

UE 7 – Physique et Biophysique

Zone réservée pour
la vidéo

TRANSFERT DE CHALEUR

Pr Christelle Wisniewski

UFR des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques

christelle.wisniewski@umontpellier

2020 - 2021

PASS



TRANSFERT DE CHALEUR

Zone réservée pour
la vidéo

Sommaire

- 1 AGITATION THERMIQUE, TEMPERATURE ET CHALEUR**
Relation agitation thermique, température et chaleur
Quantité de chaleur
- 2 PROPAGATION DE LA CHALEUR**
Conduction
Convection
Rayonnement
- 3 THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN**
Les échanges thermiques du corps humain
Evaporation : rôle et principe

① AGITATION THERMIQUE, TEMPERATURE ET CHALEUR

Zone réservée pour la vidéo

① AGITATION THERMIQUE, TEMPERATURE ET CHALEUR



① AGITATION THERMIQUE, TEMPERATURE ET CHALEUR

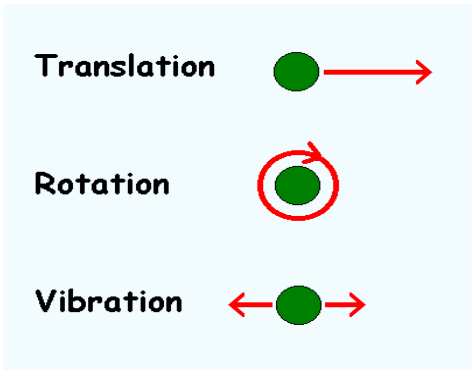
Zone réservée pour la vidéo

Agitation thermique

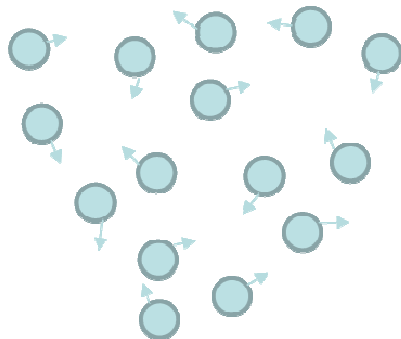
Mouvement incessant dont sont animés les atomes ou molécules qui constituent la matière, et ce quel que soit l'état physique dans lequel elle se trouve.

i 3 types de mouvements:

Energie cinétique



Mouvement Brownien



↗ Agitation thermique

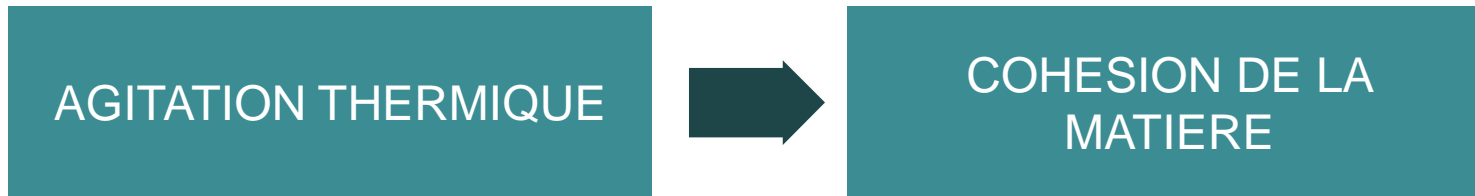
↗ Energie cinétique de chaque molécule

↘ Liens qui retiennent les molécules entre elles



① AGITATION THERMIQUE, TEMPERATURE ET CHALEUR

Zone réservée pour la vidéo



Température

La température (K, unité SI) d'un corps donne une indication du degré d'agitation des molécules.

i Cas des gaz parfaits

L'énergie cinétique moyenne des particules (E_c) est proportionnelle à la température absolue T .

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times \overline{v}^2 \approx \frac{3}{2} \times k_B \times T$$

k_B , constante de Boltzmann



① AGITATION THERMIQUE, TEMPERATURE ET CHALEUR

Zone réservée pour la vidéo

La chaleur ou énergie thermique

Associée au changement de température d'un corps dans un état donné.



Pour élever (ou baisser) la température d'un corps, il faut lui apporter (ou lui ôter) de la chaleur.

L'apport d'énergie thermique, sous forme de chaleur, augmente l'agitation thermique.



① AGITATION THERMIQUE, TEMPERATURE ET CHALEUR

Zone réservée pour la vidéo

Quantité de chaleur

$$Q = c \times m \times \Delta T$$

Chaleur absorbée ou restituée par un corps dont la température varie de ΔT .

Capacité calorifique massique du corps **J .kg⁻¹.K⁻¹**
Chaleur spécifique du corps

Avec	Q	Quantité de chaleur ou énergie thermique	J
	m	Masse	kg
	ΔT	Variation de température	K



① AGITATION THERMIQUE, TEMPERATURE ET CHALEUR

Zone réservée pour la vidéo



La quantité de chaleur Q à apporter ou à ôter à un corps dépend de la nature chimique de ce corps et de son état (*solide, liquide ou gazeux*), de sa masse et de l'élévation (ou baisse) de température ΔT souhaitée.



Plus la chaleur massique d'un corps est grande, plus il est difficile de faire varier sa température.



La chaleur massique de l'eau est supérieure à celle des autres liquides : on parle de ***l'inertie calorifique de l'eau***.

Chez les êtres vivants **homéothermes**, l'eau contribue ainsi à garder constante leur température interne.

② PROPAGATION DE LA CHALEUR

Zone réservée pour
la vidéo

②

PROPAGATION DE LA CHALEUR



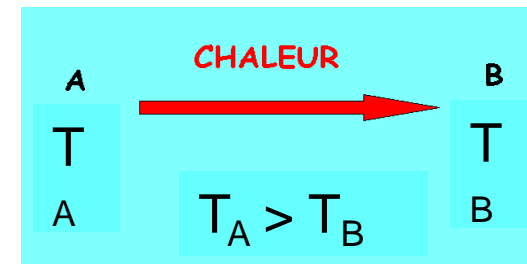
② PROPAGATION DE LA CHALEUR

Zone réservée pour
la vidéo

Transfert d'énergie thermique

... basé sur les deux premiers principes de la thermodynamique.

Ainsi, la chaleur se déplacera **du point le plus chaud au point le plus froid**, jusqu'à **égalisation des températures**.



Ce transfert d'énergie donne lieu à un **flux de chaleur Φ** qui est caractérisé non seulement par sa **direction** mais aussi par **son intensité**.

② PROPAGATION DE LA CHALEUR

Zone réservée pour
la vidéo

Trois modes de propagation de chaleur

Conduction

Convection

Rayonnement



② PROPAGATION DE LA CHALEUR - conduction

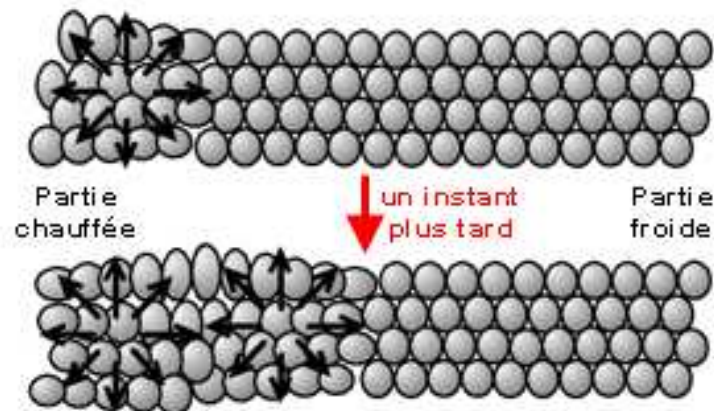
Zone réservée pour
la vidéo

Propagation par **conduction thermique**

Principe

La conduction est un phénomène de diffusion qui permet à la chaleur de se propager à l'intérieur d'un corps, grâce à des interactions à **l'échelle moléculaire**, sans **mouvements macroscopiques**.

L'agitation moléculaire élevée de la zone chaude communique de l'énergie cinétique aux zones plus froides.

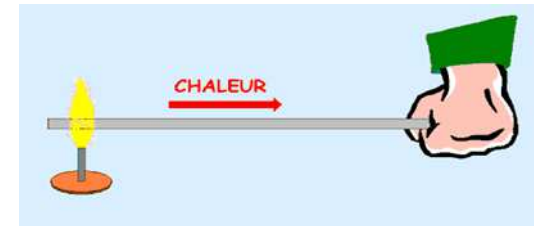


② PROPAGATION DE LA CHALEUR - conduction

Zone réservée pour
la vidéo



Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur **dans les solides** ou **entre corps solides contigus**.



