

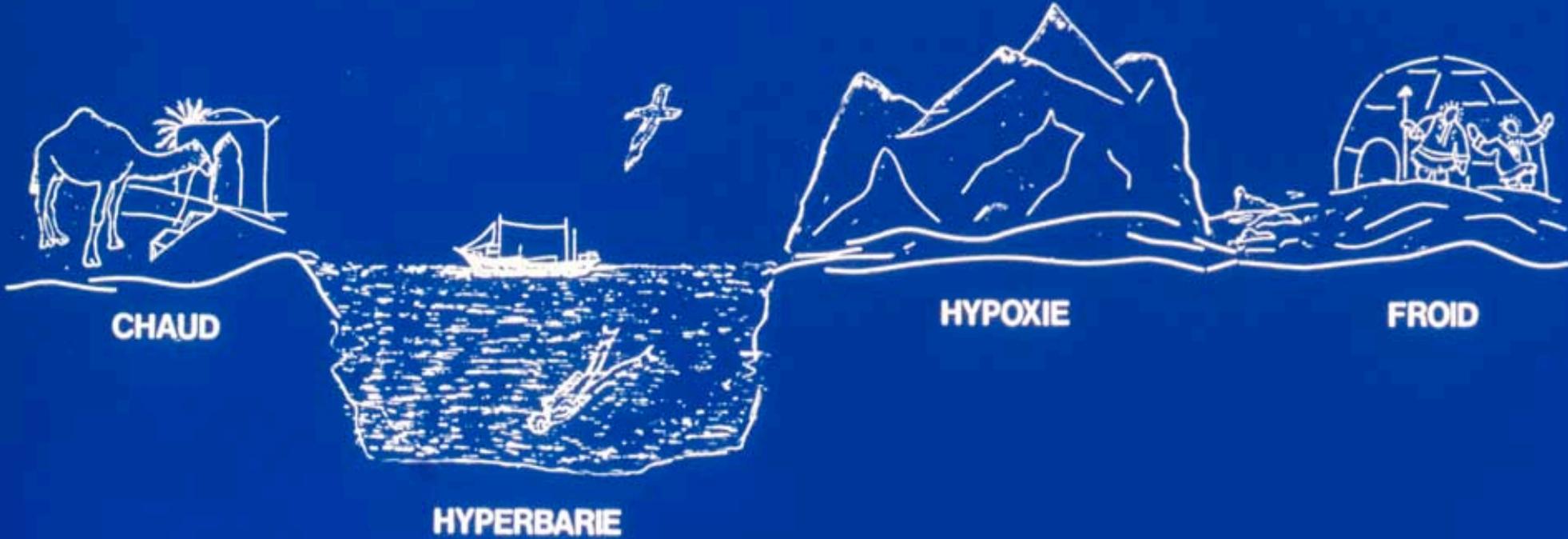
CSM- 17/10/11

# Adaptation physiologique de l'homme aux changements de température

Jean-Paul Richalet  
Université Paris 13

© SaharaMet .org

**MICROGRAVITE**



**CHAUD**

**HYPERBARIE**

**HYPOXIE**

**FROID**

# Thermorégulation

L'Homme est un animal à sang chaud:

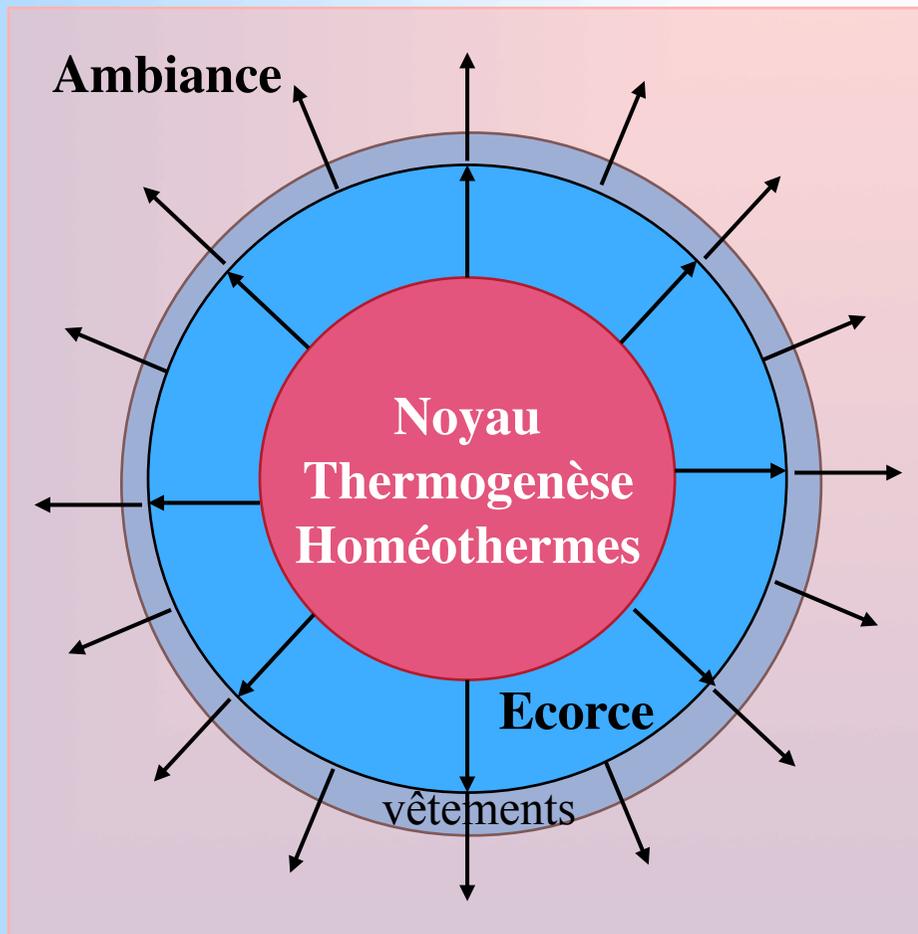
HOMEOTHERME

Par rapport à des organismes

POÏKILOTHERMES

(température variable – hibernation)

