THERMODYNAMIQUE FILIERE MP

3 CHAPITRES

Chap 1: TRANSFERT THERMIQUE, DIFFUSION THERMIQUE

Chap 2: RAYONNEMENT THERMIQUE, CORPS NOIR

Chap 3: ELEMENTS DE PHYSIQUE STATISTIQUE , Energie interne, capacité calorifique d’un système thermodynamique

EL HISSE ABDERRAHMAN 16 MARS 2020

CHAPITRE 1: TRANSFERT THERMIQUE

OBJECTIFS

- 1 DIFFÉRENTS MODES DE TRANSFERT THERMIQUE
- 2 LA CONDUCTION THERMIQUES, LOI DE FOURIER
- 3 RÉGIME PERMANENT , RÉSISTANCE THERMIQUE
- 4 LA CONVECTION THERMIQUE À LA PAROI , LOI DE NEWTON
- 5 RÉGIME VARIABLE, ÉQUATION DE DIFFUSION THERMIQUE

1- LES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSFERT THERMIQUE

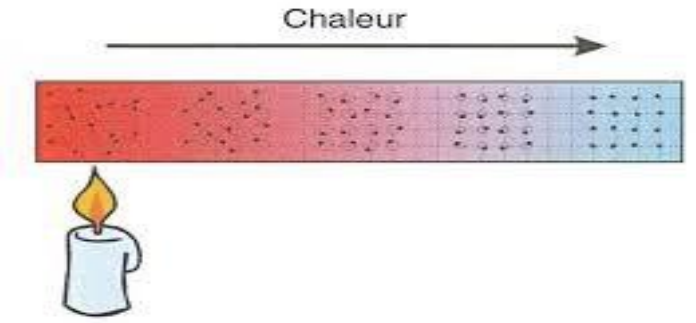
Il y a trois processus différents de transferts thermique

- Conduction thermique. Transfert conductif
- Convection thermique. Transfert convectif
- Rayonnement thermique. Transfert radiatif

1- LES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSFERT THERMIQUE

1.1 CONDUCTION THERMIQUE. Transfert conductif

- C'est un transfert direct d'énergie thermique entre particules microscopiques du milieu continu, sans mouvement macroscopique d'ensemble de ces particules Sous l'effet d'un gradient de température



Prenons l'exemple d'une barre métallique que l'on chauffe à l'une de ses extrémités: l'agitation thermique des atomes situés à l'extrémité chauffée de la barre augmente et se transmet de proche en proche Dans la direction inverse du gradient thermique.

Dans les métaux, la conduction fait intervenir les électrons libres qui les rendent bons conducteurs thermique. En revanche dans les isolants , la conduction se produit mal, il y a une correspondance entre le propriétés thermiques et électriques des solides

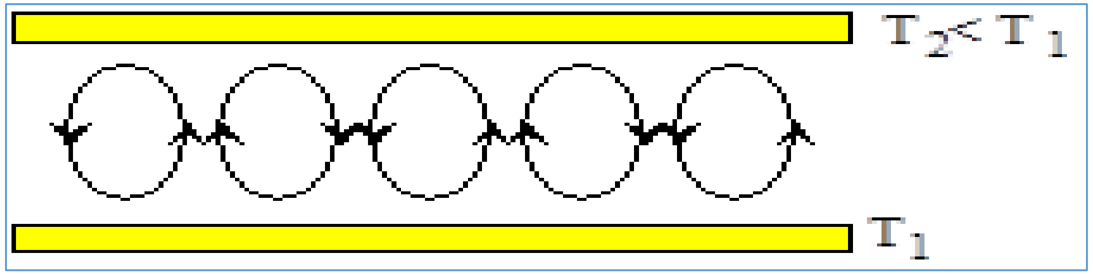
La conduction s'observe aussi dans les fluides au repos mais elle est plus faible que dans un métal, de plus elle est souvent dominé par la convection.

La conduction intervient seule dans les échanges de chaleur à l'intérieur d'un solide.

1- LES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSFERT THERMIQUE

1.2 CONVECTION THERMIQUE. Transfert convectif

- La convection implique le transport de l'énergie thermique par une partie d'un fluide qui se mélange avec une autre partie
- La convection concerne exclusivement les fluides (liquides ou gaz), puisqu'elle prend sa source dans transport macroscopique de matière dans le milieu continu.
- Dans un fluide à température non uniforme, donc de densité non uniforme, apparaissent des mouvements locaux ordonnés (courants de convection) permettant aux parties les plus chaudes et les moins denses de céder de l'énergie aux plus froides.