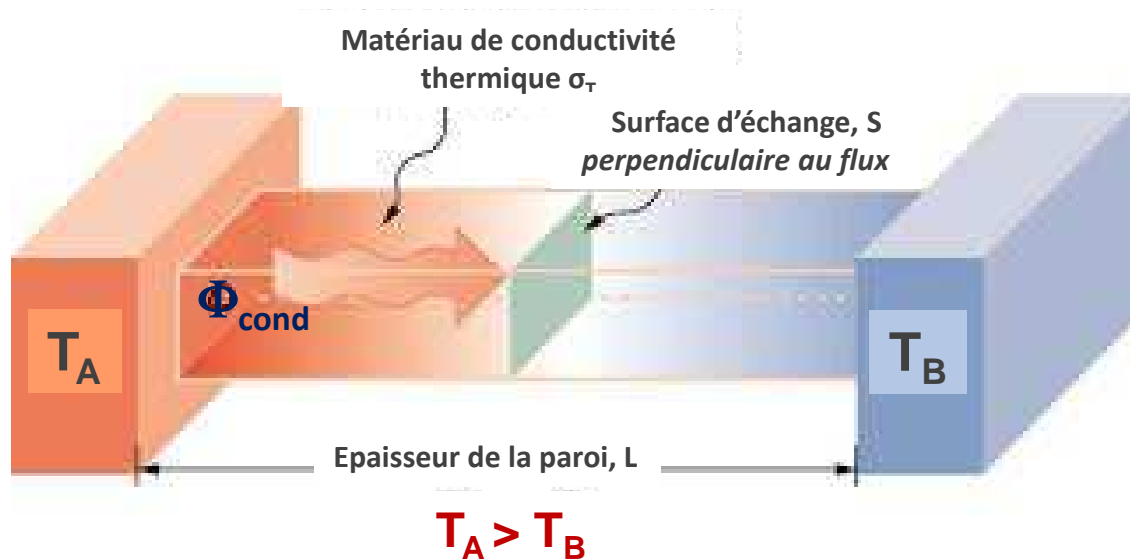
La conduction intervient également dans les liquides et les gaz mais son effet est généralement marginal par rapport à celui de la convection.

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - conduction

Zone réservée pour la vidéo

Expression du flux de chaleur en conduction

Pour quantifier ce phénomène de propagation, en régime permanent et pour des corps de forme géométrique simple, le **flux thermique** Φ_{cond} peut être quantifié à partir de la **loi de Fourier**.



Le sens de l'écoulement de chaleur coïncide avec celui du gradient de température: l'écoulement de chaleur s'effectue dans le **sens des températures décroissantes**.

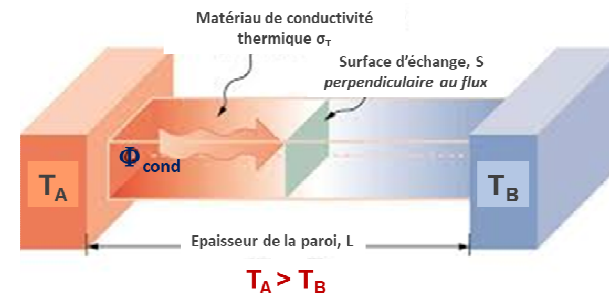
② PROPAGATION DE LA CHALEUR - conduction

Zone réservée pour la vidéo

Loi de Fourier - Cas d'un matériau homogène

$$\Phi_{\text{cond}} = \frac{\overset{\text{m}^2}{\sigma_T} \times \overset{\text{K}}{S} \times |T_A - T_B|}{\underset{\text{m}}{L}}$$

Puissance
en W



σ_T est la **conductivité thermique**, en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre.

σ_T dépend du **matériau** et de la **température**

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - conduction

Zone réservée pour
la vidéo

Exemples de conductivités thermique

Matériau	σ_T en $W.m^{-1}.K^{-1}$ (37°C)
Cuivre	400
Eau	0,6
Graisse	0,1
Air sec	0,025



A température égale, le refroidissement de l'organisme est beaucoup plus rapide dans l'eau que dans l'air sec (20 à 30 fois).

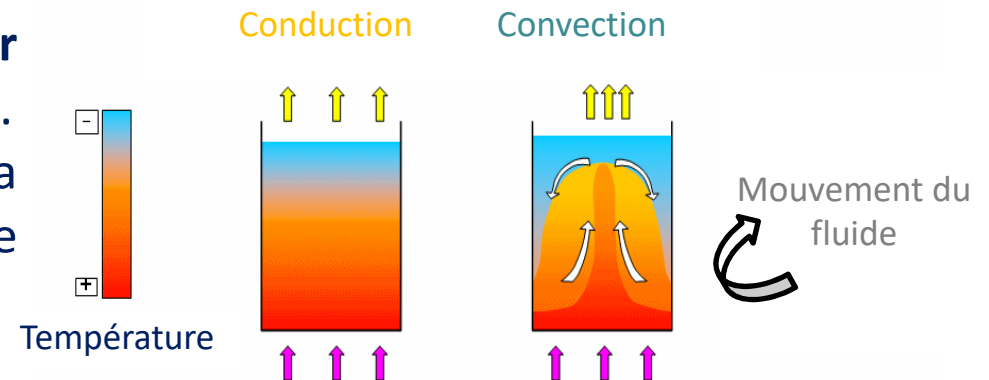
② PROPAGATION DE LA CHALEUR - convection

Zone réservée pour
la vidéo

Propagation par **convection thermique**

Principe

L'énergie thermique est transportée **par un fluide (liquide ou gaz) en mouvement**. La convection implique le transport de la chaleur par une partie d'un fluide qui se mélange avec une autre partie.



Conduction + Fluide en mouvement = **Convection**



La chaleur se servant du fluide comme *véhicule* pour se déplacer, l'étude de la convection est étroitement liée à celle de l'écoulement (dynamique) des fluides.

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - convection

Zone réservée pour
la vidéo

La convection concerne exclusivement les fluides (gaz ou liquides) puisqu'elle prend sa source dans un transport macroscopique de matière.

Elle peut être **naturelle** ou **forcée**.

Convection naturelle

Le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide

Convection forcée

Le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques



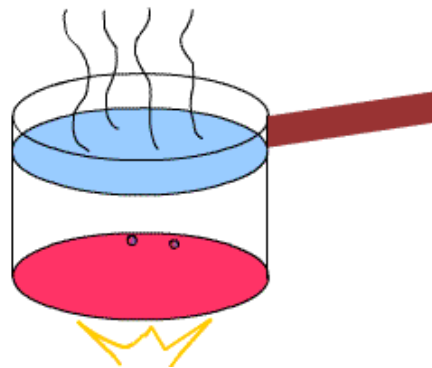
② PROPAGATION DE LA CHALEUR - convection

Zone réservée pour
la vidéo

Convection naturelle

Le mouvement du fluide est spontané

Exemple



Casserole remplie d'eau sur
le feu

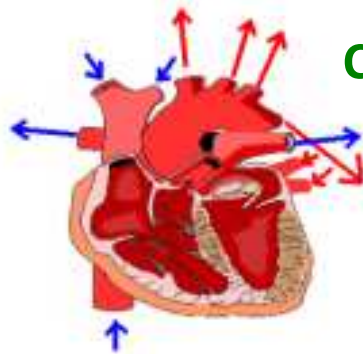
② PROPAGATION DE LA CHALEUR - convection

Zone réservée pour
la vidéo

Convection **forcée**

Le mouvement du fluide est provoqué par une circulation artificielle

Exemple



Circulation du sang grâce à la pompe cardiaque

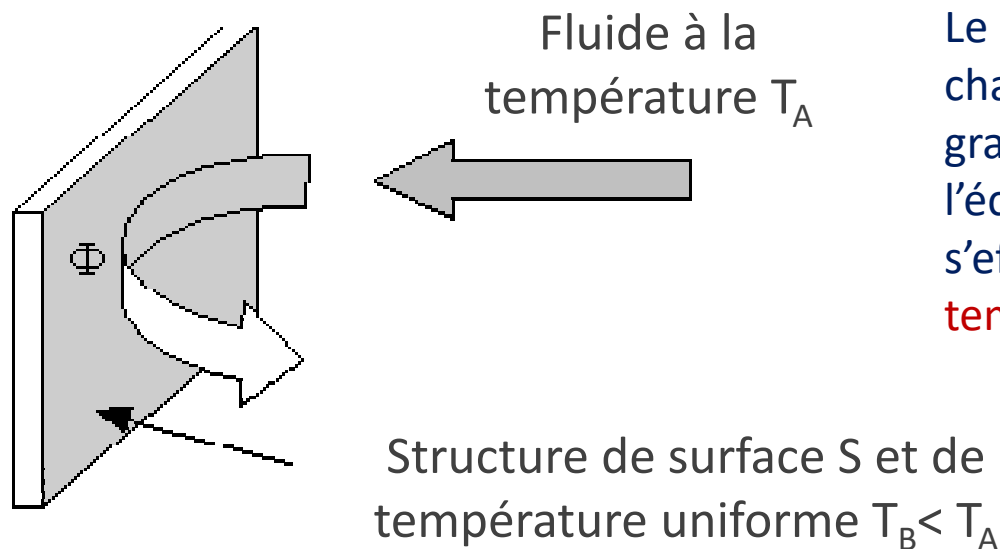
Le sang est un liquide caloporteur qui, réchauffé dans les organes chauds, cède la chaleur dans les régions froides et transporte la chaleur entre «le noyau» et la peau.

