

PHENOMENES DE TRANSPORT

TR 1 : TRANSPORT DE CHARGE - CONDUCTION ELECTRIQUE

1. Charges et courants

- 1.1. *Densité volumique de charge $\rho(\vec{r}, t)$.*
 - Charges discrètes
 - Distribution continue de charges à l'échelle mésoscopique. Définition de $\rho(\vec{r}, t)$.
 - Cas des conducteurs métalliques, électrolytiques, semi-conducteurs.
 - Généralisation : $\rho = \sum_{\neq k} n_k q_k$.
- 1.2. *Courant algébrique traversant une surface orientée. Vecteur densité de courant $\vec{j}(\vec{r}, t)$.*
 - Courant algébrique traversant une surface orientée = débit de charge.
 - Définition du vecteur densité de courant $\vec{j}(\vec{r}, t)$.
 - Cas des conducteurs métalliques, électrolytiques, semi-conducteurs. Ordres de grandeur.
 - Généralisation : $\vec{j} = \sum_{\neq k} n_k q_k \vec{U}_k$
- 1.3. *Bilan de charge ou conservation de la charge*
 - Equation globale de conservation de la charge
 - Equation locale de conservation de la charge (cas 1D)
 - Equation locale de conservation de la charge (cas 3D)
- 1.4. *Cas du régime stationnaire.*
 - \vec{j} est à flux conservatif
 - Unicité du courant le long d'une branche
 - Loi des nœuds

2. Conduction électrique : loi d'Ohm.

- 2.1. *Loi d'Ohm locale ; conductivité électrique. Ordres de grandeur*
- 2.2. *Modèle de Drude de la conduction électrique*
 - Hypothèses
 - Modèle phénoménologique : frottement fluide traduisant les collisions.
 - Modèle collisionnel
- 2.3. *Puissance volumique fournie par le champ au conducteur. Effet Joule local.*

3. Loi d'Ohm intégrale : résistance électrique.

- 3.1. *Résistance d'un conducteur ohmique cylindrique.*
- 3.2. *Puissance dissipée dans un conducteur ohmique par effet Joule*

CAPACITES EXIGIBLES :

- Passer d'une description microscopique (porteurs de charges, vitesse des porteurs) aux grandeurs mésoscopiques ρ et \vec{j} .
- Décrire les différents types de porteurs de charge. Faire la distinction entre charges mobiles et charges fixes.
- Écrire l'intensité comme le flux du vecteur densité de courant électrique à travers une surface orientée.
- Établir l'équation locale traduisant la conservation de la charge électrique en coordonnées cartésiennes à une dimension.

- Citer l'équation locale dans le cas tridimensionnel et en interpréter chacun des termes.
- Définir une ligne de courant et un tube de courant.
- En régime stationnaire, exploiter le caractère conservatif du vecteur densité de courant électrique. Relier cette propriété à la loi des nœuds usuelle de l'électrocinétique.
- Relier le vecteur densité de courant au champ électrique dans un conducteur ohmique. Citer l'ordre de grandeur de la conductivité du cuivre.
- En régime stationnaire, établir une expression de la conductivité électrique à l'aide d'un modèle microscopique.
- Établir l'expression de la puissance volumique reçue par un conducteur ohmique. Interpréter l'effet Joule.
- Établir l'expression de la résistance d'un câble cylindrique parcouru uniformément par un courant parallèle à son axe.

TR 2 : DIFFUSION DE MATIERE

1. Courants et bilans de particules

1.1. *Diffusion vs convection.*

- Convection : vidéo Youtube (convection de KMnO_4 dans l'eau).
- Diffusion : vidéo Youtube (diffusions comparées de KMnO_4 et du bleu de méthylène dans un gel d'agar-agar).
- Un modèle microscopique de la diffusion : marche au hasard 2D (simulation https://femto-physique.fr/physique_statistique/diffusion-moleculaire.php)

1.2. *Débit de particules et vecteur densité de courant de diffusion $\vec{j}_N(\vec{r}, t)$*

- Débit (ou courant) de particules à travers une surface orientée.
- Vecteur densité de courant de particules $\vec{j}_N(\vec{r}, t)$

1.3. *Bilan de particules*

- Equation intégrale de bilan de particules avec terme source
- Equation locale de bilan de particules : cas 1D
- Equation locale de bilan de particules : géométrie sphérique
- Equation locale de bilan de particules : cas 3D.

2. Diffusion de matière : loi de Fick.

2.1. *Loi de Fick ; coefficient de diffusion.*

2.2. *Ordres de grandeur.*

3. Equation de la diffusion

3.1. *Equation de diffusion*

- 1D
- Géométrie sphérique
- 3D. Opérateur laplacien.