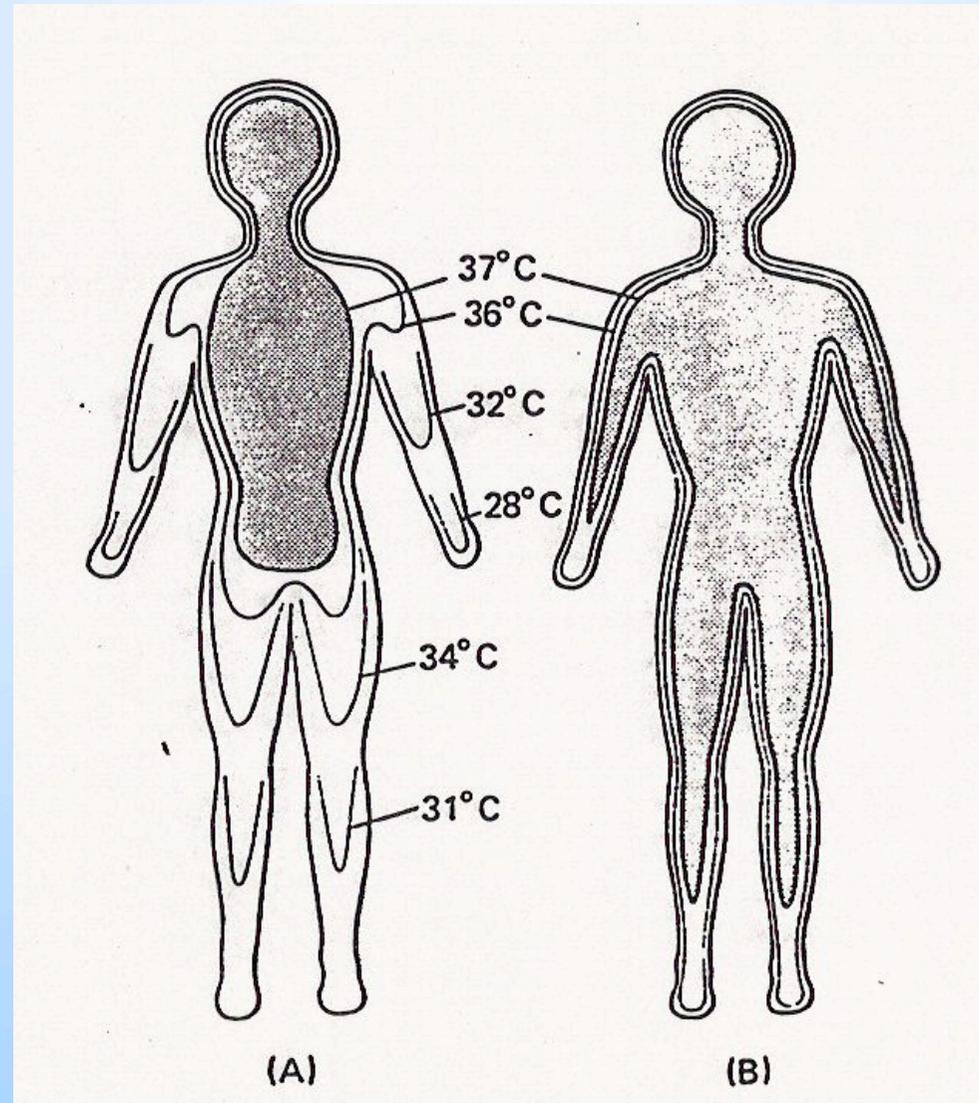
# Homéothermie



- L'homéothermie ne s'applique qu'au noyau
- Variations physiologiques
- La chaleur produite dans le noyau est transportée à travers l'écorce jusqu'à l'extérieur
- Les échanges de chaleur avec l'ambiance se font essentiellement par la peau

# Le noyau central

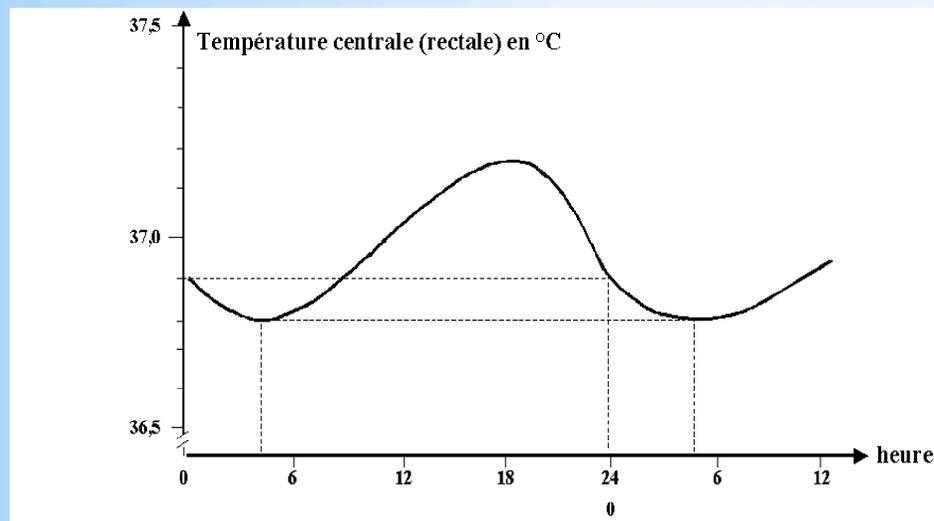
Ambiance  
froide



Ambiance  
chaude

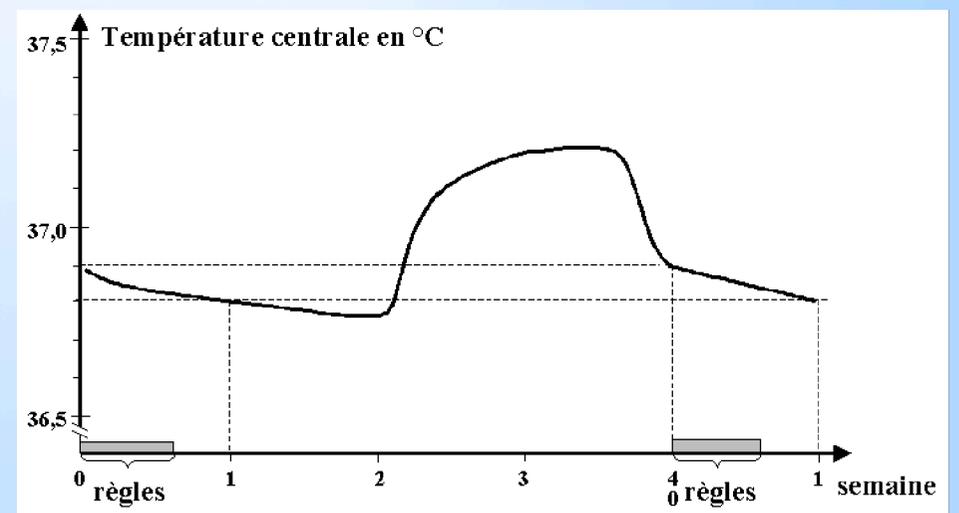
# Variations physiologiques

## Rythme nyctéméral



Température maximale à 17 h  
et minimale à 5h

## Rythme menstruel



+ 0,5° après l'ovulation

# Conditions de l'homéothermie

Température constante = Stock de chaleur constant

Gains de chaleur = Pertes de chaleur

Thermogenèse = Thermolyse

Equilibre entre thermogenèse et thermolyse

# 4 types d'échanges thermiques

- Echanges par conduction :  $\dot{Q}_{cal} = K(T1 - T2)$
- Echanges par convection :  $\dot{Q}_{cal} = c\dot{Q}_{fluide}(T1 - T2)$
- Echanges par radiation :  $\dot{Q}_{cal} \propto T^4$
- Chaleur de changement d'état : 2.5 kJ pour 1g de sueur

