

# Liaison secondaire-supérieur

## Echanges sur les programmes de physique



# Thermodynamique

## Premier principe et transferts thermiques

*« Pour que la chaleur ne donne plus de sueurs froides »*

**Sophie REMY**

**Physique PC\*, lycée Gay-Lussac - Limoges**



Université de Limoges – 11 avril 2022



## Classe de première

**Notions abordées en classe de première (enseignement de spécialité et enseignement scientifique) :**

Énergie cinétique, travail d'une force, énergie potentielle, théorème de l'énergie cinétique, conservation et non conservation de l'énergie mécanique, bilan de puissance dans un circuit, effet joule, rendement d'un convertisseur, énergie molaire de réaction, pouvoir calorifique massique, énergie libérée lors d'une combustion, énergie de liaison, rayonnement solaire, bilan radiatif terrestre, bilan thermique du corps humain.

## Classe de terminale

### 1. Décrire un système thermodynamique : exemple du modèle du gaz parfait

Notions et contenus	Capacités exigibles <i>Activités expérimentales support de la formation</i>
Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température thermodynamique, pression. Équation d'état du <u>gaz parfait</u> .	Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique. Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz. Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait.

# Terminale, spécialité (suite)

## / Bilans d'énergie

→ Premier principe

### ▪ Energie interne et bilan énergétique

#### 2. Effectuer des bilans d'énergie sur un système : le premier principe de la thermodynamique

Énergie interne d'un système.  
Aspects microscopiques.

Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.

Capacité thermique d'un système incompressible.

Énergie interne d'un système incompressible.

Citer les différentes contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.

Prévoir le sens d'un transfert thermique.

Distinguer, dans un bilan d'énergie, le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.

Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible en fonction de sa capacité thermique et de la variation de sa température pour effectuer un bilan énergétique.

*Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique.*

# Terminale, spécialité (suite)

Notions revues au semestre 1 de CPGE

## Transferts thermiques

Modes de transfert thermique.  
Flux thermique. Résistance thermique.

Bilan thermique du système Terre-atmosphère. Effet de serre.

Loi phénoménologique de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat.

Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection, rayonnement.

Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.

Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour estimer la température terrestre moyenne, la loi de Stefan-Boltzmann étant donnée.

Discuter qualitativement de l'influence de l'albédo et de l'effet de serre sur la température terrestre moyenne.

Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie. Établir l'expression de la température du système en fonction du temps.

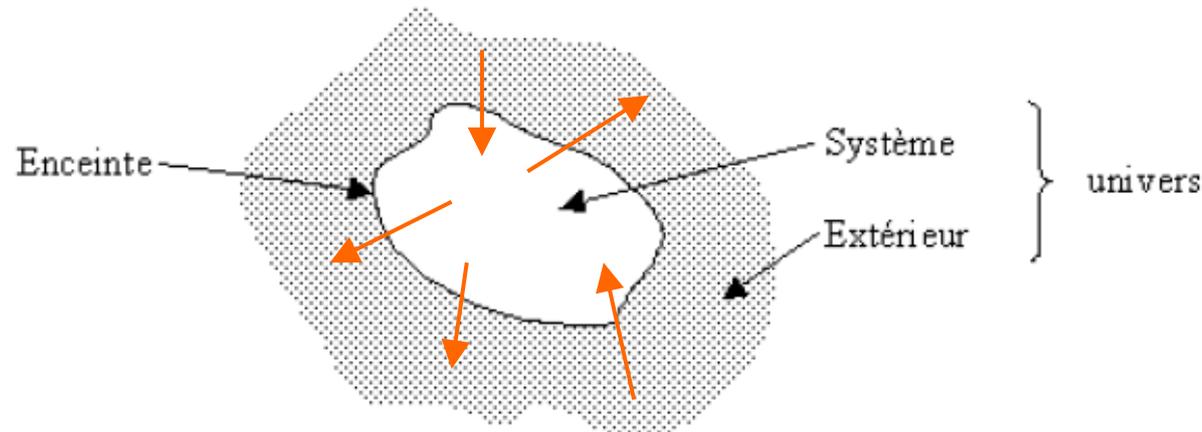
*Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible.*

**Capacité mathématique** . Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec un second membre constant.

# Thermodynamique

## / Présentation

Etude des **échanges d'énergie** entre un « système » et « l'extérieur »



## / Transformation

Une transformation thermodynamique modifie les paramètres d'état du système.

