

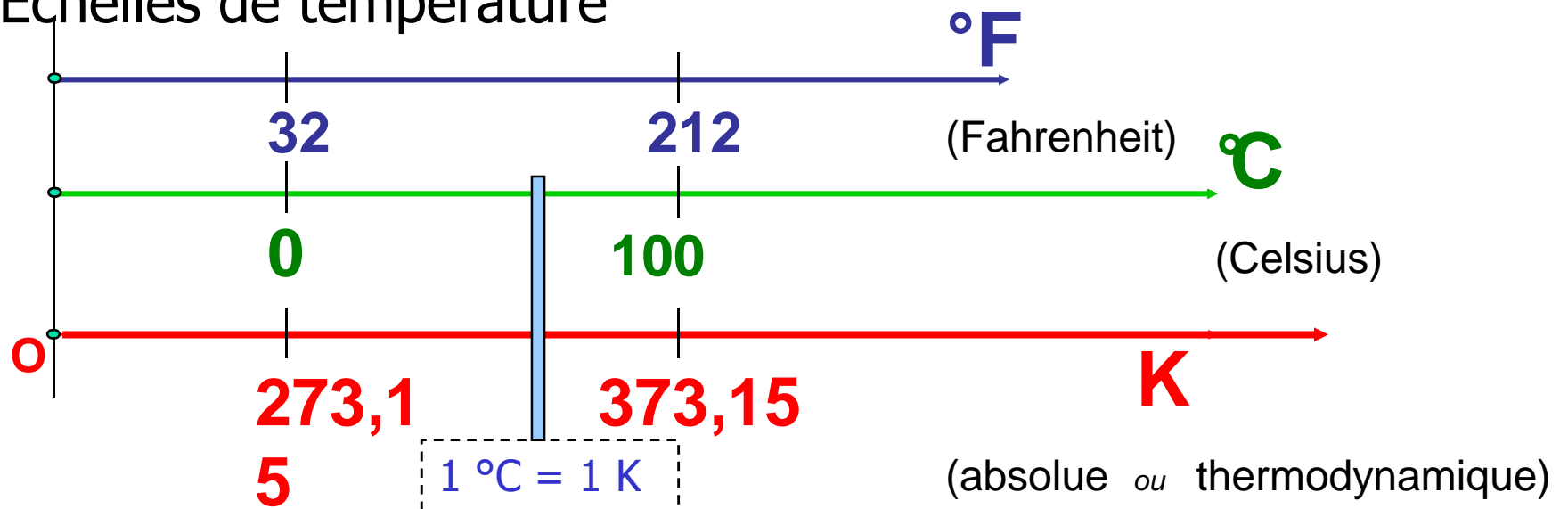
Définitions - Unités

Quantité de chaleur : Q en Joule (**J**) [ou en calories (**cal**)]

Sachant que : $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$ $1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ cal}$ et $1 \text{ th} = 10^6 \text{ cal}$

Travail [W] et **Chaleur [Q]** s'expriment avec la même unité. Dans le système international **SI**, l'unité est le Joule (**J**)

■ Échelles de température



Energie, puissance

Chaleur Q ou travail W sont exprimés en **Joules** (J) [ou **calorie** (cal)]

On définit également le Wattheure comme étant :

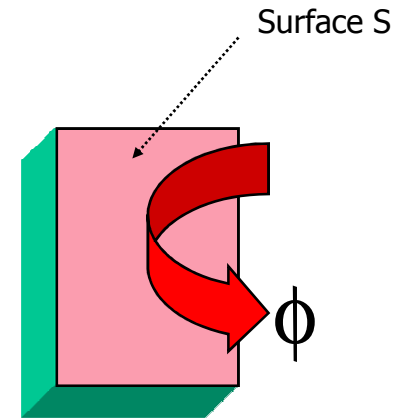
$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$$

Puissance ou Flux thermique (Quantité d'énergie par unité de temps)

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

en (J/s) ou (**Watt**)

[ou ($kcal/h$) ou (th/h)]



Autre écriture :

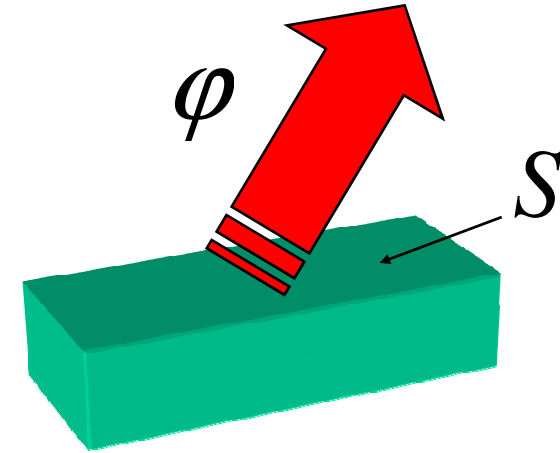
$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \dot{Q}$$

Densité de puissance (ou densité de flux)

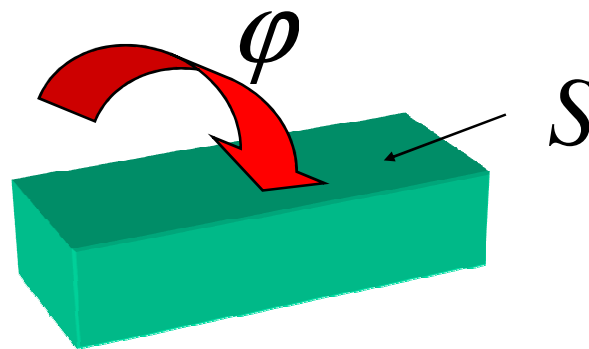
$$\varphi = \frac{\Phi}{S}$$

en (**W/m²**)

Ou en (**(kcal/h)/m²**)



(cas a): le corps cède de l'énergie

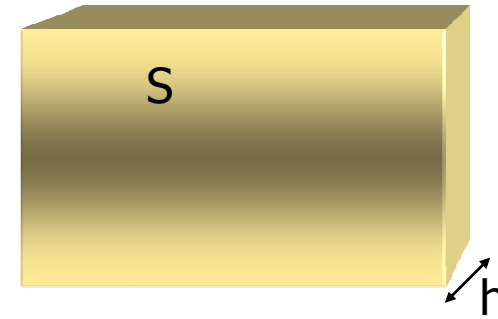


(cas b): le corps reçoit de l'énergie

Masse volumique, densité volumique

Volume :

$$V = S.h \text{ (en } m^3 \text{)}$$



Masse volumique :

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ en (kg.m}^{-3}\text{)}$$

cas de l'eau pure (à 4°C): $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$

Densité : elle est définie par rapport à la masse volumique de l'eau.

$$d = \frac{\rho_{\text{corps considéré}}}{\rho_{\text{eau}}} \text{ (sans unité)}$$