# Transport entre le noyau et l'écorce

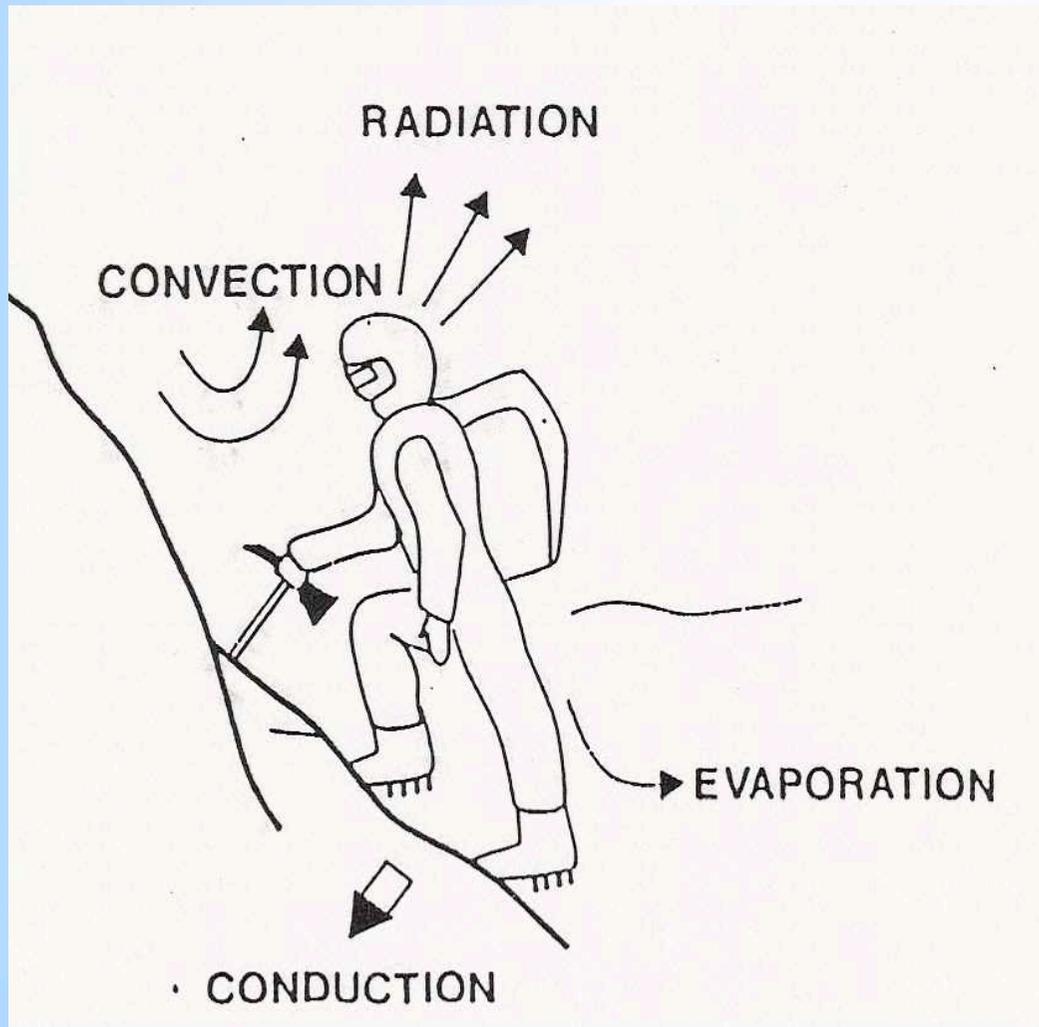
- Conduction négligeable :

$$\dot{Q}_{cal} = K.(T_{cent.} - T_{cut.})$$

- Convection forcée par le sang :

$$\dot{Q}_{cal} = c.\dot{Q}_{s.cut.}.(T_{art.} - T_{vein.})$$

# Echanges entre l'écorce et l'ambiance



- Conduction habituellement négligeable
- Convection naturelle ou forcée
- Radiations
- Evaporation

# Echanges par conduction

- $\dot{Q}_{cal} = K_c \cdot (T_{skin} - T_{obj}) \cdot A_k$

Acier:	83
Caoutchouc:	20
Chêne:	12
Pin:	4
Ecorce:	1

# Echanges entre l'écorce et l'ambiance

- **Convection naturelle**

Fonction de la position, des vêtements.

Immersion dans l'eau (25 fois plus de pertes)

- **Convection forcée**

Très variable selon les conditions : vent, mouvements.

# Echanges par convection

$$\dot{C} = K_c \cdot (T_{\text{skin}} - T_{\text{amb}}) \cdot A_c$$

$$K_c = 8,3 \cdot \sqrt{V(m/s) \cdot P/760}$$

Dans l'eau,  $K_c$  25 fois plus fort que dans l'air

Température de confort thermique dans l'eau:

repos 33-34 °C

exercice 26°C

Si température de l'eau > température de la peau:

**PEU DE POSSIBILITE DE THERMOREGULATION**

# Effet vent (*Wind chill index*)

$T (^{\circ}C)$ $V (km/h)$	4	2	-1	-4	-7	-9	-12	-15	-18	-21	-23	-26	-29	-32	-34
8	3	0	-3	-6	-9	-11	-14	-17	-21	-24	-26	-29	-32	-35	-37
15	-2	-6	-9	-13	-16	-19	-23	-26	-29	-33	-36	-39	-43	-47	-50
22	-6	-9	-12	-17	-21	-24	-28	-32	-35	-40	-43	-46	-50	-54	-57
30	-8	-11	-16	-20	-23	-27	-32	-36	-39	-43	-47	-51	-55	-60	-63
40	-9	-14	-18	-22	-26	-30	-34	-38	-42	-47	-51	-55	-59	-64	-67
50	-11	-15	-19	-24	-28	-32	-36	-41	-44	-49	-53	-57	-62	-66	-70
58	-12	-16	-20	-25	-29	-33	-37	-42	-45	-51	-55	-59	-64	-68	-72
65	-12	-17	-21	-26	-30	-34	-38	-43	-47	-52	-56	-60	-65	-70	-74

→ Effet ventilateur

D'après J. L. Lecroart.

# Echanges entre l'écorce et l'ambiance

- **Evaporation**

pertes obligatoires et pertes régulées (glandes eccrines) l'évaporation d'1g de sueur consomme 2,5 kJ soit 580 kcal / L de sueur.