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - convection

Zone réservée pour
la vidéo

Expression du flux de chaleur en convection

Pour quantifier les échanges de chaleur par convection (**libre ou forcée**) se produisant entre un fluide et la paroi d'une structure, on peut estimer le **flux thermique** Φ_{conv} à partir de la **loi de Newton**.



Le sens de l'écoulement de chaleur coïncide avec celui du gradient de température: l'écoulement de chaleur s'effectue dans le **sens des températures décroissantes**.

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - convection

Zone réservée pour la vidéo

Loi de Newton

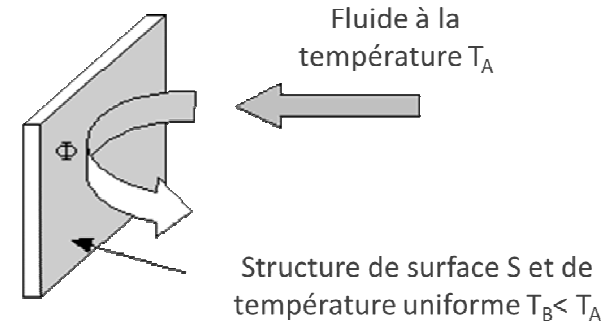
Pour un écoulement à température T_A autour d'une structure à température de surface uniforme T_B et d'aire S , l'expression du **flux de chaleur en convection** Φ_{conv} est la suivante :

$$\Phi_{\text{conv}} = h \times S \times |T_A - T_B|$$

Puissance en W

m^2

K



h est le **coefficient d'échange par convection**, en $W.m^{-2}.K^{-1}$

dépend des caractéristiques du fluide, de la nature de l'écoulement, de la température, de la forme de la surface d'échange...

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - convection

Zone réservée pour
la vidéo

Exemples de coefficients d'échange par convection

Type de convection	Matériau	h en $W.m^{-2}.K^{-1}$ conditions normales de pression et de température
Convection naturelle	Gaz	5 - 30
	Eau	100 - 1000
Convection forcée	Gaz	10 - 300
	Eau	300 - 12000
	Huile	50 - 1 700



② PROPAGATION DE LA CHALEUR - rayonnement

Zone réservée pour
la vidéo

Propagation par **rayonnement thermique**

Principe

Le rayonnement est le transfert de chaleur d'un corps à un autre, **sans aucun contact entre eux**, par le **déplacement d'ondes** dans l'espace.

Dans la transmission de chaleur par **rayonnement**, le transfert thermique s'effectue ainsi par des **ondes électromagnétiques** qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière.



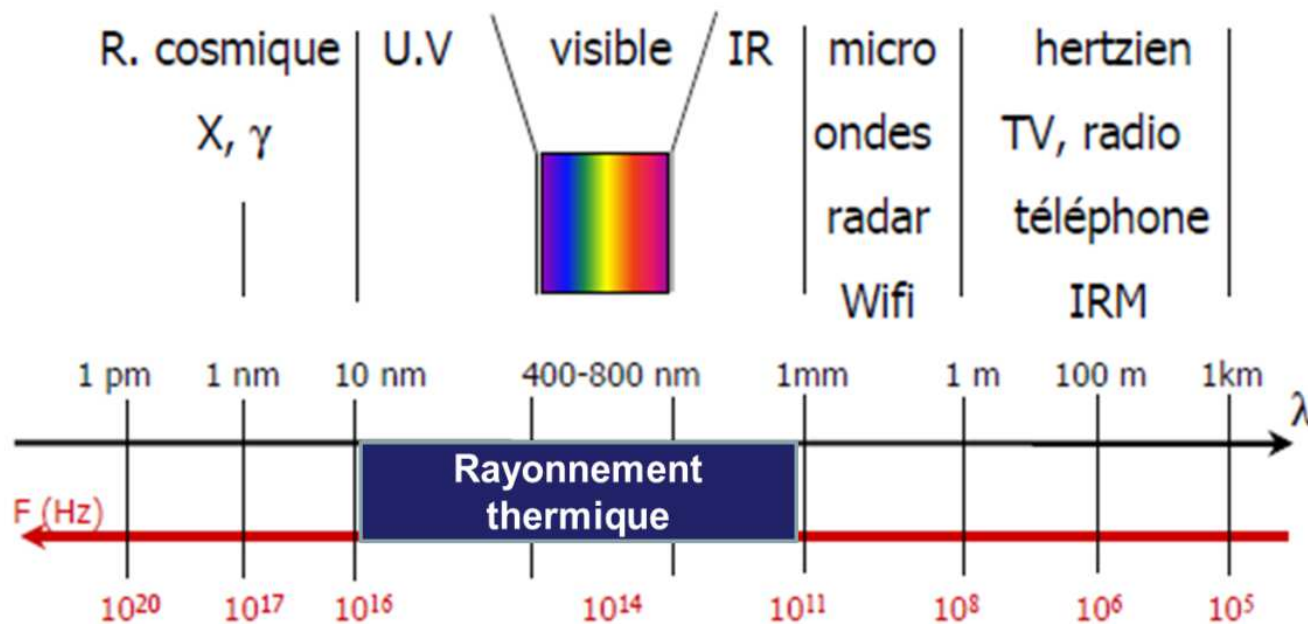
Tout corps à la température $T \neq 0 \text{ K}$ émet un rayonnement électromagnétique.

Tout corps est à la fois émetteur et récepteur.

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - rayonnement

Zone réservée pour
la vidéo

Le **rayonnement thermique** concerne les longueurs d'ondes comprises **entre approximativement 10 nm et 1 mm** et se situe ainsi de l'ultraviolet à l'infrarouge, en couvrant le visible.

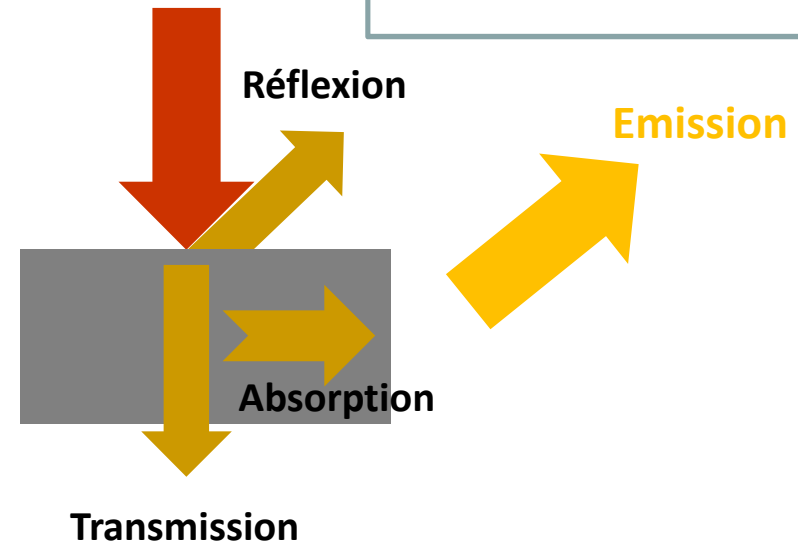


② PROPAGATION DE LA CHALEUR - rayonnement

Zone réservée pour
la vidéo

Quelques rappels...