- Qualificatifs d'une transformation
  - « iso », « mono », « no », »quasi », etc...

# Fonctions liées à l'énergie : U et H

## Function d'état

Sa variation, entre 2 états d'équilibre, ne dépend que de l'état initial et de l'état final

## Gaz parfait

### → Compressible

### → Capacités thermiques

$$c_p = R/M + c_v \neq c_v$$

### → Energie interne

#### ▪ Première loi de Joule

$$\Delta U = m c_v \Delta T$$

> Deuxième loi de Joule

$$\Delta H = m c_p \Delta T$$

> Relation

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) \neq \Delta U$$

## Systeme incompressible

### → Phase condensée : liquide ou solide

### → 1 seule capacité thermique

$$c_p \sim c_v = c (J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1})$$

### → Energie interne

$$\Delta U = m c \Delta T$$

#### ▪ Systeme incompressible

$$> \Delta U \simeq \Delta H$$

# Energies de transfert

## ECHANGES énergétiques avec l'EXTERIEUR

Un système fermé peut échanger de l'énergie sous 2 formes.

Ce sont des « transferts », et non des fonctions d'état.

Ces quantités **dépendent du chemin suivi** (de la façon dont on procède).

### Travail W

→ Origine « mécanique »  
macroscopique

#### Formes

$$W_{tot} = \underbrace{W_c}_{-\Delta E_p} + \underbrace{W_{nc}}_{W_a \text{ ou } W_u} + \underbrace{W_{P_{ext}}}_{\text{à voir...}}$$

#### Travail des forces de pression

> Concerne les GAZ

$$\delta W_{P_{ext}} = -P_{ext} dV$$

### « Chaleur » Q

→ Ne se met pas sous forme  
d'un travail macroscopique

#### Pas de forme simple

→ Eh oui !!!

Même pour une phase condensée !

# Premier principe

## / Pour tout système thermodynamique

- Il existe une fonction d'état  $U$   
Additive et extensive
- Variation entre 2 états d'équilibre : l'état « initial » et l'état « final »
  - **Système macroscopiquement au repos** dans un ref galiléen

$$\Delta U = W_{tot} + Q$$

## / Généralisation

- Système en écoulement

- **Détail**

$$\Delta U + \Delta E_C = W_{tot} + Q$$

$$\Delta U + \Delta E_C + \Delta E_P = W_{P_{ext}} + W_{autre} + Q$$

# Applications...

## / NOMBREUSES !

→ Voir exemples classiques et originaux dans les manuels

## / Adiabatique / isotherme ???

→ Systèmes **incompressibles**

- **Si  $W_{\text{tot}} = 0$**

$$\text{Alors : } \Delta U = m c_v \Delta T = 0 + Q$$

$$\text{OK : } Q=0 \longleftrightarrow \Delta T=0$$

- **Si  $W_{\text{tot}}$  non nul**

$$\Delta U = m c_v \Delta T = W + Q$$

$$\text{Aïe !!! } Q=0 \overset{\text{X}}{\longleftrightarrow} \Delta T=0$$

- **Changement d'état**

>  $\Delta T=0$  mais échange de  $Q$  !



# Adiabatique n'est pas isotherme !

## / Système compressible, cas des GP

$$\Delta U = m c_v \Delta T = W_{tot} + Q$$

- **Cas isotherme :  $\Delta T = 0$**

Alors :  $0 = W + Q$

Et :  $Q = -W \neq 0$

Compression ou détente  
d'un gaz thermostaté  
Ici NON adiabatique

- **Cas adiabatique :  $Q = 0$**

Alors :  $\Delta U = m c_v \Delta T = W_{tot} + 0$

Et :  $\Delta T \neq 0$

Compression ou détente  
d'un gaz calorifugé  
Ici NON isotherme

## / Rôle du travail !!!

→ En particulier celui des « forces de pression extérieures »

## / Pas d'expression « a priori » pour Q !



# Calorimétrie

Adiabatique non isotherme

## / Principe

- Etat initial : 2 sous-systèmes incompressibles (eau liquide)
  - Masse  $m_1$  d'eau à  $T_1$
  - Masse  $m_2$  d'eau à  $T_2$
- Etat final : mélange thermalisé
  - Masse totale  $m = m_1 + m_2$  à  $T_f$ ,
    - >  $T_f$  intermédiaire entre  $T_1$  et  $T_2$ .