- $\dot{E} = K_e \cdot (P_{ws} - P_{wa}) \cdot A_e$

Différence des pressions de vapeur d'eau (surface – air)

*Un sujet peut suer beaucoup sans que sa peau soit humide*

# Principe de la thermorégulation

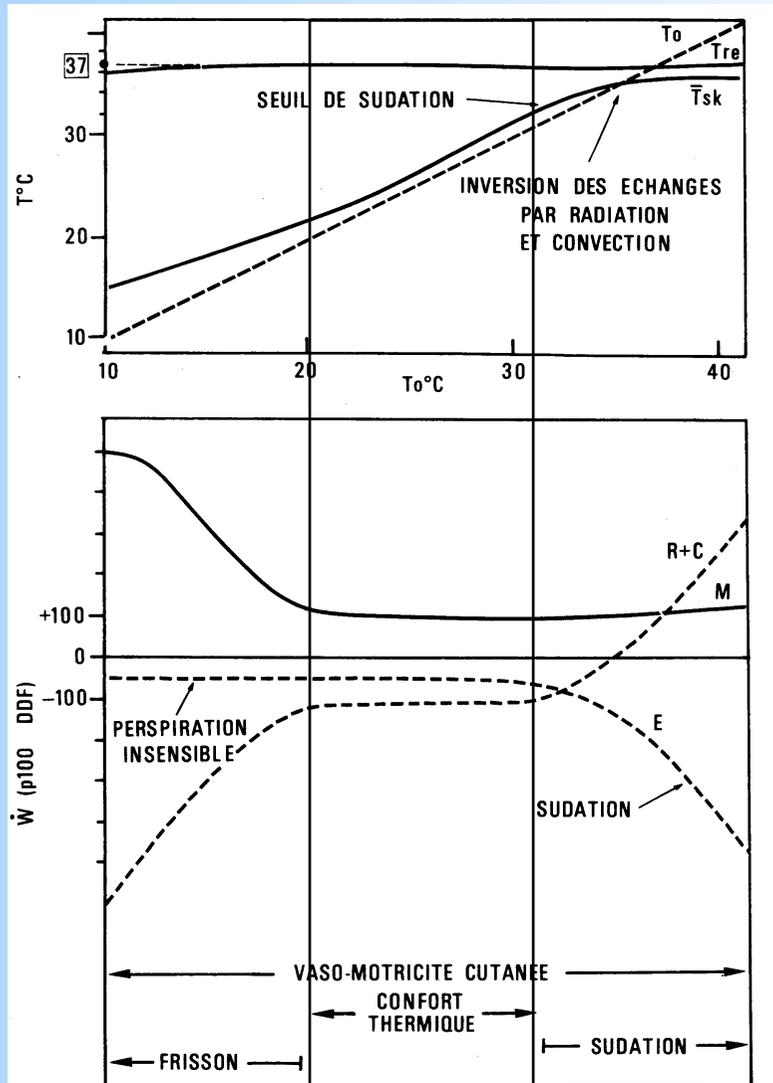
Equilibre entre thermogenèse et thermolyse

Thermogenèse = thermolyse

$$\dot{M} = \dot{R} + \dot{C} + \dot{K} + \dot{E}$$

Production de chaleur = perte de chaleur

# Différentes zones de thermorégulation



J.Durand (Physiologie humaine de P.Meyer)

## Zone de neutralité thermique

métabolisme minimum

20 à 32°

## Zone de régulation au chaud

efficace, peu coûteuse en énergie

au dessus de 32°

## Zone de régulation au froid

coûteuse en énergie et peu efficace

en dessous de 20°

# Thermorégulation au froid

## Lutter contre l'augmentation des déperditions thermiques

- **Augmenter la thermogenèse**

Frisson limité et fatiguant.

Thermogenèse chimique (du non frisson) objet de nombreuses études récentes, mais surtout limité au nouveau né...

Modifications comportementales: exercice volontaire

- **Limiter la thermolyse**

Vasoconstriction périphérique limitée, dangereuse.

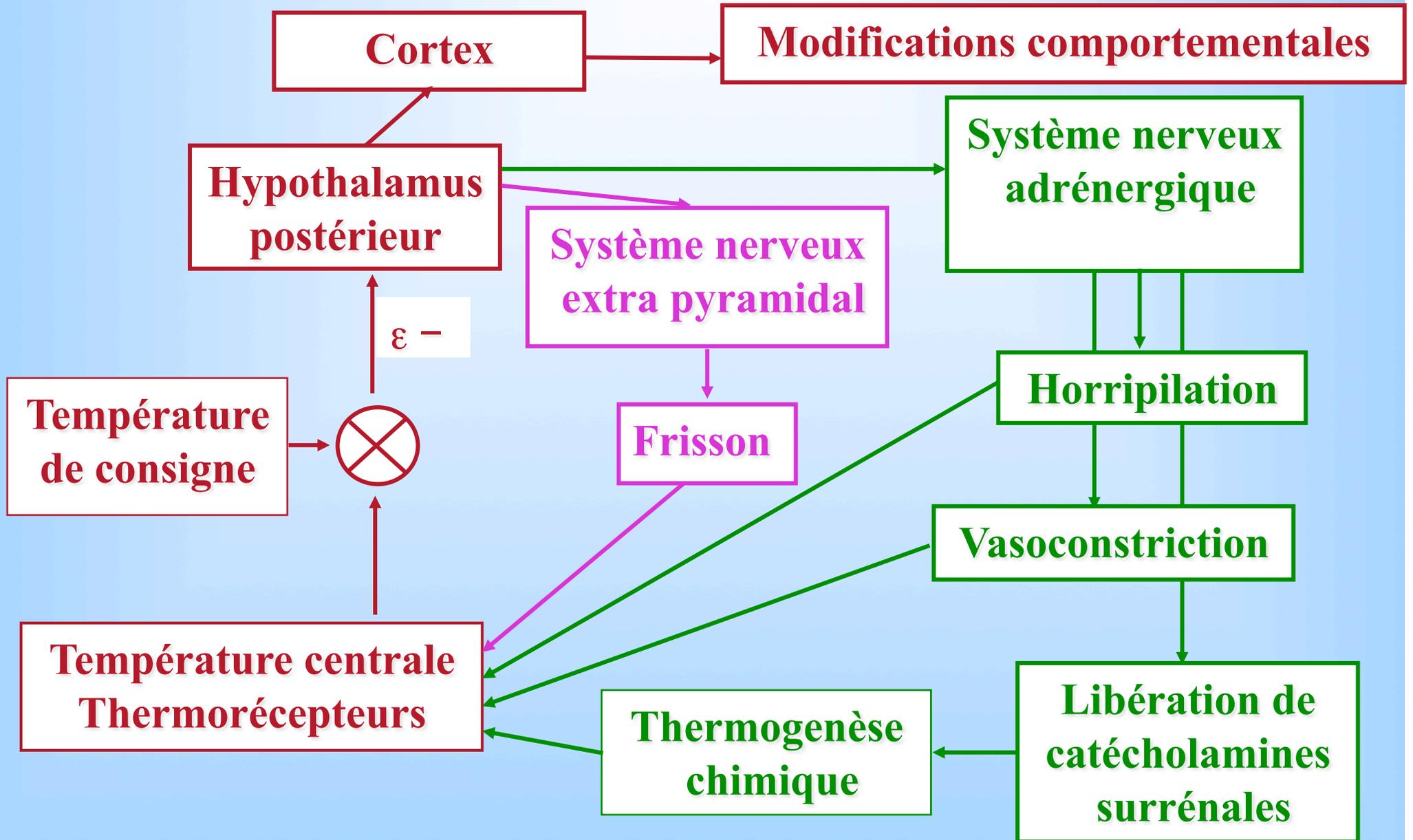
Horripilation inefficace.