Lorsqu'un flux d'énergie rayonnée rencontre un corps, une partie de l'énergie est absorbée, une partie est réfléchie, une partie continue son trajet après avoir traversé le corps.



Le corps va ensuite **émettre** à son tour un flux d'énergie.

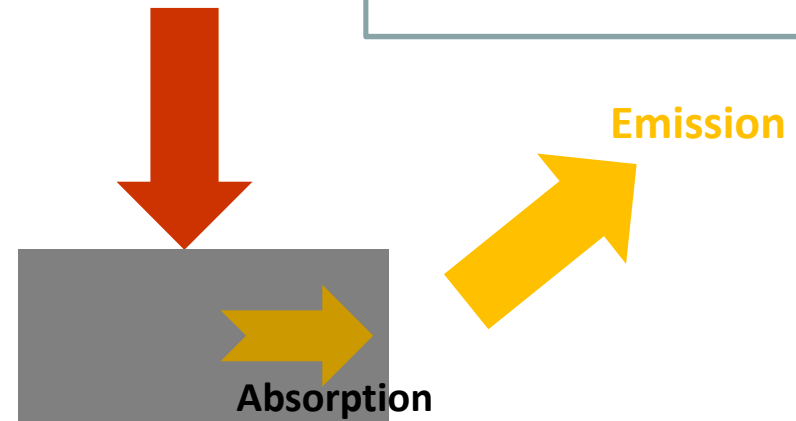
② PROPAGATION DE LA CHALEUR - rayonnement

Zone réservée pour la vidéo

Définition d'un corps noir

Le corps noir est par définition un corps absorbant intégralement les radiations qu'il reçoit.

Dans ces conditions, le flux réfléchi ou transmis est nul.



Le corps noir va ensuite **émettre** à son tour un flux d'énergie.



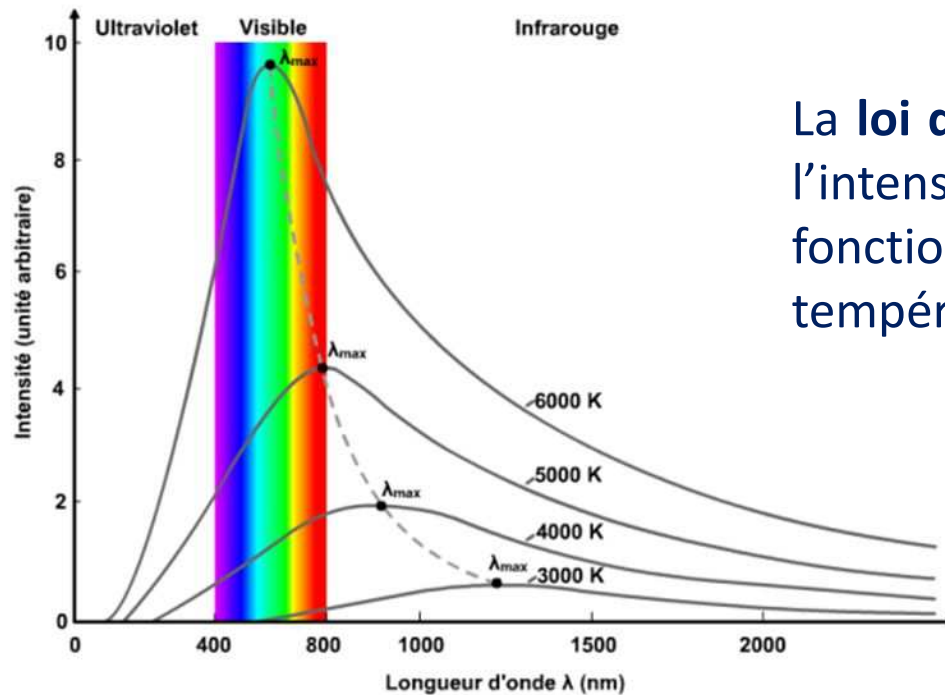
Les longueurs d'onde du rayonnement reçu et du rayonnement émis ne sont pas forcément les mêmes.

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - rayonnement

Zone réservée pour
la vidéo

Corps noir et spectre d'émission

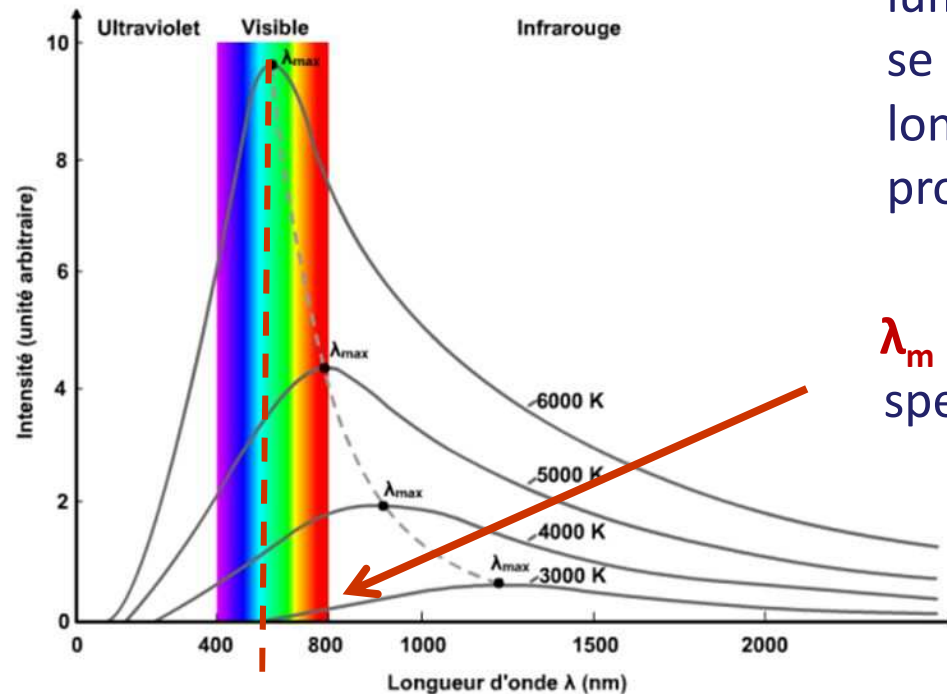
Un corps noir à la température absolue T émet
toute une gamme de longueurs d'ondes.



La **loi de Planck** donne la répartition de l'intensité émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde λ et de la température T .

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - rayonnement

Zone réservée pour
la vidéo



En 1893, **Wien** découvrit que la lumière émise par un corps noir se distribue autour d'une longueur d'onde λ inversement proportionnelle à la température.

λ_m correspond à l'intensité maximum du spectre et est donnée par la **loi de Wien**



Pic d'émissivité

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - rayonnement

Zone réservée pour
la vidéo

Loi du déplacement de Wien

Cette loi permet de calculer la longueur d'onde λ_m qui correspond au maximum d'énergie rayonnée à la température T

$$m \quad \lambda_m = \frac{b}{T} \quad K$$

avec $b \cong 3 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$

b est la **constante de Wien**



Aux températures ambiantes, λ_m se situe dans l'infrarouge (corps humain).
Si la température augmente, λ_m se situe dans le visible (soleil).

② PROPAGATION DE LA CHALEUR - rayonnement

Zone réservée pour
la vidéo

Loi de Stefan-Boltzmann

Soit un corps noir de surface **S** et de température **T**

- Puissance électromagnétique **absorbée** P_a (environnement à la température T_0)

$$P_a = \sigma \times S \times T_0^4$$

W m² K

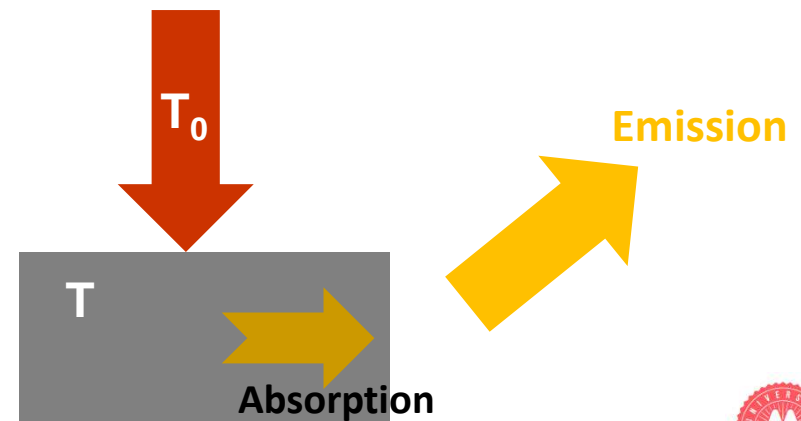
avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

σ est la **constante de Stefan Boltzmann**

- Puissance électromagnétique **émise** P_e

$$P_e = \sigma \times S \times T^4$$

W m² K



② PROPAGATION DE LA CHALEUR - rayonnement

Zone réservée pour
la vidéo

■ Expression du flux de chaleur en rayonnement

$$P_e = \sigma \times S \times T^4 \qquad P_a = \sigma \times S \times T_0^4$$

Le flux de chaleur échangé par rayonnement correspond à la puissance **nette rayonnée (ou flux net rayonné)** et est donné par :

$$\Phi_{\text{ray}} = P_e - P_a = \sigma \times S \times \left| T^4 - T_0^4 \right|$$

$\text{m}^2 \quad \text{K} \quad \text{K}$

Puissance
en W

avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ **Constante de Stefan Boltzmann**



Si le corps noir est à une température identique à celle du milieu qui l'entoure alors la puissance qu'il absorbe est égale à la puissance qu'il émet.

