

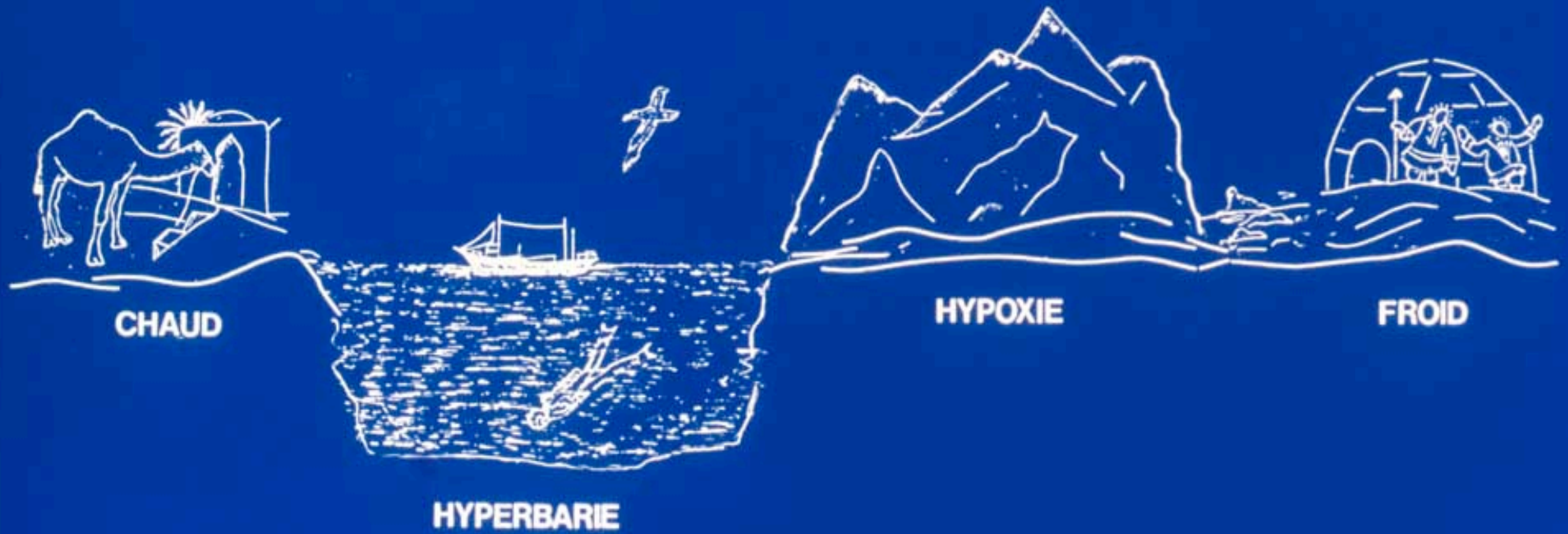
Thermorégulation

- JP Richalet
- DU de Médecine de Montagne
- Université Paris 13

Adaptations à l'environnement

Un modèle exceptionnel
pour mieux comprendre
les mécanismes de régulation physiologiques