Modifications comportementales: vêtements, chauffage

**Très peu efficace si on exclu les facteurs comportementaux**

**L'espèce humaine est très peu adaptée au froid.**

# Thermorégulation au froid



# Thermorégulation au chaud

- On ne peut pas diminuer la thermogénèse
- On augmente la thermolyse
  - Vasodilatation massive par inhibition des mécanismes adrénergiques, mais  $T_{\text{cut.}}$  doit rester inférieure à  $T_{\text{cent.}}$
  - **Evaporation compense seule tous les gains de chaleur.**  
Mécanisme cholinergique

Au dessus de  $35^{\circ}$  :  $\dot{M} + \dot{R} + \dot{C} + \dot{K} = \dot{E}$

L'adaptation au chaud est efficace  
et peu coûteuse en énergie

# Sudation = déshydratation ?

MÉTÉO : CANICULE AU SUD, INONDATIONS AU NORD



## Production sudorale:

- maximale 10 à 12 L / j
- la production de sueur n'est maintenue que si l'apport hydrique compense les pertes (équilibre hydro-minéral)

# Effets de l'entraînement physique sur les capacités sudorales

- Favorise mouvements d'eau et d'électrolytes entre les secteurs
  - limite la  $\searrow$  du V plasmatique
- ↗ capacité de thermolys sudorale
- ↗ capacité de stockage de chaleur

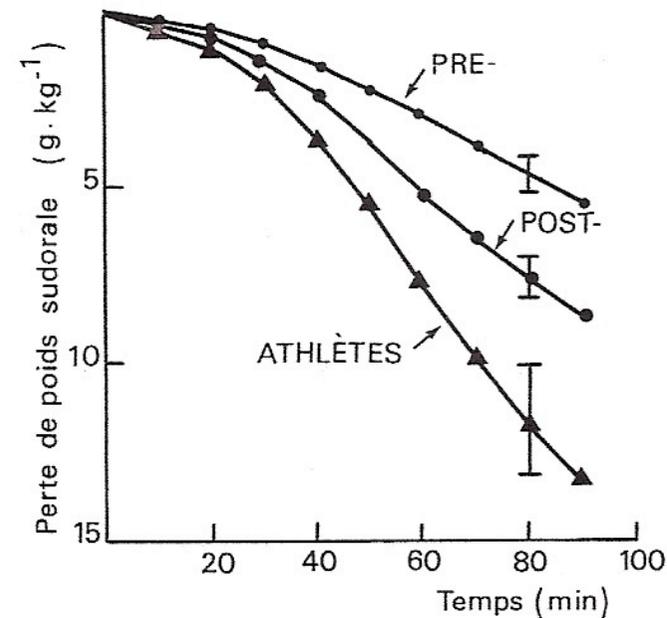
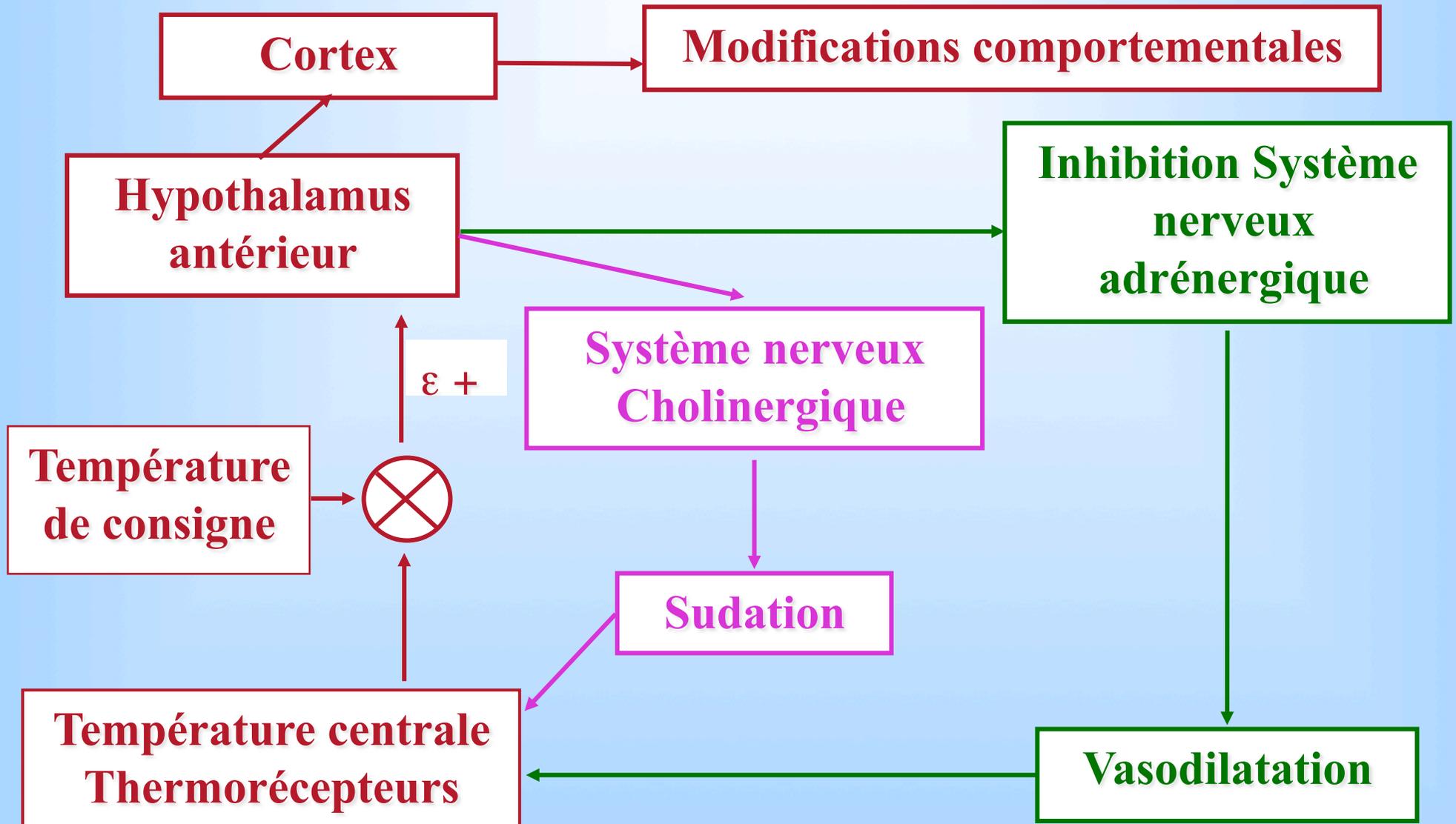


Fig. 10.3. Pertes sudorales au cours de l'exercice. Test d'hyperthermie contrôlée. Comparaison des résultats obtenus chez des athlètes et chez des sujets non entraînés avant et après acclimatation à la chaleur (Hénane et coll., *J. appl. Physiol.*, 1977, 43, 822-828).