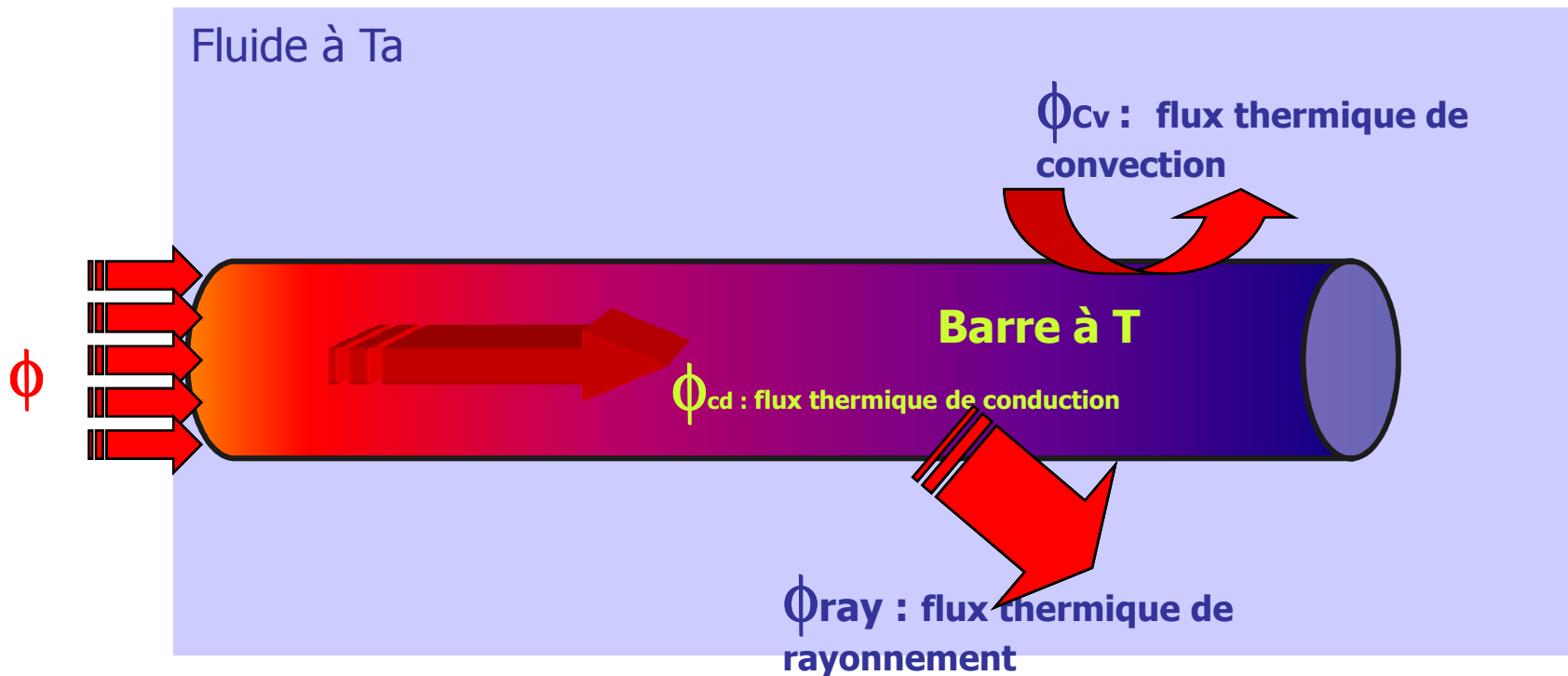
Densité relative à l'air :

- Cas de l'hydrogène : il monte en l'air
- Cas du dioxyde de carbone : il reste au sol
- Cas de l'air : sa densité baisse si sa température augmente

corps	densité
uranium	18,7
plomb	11,3
cuivre	8,92
Fer	7,86
aluminium	2,70 (avions)
Eau	1
huile	0,9
air	0,0012

Différents modes de transferts thermiques

3 modes : Conduction, convection et rayonnement thermique



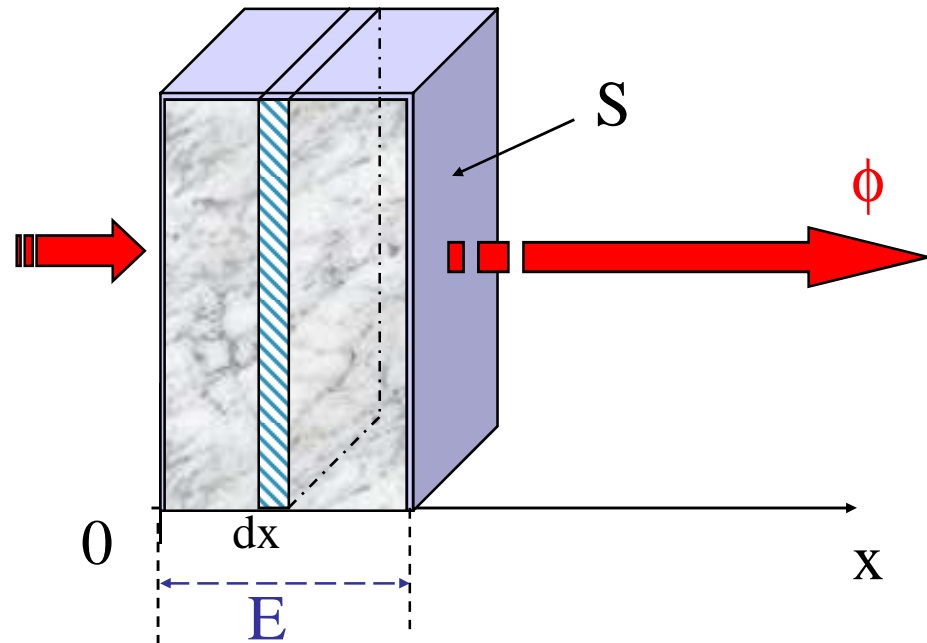
Conduction thermique

Equation de Fourier : Le flux de chaleur (débit), en **Watt** ou en **kcal/h** est donné par la relation suivante

$$\phi = -\lambda.S.\frac{dT}{dx}$$

ou plus simplement :

$$\phi = \lambda.S.\frac{\Delta T}{E}$$



λ : conductivité thermique du matériau en **W/m.°C**

S : surface soumise au flux de chaleur en **m²**

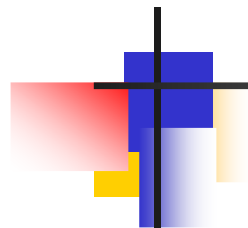
E : épaisseur du matériau en **m**

$\Delta T/E$: gradient de température ou taux de variation de la température en **(°C/m)**



