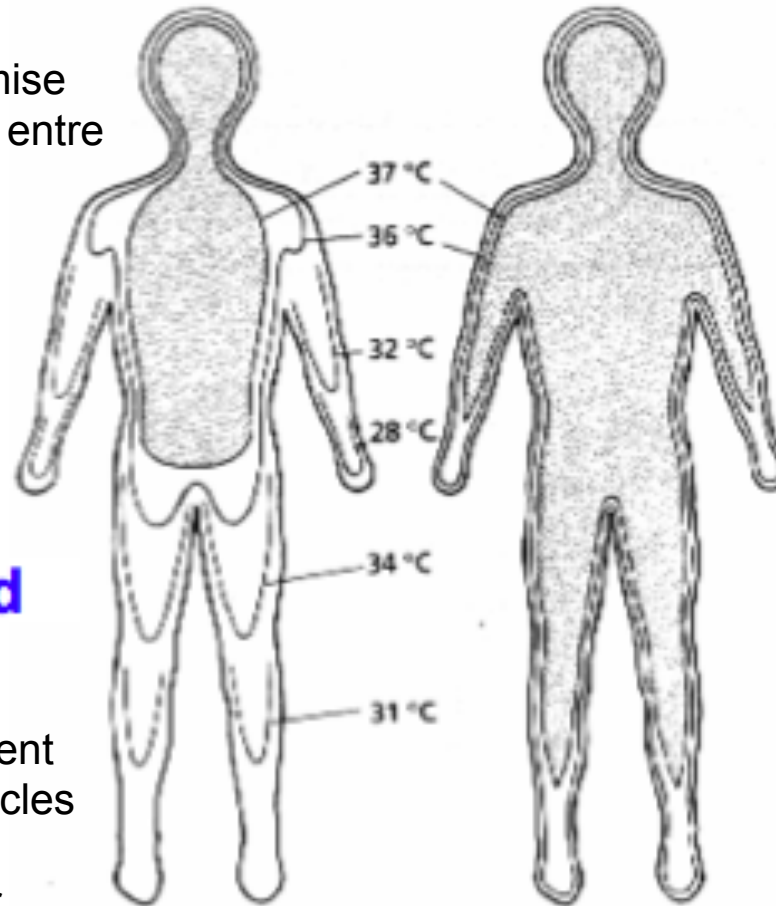


**En ambiance froide** : *peau blanche*  
la **vasoconstriction** cutanée **limite**  
le débit sanguin dans la peau  
et donc la **perte de chaleur**

**Au chaud** : *peau rouge*  
la **vasodilatation** cutanée favorise  
un grand débit sanguin pour  
le **transport de chaleur**  
vers l'ambiance plus fraîche et/ou  
le refroidissement de la peau  
(et du sang) par évaporation

# Répartition des températures selon l'équilibre thermique

La vasoconstriction minimise les échanges thermiques entre le noyau et l'enveloppe, puis la peau.



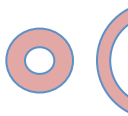
La vasodilatation augmente la capacité de transfert de Chaleur entre noyau et peau (dans les deux sens)

**Au froid**

**À la chaleur**

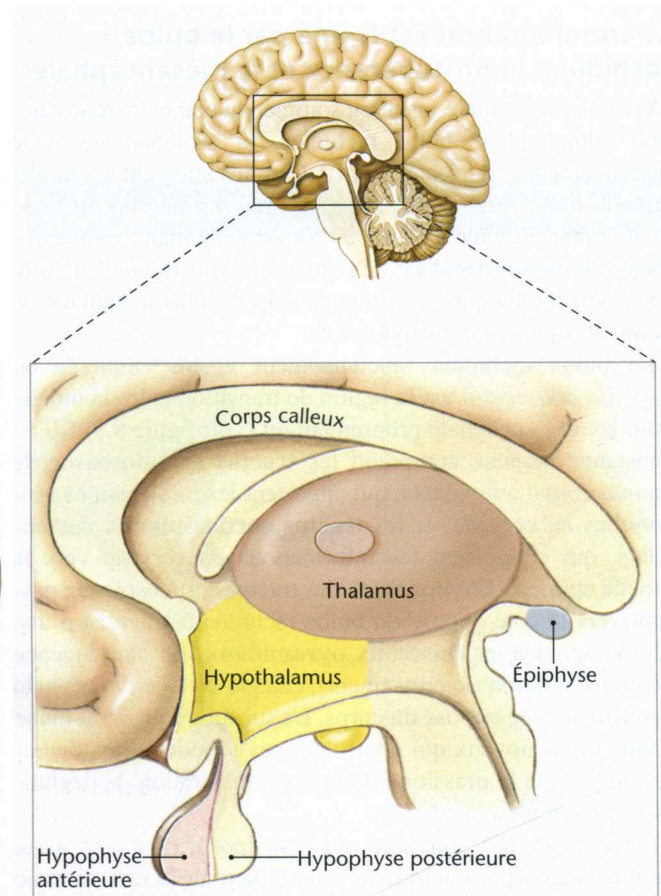
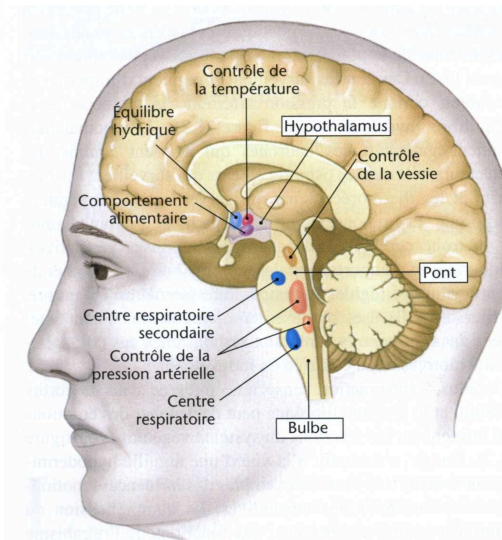
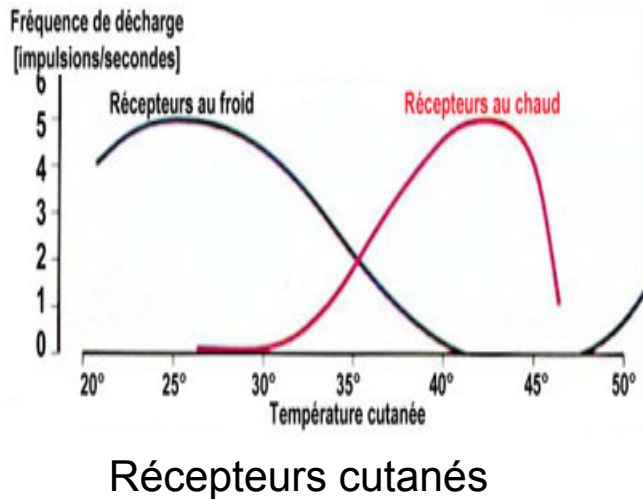
Si vasoconstriction prolongée : refroidissement de la peau puis des muscles plus profondément, c-à-d perte de chaleur par conduction > apports de chaleur par petit débit sanguin.

