

Diffusion thermique

Révision 1ère année :

- Premier principe de la thermodynamique
- Capacité thermique et échange de chaleur
- Les échelles thermodynamiques
- Les mécanismes de transfert de la chaleur

Objectifs :

- Diffusion de la chaleur (Loi de Fourier)
- Eq° de conservation & bilans
- Applications

I - Diffusion thermique

1 - les mécanismes de transport de la chaleur

Différents mécanismes physiques permettent le transport de chaleur : (cf - 1ère année)

- **Rayonnement :** Les corps chaud émettent un rayonnement électromagnétique [infrarouge en général] comme le soleil [rayonnement du corps noir]. Celui-ci se propage à travers l'air ou même le vide jusqu'à rencontrer un corps qui l'absorbe et capte ainsi la chaleur émise (Astrophysique). On parle de **transfert par radiation**.
- **Convection :** la matière se déplaçant au sein d'un fluide, elle emporte avec elle sa « chaleur » par le biais de son agitation thermique. Cela se produit en raison de l'entraînement par le fluide en mouvement (advection) ou du fait d'une densité différente. En particulier, le fluide plus chaud étant moins dense, il va monter sous l'effet de la poussée d'Archimède.
- **Diffusion :** l'**agitation thermique* se transmet de proche en proche** sous l'effet des chocs aléatoires. Il est important de noter que **ce processus est isotrope** [ne dépend pas de la direction], ainsi le « chaud » ne monte pas comme avec la convection. [* E_c microscopique].

C'est ici le mécanisme de **diffusion thermique** que l'on veut modéliser c'est à dire la propagation de proche en proche de la chaleur sans qu'aucun rayonnement ou mouvement macroscopique du milieu n'y participe. On parle alors de **conduction thermique** car la chaleur est conduite au sein du matériau de proche en proche.

Phénoménologie de la diffusion :

La phénoménologie de la diffusion est simple à comprendre. La chaleur est un transfert d'agitation microscopique sous l'effet des chocs. Or on a vu en sup que **l'interprétation microscopique de la température est que celle-ci quantifie l'énergie cinétique d'agitation microscopique des particules**.

La chaleur diffuse ainsi des zones plus chaudes (forte agitation) vers les zones plus froides (faible agitation). Si la température tend à devenir homogène, la diffusion s'arrête car l'agitation microscopique fait de même.

Les trois mécanismes de transfert de la chaleur

Résumé simple et efficace

$q = h\Delta T$
where
q is the local heat flux density [W.m⁻²]
h is the heat transfer coefficient [W.m⁻².K]
 ΔT is the temperature difference [K]

$q = -k\nabla T$
where
q is the local heat flux density [W.m⁻²]
k is the materials conductivity [W.m⁻¹.K⁻¹]
 ∇T is the temperature gradient [K.m⁻¹]

Convection

Conduction

Radiation

$q = \epsilon\sigma T^4$
where
q is the power radiated from an object [W.m⁻²]
 σ is the Stefan-Boltzmann constant [W.m⁻².K⁻⁴]
 ϵ is the emissivity of the surface of a material [-]

Rq : on peut dire Conduction ou Diffusion

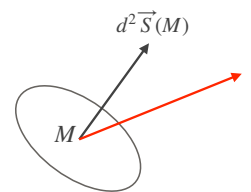
2 - Quantification de la diffusion de la chaleur

Définition : On peut quantifier la diffusion de la chaleur par la puissance qui traverse une surface par unité de temps : **c'est donc un flux !**

On note \vec{j}_Q le vecteur densité de courant thermique :

Alors d^3Q est la chaleur (en joule) qui traverse la surface élémentaire $d^2\vec{S}$ pendant un durée élémentaire dt .

On notera souvent : $dQ = (\vec{j}_Q \cdot d\vec{S}) dt$ cette chaleur.

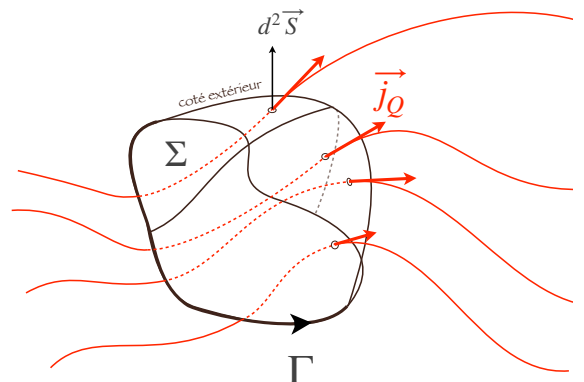


Puissance thermique :

Soit dQ la chaleur qui traverse une surface Σ pendant une durée dt.

On note la puissance associée : $\mathcal{P} = \frac{dQ}{dt}$

La puissance thermique transmise est donc simplement le flux de \vec{j} à travers Σ .



Rq : En régime permanent, celle-ci ne dépend que du contour Γ

3 - Loi de Fourier

On sait que les particules vont migrer des zones chaudes vers les zones froides. Notons que c'est une conséquence du 2nd principe. L'objet pertinent pour quantifier la diffusion thermique sera ainsi le gradient de température.