# Thermorégulation au chaud



# Réactions d'acclimatation (long terme)

## Au froid

Hypothalamus  $\Rightarrow$  TRF  $\Rightarrow$  TSH  $\Rightarrow$  Hormone thyroïdienne

La thyroxine :

- Augmente le métabolisme
- Sensibilise les tissus à l'action de l'adrénaline

Baisse de la température centrale

## Au chaud

Hypertrophie des glandes sudoripares

- Augmente le débit sudoral (de 700 ml/h à 1,5 - 2l/h)
- Diminue les pertes de sel par hypotonie (de 15-30g/j à 3-5g/j)

Augmentation de la température centrale

# Ajustements comportementaux

Ils sont essentiels, chez l'Homme

- Vêtements – isolation thermique (CLO)
  - Fourrure des grands animaux arctiques 10
  - Vêtement d'expédition arctique 5
  - Vêtement d'hiver 2
  - Vêtement courant (demi-saison) 1
  - Tenue légère d'été 0,5
  - Tenue de sport 0,3
- Habitat
  - Chauffage, climatisation, circulation d'air, épaisseur des murs, orientation vis-à-vis du soleil, etc.
- Organisation de la vie
  - Horaires de travail, sieste, etc.

# Thermorégulation et sommeil

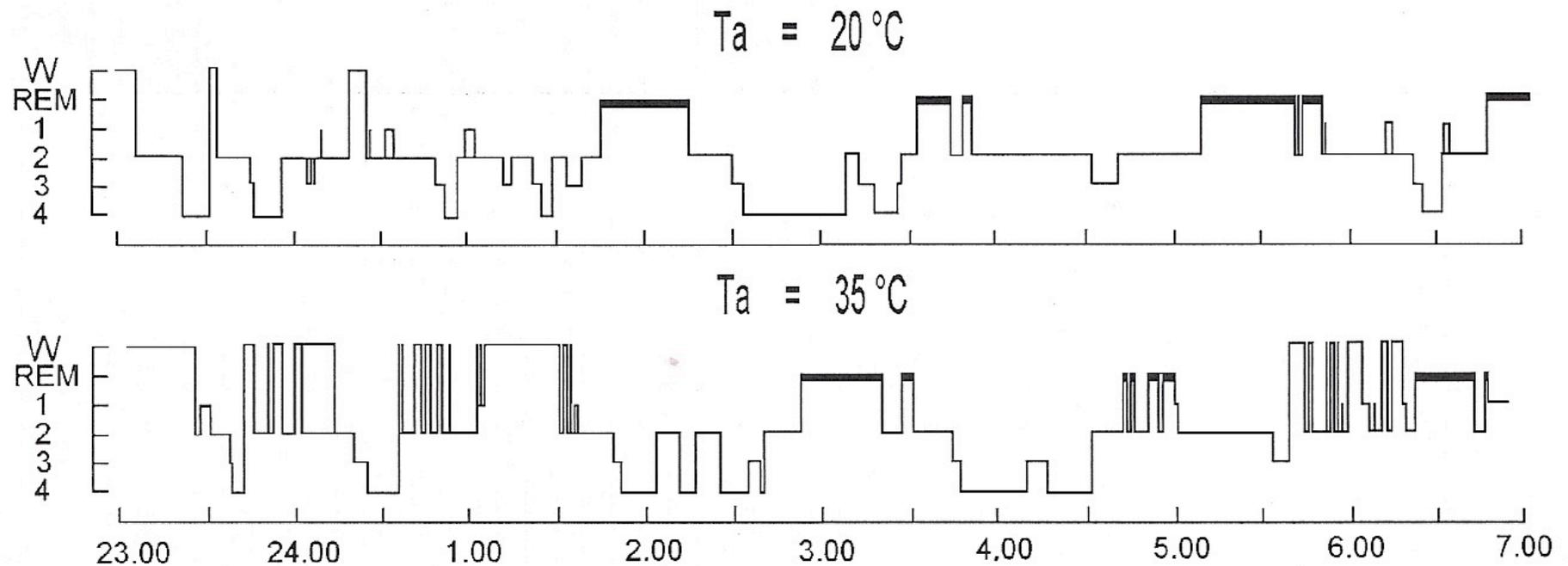
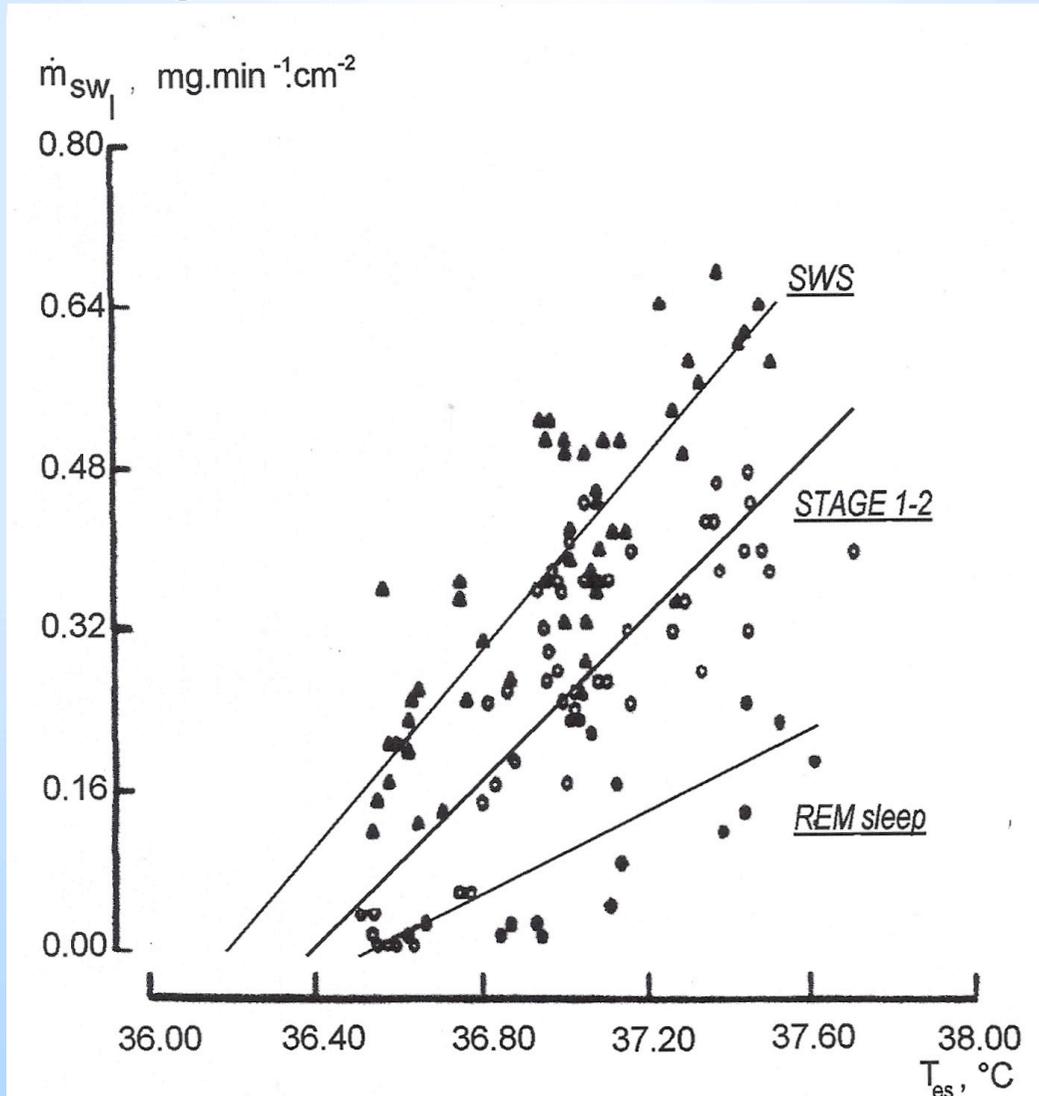


Figure 1 : Hypnograms of one adult sleeping at  $20^\circ\text{C}$  or at  $35^\circ\text{C}$  of air temperature (unpublished data)

(Véronique Bach, Amiens)

# Thermorégulation, sudation et sommeil



(Figure 2: Relationship between local sweating rate ( $\dot{m}_{sw}$ ,  $\text{mg}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) and esophageal temperature ( $T_{es}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ) during slow wave sleep (SWS), sleep stage 2 and rapid eye movement (REM) sleep in adult humans (unpublished data).