# Thermorégulation

- Détecteurs de température : **thermorécepteurs**
- Analyse des signaux et commande : « **centres** »
- Transmission des commandes : **voies nerveuses**
- **Effecteurs** :
  - vaisseaux sanguins contraction / dilatation 
  - glandes sudoripares
  - réserves énergétiques glycogène, lipides
  - tissu adipeux brun
  - commande de la contraction musculaire

# Thermorécepteurs et « centres »

- Récepteurs périphériques chaud / froid
  - cutanés : réponse aux écarts (vitesse et distance)
  - profonds (veine cave, moelle spinale...)
  - centraux SNC : hypothalamus



# Réflexes thermorégulateurs

**Stimulus**

**Changement T ambiante**

**Chgt. T centrale du corps**

**Récepteur**

Thermorécepteurs  
périphériques

Thermorécepteurs  
hypothalamiques

centre  
Thermorégulateur  
hypothalamique

**Voie n.  
efférente**

Neurones  
sympathiques  
cholinergiques

Neurones  
sympathiques  
noradrénergiques

Neurones  
Moteurs  
somatiques

**Effecteur**

Glandes  
sudoripares

Vaisseaux  
sanguins  
cutanés

Vaisseaux  
sanguins  
cutanés

Graisse  
brune

Muscles  
squelettiques

**Tissu**

sudation

vasodilatation

Vaso-  
constriction

thermogénèse  
sans frisson

frisson

**Réponse  
systémique**

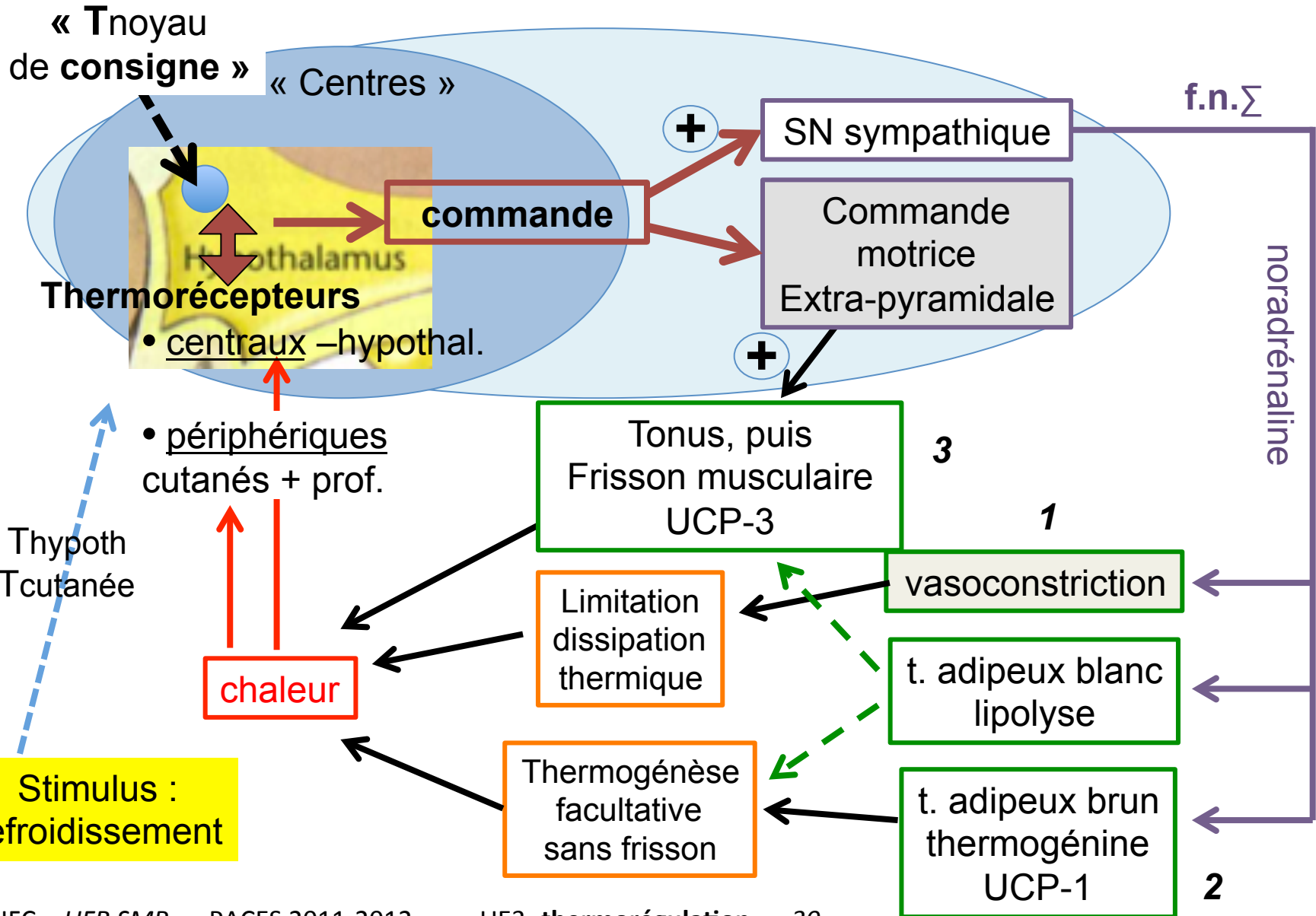
Chaleur  
évaporée

Chaleur cédée  