② PROPAGATION DE LA CHALEUR

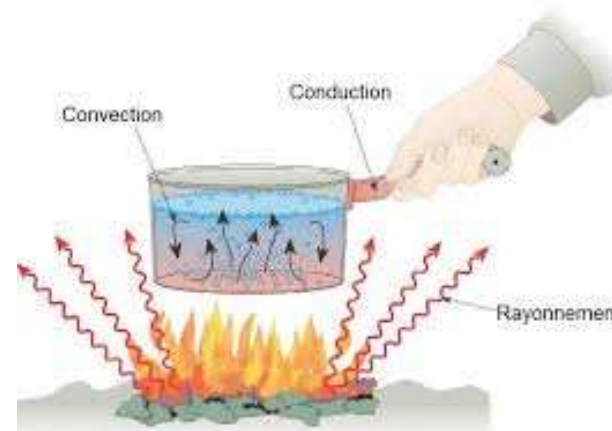
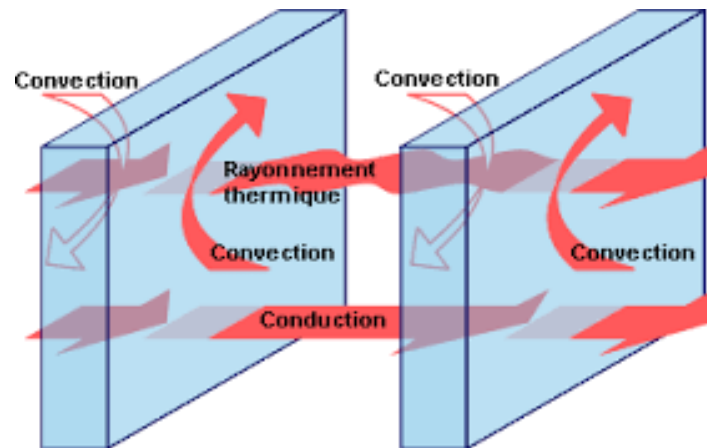
Zone réservée pour
la vidéo

Trois modes de propagation de chaleur

Conduction

Convection

Rayonnement



③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour
la vidéo

③

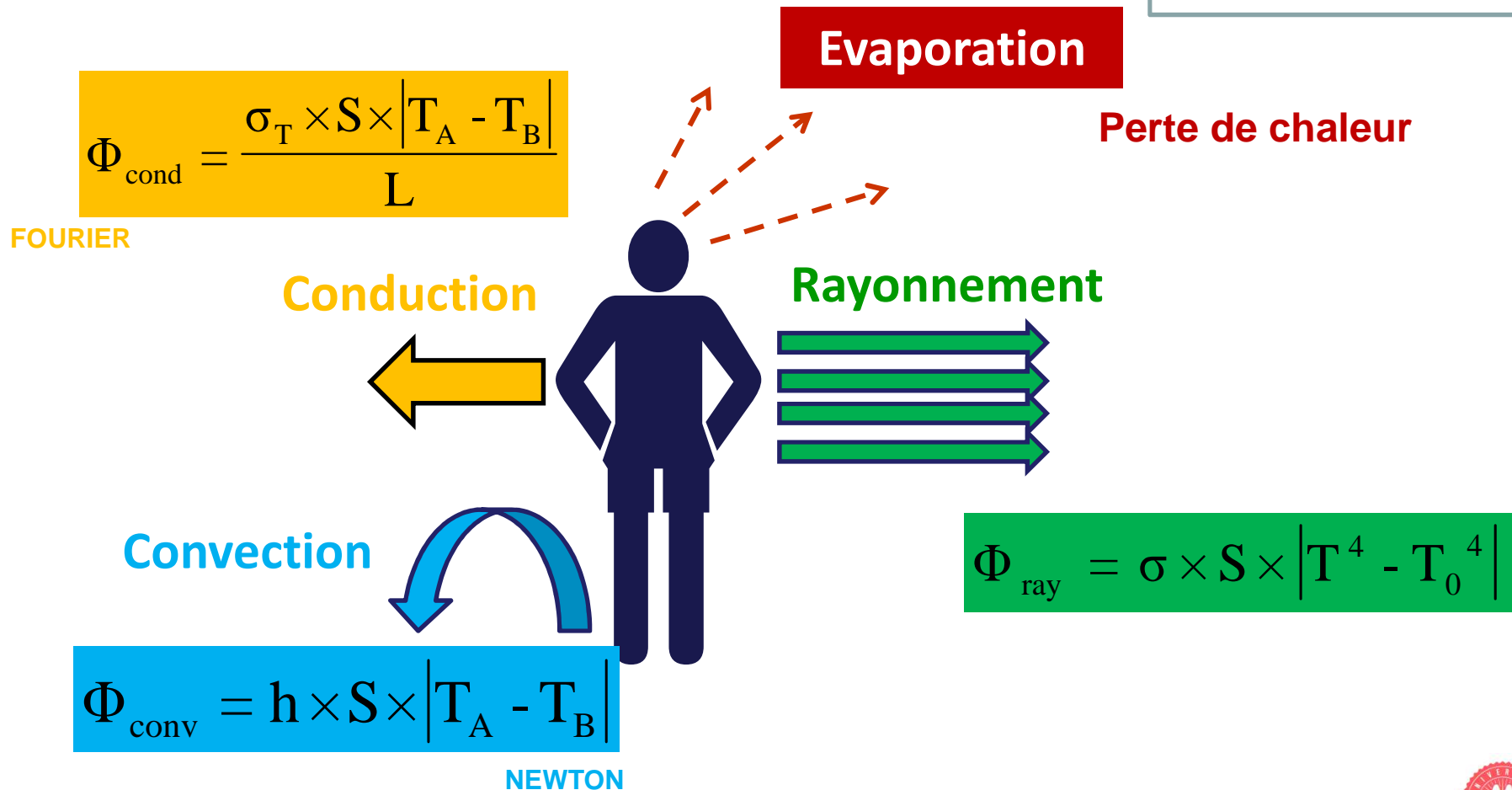
THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN



③ THERMORÉGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour la vidéo

Les échanges thermiques du corps humain



③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

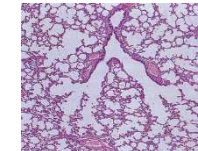
Zone réservée pour
la vidéo

Evaporation et régulation thermique



Chez l'homme, l'évaporation de l'eau joue un très grand rôle dans l'élimination de l'excès de chaleur.