Quelques valeurs de λ (en W/m.°C) (pour des températures usuelles)

air	0.02	Très bon isolant thermique
Polyuréthane (PUR)	0,03	Contient des CFC – nouveaux produits sans CFC-
Polystyrène expansé	0.04	Isolant thermique Contient de l'air
Laine de roche	0,04	$\rho = 25 \text{ kg/m}^3$ $\rho_{\text{verre}} = 2500 \text{ kg/m}^3$
Liège expansé	0.04	Isolant thermique et phonique
Liège comprimé	0.1	
Bois sec	0,06	
eau	0,6	



Quelques valeurs de λ (W/m.°C)

(pour des températures usuelles)

Verre à vitre	0,8	
bétons	1,5	
Pierre lourde	2,5	
Aciers _(0,1C)	45	Plus faible pour aciers inox (15)
Nickel	90	
Aluminium	200	Bac de cuisson alimentaire
Cuivre	380	Échangeurs thermiques
Argent	420	

La conductivité thermique d'un matériau est fonction de :

■ Sa densité : Au-delà de 1,5 de densité, une augmentation de 10 % de celle-ci entraîne une augmentation de λ d'environ 15 %

Plus un matériau est léger, plus il est isolant thermique

■ Sa température :

Plus un matériau est chaud, plus il est conducteur thermique

■ Sa teneur en humidité : *Plus un matériau est humide, plus il est conducteur thermique*

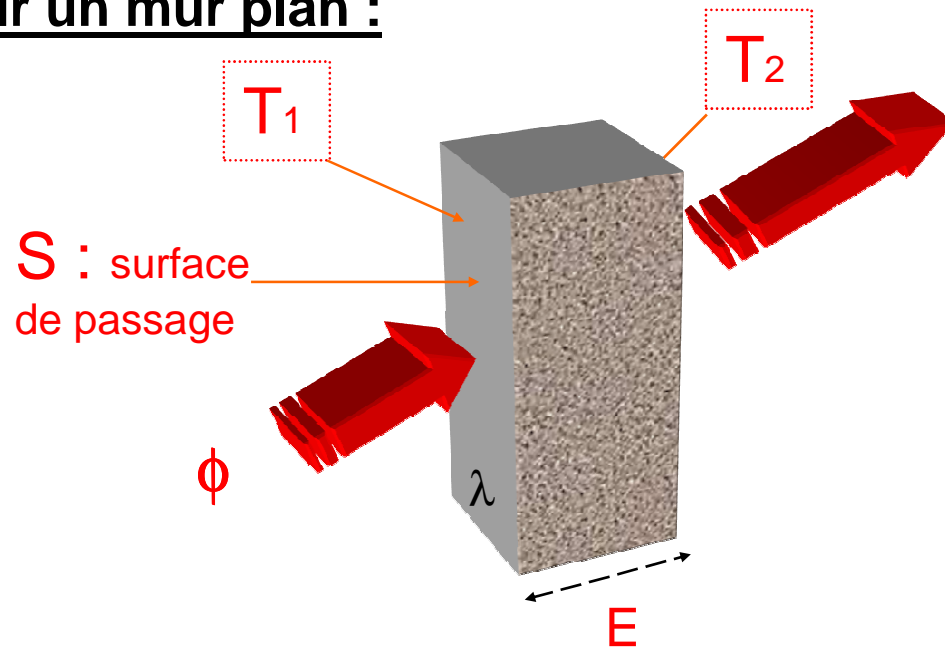
Résistance thermique

- Donnée par la relation :

$$\Delta T = R_{cd} \cdot \Phi$$

R_{th} en $(^{\circ}\text{C}/\text{W})$
ou $^{\circ}\text{C}/(\text{kcal}/\text{h})$


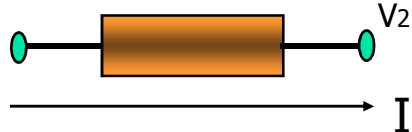
Pour un mur plan :



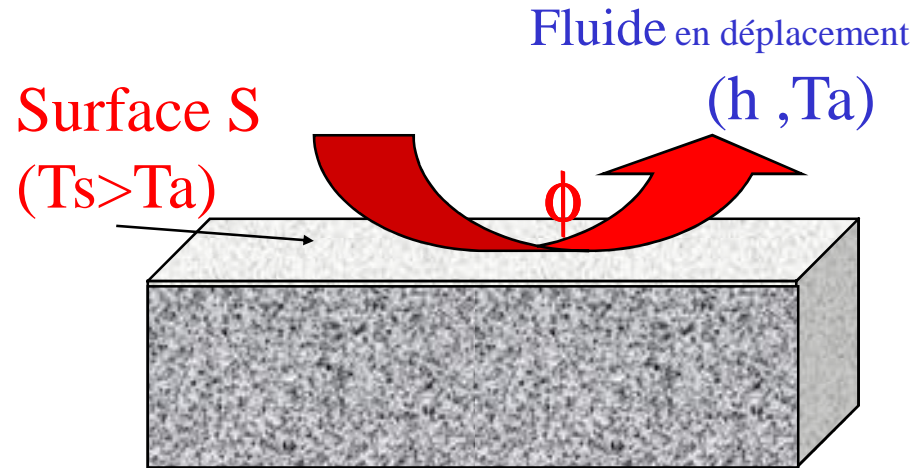
$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$R_{cd} = \frac{E}{\lambda \cdot S}$$

Analogie électrique

		ϕ : Courant thermique I : courant électrique
$\Delta T = R \phi$	$U = R \cdot I$ Loi d'Ohm	
R : Résistance thermique	R : résistance électrique	$K = 1/R$: conductance thermique
T_1, T_2 : potentiels thermiques	V_1, V_2 : potentiels électriques	$\Delta T = T_1 - T_2$: écart thermique $\Delta U = V_1 - V_2$ différence de potentiel (d.d.p)

Convection



Le flux de chaleur est donné par la relation :

$$\phi = h.S.\Delta T \quad \text{avec} \quad \Delta T = T_s - T_a$$

h : coefficient de convection en $(W.m^{-2}.K^{-1})$



Coefficient de convection h

- Le tableau qui suit en donne l'ordre de grandeur :

Condition	h (W/m ² .K)		
Air en convection libre	6	à	30
Air en convection forcée <i>ou</i> Vapeur d'eau surchauffée	30	à	300
Eau en convection forcée	300	à	12 000
Eau en ébullition	3 000	à	60 000
Vapeur d'eau, condensation	6 000	à	120 000
Huile en convection forcée	60	à	1800

Le coefficient de convection h est difficile à déterminer. Il dépend de plusieurs paramètres: vitesse du fluide, géométrie et position dans l'espace de la surface considérée, paramètres thermophysiques du fluide (masse volumique, viscosité dynamique, conductivité thermique, chaleur spécifique etc.)