à l'ambiance

Chaleur  
conservée

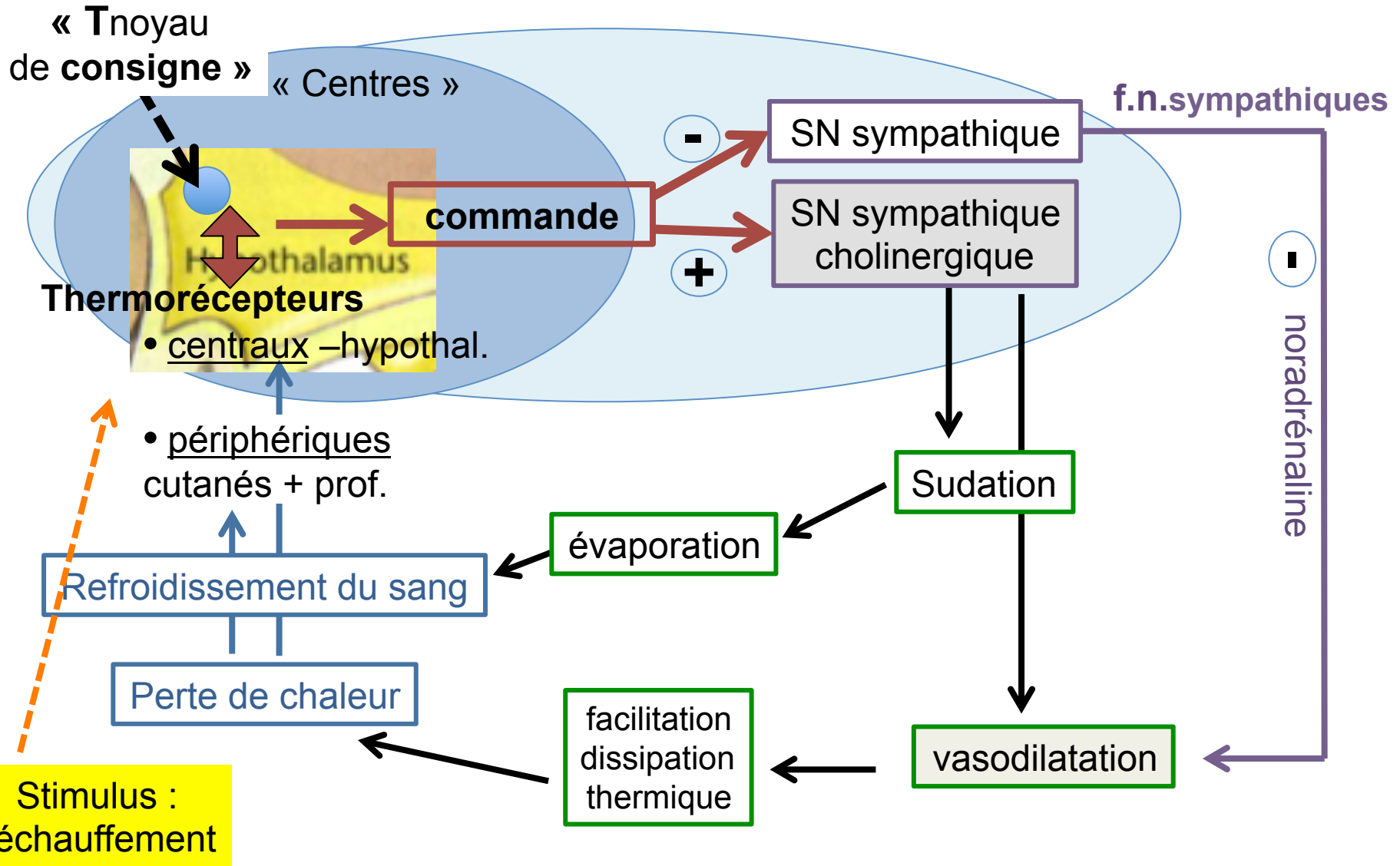
Production  
de chaleur

# Le « thermostat » réponses au **froid**

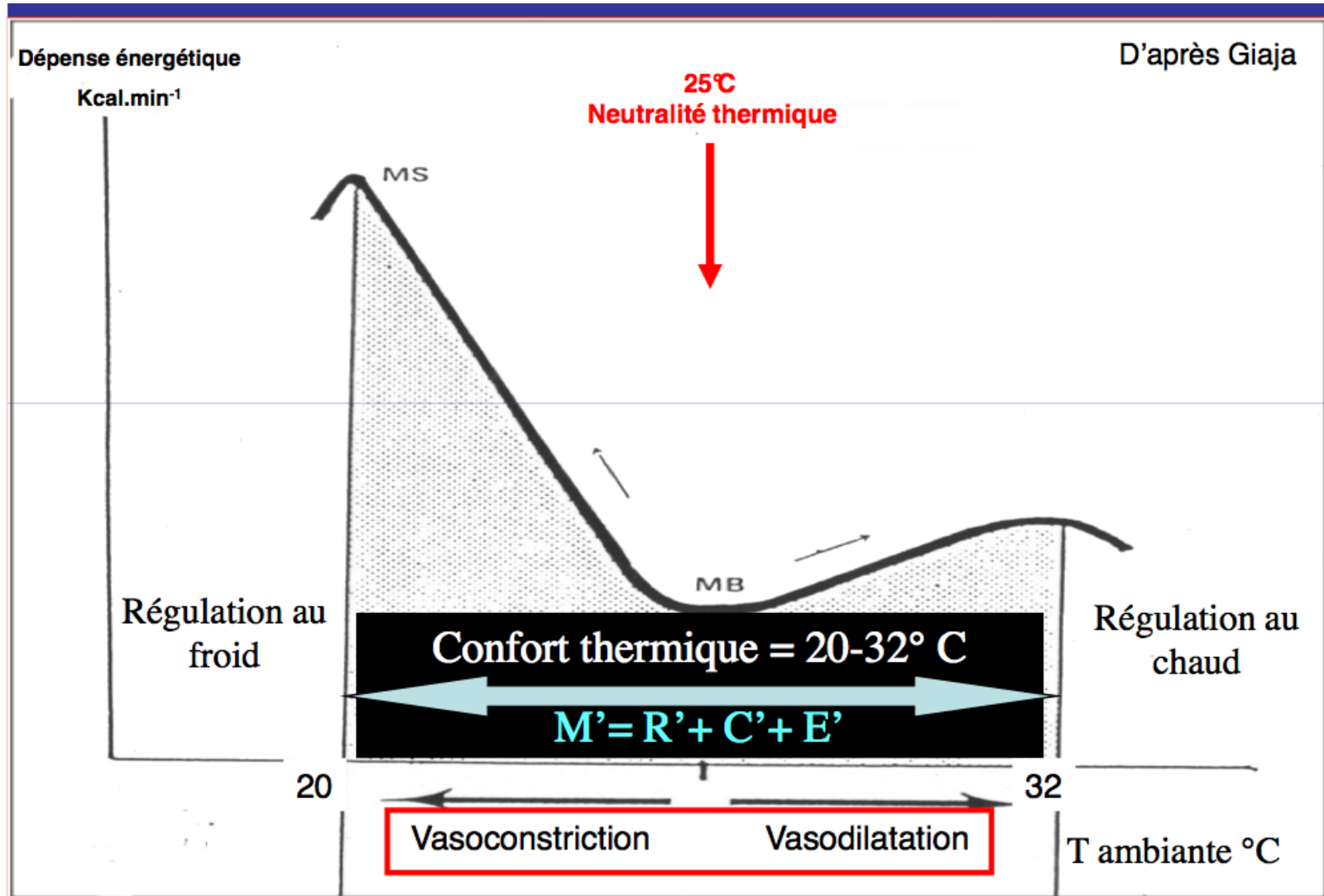




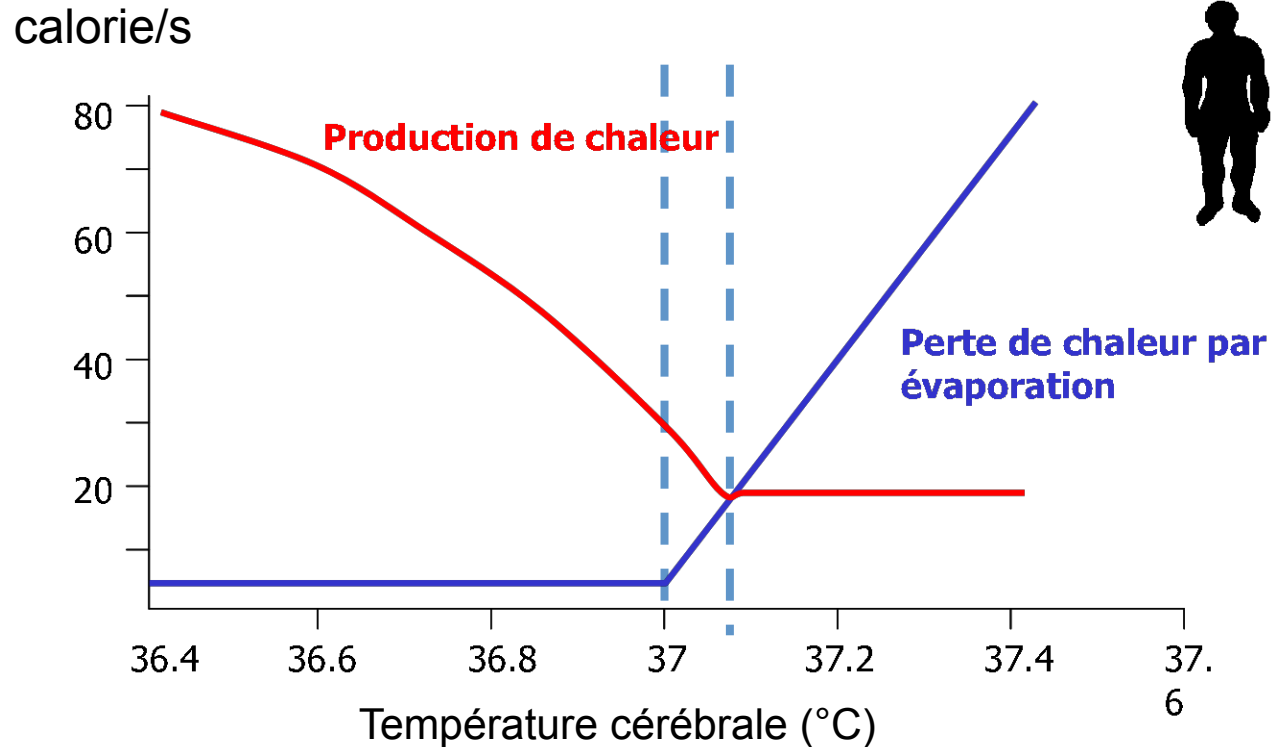
# Le « thermostat » réponses au **chaud**



# Zône de confort thermique



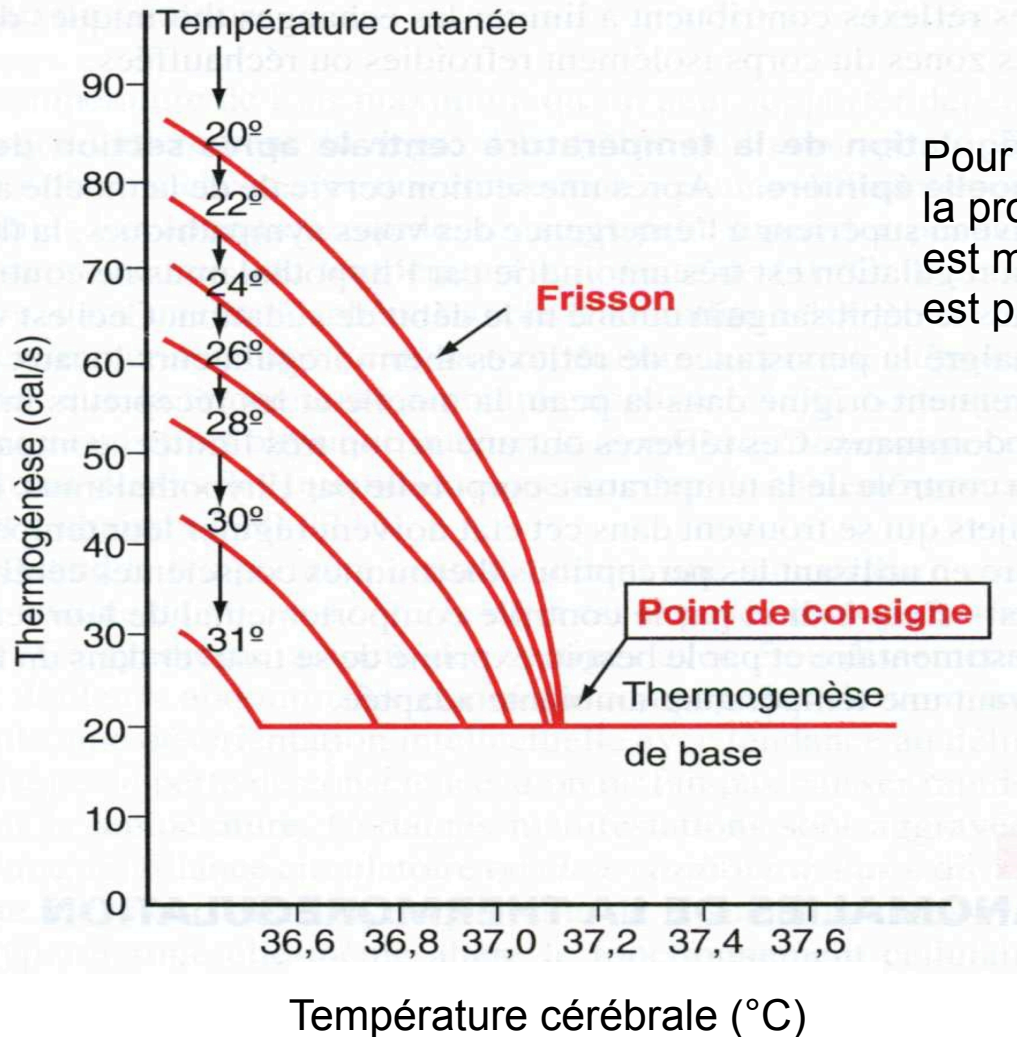
# Fonctionnement **simultané** de plusieurs mécanismes de régulation thermique