(Véronique Bach, Amiens)

# Thermorégulation et vieillissement

## *Is Older Colder or Colder Older ?*

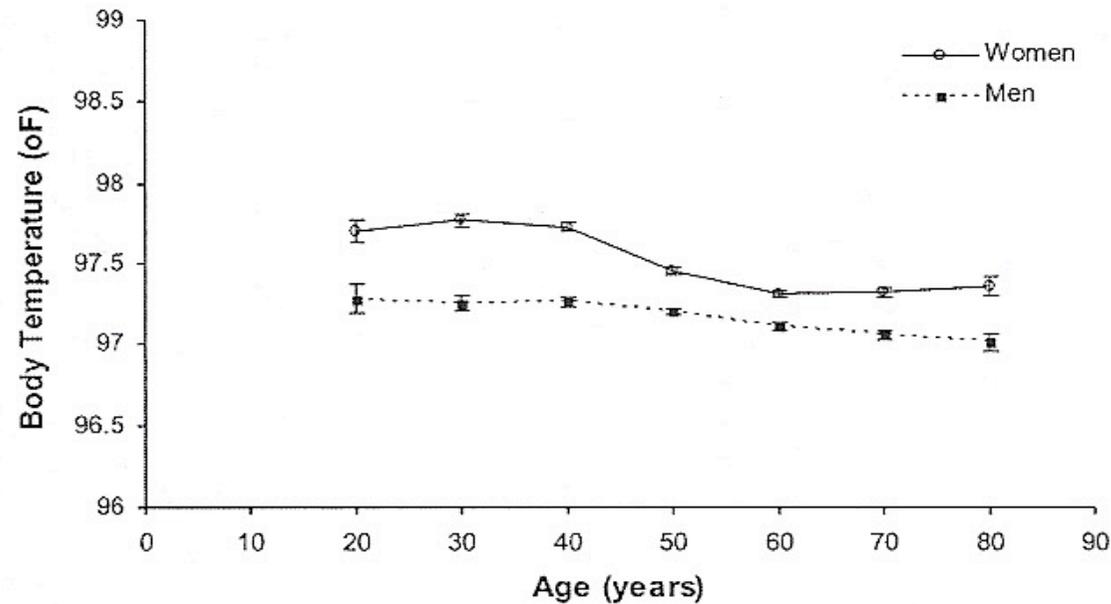


Figure 4. Mean body temperature by age adjusted for body mass index and white blood cell count in white participants with normal thyroid-stimulating hormone. Error bars =  $\pm$ standard error of the mean.

# Thermorégulation, sudation et âge

Les capacités intrinsèques de thermorégulation au chaud (sudation) ne dépendraient pas directement de l'âge, mais du niveau d'activité physique ( $VO_2\text{max}$ ) et du niveau d'hydratation qui lui-même dépend du seuil de déclenchement de la soif (altéré avec l'âge).

(Drinkwater et al., 1982)

La sensibilité des glandes eccrines à la stimulation diminuerait avec l'âge, ce qui expliquerait une diminution du débit sudoral induit par un stress thermique ou un exercice

(Anderson et al., 1987)

Environnement naturel = Espace *habituel*

Environnement extrême = Espace *inhabituel*

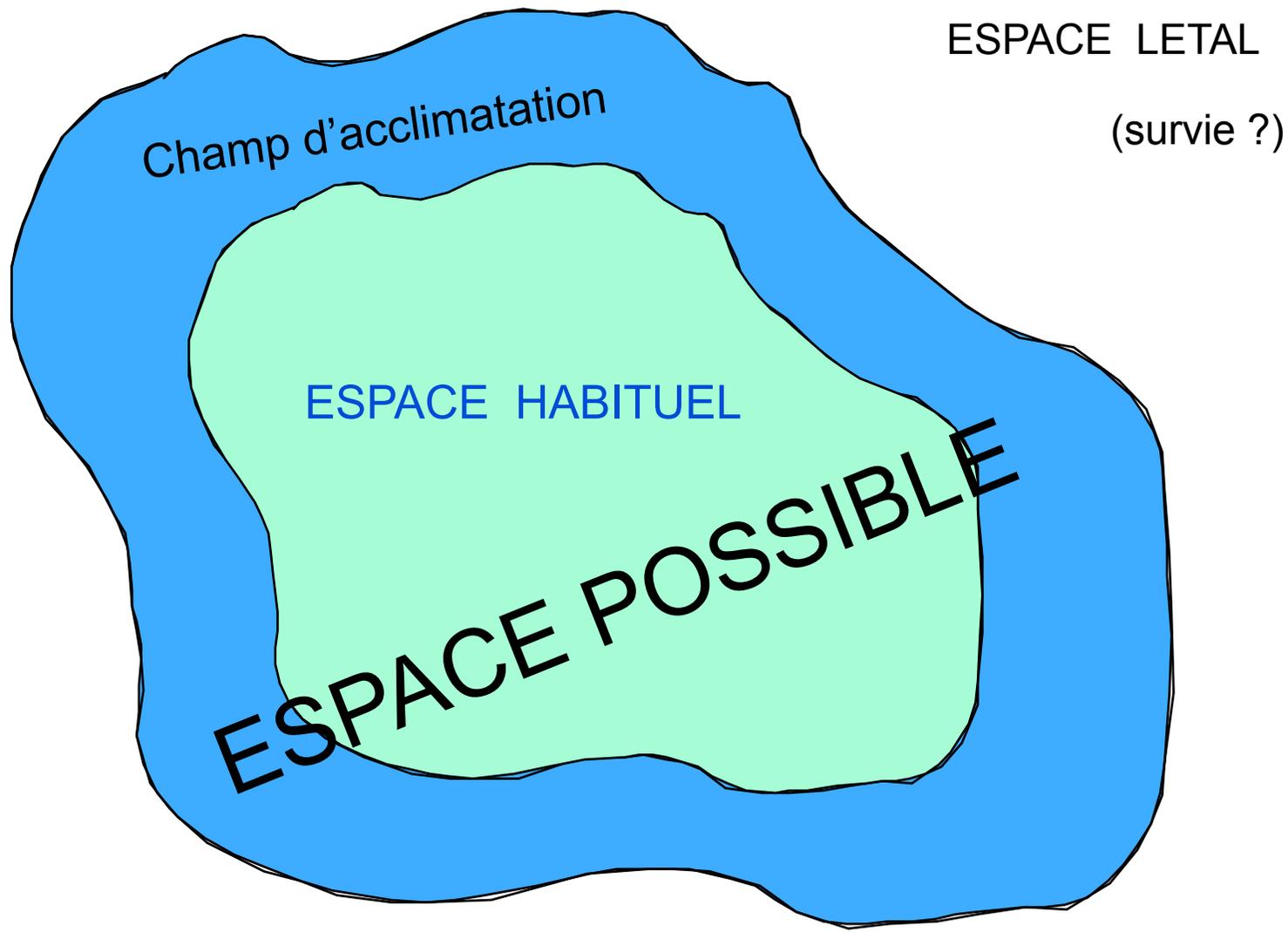
\* *léthal*

\* *adaptation possible*

- niveau **CULTUREL**

- niveau **PHYSIOLOGIQUE**

- niveau **GÉNÉTIQUE**



Champ d'acclimatation

ESPACE HABITUEL

ESPACE POSSIBLE

ESPACE LETAL

(survie ?)