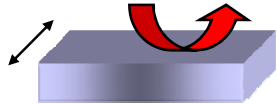
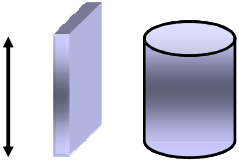
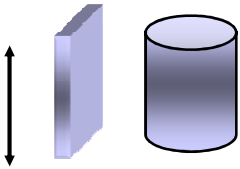
$$h=f(\mathbf{v}, \mathbf{D}, \mathbf{x}, \rho, \eta, \lambda, C_p)$$

D'où la difficulté de calculer le coefficient de convection h

Cependant, on peut déterminer la valeur du coefficient h à l'aide des formules semi empiriques suivantes:

Valeur empirique du coefficient de convection h pour l'air

h en (W/m².°C)

<p>Largeur L</p> 	$h = 1,3 \left[\frac{\Delta\theta}{L} \right]^{(1/4)}$
<p>Hauteur H < 30cm</p> 	$h = 1,4 \left[\frac{\Delta\theta}{H} \right]^{(1/4)}$
<p>Hauteur H > 30cm</p> 	$h = 1,8 [\Delta\theta]^{(1/4)}$

Résistance thermique de convection

- On définit de la même façon:

$$\Delta T = R_{cv} \Phi$$

Une relation de type :

Avec :

$$R_{cv} = \frac{1}{h.S}$$

Résistance thermique de convection en : deg/W

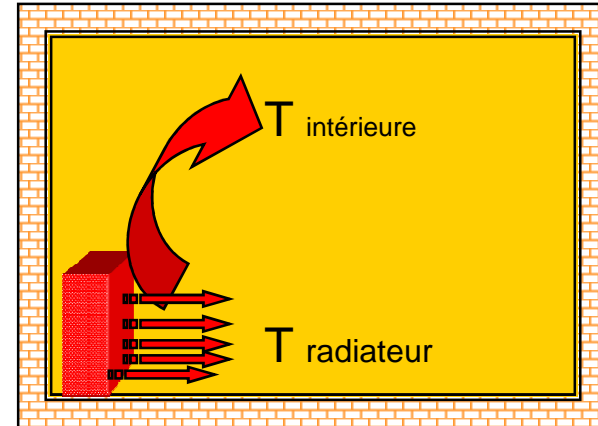
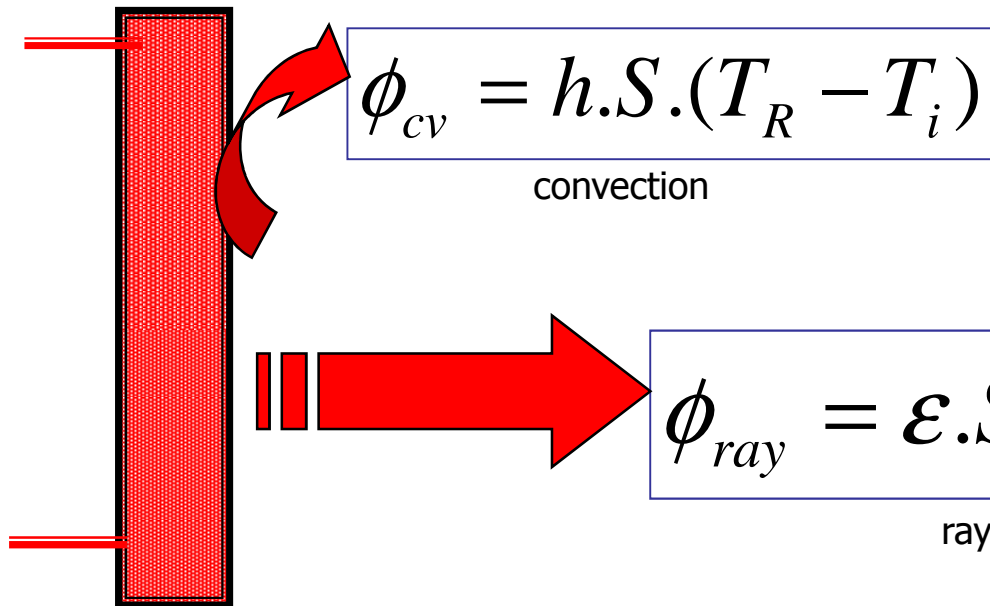
ou °C/(kcal/h)

Ou une **conductance** telle que :