Loi de Fourier :

La diffusion thermique sera quantifiée par son vecteur densité de courant thermique :

- Gradient $\vec{\nabla}(T)$: c'est la dérivée en 3D de la température. C'est un **vecteur qui pointe dans la direction où $T(x, y, z)$ augmente le plus fortement**. Sa norme indique son taux d'accroissement.
- Signe « moins » : Signifie que **la diffusion s'opère des régions les plus chaudes vers les plus froides**.
- Coefficient λ : Coefficient de **conductivité thermique** : λ **quantifie la rapidité de la diffusion** selon la matière traversée. λ est en $Wm^{-1}K^{-1}$.

Rq : **La loi de Fourier suppose des températures** qui ne soient pas excessivement faibles/ fortes, et pas trop de variabilité de la température dans le temps et l'espace. C-à-d comme toujours **relativement proches de l'équilibre thermodynamique local**. Enfin λ dépend de la température de façon très différente d'un matériau à l'autre. Augmentation faible avec T dans l'air et l'eau.

Enfin la loi de Fourier est associée au 2nd principe de la thermodynamique :

- La chaleur s'écoule spontanément du chaud vers le froid.
- L'existence même d'un gradient de température implique qu'il y ait création d'entropie.

Valeurs tabulées pour λ (en $Wm^{-1}K^{-1}$)

MATERIAUX	CONDUCTIVITE (W/m/K)
Terre	2,1-8,4
Terre sèche	0,14
Pierre lourde (granite)	3,49
Briques pleine	1,16
Béton plein	1,75
Fer	78,2
Aluminium	204
Eau	0,57
Glace	2,2
Air	0,025
Verre	1
Bois	0,12-0,23
Matières organiques	0,25

	CONDUCTIVITE (W/m/K)	
Gaz	0,006 – 0,18	mauvais conducteurs
Liquides (non métalliques)	0,1 – 1	conducteurs moyens
Matériaux non métalliques	0,004 – 4	conducteurs moyens
Solides Métalliques	10 – 400	excellents conducteurs

	Sec	Humide	
	sec	hum.	
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane
	0,040		laine minérale, liège
	0,058		vermiculite
	0,065		perlite
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs
	0,12	0,13	résineux
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1000 kg/m ³
	0,54	0,75	briques 1000-1600 kg/m ³
	0,90	1,1	briques 1600-2100 kg/m ³
Verre	1,0	1,0	
Béton armé	1,7	2,2	
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre
	2,91	3,49	granit, marbres
Métaux		45	acier
		203	aluminium
		384	cuivre

II - Équation de la diffusion thermique

1 - Bilan de conservation de l'énergie

Nous allons calculer l'augmentation dU de l'énergie interne au sein du volume élémentaire et l'identifier avec la chaleur reçue : $dU = \delta Q$

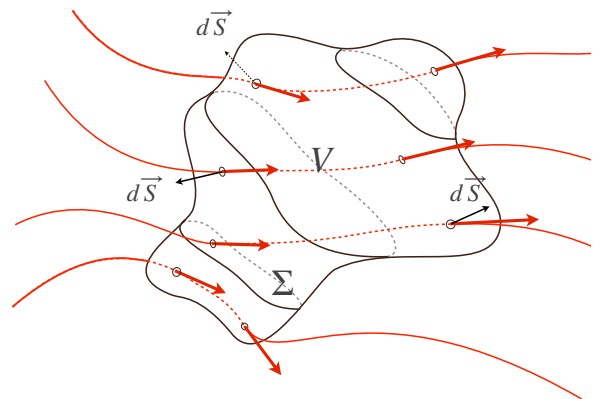
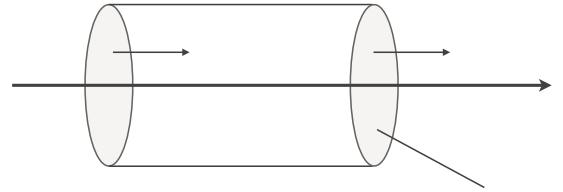
- dU est liée à l'augmentation de température au cours du temps.

- δQ : Bilan des entrée / sortie du flux thermique à travers ses frontières.

L'identification de ces 2 expressions est la traduction même de la conservation de l'énergie.

Notons que l'on envisage pas ici de travail δW quel qu'il soit, car on envisage généralement des phases denses, mais cela peut se généraliser.

Enfin on notera ρ la masse volumique, c la capacité thermique massique, et $u(t, x)$ l'énergie interne massique.



Interprétation :

$Div(\vec{j}_Q)$ est le flux **sortant** par unité de volume

2 - Équation de la chaleur

3 - Terme source

Certains phénomènes peuvent nous amener à envisager des termes dits de « source » qui apportent ou retire de l'énergie au sein du système :

Apports :

- Effet Joule par **dissipation électrique** (fil électrique, résistance)
- Effet Joule par **radioactivité** (croûte terrestre)
- **Rayonnement** : captation en volume d'ondes électromagnétiques (Photons Visibles, UV, X, γ)
- **Réaction chimique exothermique** (ou tout ce qui apporte de la chaleur)

Pertes :

- **Réaction chimique endothermique** (ou tout ce qui prélève de la chaleur)
- **Rayonnement** : émission d'ondes électromagnétiques (Photons Visibles, UV, X, γ)
—> cf - exemple de la nébuleuse / proto-étoile