## / Transformation

- **adiabatique** pour l'ensemble : **Q=0**
- **Non isotherme !**
  - Masse  $m_1$  :  $T_1 \rightarrow T_f$      **$\Delta T \neq 0$**
  - Masse  $m_2$  :  $T_2 \rightarrow T_f$      **$\Delta T \neq 0$**

# Changement d'état

Isotherme non adiabatique

## / IsoT mais pas adiabatique !

- Transformation aussi iso P
- Paramètres intensifs invariables pendant la transition de phase



## / Fonction d'état caractéristique

- **Chaleur latente**  $L_{1,2}$  :  $\Delta H_{1,2}$  : variation d'enthalpie

## / Transition entre phases condensée : solide-liquide

$$\Delta H = L_{1,2} \sim \Delta U = Q_{+w}$$

$$\text{Souvent : } L_{1,2} \sim Q$$

## / Cas d'une vaporisation

- $\Delta H = L_{1,2} \neq \Delta U = Q + W$
- Il se peut que :  $Q \neq L_{1,2}$ 
  - Cf vaporisation dans le vide...



# Transferts thermiques

## Etude en terme de « flux »

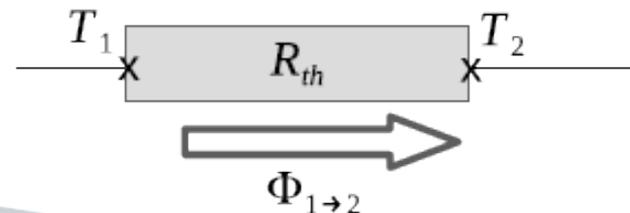
### / Flux thermique

- $\Phi$  : « chaleur » traversant une section  $S$  par unité de temps
  - **Flux thermique = puissance** (W)
- Notion de « temps » ← *N'apparaît pas dans le 1<sup>er</sup> principe !*

### / Résistance thermique

- En régime permanent (conservation du flux) ou au moins ARQS
  - > *Comme en électricité*

- $$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi_{1 \rightarrow 2}} \quad [R_{th}] : K.W^{-1}$$
$$R_{th} > 0$$

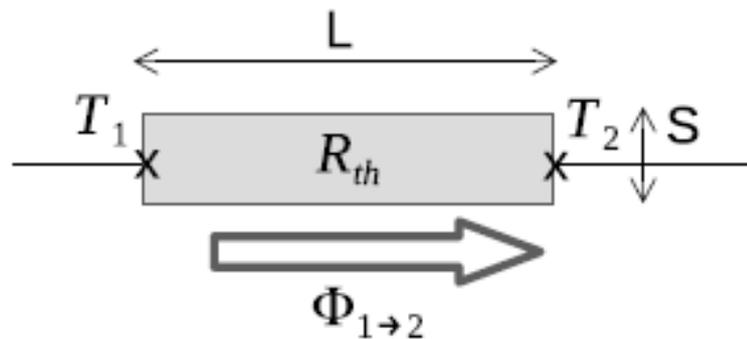


- Notion générale « d'impédance »

$$\frac{\text{Cause}}{\text{Conséquence}} = \frac{\text{Différence de champ scalaire}}{\text{Flux}}$$