$$K_{cv} = \frac{1}{R_{cv}}$$

Rayonnement thermique

- Puissance rayonnée par un radiateur

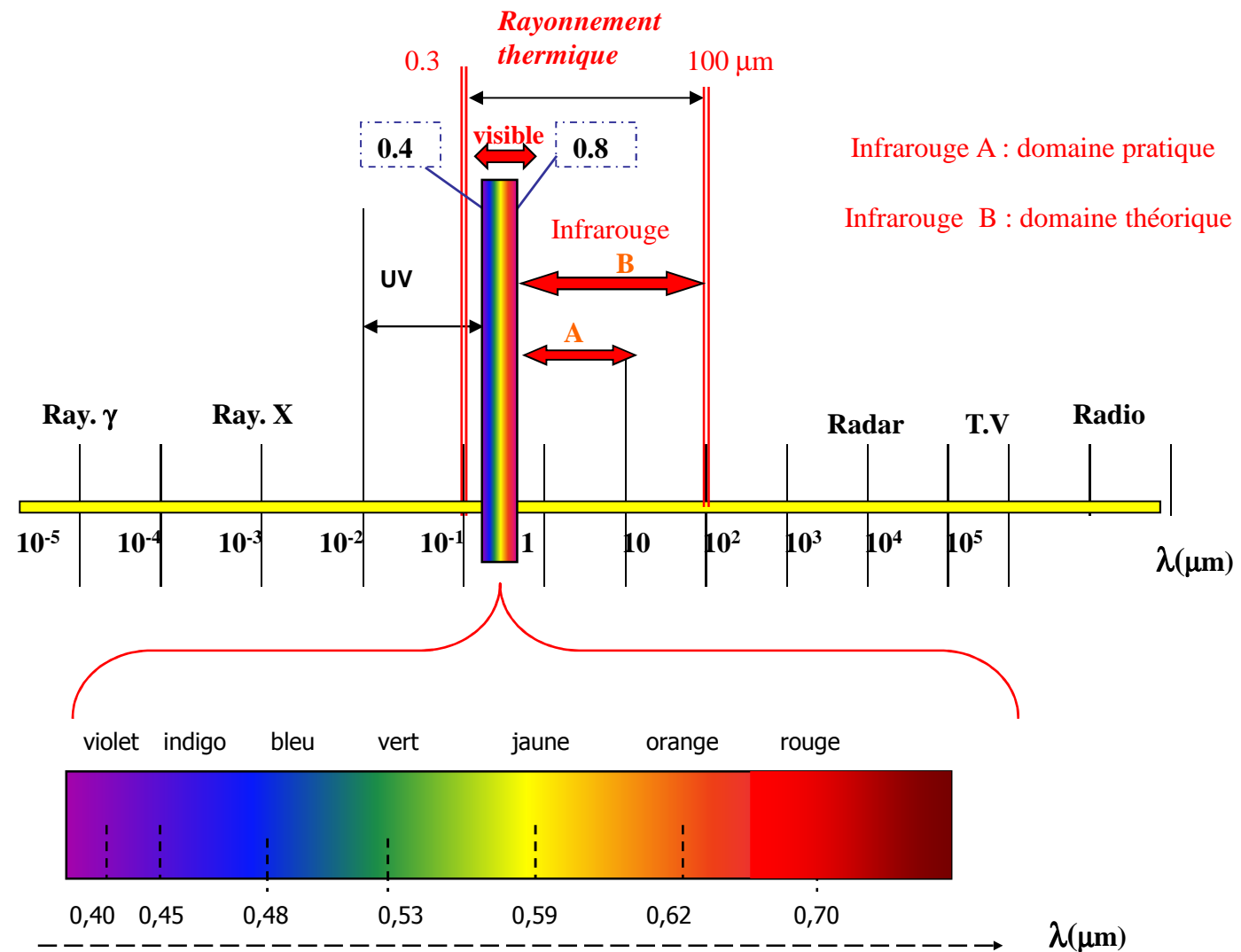


- ε : coefficient d'émission ou **émissivité** de la surface rayonnante $0 \leq \varepsilon \leq 1$
- σ : constante de Stéfán $\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
- T_r : température de la surface rayonnante en K
- T_i : température intérieure de l'enceinte en K

Quelques valeurs de l'émissivité de certains matériaux

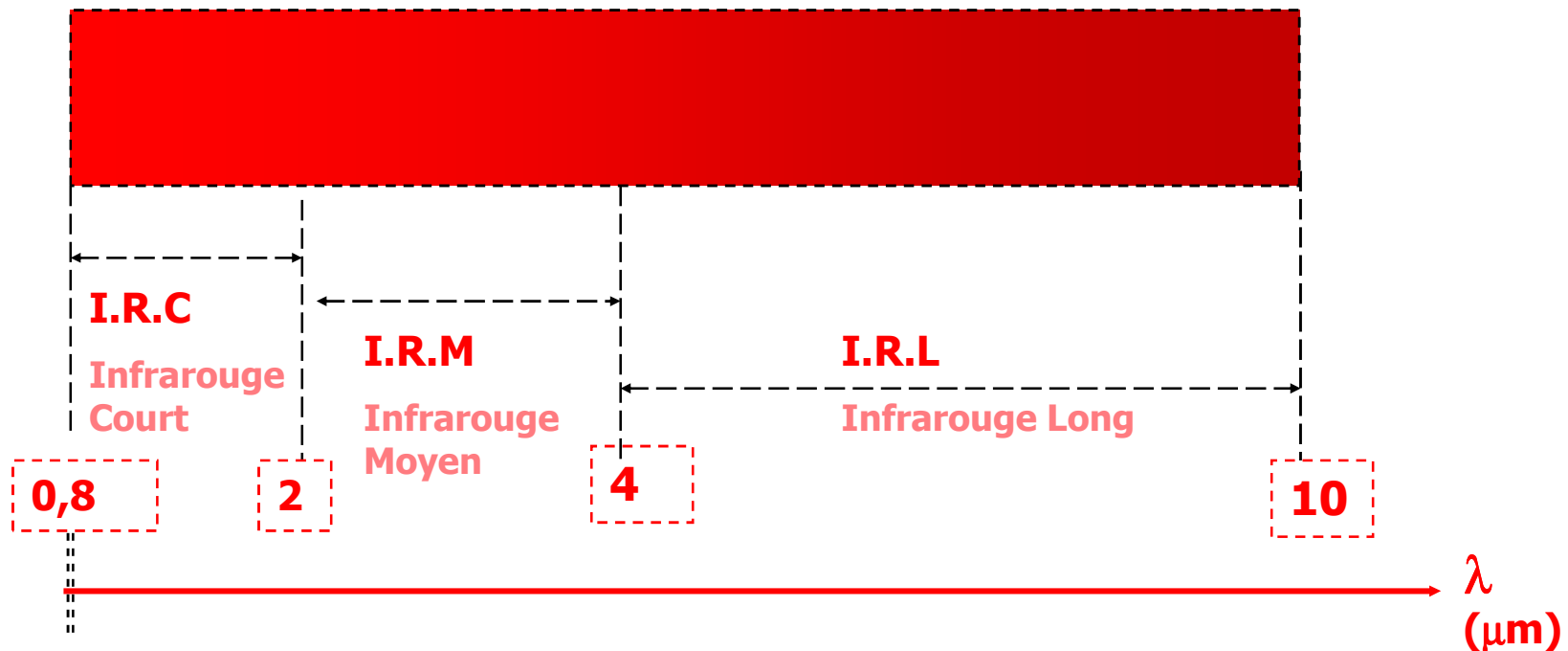
Corps noir	$\varepsilon = 1$	Théorique (référence) Cavité isotherme possédant la capacité d'une absorption totale de l'onde qui y pénètre
Acier inox 18-8 poli	0,15 (38 °C)	
Acier inox 18-8 altéré	0,85 (38 °C)	
Chrome poli	0,08	
Fonte oxydée	0,65 (20 °C) 0,85 (900 °C)	
Aluminium poli	0,04	réflecteurs
Aluminium anodisé	0,94	
cuivre poli	0,04	
Cuivre oxydé	0,87	
briques	0,9	
Émail blanc	0,9	
peintures	0,95	
Corps humain	0,98	Valeur importante