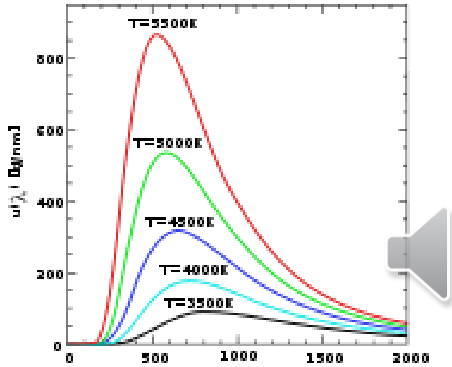
1-LES DIFFÉRENTS MODES DE TRANSFERT THERMIQUE

1.3 Mode rayonnement:

c'est l'émission d'énergie par une source, sous forme d'ondes électromagnétiques, comme le cas de rayonnement dipolaire.

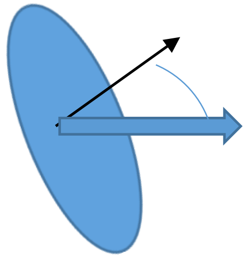
- Rayonnement thermique: c'est le cas ou la source est un corps chaud (T>0 K).
- Tout corps émet par sa surface des radiations qui se propagent même dans le vide et peuvent être absorbées par d'autres corps.
- L'énergie absorbée augmente l'énergie cinétique moyenne des particules du milieu absorbant (opaque), d'où un échauffement de ce milieu.
- Le spectre de rayonnement thermique est continu (CONTINIUM SPECTRAL), il est d'autant décalé vers les hautes fréquences (énergie plus grandes) que la température est plus élevée: loi de déplacement de Wien

$$\lambda_{max} . T = 3000\ \mu m\ K$$



2- CONDUCTION THERMIQUE. LOI DE FOURIER

2.1 FLUX THERMIQUE –On appelle flux thermique (Φ_{th}),la puissance thermique (en Watt) qui traverse une surface S , c'est l'énergie thermique (δQ_{th}) qui traverse S pendant une durée élémentaire dt



$$\Phi_{th} = \delta Q_{th}/dt$$

FLUX THERMIQUE SURFACIQUE

- Soit θ l'angle entre la direction des transferts et la normale à la surface dS.
- Soit ($\delta \Phi_{th}$) le flux thermique qui traverse dS selon la direction θ .
- On appelle flux thermique surfacique (φ), la puissance thermique surfacique, qui traverse une surface élémentaire dS : $\varphi = \delta \Phi_{th} / dS$
- φ est maximal si $\theta = 0$
- φ est minimal si $\theta = \pi/2$

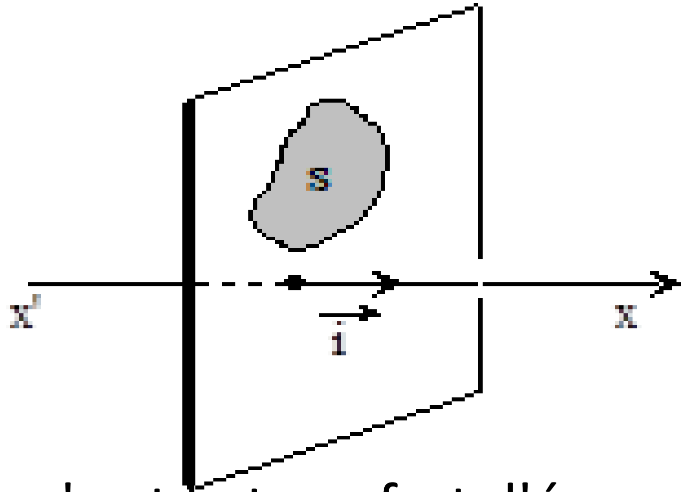
- On peut caractériser les transfert par un vecteur courant thermique surfacique

2- CONDUCTION THERMIQUE: LOI DE FOURIER

- On généralise à tout matériau homogène continu

et isotrope la relation fondamentale de transfert thermique par conduction. Dans le matériau, supposé infini,

la température T varie selon $\text{direction}\, x'x:\ \overrightarrow{\text{grad}}\,T = \frac{\partial T}{\partial x}\vec{i}\,.$