# Résistances thermiques

✓ Définissable pour les 3 modes de transfert thermique



→ Conduction

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = S \lambda \frac{T_1 - T_2}{L}$$

$$R_q = \frac{L}{S \lambda}$$

→ **Conducto-convection**

▪ Loi de Newton

$$\Phi_{cc} = h S (T_1 - T_2)$$

$$R_{cc} = \frac{1}{h S}$$

▪ Le flux se distribue sur les sections :

$$R_{th} \propto 1/S$$

→ Rayonnement

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \sigma S (T_1^4 - T_2^4)$$

$$R_{ray} = \frac{1}{4 \sigma T_2^3 S}$$

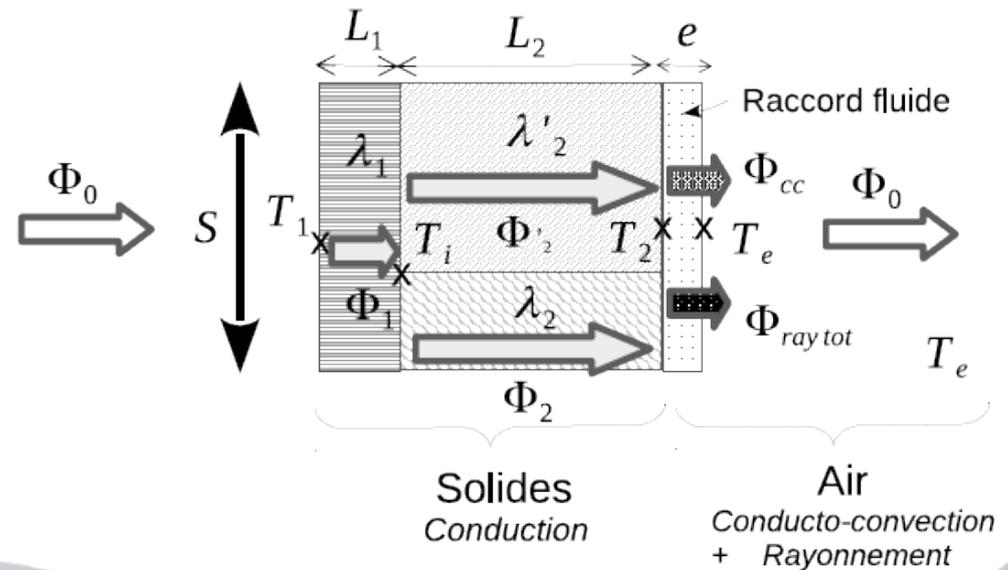
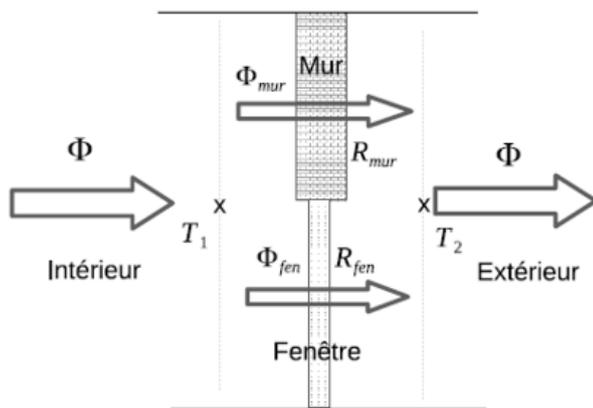
← Si  $T_1 \sim T_2$