Spectre des ondes électromagnétiques



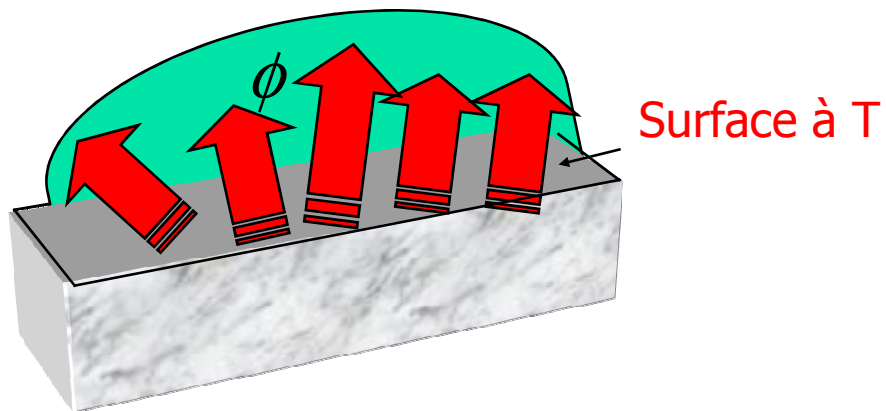
Domaines de l'infrarouge

- On définit 3 domaines



Quelques définitions

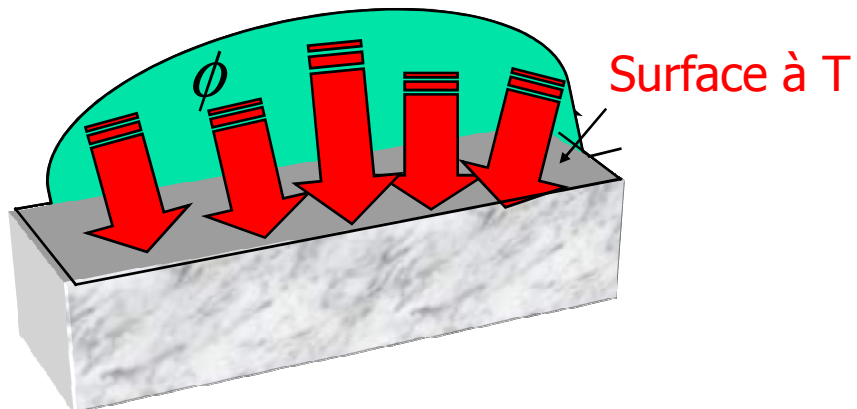
- Emittance d'une surface émettrice:



$$M = \frac{\phi}{S}$$

en (W / m^2)

- Eclairement d'une surface réceptrice:

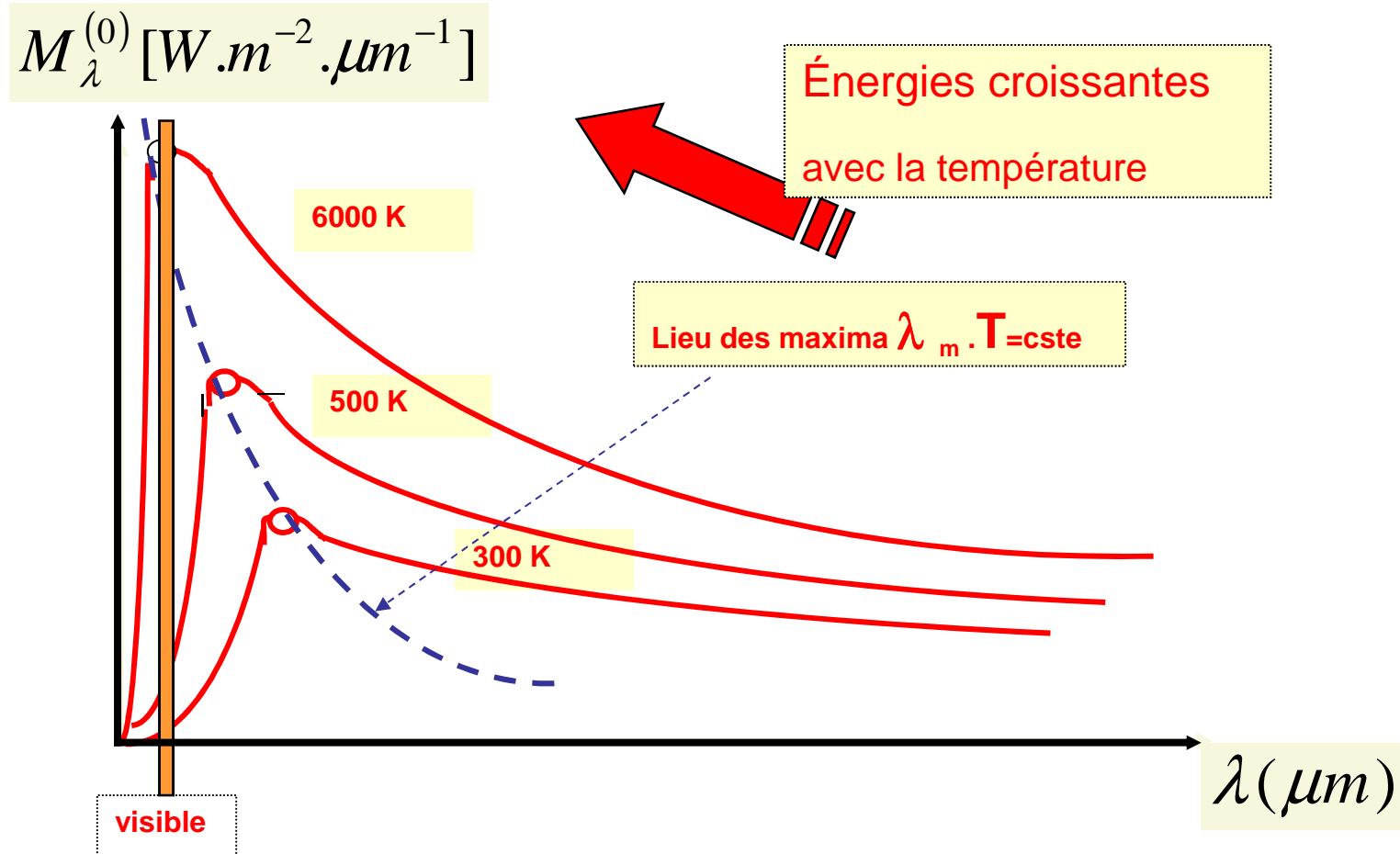


$$E = \frac{\phi}{S}$$

en (W / m^2)

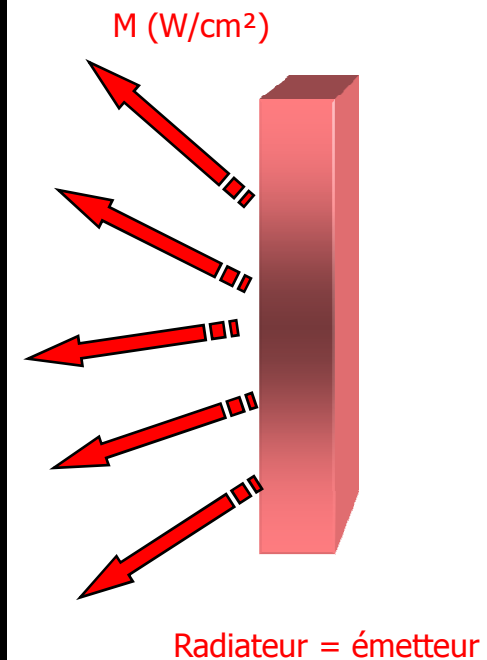
EMITTANCE MONOCHROMATIQUE DU CORPS NOIR

Distribution spectrale de l'émittance du corps noir en fonction de la température absolue