MICROGRAVITE

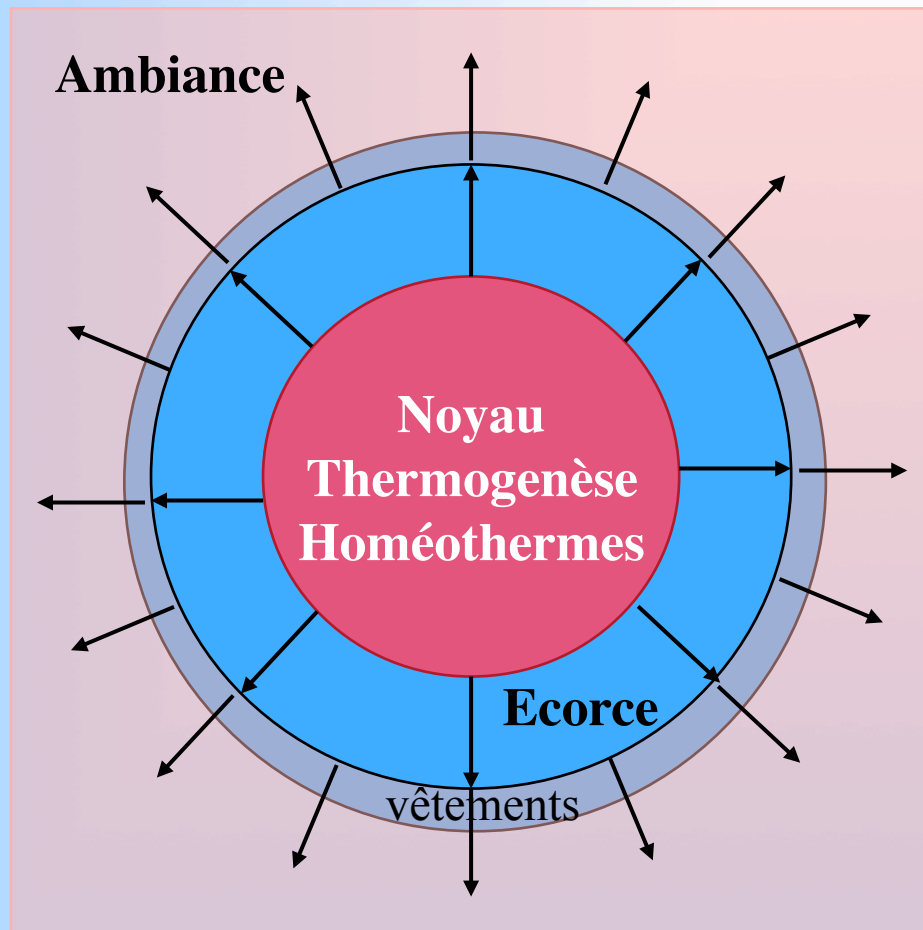


Thermorégulation

L'Homme est un animal à sang chaud:
HOMEOTHERME

Par rapport à des organismes
POÏKILOTHERMES
(température variable – hibernation)

Homéothermie



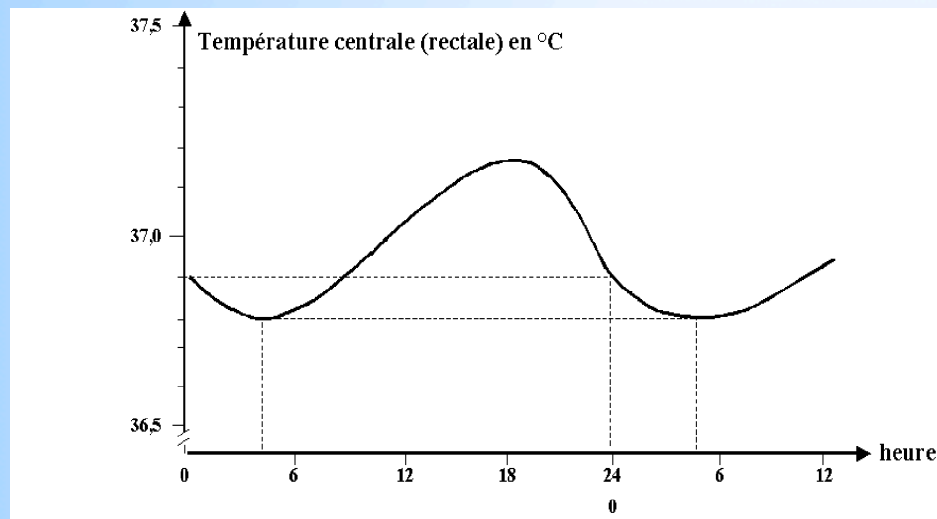
- L'homéothermie ne s'applique qu'au noyau
- Variations physiologiques
- La chaleur produite dans le noyau est transportée à travers l'écorce jusqu'à l'extérieur
- Les échanges de chaleur avec l'ambiance se font essentiellement par la peau

Mesure de la température centrale

- Référence: température rectale
- Température tympanique
- Température oesophagienne
- Température buccale: $0,5^{\circ}\text{C} < \text{temp. centrale}$