# Associations de résistance thermique

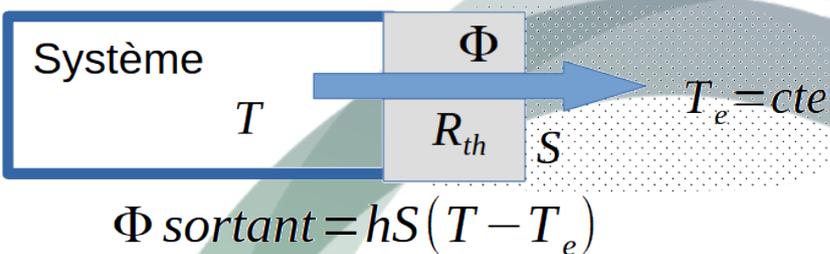
## Raisonner sur les flux

→ Comme en électricité : série / parallèle

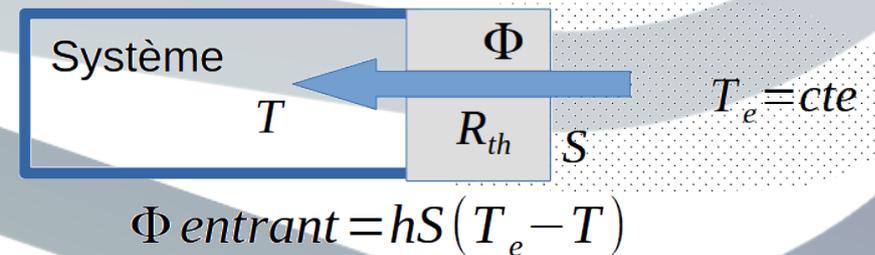
▪ Indépendamment du mode de transfert



→ Important : sens de  $\Phi$



$$\Phi_{\text{sortant}} = hS(T - T_e)$$



$$\Phi_{\text{entrant}} = hS(T_e - T)$$

# Ensemble pour lutter contre le froid

## / Position du problème

→ Les manchots empereurs se mettent en groupe pour résister au froid

Source : Gilbert C. *et al.*, Energy saving processes in huddling emperor penguins : from experiments to theory, *Journal of Experimental Biology*, vol. 211, 2008, p. 1-8.

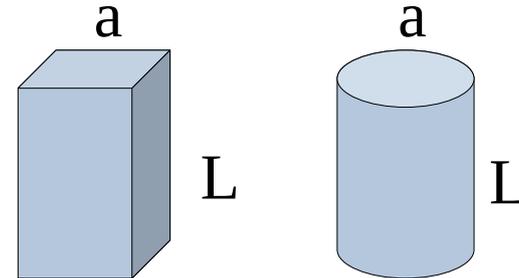
Le manchot empereur *Aptenodytes forsteri* est la plus grande espèce de manchots, avec en moyenne une taille de 1,2 m et une masse corporelle de 30 kg. Ce manchot est capable d'affronter sur de longues durées les conditions climatiques extrêmes de l'Antarctique, caractérisées par des températures moyennes de  $-40\text{ °C}$  lors des longues nuits polaires du mois de juin et des températures ressenties atteignant les  $-200\text{ °C}$  lorsque le blizzard souffle au plus fort. Le secret de cette exceptionnelle capacité d'isolation thermique réside dans toute une série d'adaptations, en particulier physiologiques et comportementales.



# Modèle du manchot

## Forme (au choix)

- Parallélépipède : côté  $a$ , hauteur  $L$
- Cylindre : diamètre  $a$ , hauteur  $L$ 
  - $a \sim 20 \text{ cm}$  ;  $L \sim 1,2 \text{ m}$

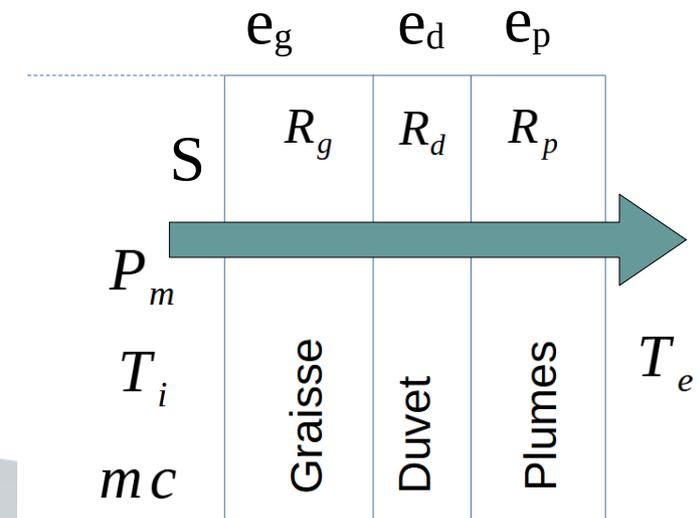


## Métabolisme

- Puissance  $P_m$  (W)
- Capacité thermique  $C$  ( $\text{J.K}^{-1}$ ) ou  $mc$  ( $\text{J.K}^{-1}$ )

