

Titre : Phenomenes de transport

Présentée par : R. Aeschlimann

Rapport écrit par : T Le Bret

Correcteur : F Debbasch

Date : 5/01/2021

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
Tec et Doc PC		
Dunod PC		
Thermodynamique	Diu	

Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Pré-requis : Thermodynamique, hydrodynamique, électromagnétisme

I. Généralités sur le transport

Rappel : définition de l'équilibre thermodynamique = toutes les variables d'état sont constantes et il n'y a pas de flux de matière/énergie.

Les phénomènes de transport sont donc par définition des phénomènes hors équilibre.

1) Types de transport

Rayonnement (transport d'énergie sans transfert de matière, ex Soleil)

Convection (transport macroscopique de matière, ex manteau terrestre)

Diffusion (transport de matière sans mouvement macro, ex sucre dans le café)

2) Équilibre thermodynamique local

On définit une échelle mésoscopique l , $L_{\text{micro}} < l < L_{\text{macro}}$, sur laquelle le système est considéré à l'équilibre thermodynamique.

(Hypothèse supplémentaire : temps de retour à l'équilibre < temps caractéristique macro)

t=10min

On effectue un bilan de matière sur un petit volume de fluide. On définit j la densité courant surfacique et l'on obtient l'équation de conservation de la matière $d\rho/dt + \text{div}(j) = 0$

Le transport de matière par diffusion est dû à un déséquilibre produit par la présence d'un gradient de concentration/densité.

3) Réponse linéaire

Loi de Fick (phénoménologique, établie en 1855) : $j = -D \text{grad}(n)$

Explication micro : le mouvement Brownien des particules « pousse » en moyenne les particules des zones de forte concentration aux zones de faible concentration.

Remarques : signe « - » => on a affaire à une loi de modulation, car l'effet tend à s'opposer à la cause qui l'a produit (la diffusion tend à effacer le gradient de densité qui lui donne naissance).
Ordres de grandeur de $D \sim 10^{-6}$, 10^{-2} pour deux gaz ; 10^{-8} , 10^{-12} pour des liquides ; 10^{-30} , 10^{-16} pour un atome dans un solide.

En injectant la loi de Fick dans la loi de conservation, on obtient l'équation de diffusion :

$$dn/dt - D \text{laplacien}(n) = 0$$

(On fait l'hypothèse d'un milieu isotrope)

4) Généralisation

On peut écrire une loi de diffusion généralisée pour g une grandeur intensive, et f une autre grandeur intensive dont le gradient provoque un courant de g .

Analogie : électricité (densité courant électrique liée à un gradient de potentiel électrique → loi d'Ohm), énergie thermique (densité de courant d'énergie thermique liée à un gradient de température → loi de Fourier)

t = 25min

II. Propriétés de l'équation de diffusion

1) Irréversibilité

L'équation de diffusion n'est pas symétrique par échange $t \leftrightarrow -t$, ce qui implique irréversibilité

On peut aussi justifier le signe du coefficient de diffusion en terme de création d'entropie : (on prend l'exemple de la diffusion de chaleur) on montre que $S_{\text{créée}} > 0 \Rightarrow \lambda > 0$

2) Propriétés d'échelle

Eq diffusion => $L = \text{racine}(DT)$, L longueur de diffusion, T temps caractéristique

On trouve $L \sim 1$ cm après 20 min dans un fluide comme le glycérol, ce qui permet d'estimer D à $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, cohérent avec les OdG connus.

Manip : mesure de D dans le glycérol à partir du gradient d'indice optique (montage « loi de Fick » du TP capillarité)

t = 35 min

III. Comparaison des différents modes de transports

1) Convection et diffusion

On définit le nombre de Reynolds $Re = UL/\nu$, ν viscosité cinématique

Quand $Re \gg 1$ la convection domine le transport de quantité de mouvement, on passe du régime laminaire au régime turbulent.