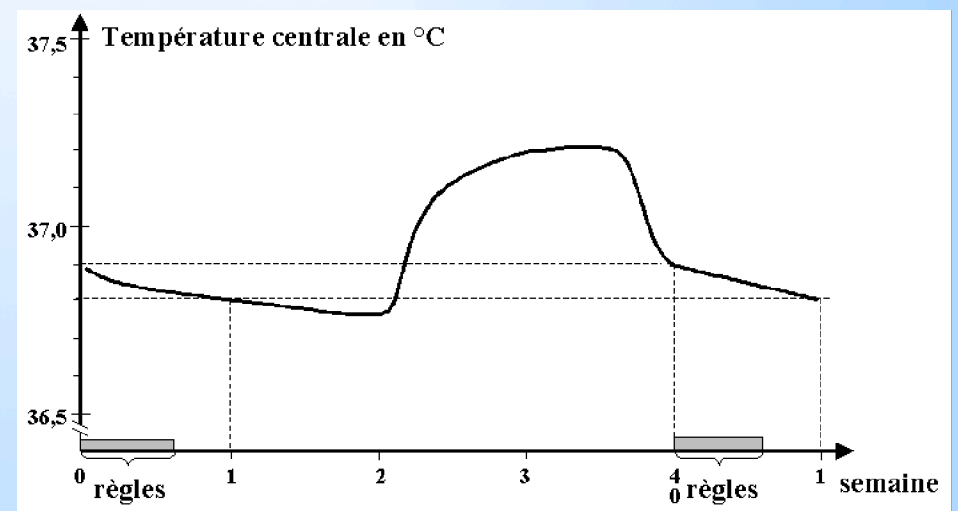
Variations physiologiques

Rythme nycthéméral



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

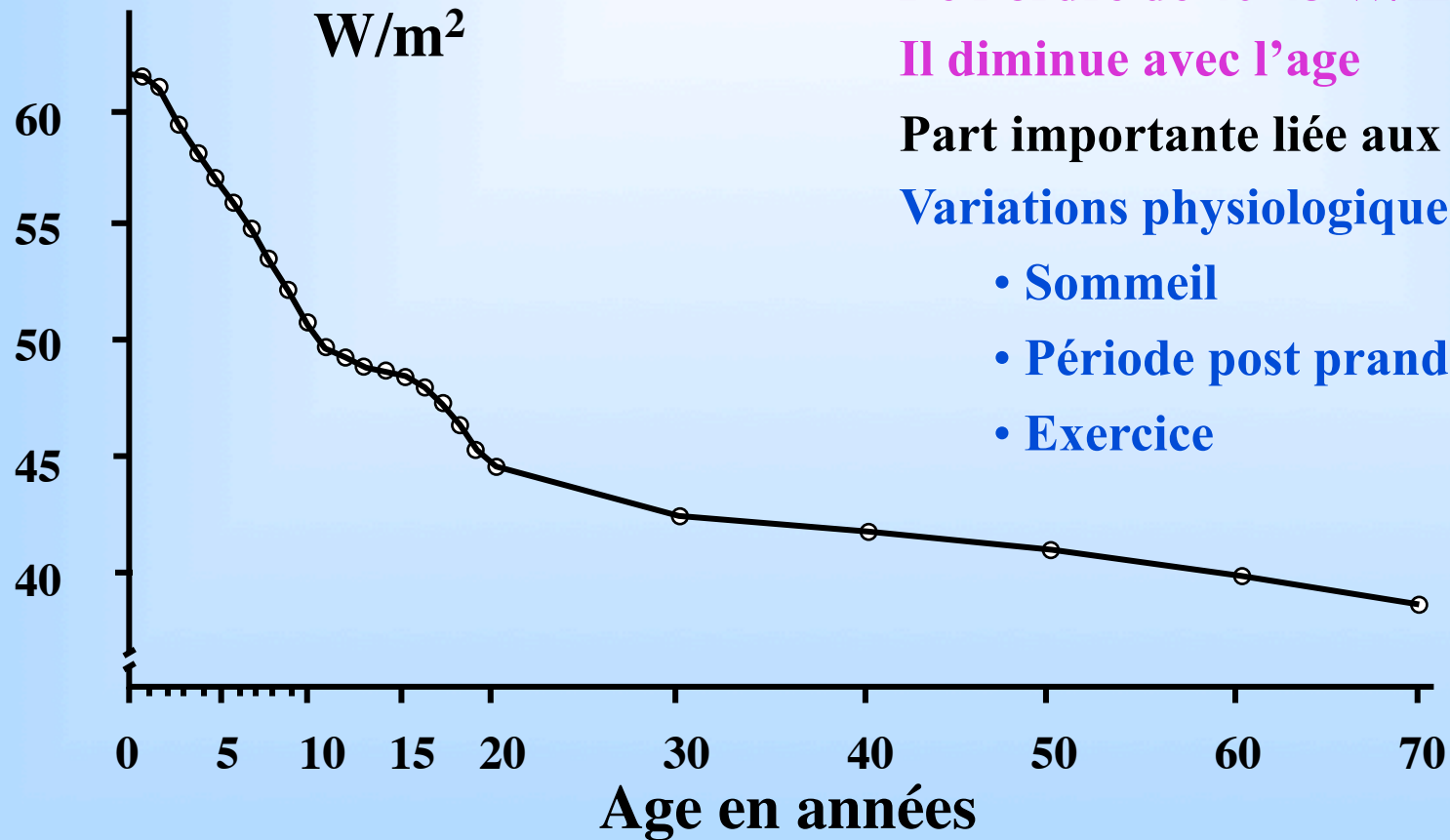
4 types d'échanges thermiques