- Les surfaces isothermes sont les plans orthogonaux à la direction x'x et le transfert d'énergie se fait toujours dans le sens des températures décroissantes.
- Pendant une durée dt, l'énergie thermique (ou chaleur...) transmise à travers une surface S perpendiculaire à x'x est: $\delta Q = -\lambda\, S\, \frac{\partial T}{\partial x}\, dt$
- λ est la conductivité du matériau et dépend de la nature du matériau et de sa température.
- La puissance thermique transmise est P = $\frac{\delta Q}{dt} = -\lambda\, S\, \frac{\partial T}{\partial x}$
- δQ et P s'expriment aussi en fonction du vecteur puissance thermique surfacique:

LOI DE FOURIER $\vec{j}_Q = -\lambda\, \overrightarrow{\text{grad}}\,T;\quad \mathcal{P} = \vec{j}_Q\, \vec{i}\, S;\quad \delta Q = \vec{j}_Q\, \vec{i}\, S dt$

3- RÉGIME PERMANENT.

- En régime permanent l'état du milieu ne dépend pas du temps t.
- La température de chaque point est invariable et ne dépend que de l'abscisse x du point M .
- Dans ces conditions, toute surface S perpendiculaire à x'x est traversée par la même puissance thermique

$\mathcal{P} = -\lambda S \dfrac{dT}{dx}$ ou $\dfrac{dT}{dx} = -\dfrac{\mathcal{P}}{\lambda S}$. En admettant que λ ne dépend pas de T, on obtient $T = -\dfrac{\mathcal{P}}{\lambda S} x + cste$

La constante est déterminée connaissant la température T_1 à l'abscisse x_1: $T = T_1 - \dfrac{\mathcal{P}}{\lambda S}(x - x_1)$.

- Réciproquement, connaissant les températures T_1 et T_2 correspondant aux abscisses x_1 et x_2, on déduit la puissance transmise:

$$\mathcal{P} = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1}$$

➢ Calculer la puissance transmise à travers un mur de briques (λ = 0,7 W m^{-1} K^{-1}) mesurant 5 m de largeur, 3 m de hauteur et d'épaisseur égale à 25 cm, dont les faces sont à des températures différant de 20°C.

3- RÉGIME PERMANENT : Notion deRésistance thermique.

Définition: Pour un conducteur thermique de surface S et de longueur *L* = x2 - x1, la relation $T_1 - T_2 = \frac{\ell}{\gamma S}\mathcal{P}$ est analogue à la loi d'Ohm pour un résistor, **V1 - V2 = RI** avec , $R = \frac{\ell}{\gamma S}$ où γ est la conductivité du conducteur et son inverse ρ la résistivité électrique.

- Par analogie on appelle résistance thermique d'un conducteur thermique la grandeur ou plus généralement $R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\mathcal{P}}$ (unité K W-1)

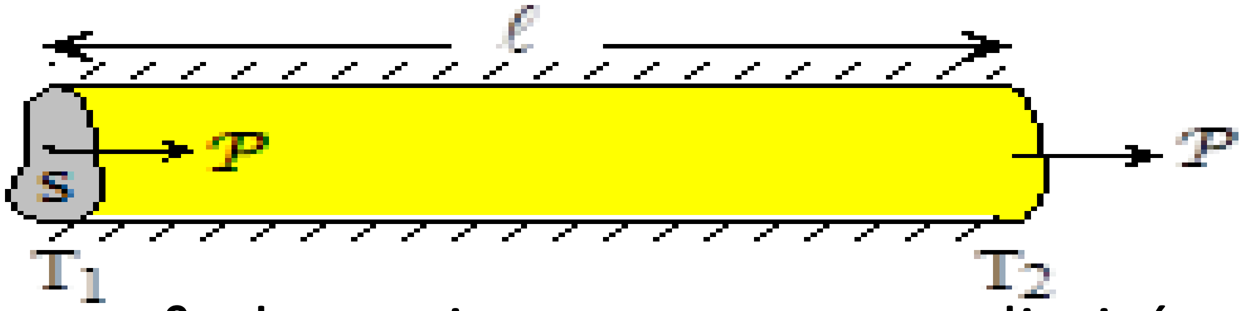
Cas particuliers:

- Si $\lambda \to 0$ alors $R_{th} \to \infty$ et $P_{th} \to 0$ quel que soit $(T_1 - T_2)$

dans ce cas le matériau est un isolant thermique parfait et constitue une paroi adiabatique (ou athermane).