## Isolation thermique du manchot

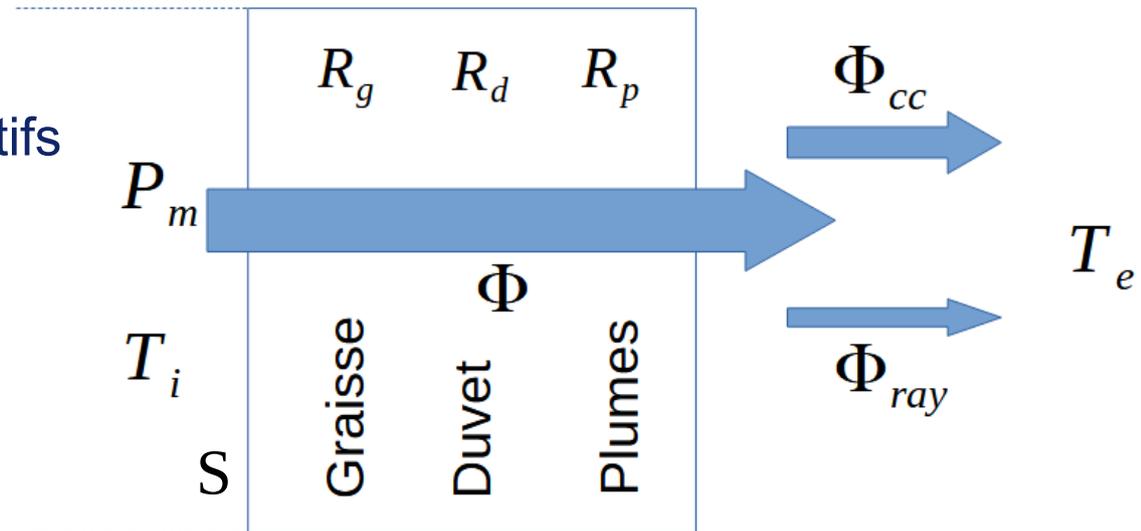
- Couche de graisse,  $e_g$  (cm)
- Duvet filamenteux, emprisonnant de l'air,  $e_d$  (cm)
- Plumes courtes et raides, formant un « coupe-vent »,  $e_p$  (cm)
  - **Résistances en série** ( $\text{K.W}^{-1}$ ), même section  $S$



# Pertes thermiques

## Pertes thermiques

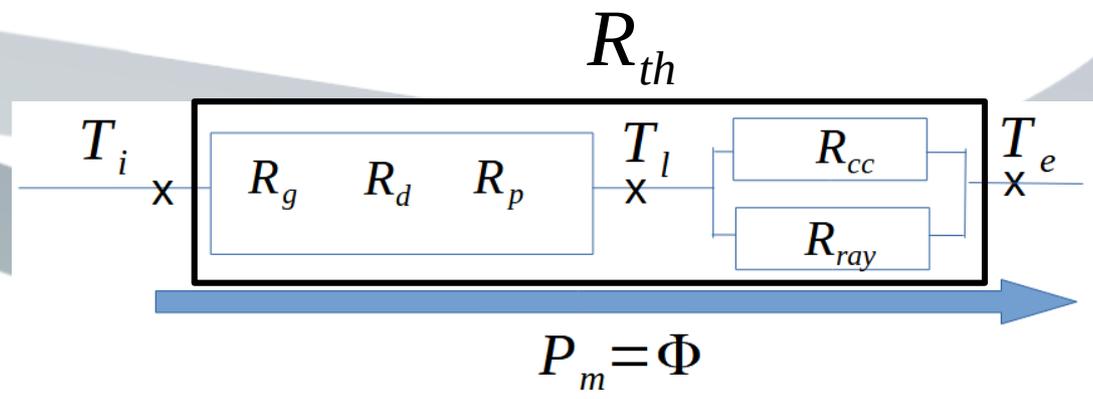
- Transferts conducto-convectifs
  - Loi de Newton
    - > Coef h dépend du vent
- Transferts par rayonnement



## Régime stationnaire

- « Tout ce qui entre sort »
- $P_m = \Phi = \Phi_{perdu} = \Phi_{cc} + \Phi_{ray}$