- 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

Métabolisme de base

Métabolisme de base

W/m^2



De l'ordre de 40-45 W/m^2

Il diminue avec l'âge

Part importante liée aux pompes à sodium

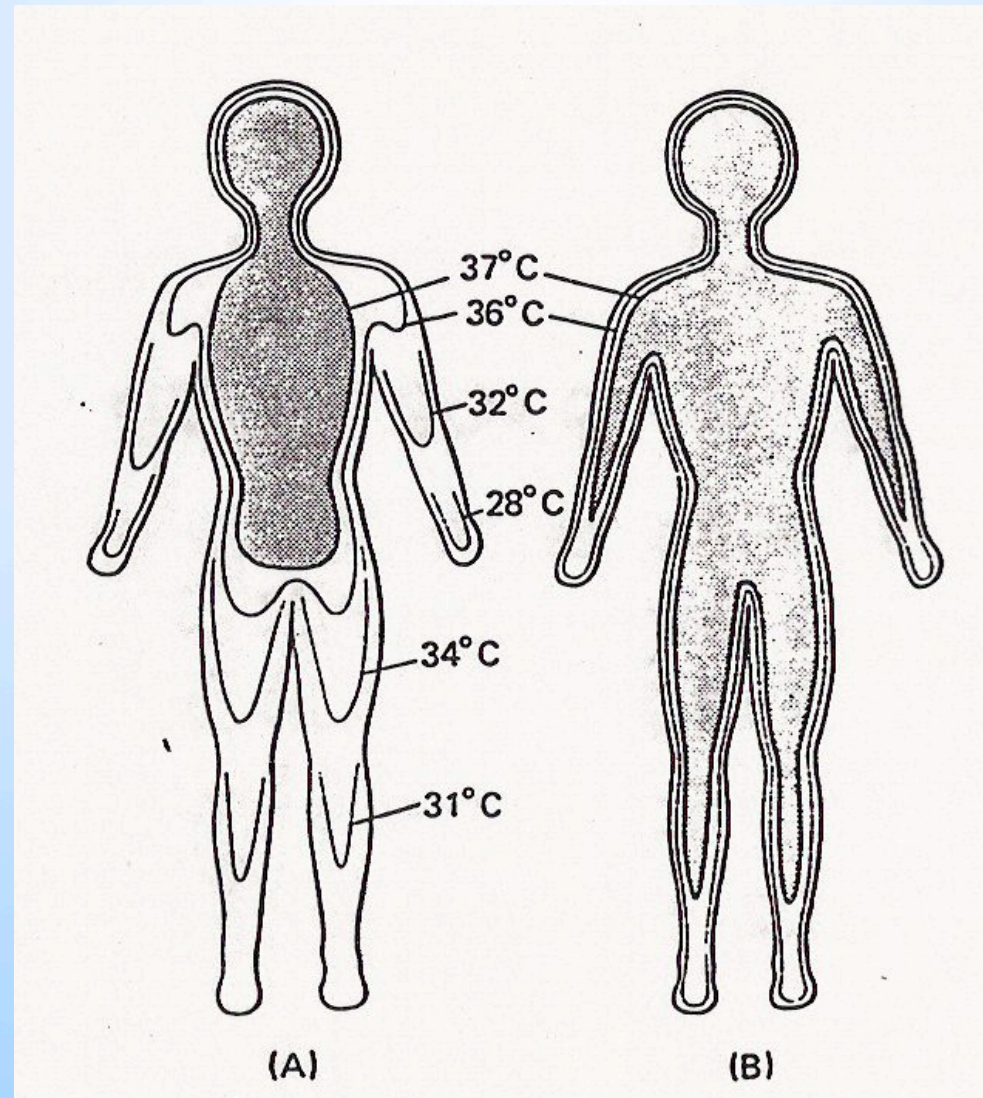
Variations physiologiques :