- Si $\lambda \to \infty$ alors $R_{th} \to 0$, le matériau est un conducteur thermique parfait et constitue une paroi diatherme (ou diathermane).

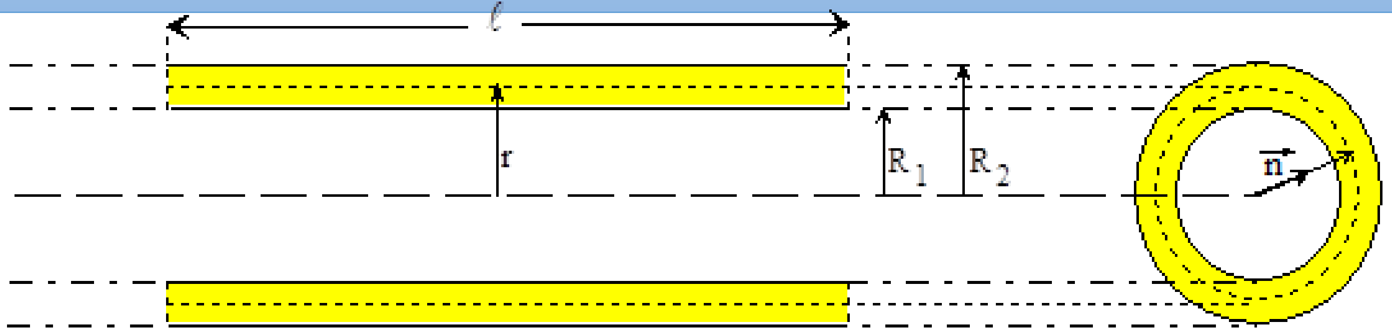
3-RÉGIME PERMANENT: Résistance d'une Tige isolée latéralement.



- La tige de longueur ℓ, de section constante, est limitée par 2 sections droites de surface S dont les températures sont T_1 et T_2.
- Les surfaces isothermes sont les sections droites de la tige et, en **régime permanent**, toute la puissance reçue par la face d'entrée est transmise intégralement à la face de sortie si l'on suppose qu'il n'y a aucune perte latérale (tige entourée d'un isolant parfait).
- Les relations précédentes s'appliquent directement:

$$R_{th} = \frac{\ell}{\lambda S} \quad \text{et} \quad T_1 - T_2 = R_{th}\mathcal{P}.$$

3- RÉGIME PERMANENT : Résistance d'un Tube cylindrique



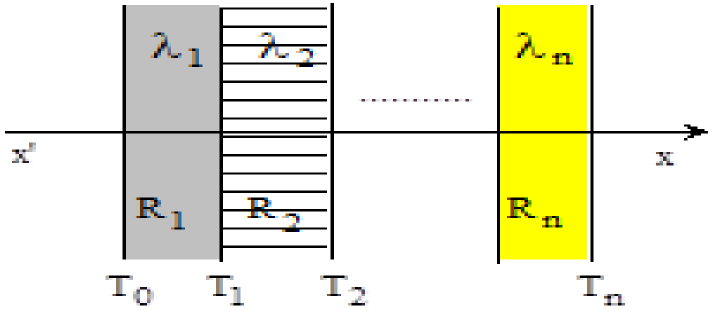
En régime permanent, la paroi interne de rayon R_1 est à T_1 et la paroi externe de rayon R_2 est à $T_2 < T_1$ (conduite d'eau chaude par exemple). La chaleur se propage radialement de l'intérieur vers l'extérieur.

Dans le matériau la température ne dépend que de r: $\overrightarrow{\text{grad}}\, T = \dfrac{dT}{dr}\vec{n}$.

La puissance transmise à travers la surface latérale S d'un cylindre de longueur ℓ et de rayon r ∈ [R_1, R_2] est constante et vaut $\mathcal{P} = -\lambda S \vec{n}\,\overrightarrow{\text{grad}}\, T = -\lambda 2\pi r \ell \dfrac{dT}{dr}$. D'où $dT = -\dfrac{\mathcal{P}}{2\pi\lambda\ell}\dfrac{dr}{r}$ et $T_2 - T_1 = -\dfrac{\mathcal{P}}{2\pi\lambda\ell}\ln\dfrac{R_2}{R_1}$.

La résistance thermique est égale à $R_{th} = \dfrac{T_1 - T_2}{\mathcal{P}} = \dfrac{1}{2\pi\lambda\ell}\ln\dfrac{R_2}{R_1}$.