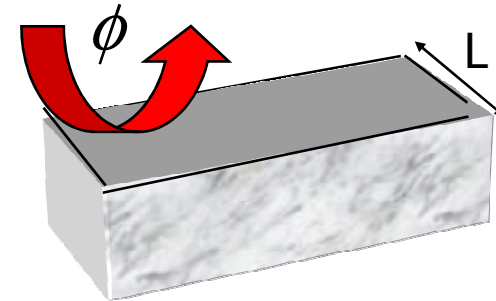
Puissance rayonnée M en fonction de la température T de l'émetteur

$T(^{\circ}\text{C})$	$M(\text{W}/\text{cm}^2)$
20	0,04
200	0,29
400	1,2
800	7,5
1200	26,7
1700	86
2700	443



Emission d'énergie d'une plaque chaude

Exemple: Comparaison entre les flux thermiques de convection et de rayonnement de la plaque



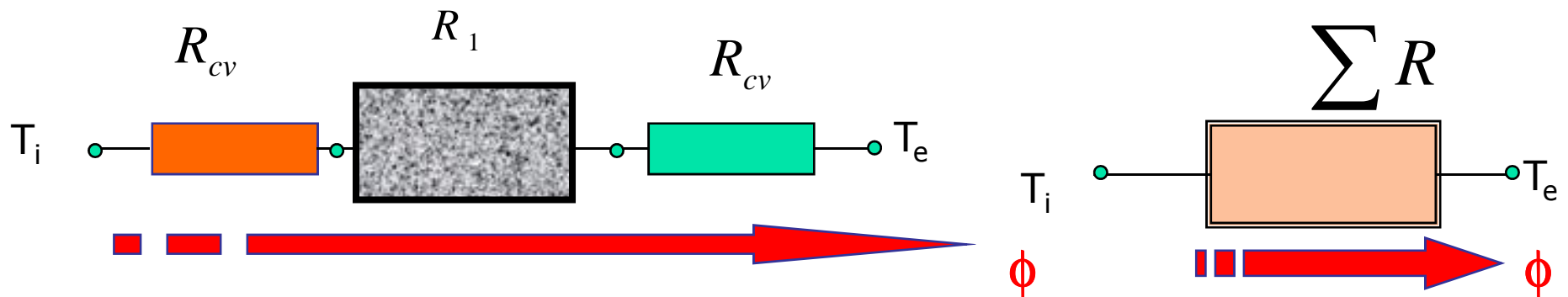
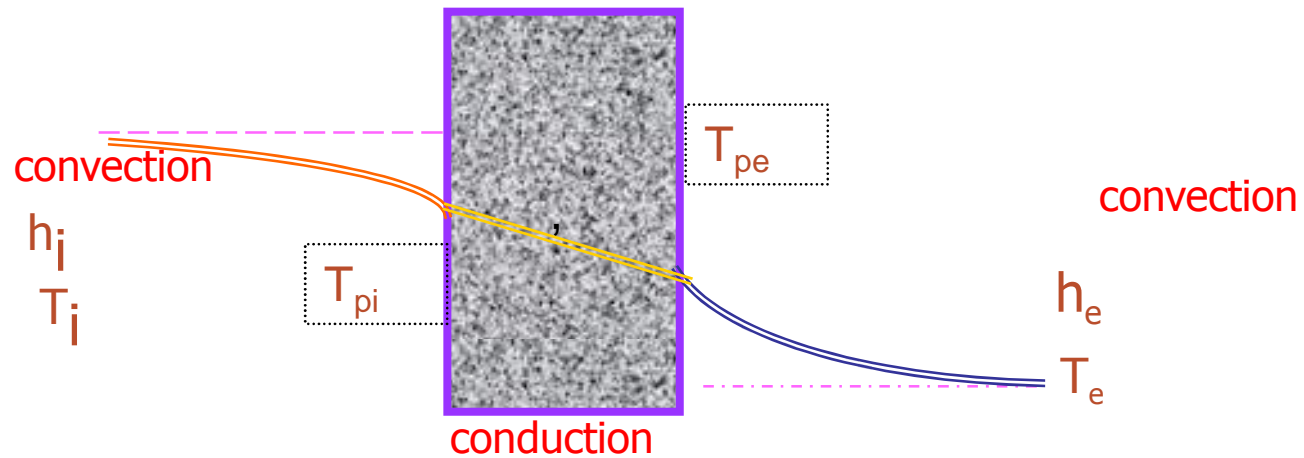
- Soit une plaque à la température T
- Surface $S = \text{Longueur} \times \text{Largeur}$, d'émissivité $\epsilon = \dots$,
 - $T_{\text{ambiante}} = 19^\circ\text{C}$,
 - coefficient de convection h_{conv} donné par la relation

$$h = 1,3 \left[\frac{(T - T_a)}{L} \right]^{1/4}$$

Température		Tambiante (en °C)	20			
en °C	350	(en K)	293			
en K	623	Coefficient h (W/m².K)	7,62			
Surface(m²)	0,056	Sigma(W/m²K⁴)	5,67E-08			
Largeur	0,28					
Longueur	0,2	Pconv(W)	Prayon(W)	(Pconv+Pray) (W)	(Pconv/Pray)en (%)	
Emissivité	1	140,76	454,92	595,69	30,9	