## Schéma équivalent



# Puissance fournie par le métabolisme ?

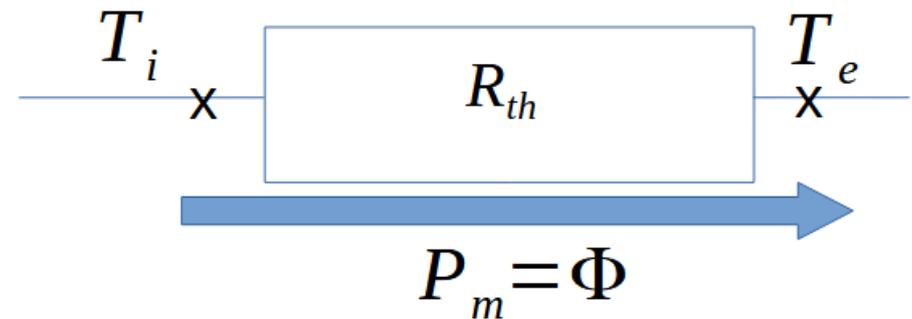
## Données

→ Températures :

- $T_i = 38 \text{ °C}$
- $T_e = -20 \text{ °C}$

→  $R_{th}$  totale :

- $R_g + R_d + R_p = 1,07 \text{ K.W}^{-1}$
  - $R_{cc} // R_{ray} = 0,03 \text{ K.W}^{-1}$
- > Soit :  $R_{th} = 1,10 \text{ K.W}^{-1}$



*On peut bien sûr se limiter à  $\Phi_{cc}$*

**Puissance nécessaire pour maintenir  $T_i$  :**  $P_m = \frac{T_i - T_e}{R_{th}}$

→ Ordre de grandeur : 50 W

**Métabolisme moyen  
d'un manchot seul**

# La température baisse...

/ **Nouvelle T extérieure :  $T_e = -40\text{ °C}$**

→  $T_i - T_e$  ↗

/ **Vent « fort » :  $R_{cc}$  ↘ qd  $V$  ↗**

$$R_{cc} = 1/(hS) \quad h \sim \alpha + \beta v$$

→  **$R_{th}$**  ↘

/ **Maintient de  $T_i$**

→  $P_m$  ↗ ↗

▪ On estime  $P_m \sim 80\text{ W}$



/ **Forte conséquence sur la durée de vie...**

/ **Solution ?**

→ Augmenter  $R_{th}$  ?

→ Augmenter  $P_m$  ?

$$T_i - T_e = R_{th} P_m \quad \nearrow$$

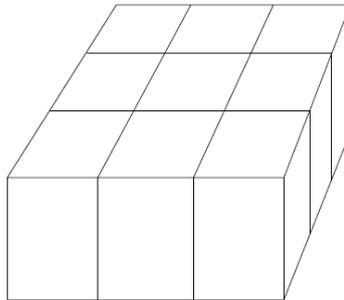
# Se regrouper

## Nombre d'individus ↗

- $P_m$  totale ↗ quand le volume ↗
- $R_{th}$  ↘ quand la surface (latérale principalement) ↗

## Effet de groupe

- Si 1 individu  $P_1$  :
  - >  $S_{lat\_1} = 4 \times (a \times L)$
  - >  $V_1 = L \times a^2$



- Si 9 individus (3x3)
  - >  $S_{lat} = 12 \times (a \times L) = 3 S_{lat\_1}$  et  $R_{th}$  est  $\times 1/3$
  - >  $V = 9 \times V_1$

**Efficacité !**

- Puissance nécessaire par individu  $\times 3/9 = 1/3$

- Et ainsi de suite : pour  $n \times n$  individus :

- $P_{1,n} = 1/n P_1$



$$P_{m\text{tot}} = \frac{T_i - T_e}{R_{th}/n} = n^2 P_{1,n}$$

$$P_{m\text{tot}} = n \frac{T_i - T_e}{R_{th}} = n P_1 = n^2 P_{1,n}$$

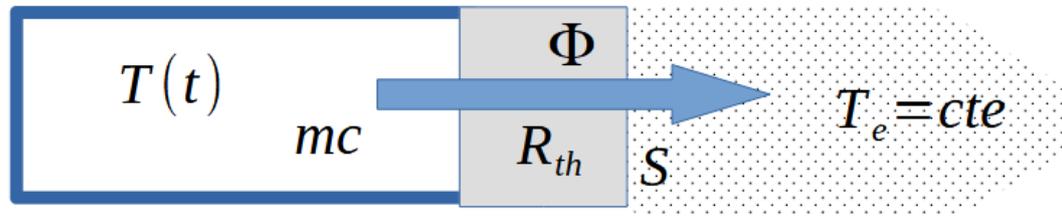
# Evolution de la température interne

✓ **Le manchot doit rester à  $T_i > T_{lim} \sim 32 \text{ °C}$**

✓ **Evolution temporelle de  $T_i$  :  $T(t)$**

→ ARQS

- **Sans puissance métabolique** (cf. cours spécialité)