3- RÉGIME PERMANENT, Association des résistances thermiques



- RÉSISTANCES EN SÉRIE
- Soient n conducteurs thermiques juxtaposés, limités par des faces parallèles dont les températures sont T_0, T_1, T_2,...,T_n.
- En régime permanent, la même puissance traverse toute surface S normale à x'x:

$$P = \frac{T_0 - T_1}{R_1} = \frac{T_1 - T_2}{R_2} = \ldots = \frac{T_{n-1} - T_n}{R_n} = \frac{T_0 - T_n}{\sum R_i}.$$

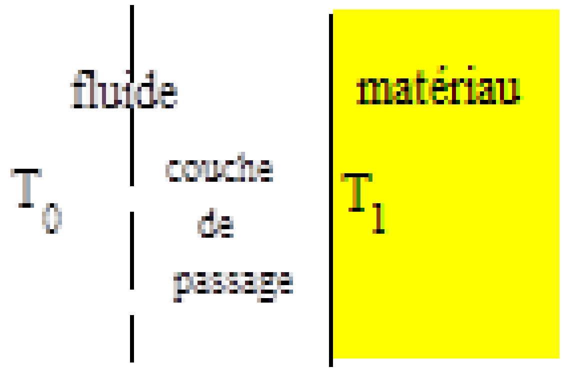
- **Les n conducteurs sont** équivalents à un conducteur unique dont les faces seraient à T0 et Tn, de résistance thermique R telle que:
- $P = \dfrac{T_0 - T_n}{R}$ D'où **$R = \Sigma(R_i)$.**

- RÉSISTANCES EN PARALLÈLE **$1/R = \Sigma(1/R_i)$**

4- CONVECTION THERMIQUE: transfert conducto-convectif

C'est un phénomène complexe qui dépend essentiellement de la vitesse du fluide par rapport à la paroi.

C’est un transfert pariétal à la paroi entre solide et un fluide



<u>On distingue deux cas:</u>

<u>CONVECTION NATURELLE</u>: les seuls mouvements du fluide sont ceux engendrés par les variations de densité du fluide dues aux variations de température.

<u>CONVECTION FORCÉE</u>: on impose au fluide une vitesse de déplacement par rapport à la paroi (différence de pression, ventilation...).

Dans tous les cas, on admet que la puissance thermique transmise par le fluide à la paroi à travers une surface S est donnée par la **loi de Newton**: $\mathcal{P} = h\,S\,(T_0 - T_1)$

T_0 est la température du fluide "loin" de la paroi et T_1 est celle de la paroi en contact avec le fluide. La variation de température $\Delta T = T_0 - T_1$ est localisée dans une "couche limite de passage" d'épaisseur variable selon la vitesse du fluide.

4- CONVECTION THERMIQUE: Résistance thermique conducto-convective

Le coefficient d'échange superficiel h (ou <u>conductance thermique surfacique</u> de la couche de passage) dépend en général de**: <u>la nature du fluide</u>** et des conditions du **<u>régime convectif</u>** et de **<u>la vitesse d'écoulement.</u>**

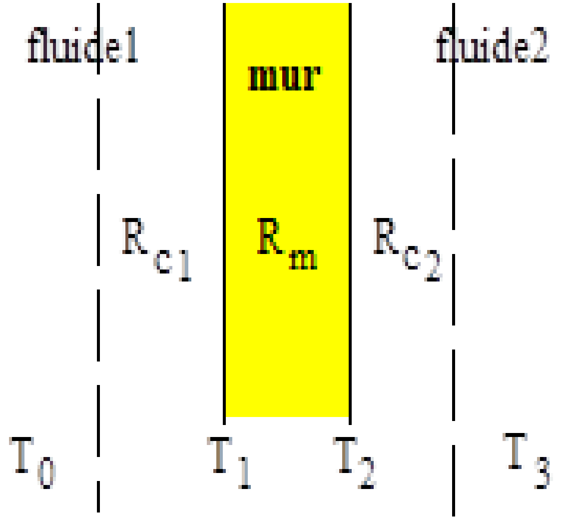
- en convection forcée, h est indépendant de ΔT mais dépend fortement de la vitesse imposée au fluide, de la forme de la paroi, de son état de surface...
- en convection naturelle, h dépend de ΔT: $h = k\,(\Delta T)^{1/4}$ où k est un facteur dépendant de l'orientation de la surface.