Transfert thermique dans une paroi non isolée

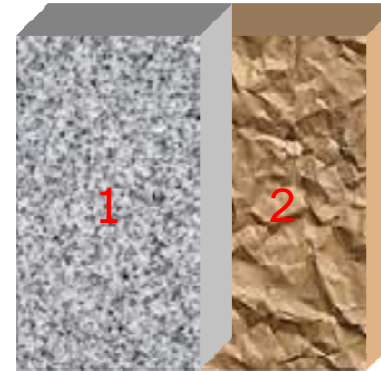
paroi : E_1, λ_1, S



ISOLATION THERMIQUE Paroi en couches

Corps 1 : béton

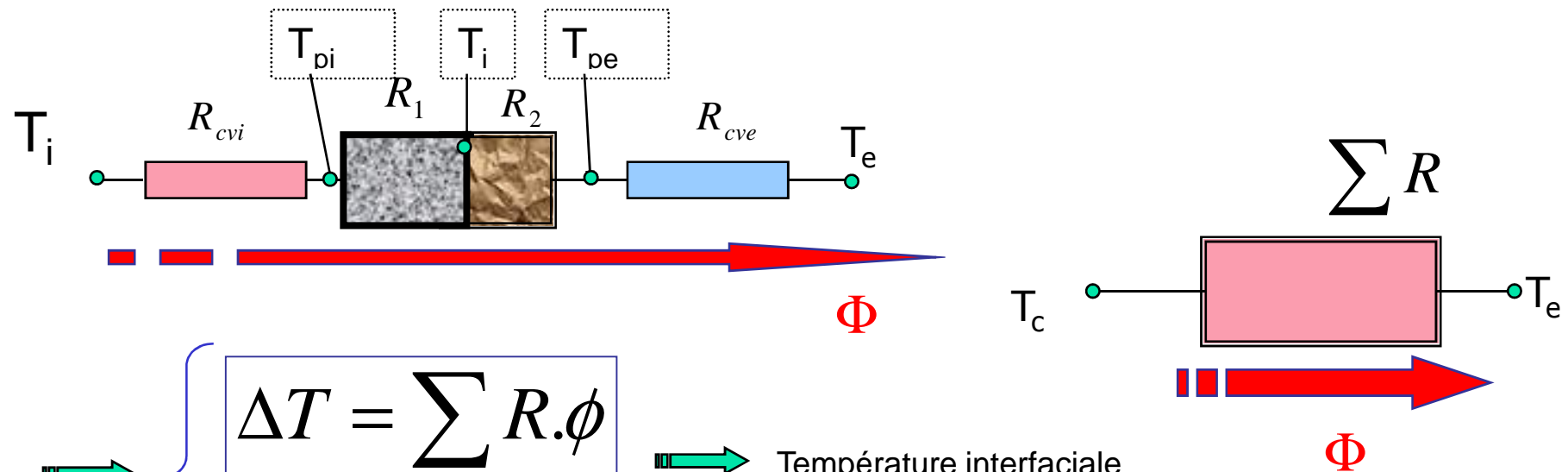
E_1, λ_1, S



Corps 2 : polystyrène

E_2, λ_2, S

Résistances thermiques



Calcul des déperditions

$$\Delta T = \sum R \cdot \phi$$

ou

$$\phi = K \cdot \Delta T$$

Température interfaciale

T_i

K : conductance thermique de la paroi ($K=1/R_{th}$ paroi)

Isolation thermique

Exemple : En faisant varier l'épaisseur de l'isolant, on peut constater l'importance de l'isolation en terme de déperditions thermiques

	sans isolant thermique		avec isolant thermique	
K (W/°C)	57,39		33,418	
Déperditions thermiques P en Watt				
P=K.Delta T				
	Sans isolant thermique		Avec isolant thermique	
P(W)	1836,5		1069,4	



Choix des épaisseurs

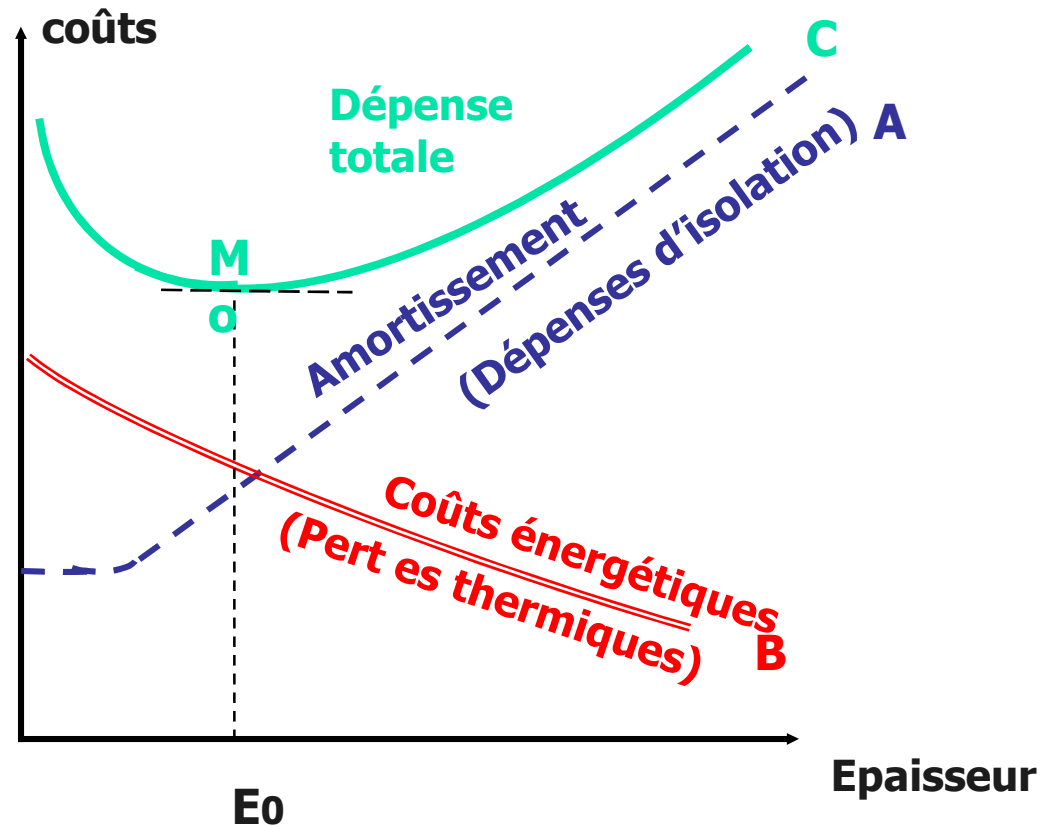
- Il sera fonction du but de l'isolation qui peut être:
- **Économique** : limiter les pertes thermiques (isolation d'une conduite de vapeur, de la paroi d'un four..)
- **Technique** : conservation des produits fluides comme le fuel lourd, éviter des condensats dans des conduites de vapeur saturée..)
- **de sécurité de travail** : protection du personnel vis à vis des conduites chaudes..
- **Réglementaire** : cas de l'isolation des bâtiments
- Dans le premier cas, il s'agit de calculer l'épaisseur d'isolation dite **économique**, ce qui minimisera la dépense totale qui se traduit par la somme des:
 - ***Frais annuels annuels d'exploitation*** dus aux pertes calorifiques qui diminuent au fur et à mesure que l'épaisseur de l'isolant augmente,
 - ***de l'amortissement*** du prix de l'isolation qui augmente en même temps que son épaisseur.

Epaisseur économique de l'isolant

Courbes représentatives

L'épaisseur économique de l'isolation E_0 peut être obtenue par tâtonnements

- on calcule le prix au m^2 courant de l'isolation en diverses épaisseurs, les déperditions au m^2 courant d'isolation
- Compte tenu des déperditions, du prix de l'énergie, de la durée annuelle de fonctionnement et de l'amortissement de l'isolation, on calcule le coût total pour chacune des épaisseurs et on prend celle qui correspond à la valeur minimale.



Exemple d'un ballon d'eau chaude