[ 1 cal = 4,18 J ]  
[ 1 cal/s = 4,18 W/s ]

Dans la même plage de températures cérébrales, mise en jeu simultanée de mécanismes de production de chaleur et de dissipation thermique

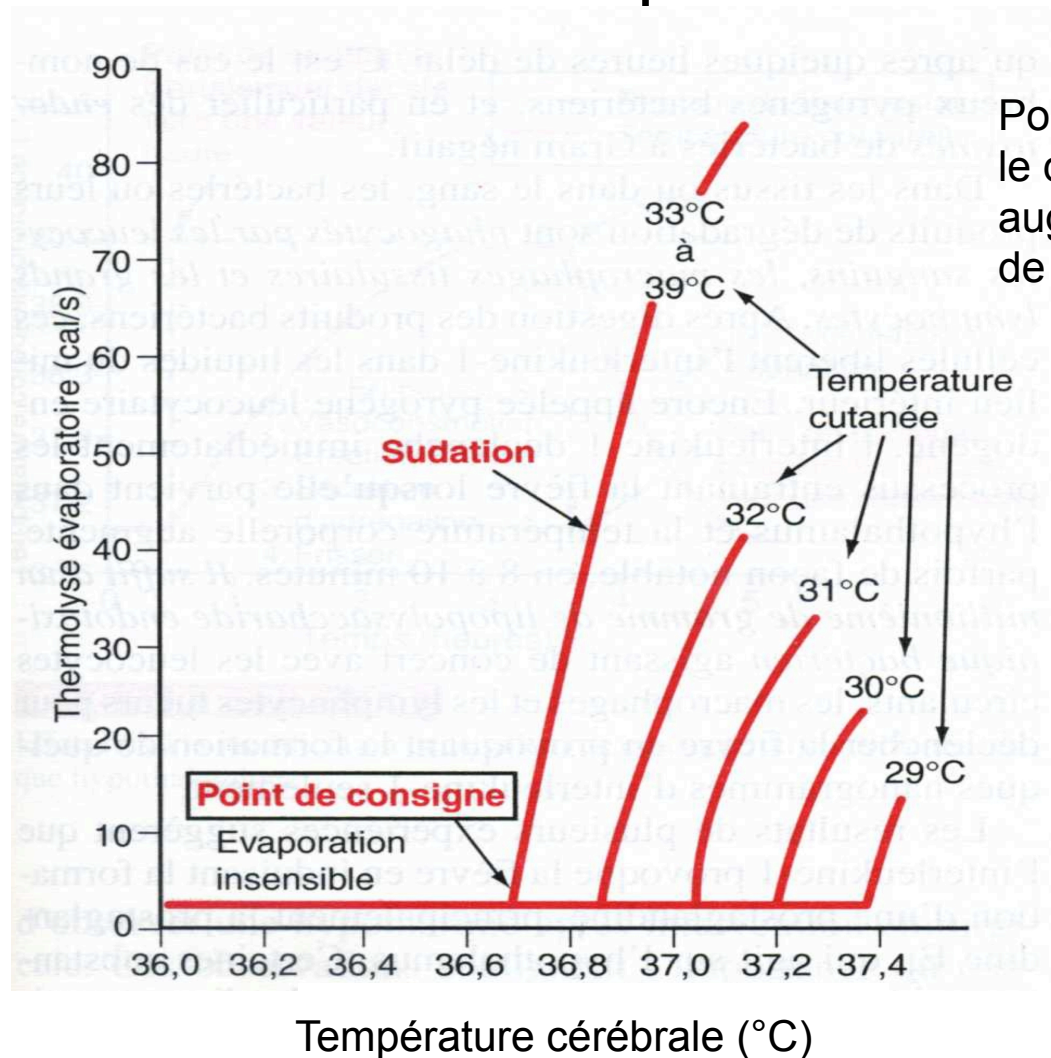
# La température cutanée modifie les réponses à la température cérébrale -1



Pour une même température cérébrale, la production de chaleur est moindre si la température cutanée est plus élevée