ORDRE DE GRANDEURS DE H (SI)	CONVICTION NATURELLE	CONVECTION FORCÉE
Gaz	**5 à 30**	**10 à 300**
LIQUIDES	**400 à 1000**	**300 à 12000**

La variation de température $\Delta T = T_0 - T_1$ étant localisée dans la couche limite de passage, celle-ci est donc équivalente à un conducteur de résistance: $R_c = \frac{T_0 - T_1}{\mathcal{P}} = \frac{1}{hS}$

4- CONVECTION THERMIQUE:
Transfert thermique entre deux fluides à travers un mur

- Pour un mur d'épaisseur ℓ, de conductivité λ (résistance thermique R_m) en contact avec 2 fluides, la résistance totale est équivalente à 3 résistances en série:



$$R = R_{c1} + R_m + R_{c2} = \frac{1}{h_1 S} + \frac{1}{h_2 S} + \frac{\ell}{\lambda S}$$

La puissance transmise par le premier fluide à T0 au second à T3, à travers une surface S, est égale à:

$$\mathcal{P} = S\frac{T_0 - T_3}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{1}{\lambda}}$$

Pratiquement on admet: hi ≈ 8 à 10 W m-2 K-1 pour l'air calme (intérieur d'une pièce)
he ≈ 20 " (pour l'air extérieur).

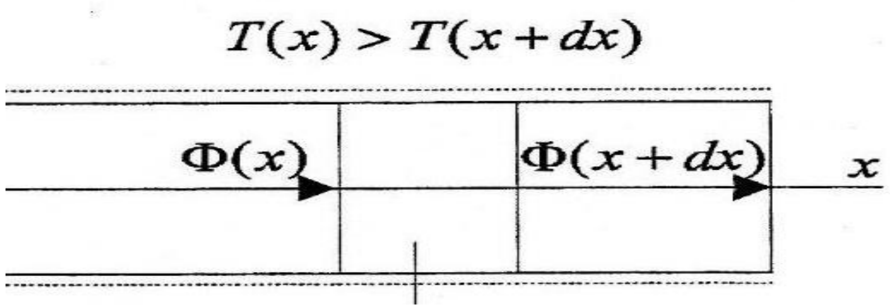
4- CONVECTION THERMIQUE:
Remarque Importante

- A la puissance échangée par convection, il faut ajouter la puissance échangée par rayonnement également proportionnelle à la surface d'échange S et à la différence des températures ΔT (si elle n'est pas trop grande) et dépendant aussi de l'état de la surface du corps (couleur, rugosité...).
- On peut encore utiliser la loi de Newton $\underline{\mathbf{P = hS\,\Delta T}}$,

où le coefficient global d'échange h tient compte des 2 phénomènes de convection et de rayonnement:

$$\underline{h = h_c + h_r.}$$

5- **RÉGIME VARIABLE.** Équation de diffusion



- Soit un cylindre droit de bases d'aire S

et d'abscisses x et x+dx soumis à un gradient

- de température unidirectionnel selon l'axe x'x.
- Entre les dates t et t+dt, ce cylindre reçoit par conduction à travers la première base l'énergie P (x,t)dt et cède à travers la seconde l'énergie P (x+dx,t)dt.

- L'énergie effectivement reçue est égale à $\delta Q = \left[\mathcal{P}(x,t) - \mathcal{P}(x+dx,t)\right]dt = -\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial x}dx\,dt = \lambda S\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}dx\,dt.$
- Si la pression extérieure est constante (évolution isobare), cette énergie reçue est aussi égale d'après le 1er principe de la thermodynamique à $\delta m\, c_p\, dT$.
- $\delta m = \mu S dx$ est la masse du système étudié, de masse volumique μ, et c_p sa chaleur massique à pression constante. L'équation d'évolution s'écrit donc

$$\delta Q = \lambda S\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}dx\,dt = \mu S c_p dx\,dT \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{\lambda}{\mu c_p}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{ou} \quad D\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}}$$

5- **RÉGIME VARIABLE**. Coefficient de diffusion thermique

le coefficient de diffusion thermique D (ou diffusivité) et s'exprime en m2 s-1.

$$D = \frac{\lambda}{\mu c_p}$$

S'il y a d'autres énergies reçues (par convection, par effet Joule, par désintégration radioactive du matériau...), elles s'ajoutent à $\delta Q_{conduction}$ dans le bilan énergétique et l'équation d'évolution devient:

$$\Sigma\text{énergies reçues} = \delta m\, c_p\, dT = \mu S c_p\, dx\, dT.$$