Evaporation par les alvéoles



Evaporation par la peau



③ THERMORÉGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour la vidéo

L'évaporation

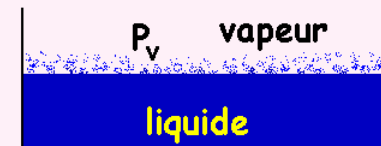
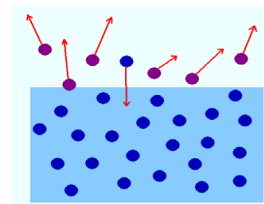
... un changement d'état particulier

Phénomène surfacique
Phénomène lent

Consommation d'énergie
Réaction endothermique

Passage **progressif**
d'un corps de l'état liquide à l'état gazeux

i évaporation \neq ébullition



③ THERMORÉGLATION DU CORPS HUMAIN

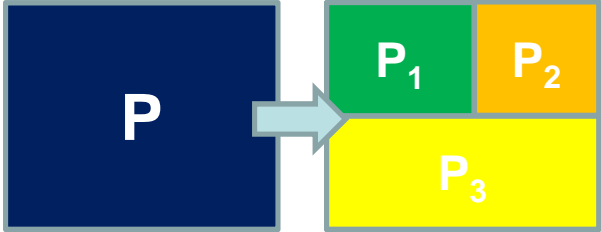
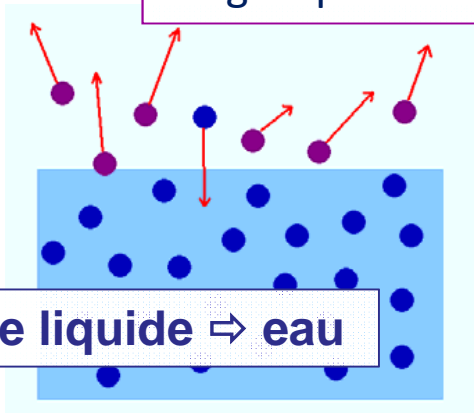
Zone réservée pour la vidéo

Rappels et définitions

La pression due à la vapeur d'eau, notée P_v , est appelée **pression de vapeur** ou **pression partielle de vapeur**.

... dont vapeur d'eau

Phase gaz \Rightarrow **mélange de gaz**
La pression de ce mélange est la somme des pressions de tous les gaz qui le composent (Loi de Dalton)



Exemple Air Humide

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{\text{vapeur d'eau}} = P_v \\ P_2 &= P_{O_2} \\ P_3 &= P_{N_2} \end{aligned}$$



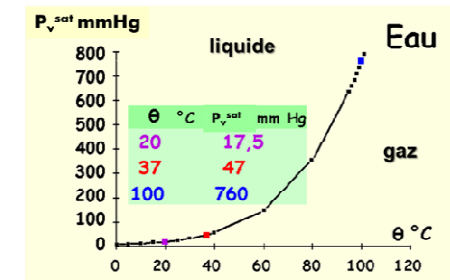
③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour la vidéo

Pression de vapeur saturante (P_v^{sat})

La pression de vapeur saturante est la **pression** à laquelle la phase gazeuse d'une corps est en **équilibre** avec sa phase liquide.

Pour un corps donné, elle dépend exclusivement de la température.



Taux d'humidité relative (HR)

Il s'agit du **rapport** entre la **pression partielle de vapeur** et la **pression de vapeur saturante**.

$$HR = \frac{P_v}{P_v^{sat}}$$

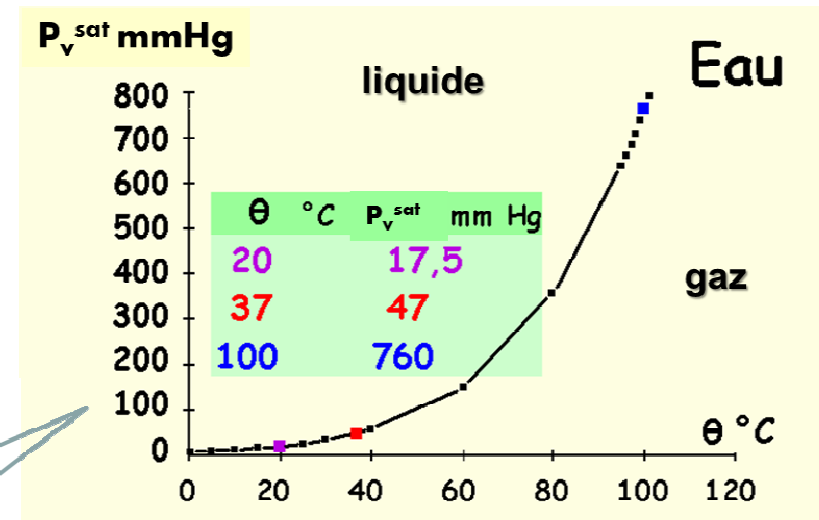
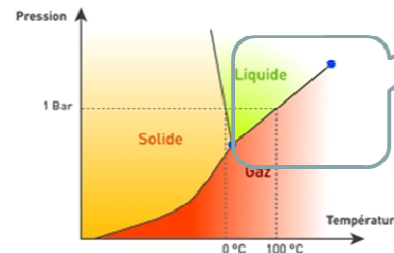
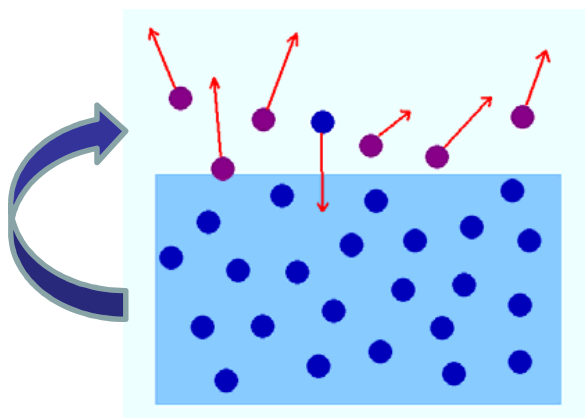
③ THERMORÉGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour la vidéo

Principe de l'évaporation d'eau

L'évaporation consiste au **passage** de molécules d'eau de la **phase liquide** à la **phase gazeuse** afin que la **pression partielle de vapeur** dans le gaz à proximité de la surface libre soit égale à la **pression de vapeur saturante de l'eau** à la température donnée.

$$P_v \nearrow P_v^{sat}$$



③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour
la vidéo



Il y aura évaporation tant que la **pression partielle de vapeur sera inférieure à la pression de vapeur saturante.**



Quand la pression partielle de la vapeur est égale à la pression de vapeur saturante, **les phases gazeuse et liquides sont dites en équilibre.**



La pression de vapeur saturante est la pression partielle de la vapeur à partir de laquelle on ne peut plus former de molécules sous forme vapeur dans l'air; l'air est **saturé.**

③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour
la vidéo

Illustration

Evaporation d'une flaque au soleil

Conditions ambiantes de température et de pression

$$T = 293 \text{ K}$$

$$P = 760 \text{ mmHg}$$

Humidité relative (HR) 50 %

Pression de vapeur saturante à 293 K

$$P_v^{\text{sat}} = 17,5 \text{ mmHg}$$

Evaporation?

$$P_v = 50\% P_v^{\text{sat}} = 8,75 \text{ mmHg}$$

$$P_v < P_v^{\text{sat}} = 17,5 \text{ mmHg}$$

Evaporation possible



③ THERMORÉGULATION DU CORPS HUMAIN

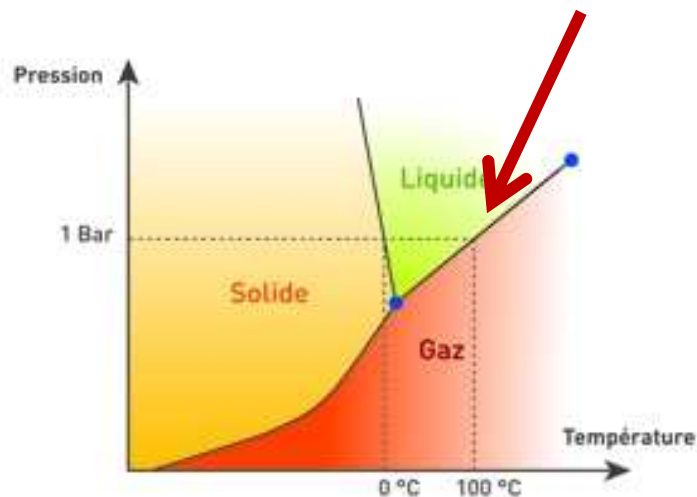
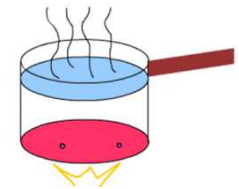
Zone réservée pour la vidéo

Attention

Ebullition \neq évaporation

On veut porter de l'eau à ébullition dans une casserole, sous la pression atmosphérique.

Température d'ébullition sous 1 bar $T = 373 \text{ K}$
Pression de vapeur saturante à 373 K $P_v^{\text{sat}} = 1 \text{ bar (760 mmHg)}$



Formation de bulles de vapeur au sein du liquide

Bulles de vapeur qui viendront augmenter la pression partielle de l'eau gazeuse (vapeur d'eau) dans l'atmosphère jusqu'à atteindre le niveau de la pression saturante de l'eau

... ou jusqu'à ce que la casserole soit vide!!