3.2. *Présence d'un terme source*

4. Propriétés de l'équation de la diffusion

4.1. *Linéarité*

- 4.2. *Irréversibilité*
- 4.3. *Echelles de temps et de distance de diffusion*
- 4.4. *Le problème des conditions aux limites et de la condition initiale*

CAPACITES EXIGIBLES :

- Citer les deux modes de transfert.
- Exprimer le débit de particules comme le flux du vecteur \vec{j}_N à travers une surface orientée.
- Établir l'équation locale de bilan de particules avec ou sans terme source.
- Énoncer et utiliser la loi de Fick.
- Établir l'équation de diffusion.
- Relier l'équation de diffusion à l'irréversibilité temporelle du phénomène.
- Analyser une équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.
- Relier l'équation de diffusion à l'irréversibilité temporelle du phénomène.
- Exploiter la linéarité de l'équation de diffusion.

TR 3 : DIFFUSION THERMIQUE

1. Transfert thermique par conduction (transport diffusif d'énergie)

- 1.1. *Les trois modes de transfert thermique : diffusion, convection, rayonnement.*
 - Convection : milieu support en mouvement (vidéo Youtube : thermosiphon)
 - Diffusion : milieu support au repos (vidéo Youtube : expérience de Ingenhousz)
 - Rayonnement : pas de milieu support (vidéo Youtube : caméra thermique)
- 1.2. *Flux thermique et vecteur densité de courant thermique $\vec{j}_Q(\vec{r}, t)$*
 - Flux thermique algébrique à travers une surface orientée
 - Vecteur densité de courant thermique $\vec{j}_Q(\vec{r}, t)$
- 1.3. *Equilibre thermodynamique local*
- 1.4. *Bilan d'énergie*
 - Bilan global d'énergie avec terme source
 - Bilan local d'énergie avec terme source : 1D en géométrie cartésienne.
 - Bilan local d'énergie : géométrie cylindrique.
 - Equation locale de conservation de l'énergie (cas 3D)

2. Conduction thermique : loi de Fourier.

- 2.1. *Loi de Fourier ; conductivité thermique.*
- 2.2. *Ordres de grandeur*

3. Equation de la diffusion thermique

- 3.1. *Equation de la chaleur*
 - 1D en géométrie cartésienne

- Géométrie cylindrique
 - 3D
- 3.2. *Présence d'un terme source : exemple de l'effet Joule.*

4. Propriétés de l'équation de la chaleur. Conditions aux limites.

- 4.1. *Rappel des propriétés de l'équation de la diffusion*
- 4.2. *Continuité du flux thermique à l'interface de deux milieux*
- 4.3. *Condition aux limites entre deux solides : modèle du contact thermique parfait.*
- 4.4. *Condition aux limites imposée par une paroi calorifugée*
- 4.5. *Condition aux limites à l'interface d'un solide et d'un fluide : transfert conducto-convectif (loi de Newton).*

5. Notion de résistance thermique

- 5.1. *Résistance thermique d'un barreau cylindrique calorifugé (cas 1D)*
 - Profil de température $T(x)$
 - Résistance thermique
 - Analogie avec le cas électrique
- 5.2. *Résistance thermique en géométrie cylindrique*
- 5.3. *Résistance thermique conducto-convective*
- 5.4. *Associations de résistances thermiques en série ou en parallèle*
 - En série : double vitrage.
 - En parallèle : pont thermique.
- 5.5. *Approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) thermique*
 - Temps caractéristique d'évolution de la température
 - Définition de l'ARQS
 - Illustration sur un exemple numérique
- 5.6. *Evolution de la température d'une habitation. Analogie avec un circuit RC.*

CAPACITES EXIGIBLES :

- Citer les trois modes de transfert thermique.
- Expliquer que la diffusion est un déplacement d'énergie de proche en proche dans la matière macroscopiquement immobile.
- Exprimer le flux thermique comme le flux du vecteur \vec{j}_Q à travers une surface orientée.
- Utiliser les champs scalaires intensifs (volumiques ou massiques) associés à des grandeurs extensives de la thermodynamique.
- Pour un milieu évoluant à volume constant, établir l'équation locale traduisant le premier principe dans le cas d'un problème ne dépendant qu'une d'une seule coordonnée d'espace en coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques.
- Admettre et utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur divergence et son expression fournie.
- Énoncer et utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, béton, acier.

- Établir l'équation de diffusion vérifiée par la température, avec ou sans terme source.
- **Capacité numérique** : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre l'équation de la diffusion thermique à une dimension par une méthode des différences finies dérivée de la méthode d'Euler explicite de résolution des équations différentielles ordinaires.
- Exploiter la continuité du flux thermique.
- Exploiter la continuité de la température pour un contact thermique parfait.
- Utiliser la relation de Newton (fournie) à l'interface solide-fluide.
- Traduire le contact avec une paroi calorifugée.
- Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique. Énoncer les conditions d'application de l'analogie.
- Établir l'expression de la résistance thermique d'un cylindre calorifugé latéralement.
- Exploiter des associations de résistances thermiques en série ou en parallèle.
- Mettre en évidence un temps caractéristique d'évolution de la température. Justifier l'ARQS. Établir l'analogie avec un circuit électrique RC.