D'après Guyton AC, 2003  
Benziger TH, 1969

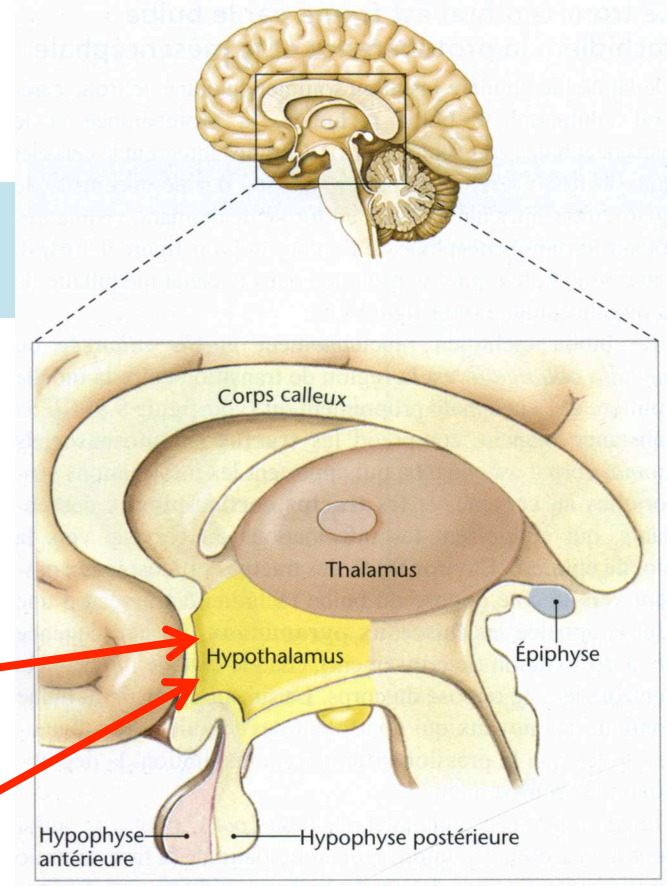
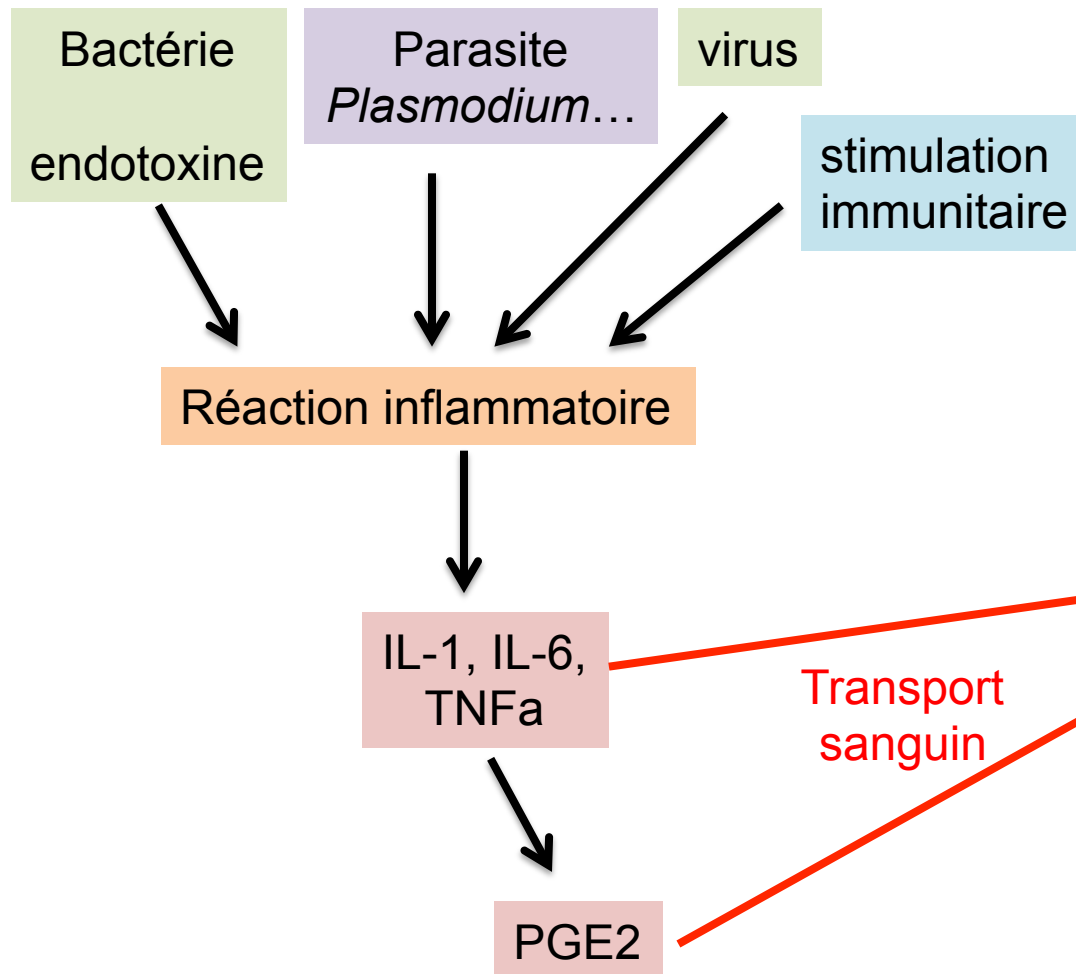
# La température cutanée modifie les réponses à la température cérébrale -2



Pour une même température cérébrale, le débit sudoral (et son évaporation) augmente avec l'augmentation de la température cutanée