- Sommeil
- Période post prandiale
- Exercice

Fleisch, 1951

Le noyau central

Ambiance
froide



Ambiance
chaude

Transport entre le noyau et l'écorce

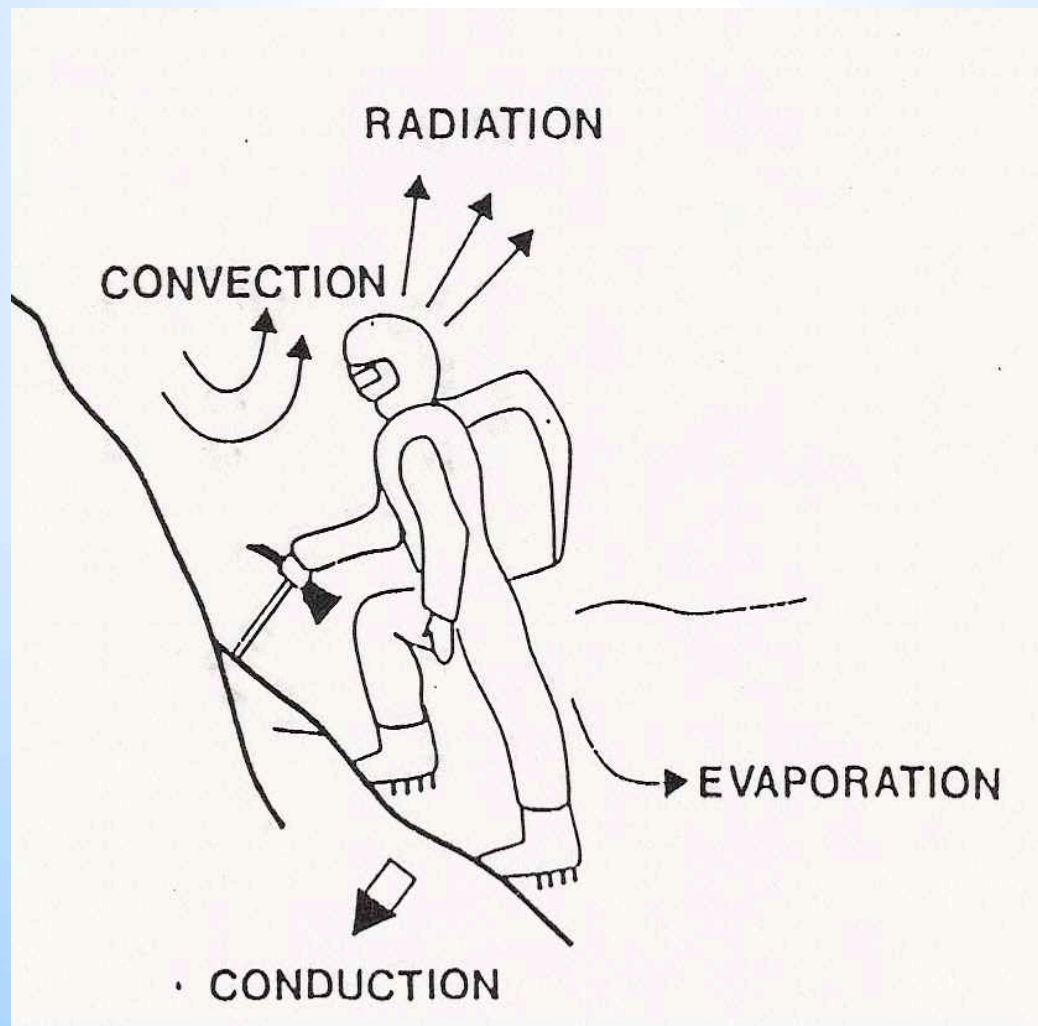
- Conduction négligeable :

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

- Convection forcée par le sang :

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

Echanges entre l'écorce et l'ambiance



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

- **Conduction habituellement négligeable**
- **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.
- **Radiations**
- **Evaporation**

Convection naturelle



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*)

$T (^{\circ}\text{C})$ $V (\text{km/h})$	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

D'après J. L. Lecroart.