2) Diffusion thermique et diffusion de matière

On définit le nombre de Prandtl $Pr = \nu / \alpha$, α diffusivité thermique pour comparer les 2 types de transport

3) Retour sur le café

On calcule les ordres de grandeur des temps caractéristiques de diffusion, rayonnement et convection pour du sucre dans une tasse de café, et on montre que la convection l'emporte largement (agiter le café est le moyen le plus efficace d'assurer l'homogénéité du mélange !)

Conclusion : universalité des phénomènes de diffusion ; existence de couplages entre les différents types de transport diffusif dans la matière (effet Seebeck, effet Peltier)

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

Pourquoi j_Q ? c'est une densité de courant de « chaleur » (mieux : de transfert d'énergie thermique)

Qu'est-ce qui diffuse dans ce cas ? De l'énergie thermique.

Et pour la loi de Fick ? De la masse/quantité de matière

Pas de déplacement de matière macro dans la diffusion ? Non d'après la définition

C'est quoi les termes dans Re ? Mvt macro du à la convection (UL) et mvt diffusif (nu)

Donc diffusion sans déplacement micro, contradictoire ? (pas certain d'avoir compris...)

Dans $j = nv$, c'est quoi v ? vitesse de la particule de fluide ? Non ! C'est un champ de vitesse eulérien.

Comment est-ce que le mouvement brownien cause une diffusion irréversible, la dynamique des collisions est pourtant réversible ? Les particules ont un plus court libre parcours moyen dans la zone de haute densité, donc plus de collisions \rightarrow les particules en moyenne diffusent. L'irréversibilité c'est un effet statistique, hypothèse du chaos moléculaire.

Comment estimer D théoriquement ? On estime l'énergie cinétique moyenne des particules $U = \frac{3}{2} k_B T$, puis on calcule le temps moyen entre collisions.

Approx de l'équilibre thermo local, fort ou faible ? Faux quand les changements sont « trop rapides », par exemple dans une onde de choc.

ETL = « variables d'état constantes + flux d'énergie/matière nuls » ? Oui, exemple du barreau de cuivre chauffé à une extrémité en régime stationnaire : variables ctes mais flux, donc pas d'éq.

Bilan d'entropie : ΔS ou dS ? DS quand on parle de la différentielle de la fonction d'état entropie, Δ quand on écrit $dS = \Delta(\text{entropie créée}) + \Delta(\text{entropie échangée})$ car ce ne sont pas des fonctions d'état et on ne peut pas les écrire sous forme de différentielle. (Pas certain de savoir si c'était vraiment ça la question)

Pourquoi le terme en $C_V \ln(T/T_0)$? Transformation isochore

La particule de fluide est-elle un « volume de contrôle » ? Pas compris.

Commentaires lors de la correction de la leçon

(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)

Attention, la diffusion sauf Fick c'est dangereux, éviter de faire de la thermo si possible !

Faire une sous-partie avec la solution gaussienne de l'équation de diffusion pour justifier de manière plus évidente le signe du coefficient de diffusion.

Résoudre l'équation en utilisant Fourier : permet d'établir $\omega \sim Dk^2$ facilement

Remarque : on peut avoir des « viscosités négatives » en hydro quand on travaille avec des particules de fluide qui sont en fait de taille presque macroscopique. Aussi une application en traitement d'image pour faire du rehaussement de contour.

Loi de Fick pas toujours valable : exemple relativiste, ou bien dans le traitement laser de tumeurs

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) : Leçon moyenne, laissant transparaître la bonne volonté, mais aussi les lacunes de l'étudiant, confirmées à l'occasion des questions.

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates : Transport diffusif, équation de diffusion, solution gaussienne. Equilibre local, aspects thermodynamiques de la diffusion thermique.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) : Simulations numériques pour la loi de Fick, barreau pour la diffusion thermique (si nécessaire).

Bibliographie conseillée : Ouvrages de classe prépa et le "gros" Reif (Fundamentals of statistical and thermal physics).