D'après Guyton AC, 2003  
Benziger TH, 1969

# La fièvre : modification du réglage du « thermostat »

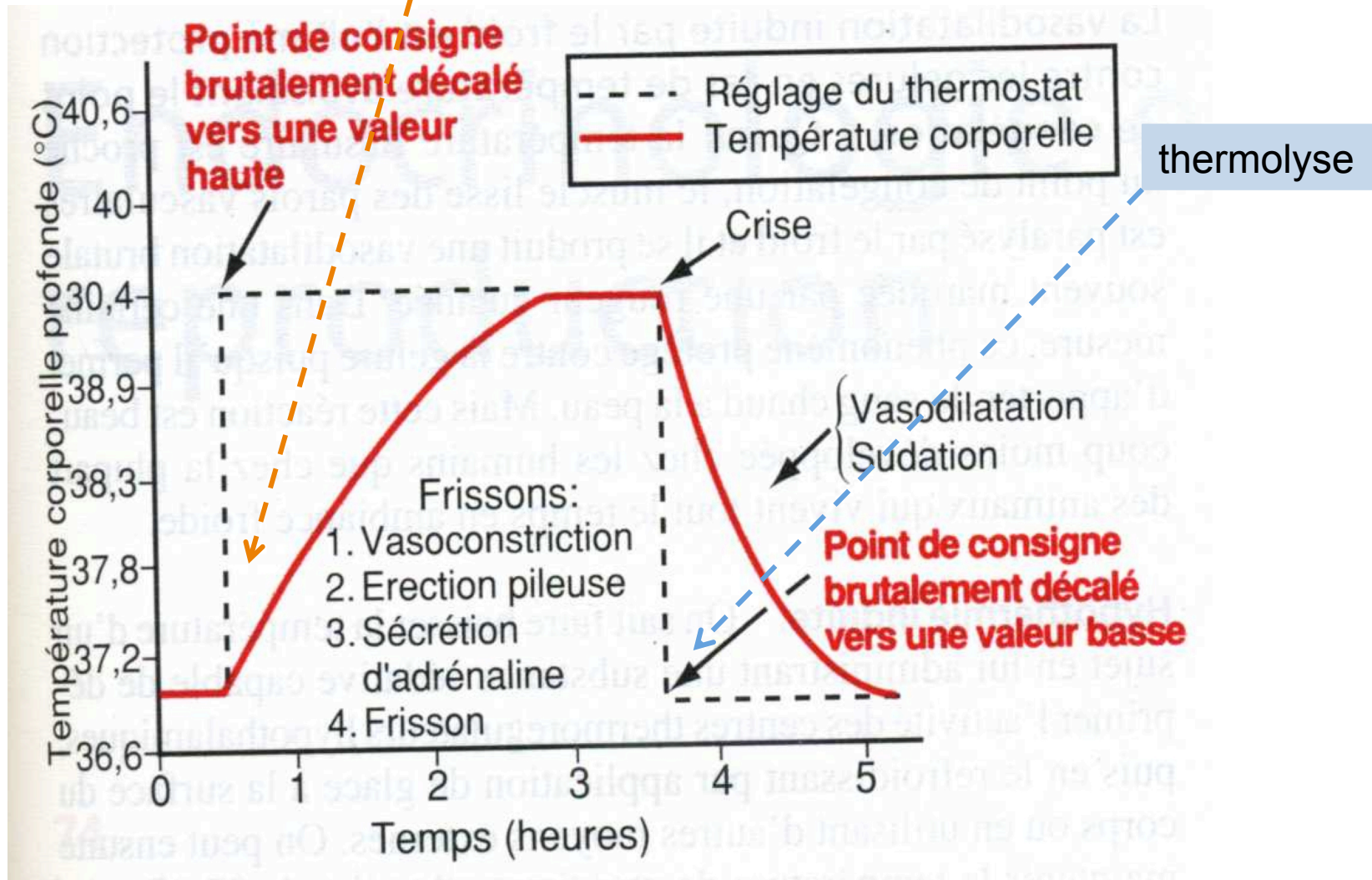


Changement du  
« point de consigne »  
37 °C → 40 °C...

**fièvre**

Conservation de la chaleur  
+ thermogénèse

# Episode fébrile



# Limites de la thermorégulation endotherme

Sujet nu :

*dans l'air*      20 °C – 32 °C    air calme, R = 0

Ta > 35 °C : débit sudoral et évaporation

*dans l'eau*      30 °C – 35 °C    eau calme

Comportement : position (surface / masse),  
vêtement, abri...

Sinon,    hypothermie / hyperthermie    léthales !



# Adaptation & acclimatement

**Adaptation** = mise en jeu des réponses fonctionnelles

adapt. *positionnelle* : couché  $\longleftrightarrow$  debout

adapt. *au froid* : amb. tempérée  $\longrightarrow$  amb. froide

adapt. *au chaud* : amb. tempérée  $\longrightarrow$  amb. chaude

Adaptation  $\pm$  **bonne** (performante) **individuellement**

**modifiée** par diverses substances, médicaments

**Ex.** l'**alcool** (vasodilatateur) **entrave** l'adaptation au froid

**Acclimatement** =  $\uparrow$  **efficacité** des réponses fonctionnelles

**Ex.** **froid** vasoconstriction et thermogénèse facultative

**Ex.** **chaud** débit sudoral (et débit cardiaque)

& **modification du seuil** de déclenchement

des réponses adapt.



**énergie**                    et                    **puissance (énergie/s)**

M métabolisme                     $\dot{M}$

R échange radiatif                     $\dot{R}$

K échange conductif                     $\dot{K}$

C échange convectif                     $\dot{C}$

E perte évaporatoire                     $\dot{E}$

W travail mécanique                     $\dot{W}$

S stockage ou perte                     $\dot{S}$