Echanges entre l'écorce et l'ambiance

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

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

Echanges par évaporation

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

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

Efficacité de la sudation = Evaporation / Production

Un sujet peut suer beaucoup sans que sa peau soit humide

Principe de la thermorégulation

Equilibre entre thermogenèse et thermolyse

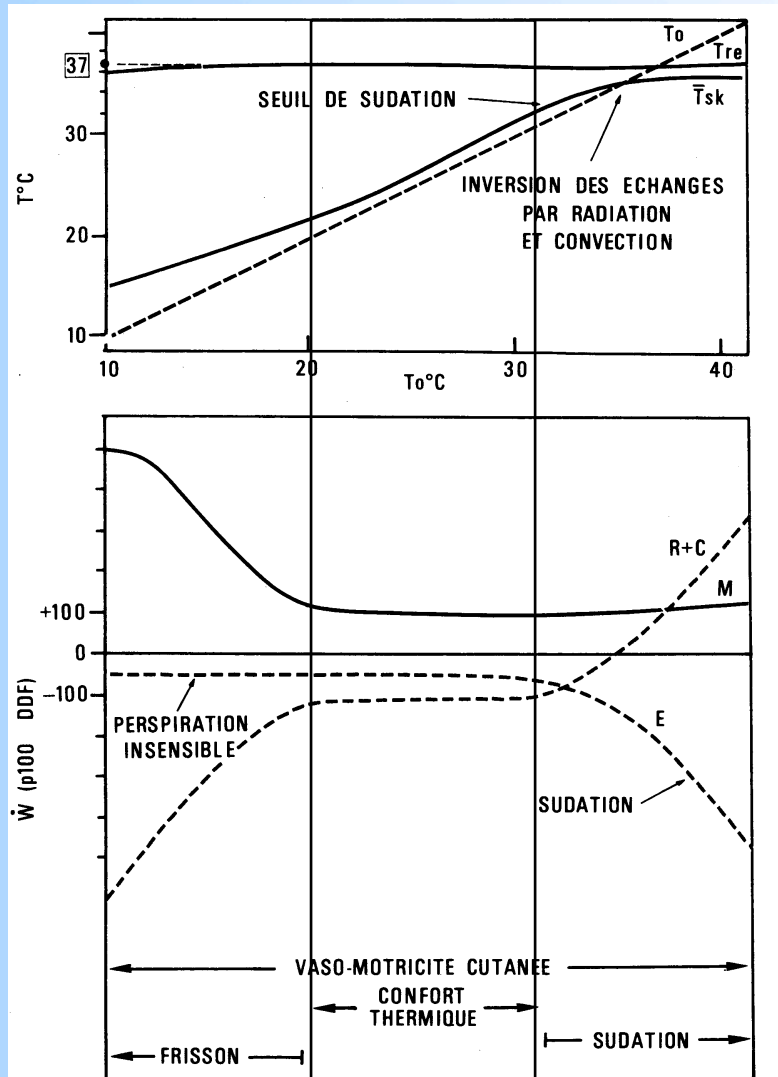
Thermogenèse = thermolyse

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

Production de chaleur = perte de chaleur

Importance de l'inertie thermique

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°

Zone de neutralité thermique

Rôle majeur la vasomotricité cutanée

Modifie la température cutanée

Vers 20-25° :



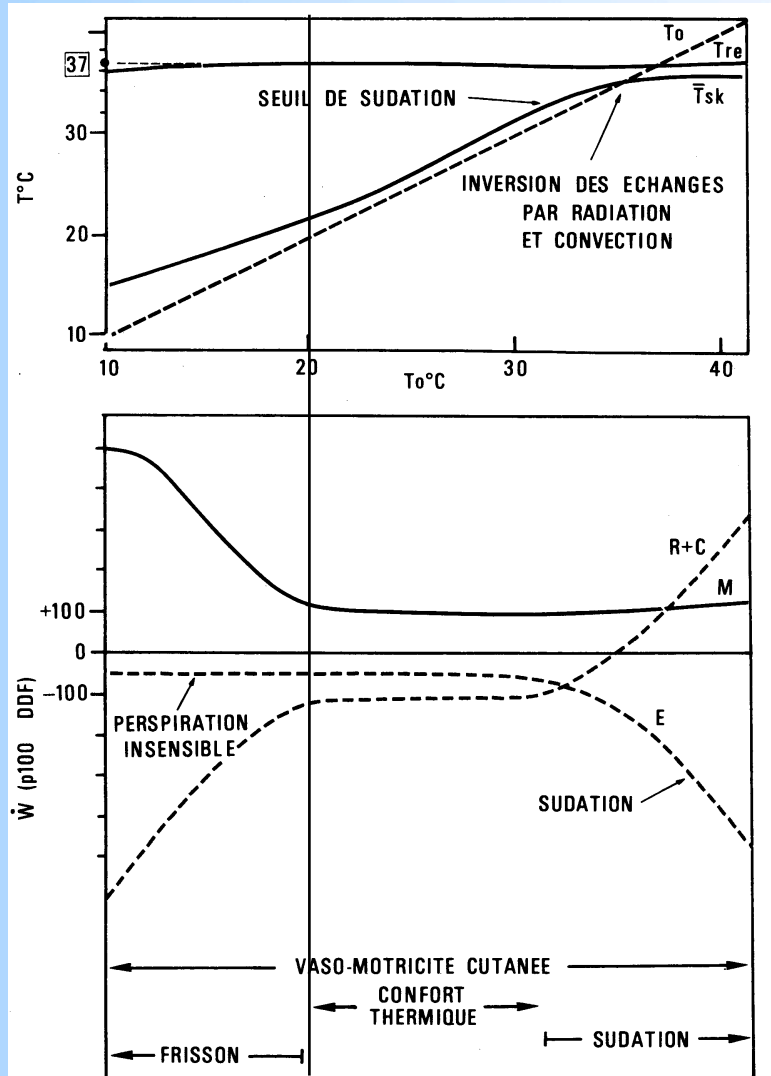
$$\dot{Q}_{\text{cal}} = c \leftarrow \dot{Q}_{\text{s.cut.}} \leftarrow (T_{\text{art.}} - T_{\text{vein.}})$$

Vers 27-30° :



Le transport de chaleur du noyau vers l'écorce reste constant

Zone de thermorégulation au froid



J.Durand (Physiologie humaine de P.Meyer)

- La température cutanée diminue moins vite que la température ambiante
- Les déperditions thermiques augmentent
- Le métabolisme augmente beaucoup pour compenser
- La température centrale n'est pas maintenue

Thermorégulation au froid

Lutter contre l'augmentation des déperditions thermiques

- **Augmenter la thermogenèse**

Frisson limité et fatigant.

Thermogenèse chimique limitée au nouveau né.