③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour la vidéo

Vitesse d'évaporation

Pour une pression ambiante et température T fixées, la masse d'eau qui s'évapore par unité de temps (vitesse d'évaporation, $V_{\text{évap}}$) s'écrit :

$$V_{\text{évap}} = \frac{dm}{dt} = K \times S \times (P_v^{\text{sat}} - P_v)$$

Avec	$V_{\text{évap}}$	Vitesse d'évaporation	kg.s^{-1}
	dm	Masse d'eau évaporée pendant dt	kg
	dt	Durée de l'évaporation	s
	K	Constante d'évaporation	$\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{Pa}^{-1}$
	S	Surface d'évaporation	m^2
	P_v^{sat}	Pression de vapeur saturante à T	Pa
	P_v	Pression partielle de vapeur d'eau	Pa



③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour la vidéo

Expression du flux de chaleur perdue par évaporation

L'évaporation est une réaction endothermique, consommatrice d'énergie, qui va donc favoriser la **perte de chaleur**

$$\Phi_{\text{évap}} = \frac{dQ_{\text{évap}}}{dt} = L_{\text{eau}} \times \frac{dm}{dt} = L_{\text{eau}} \times V_{\text{évap}} = L_{\text{eau}} \times K \times S \times (P_v^{\text{sat}} - P_v)$$

**Puissance
en W**

Avec	$\Phi_{\text{évap}}$	Flux de chaleur perdue par évaporation	W
	$dQ_{\text{évap}}$	Quantité de chaleur perdue par évaporation	J
	dt	Durée de l'évaporation	s
	L_{eau}	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à T	J.kg ⁻¹
	dm	Masse d'eau évaporée pendant dt	kg
	$V_{\text{évap}}$	Vitesse d'évaporation	kg.s ⁻¹



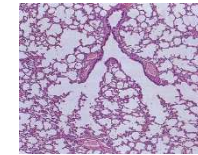
③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour
la vidéo

... Evaporation et régulation thermique



Evaporation par les alvéoles



Evaporation par la peau



③ THERMORÉGULATION DU CORPS HUMAIN

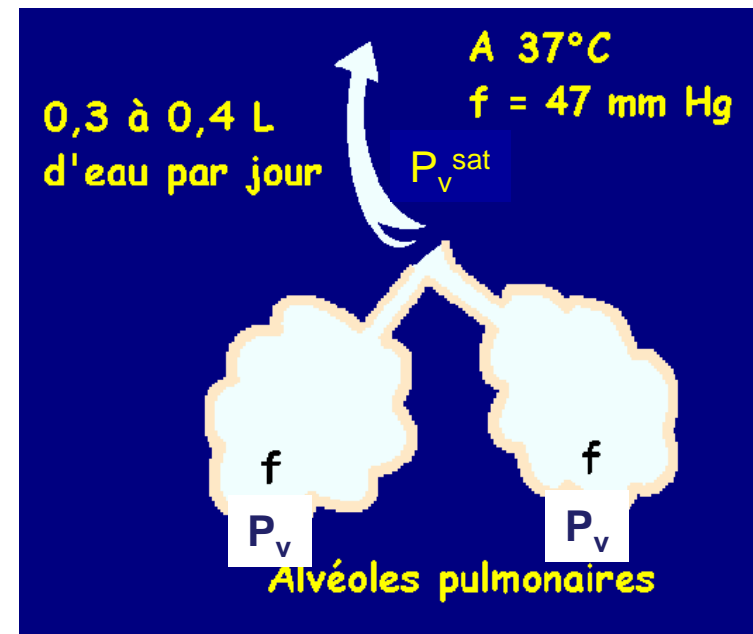
Zone réservée pour
la vidéo

Evaporation par les alvéoles

Cette élimination est de l'ordre de **300 à 400 g d'eau par jour**.

La masse de vapeur d'eau éliminée par la respiration dépend de l'humidité de l'air inspiré :

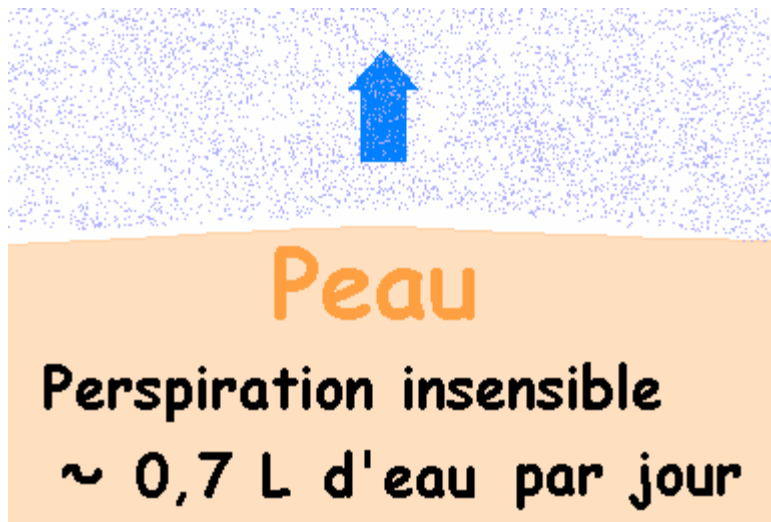
- Si l'air inspiré est **saturé en vapeur d'eau**, l'élimination de l'eau du corps par les alvéoles pulmonaires sera **nulle**.
- Si l'air inspiré est **sec**, l'élimination sera **maximale**.



③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour
la vidéo

Evaporation par la peau - *Perspiration insensible*



C'est un passage de l'eau à travers l'épiderme par simple diffusion (cette eau n'est pas sécrétée par les glandes sudoripares).

Il s'agit d'un phénomène d'évaporation à peu près **constant**, responsable de l'évaporation d'approximativement **700 g d'eau par jour**.

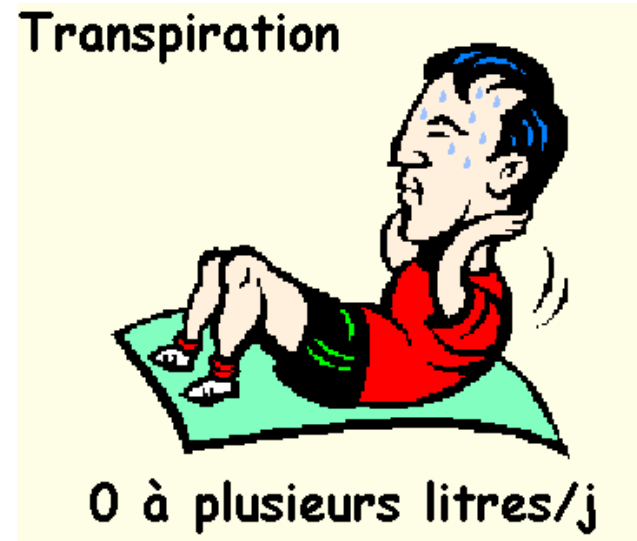
③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour
la vidéo

Evaporation par la peau - *Transpiration*

La sueur est sécrétée par les glandes sudoripares ; composée essentiellement d'eau, elle contient entre autre de l'urée et des sels minéraux.

La transpiration varie fortement suivant les nécessités, pouvant atteindre par exemple **deux litres par heure** en cas de forte sudation.