# Adaptation à un environnement inhabituel :

## NIVEAU CULTUREL

⇒ ENVIRONNEMENT DE SUBSTITUTION

HABIT



HABITACLE



HABITAT

# Adaptation à un environnement inhabituel :

## **NIVEAU CULTUREL**

### ***ADAPTATION TECHNOLOGIQUE :***

Pas de tentative pour adapter l'organisme humain à l'environnement

L'objectif est de SOUSTRAIRE l'homme aux effets de l'environnement,  
grâce à un environnement TAMPON

Adaptation à un environnement inhabituel :

## NIVEAU PHYSIOLOGIQUE



**MISE EN JEU DE MÉCANISMES D'ACCLIMATATION**

Objectif : recréer au niveau cellulaire un *environnement similaire* à l'environnement habituel

Caractéristiques : les mécanismes mis en jeu *disparaissent* quand l'individu est soustrait à l'environnement hostile

# Adaptation à un environnement inhabituel :

## NIVEAU GÉNÉTIQUE



Les mécanismes d'adaptation sont inscrits dans le patrimoine génétique de l'individu. Ils permettent une activité normale pour l'espèce considérée

**ENVIRONNEMENT NATUREL = COÛT NUL**

# Coût de l'adaptation

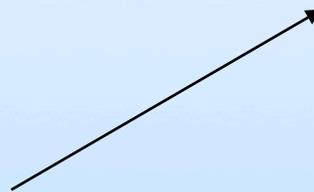
Coût  
croissant



**Génétique (=0)**



**Physiologique**



**Culturel**

**AIGU**



**CHRONIQUE**

**HABITAT**

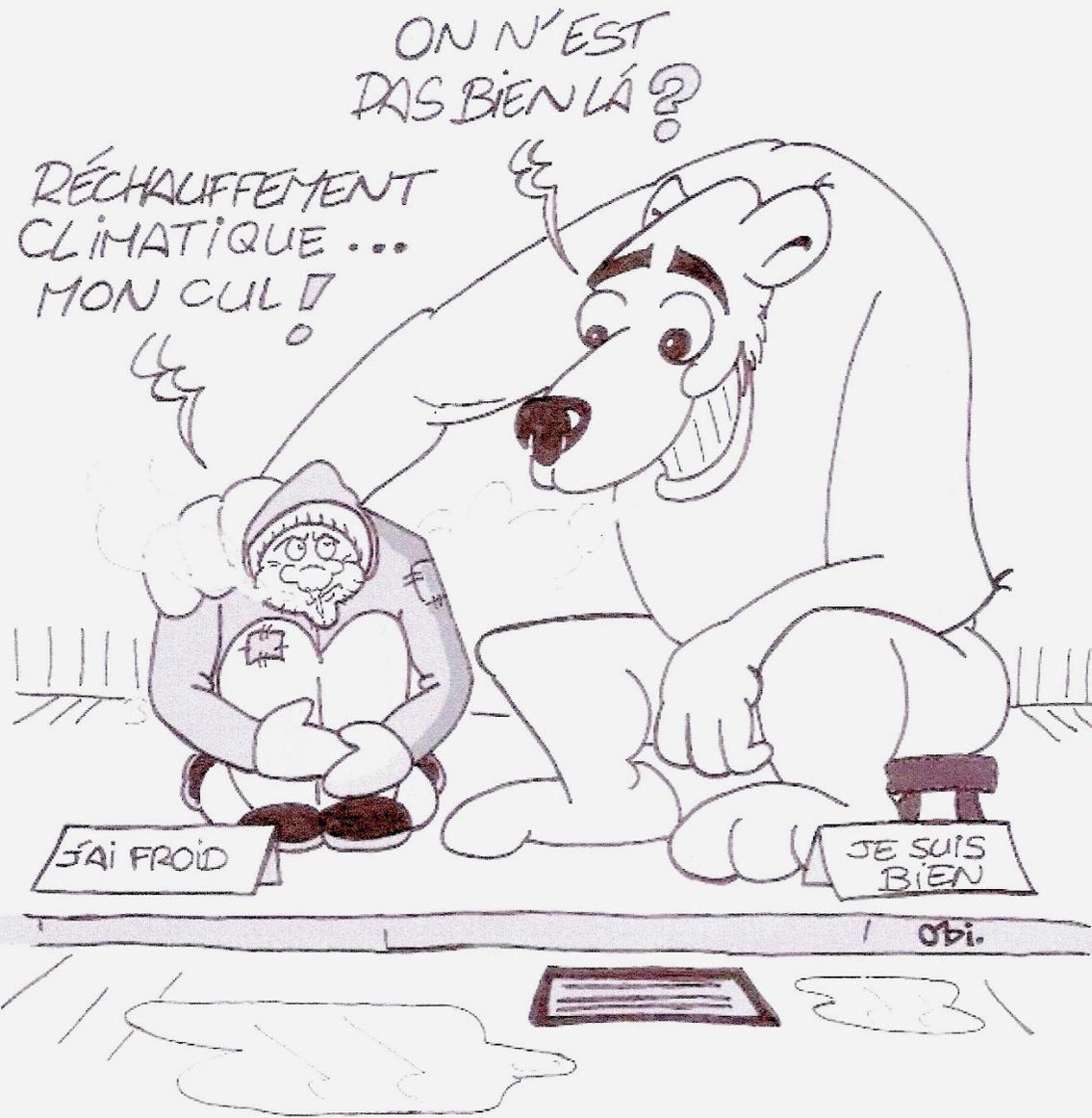


**HABITACLE**



**HABIT**

# VAGUE DE FROID POLAIRE SUR LA FRANCE !



# Conclusion

- Les mécanismes physiologiques d'adaptation aux contraintes thermiques sont limitées chez l'Homme
- Les réponses socio-comportementales sont essentielles

# CANICULE : RESTONS VIGILANTS...

SI T'AS LE MOINDRE SOUCI,  
JE T'AI LAISSÉ LE NUMÉRO  
DES POMPES FUNÈBRES  
SUR LA PORTE DU  
FRIGO !



GOUSSELLE