- **Limiter la thermolyse**

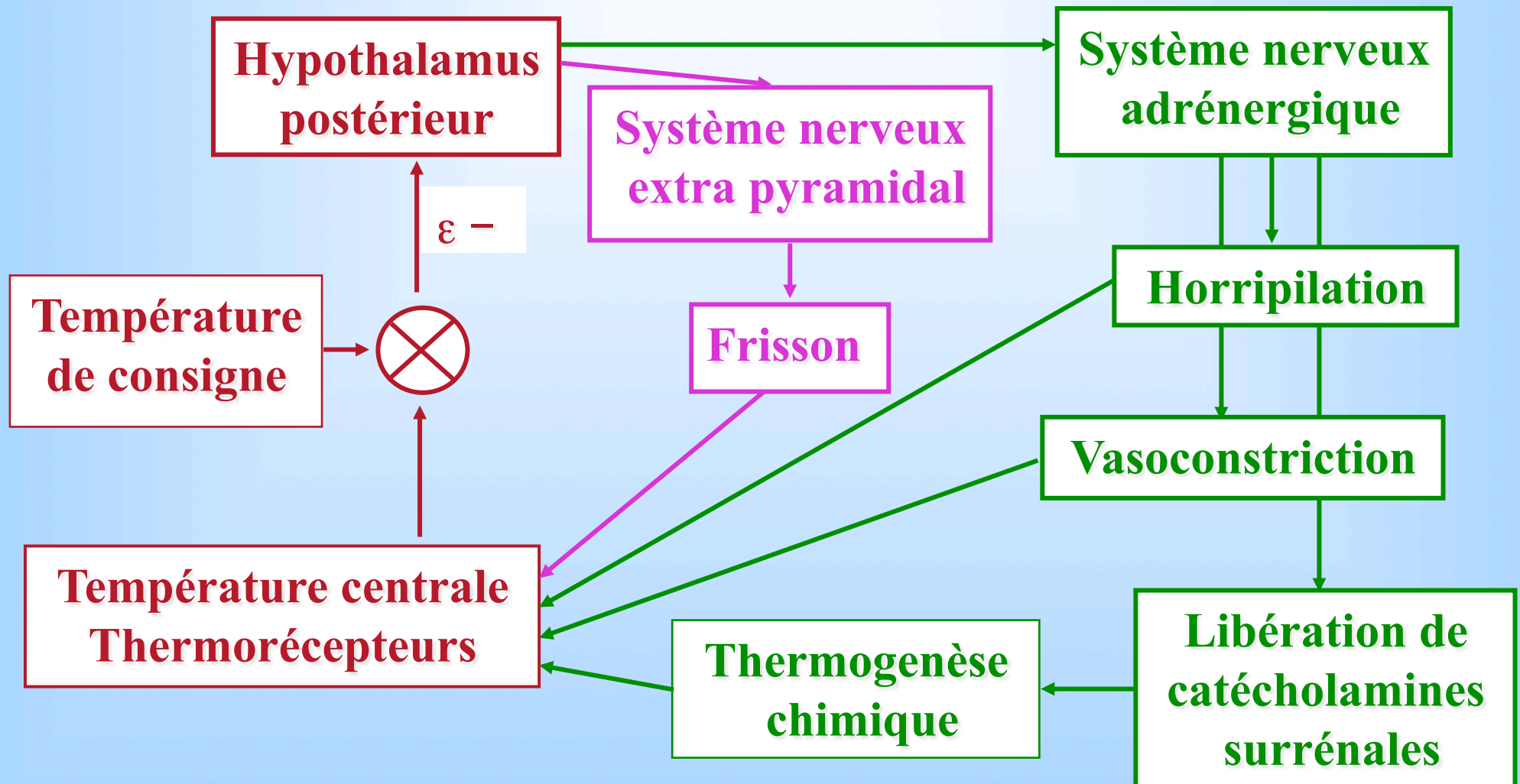
Vasoconstriction périphérique limitée, dangereuse.

Horripilation inefficace.

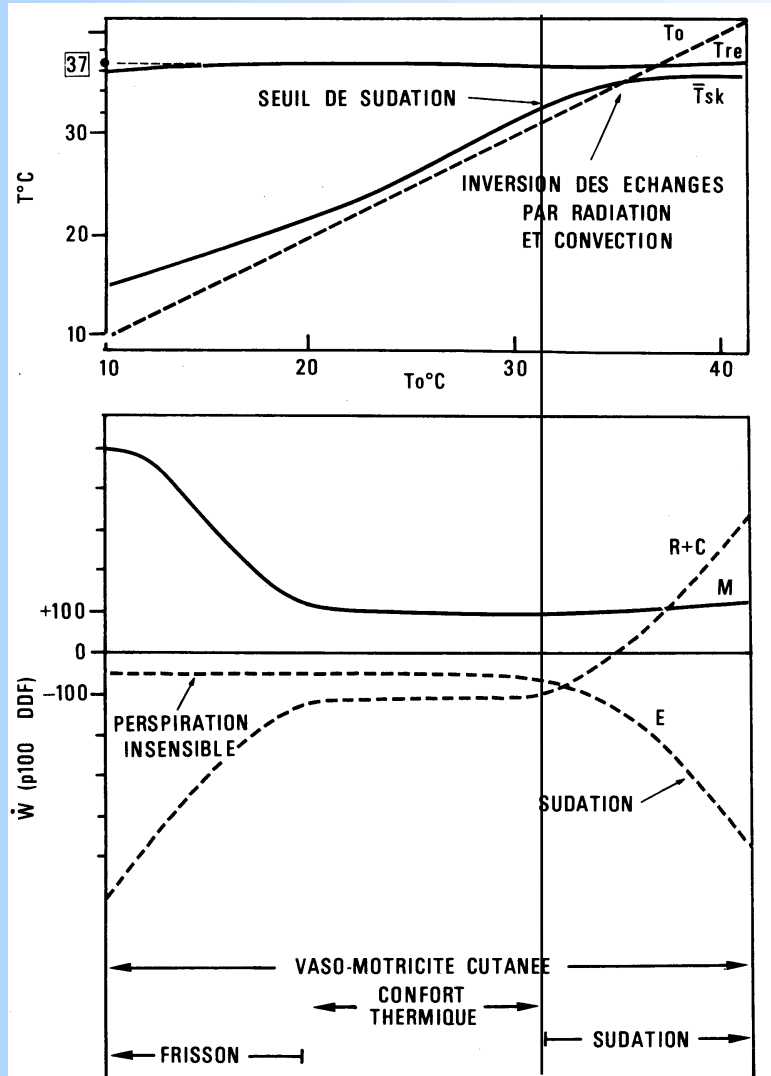
Très peu efficace si on exclu les facteurs comportementaux