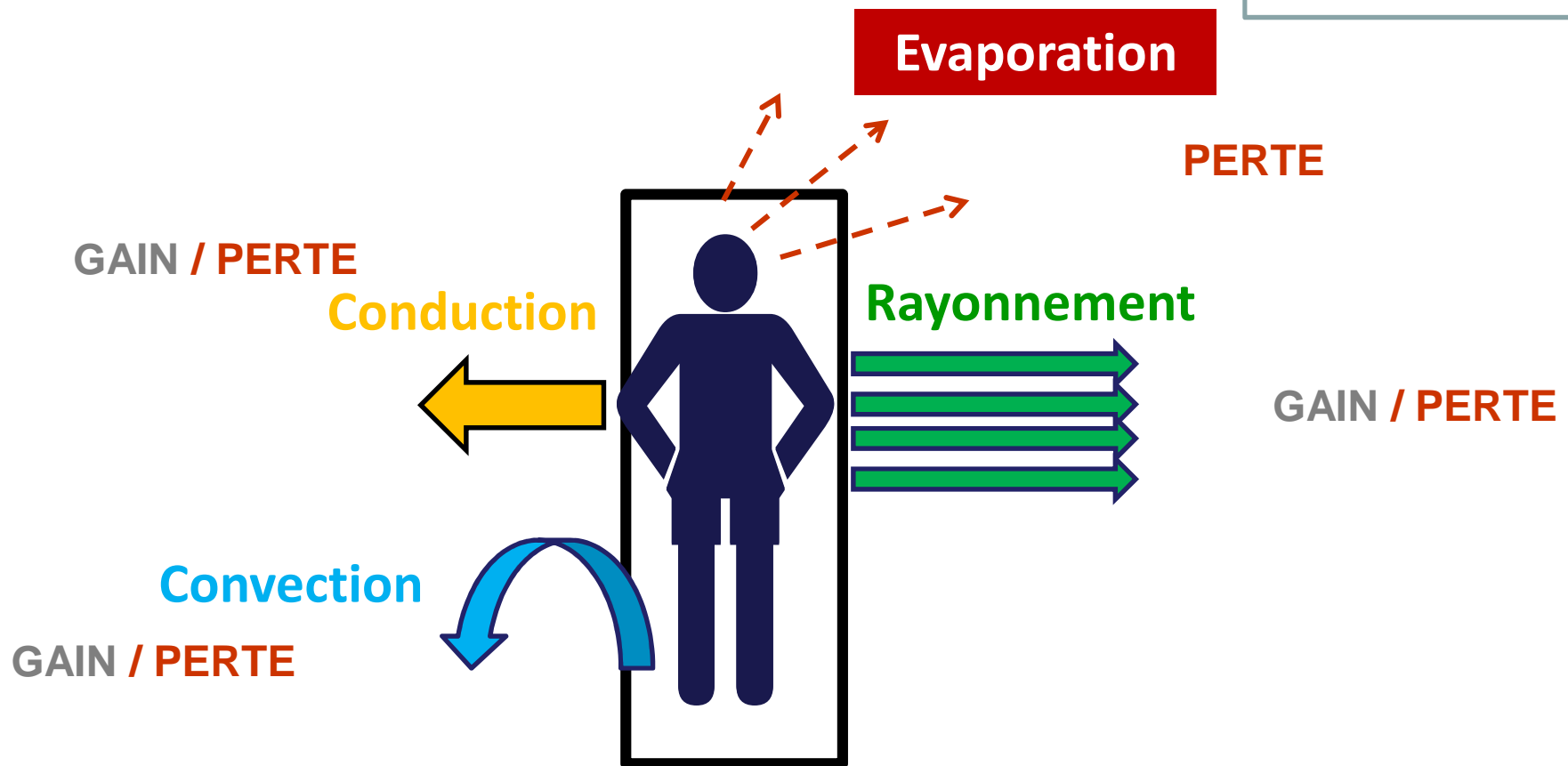


Ce n'est pas la sécrétion de sueur qui élimine de la chaleur mais l'évaporation de cette sueur à la surface de la peau!

③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour la vidéo

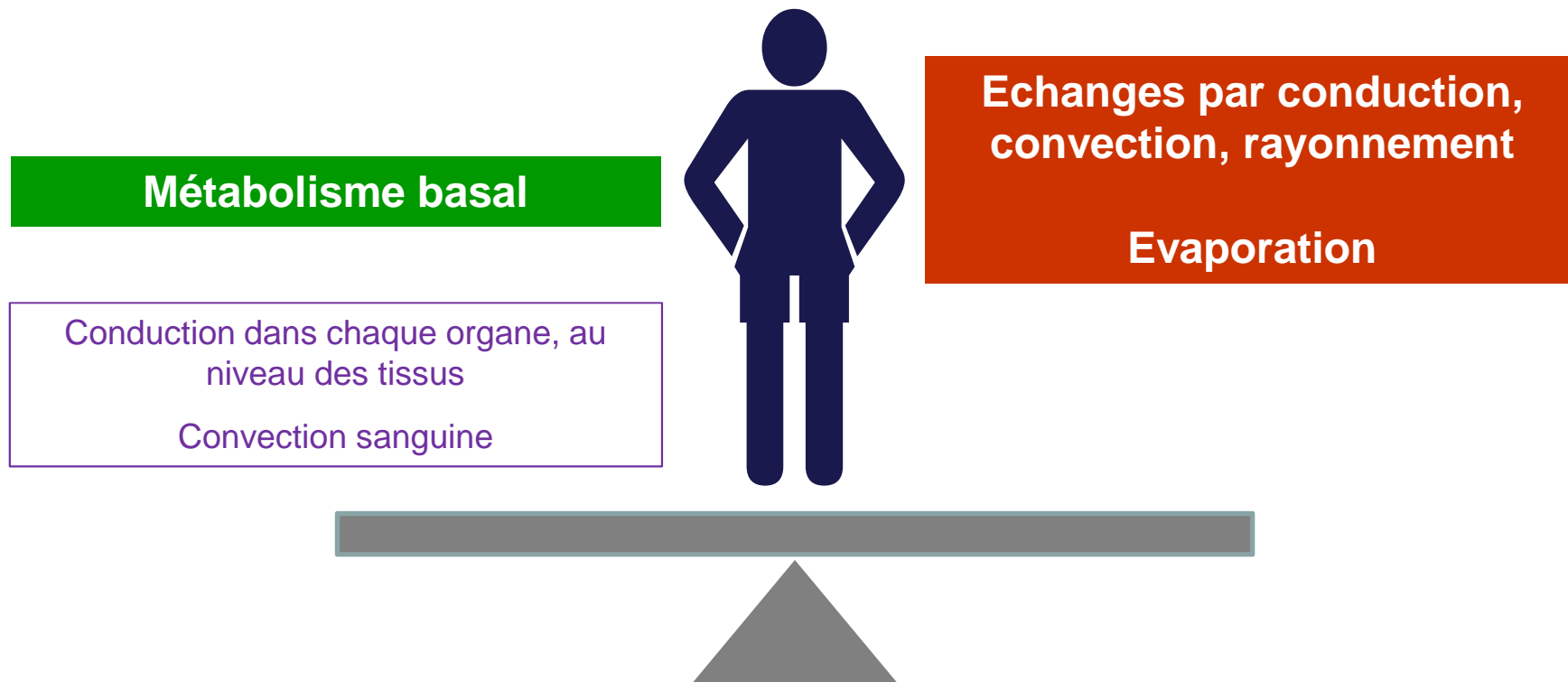
Les échanges thermiques du corps humain



③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour la vidéo

Les échanges thermiques du corps humain

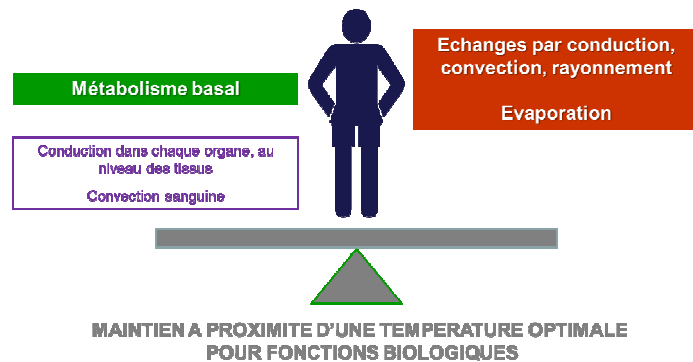


MAINTIEN A PROXIMITE D'UNE TEMPERATURE OPTIMALE
POUR FONCTIONS BIOLOGIQUES

③ THERMOREGULATION DU CORPS HUMAIN

Zone réservée pour la vidéo

Les échanges thermiques du corps humain



THERMO-REGULATION

Ne pas retenir

Détecteurs de température

Thermorécepteurs périphériques et hypothalamiques

Analyse des signaux et commandes

Centre thermorégulateur hypothalamique

Transmission des commandes

Voies nerveuses

Effecteurs

Vaisseaux sanguins (contraction/dilatation)

Glandes sudoripares

Réserves énergétiques

Tissus adipeux bruns

Contraction musculaire...



TRANSFERT DE CHALEUR

Zone réservée pour
la vidéo

- ✓ **Connaitre les différents modes de transmission de la chaleur et savoir calculer les flux de chaleur associés**

Direction du flux

Le transfert de chaleur s'effectue dans le sens des températures décroissantes.

Intensité du flux

Loi de Fourier - Conduction

Loi de Newton - Convection

Lois de Wien, loi de Stefan-Boltzmann - Rayonnement

- ✓ **Savoir appliquer les précédentes notions à la thermorégulation du corps humain**

Principe de l'évaporation et de la thermorégulation