- Equation différentielle

Le flux  $\Phi$  est "perdu" :

$$\frac{dU}{dt} = -\Phi = mc \frac{dT}{dt} = -\frac{T - T_e}{R_{th}} [W]$$

- Solution

$$T(t) = T_e + (T_0 - T_e) \exp\left(-\frac{t}{mc R_{th}}\right)$$

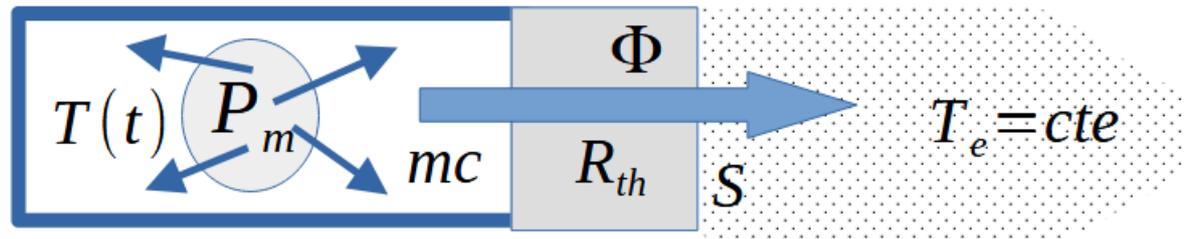
$$T(\infty) = T_e$$



# Influence du métabolisme

## Evolution avec puissance métabolique

- Système : « l'intérieur » du manchot, de température  $T(t)$
- Causes d'évolution de  $T$ 
  - Pertes à travers la surface :  $\Phi$
  - Puissance fournie par le métabolisme  $P_m$



### → Equation différentielle

- Bilan : 
$$\frac{dU}{dt} = mc \frac{dT}{dt} = -\Phi + P_m = -\frac{T - T_e}{R_{th}} + P_m \text{ [W]}$$

### ▪ Equation

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T - T_e}{mc R_{th}} = \frac{P_m}{mc}$$

# Analogie électrique

## / Solution

$$T(t) = T_e + (T_0 - T_e - \mathcal{P}R_{th}) \exp\left(-\frac{t}{CR_{th}}\right) + \mathcal{P}R_{th}$$

## / T finale : $T_f = T_e + P_m R_{th} > T_{lim}$

- Autre façon d'évaluer  $P_m$  nécessaire...
- Régime « permanent »,  $T_f = T$  interne  $T_i$  :  $T_e + P_m R_{th} = T_i$

## / Temps caractéristique de l'évolution

- Cte de temps :  $\tau = R_{th} mc$

## / Analogie avec les circuits RC électriques

- R électrique  $\Leftrightarrow$  R thermique
- C électrique  $\Leftrightarrow$   $mc = C$  thermique
- Source de courant  $I_0 \Leftrightarrow P_m$

$$I_0 = i_R + i_C \Leftrightarrow P_m = \Phi + C \frac{dT}{dt}$$

# « Thermorégulation sociale »

## / Evolution de la température interne $T(t)$

→ Analogie circuit « RC », cinétique d'ordre 1

## / Nécessité d'un métabolisme

→ Pour garder  $T_i > T_{lim}$

## / Puissance $P_m$ pour un individu seul

→ Transfert thermique limité au flux conducto-convectif  $\Phi_{cc}$

- Loi de Newton

→ Etude de différents modes de transferts thermiques

- Association de résistances

## / Efficacité du groupe

→ Economie !



# A vous de jouer !



**sophie.remy @ ac-limoges.fr**