L'espèce humaine est très peu adaptée au froid.

Thermorégulation au froid



Zone de thermorégulation au chaud



J.Durand (Physiologie humaine de P.Meyer)

La température cutanée doit toujours rester inférieure à la température centrale

Les échanges par convection et radiation diminuent puis s'inversent

L'évaporation reste le seul mécanisme de thermolyse efficace

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

La température centrale est maintenue

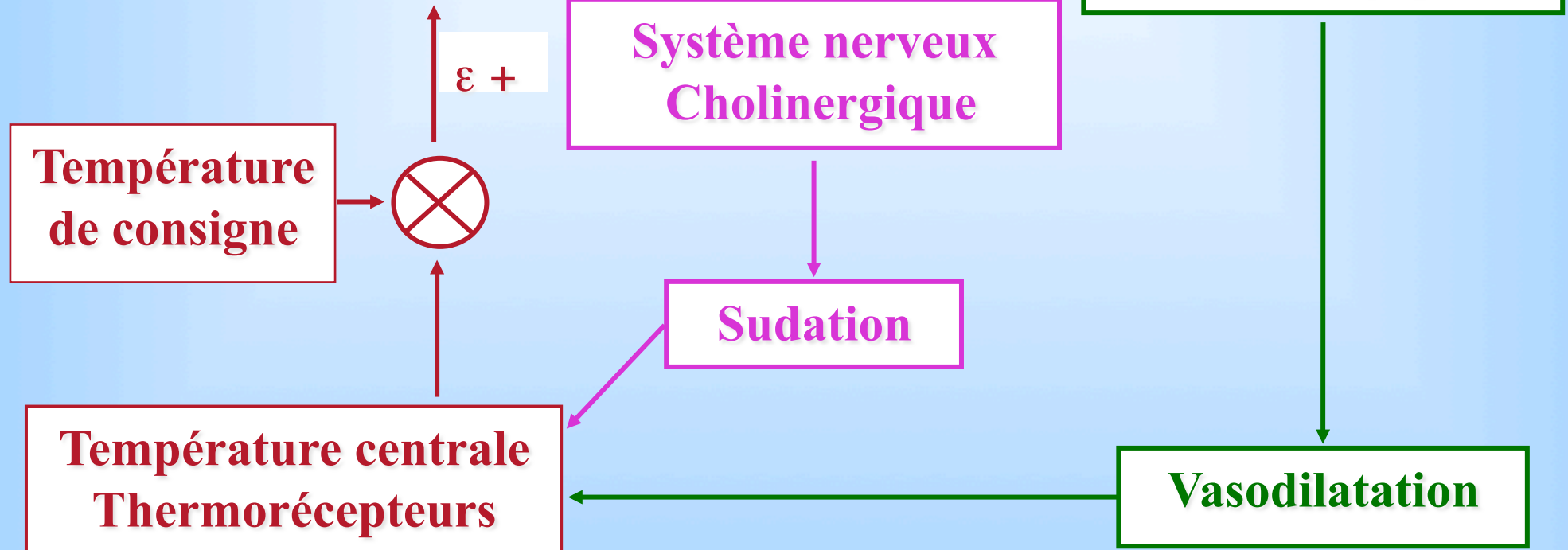
Thermorégulation au chaud

- On ne peut pas diminuer la thermogenèse
- 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° : $\dot{M} + \dot{R} + \dot{C} + \dot{K} = \dot{E}$

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

régulation a



Réactions d'acclimatation

Au froid

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

La thyroxine :

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

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)

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

* : 1 CLO = $0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$