

## Programme officiel PSI

## Phénomènes de transport

Cette partie présente le formalisme nécessaire à l'étude générale des phénomènes de transport abordés au programme de la classe de PSI (conduction électrique, conduction thermique, diffusion de particules, fluides en écoulement). Ce formalisme, commun à différents domaines de la physique, repose essentiellement sur la notion de bilan, global ou local. Il permet d'exprimer des lois de conservation (charge, énergie, masse) et d'établir des équations d'évolution en relation avec des propriétés phénoménologiques.

Le professeur pourra aborder les différentes notions dans l'ordre qu'il souhaite, en relation avec les autres parties du programme. Il est cependant essentiel de faire apparaître les analogies et les différences entre les domaines d'étude.

Dans la partie « **transport de charge** », le transport de charges et les milieux conducteurs sont étudiés en présentant un modèle microscopique. Pour sensibiliser les étudiants à l'aspect complexe de la matière, le professeur est invité à conduire une critique du modèle historique de Drude en comparant le libre parcours moyen d'un électron libre avec la distance inter atomique du réseau. La conductivité électrique est réutilisée lors de l'étude des ondes électromagnétiques dans les conducteurs (effet de peau et réflexion sur un métal).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1. Transport de charge</b>	
<b>1.1. Conservation de la charge</b>	
Densité volumique de charge électrique $\rho$ , vecteur densité de courant électrique $\vec{j}$ .	Passer d'une description microscopique (porteurs de charges, vitesse des porteurs) aux grandeurs mésoscopiques $\rho$ et $\vec{j}$ .
Intensité du courant électrique.	Écrire l'intensité comme le flux du vecteur densité de courant électrique à travers une surface orientée.
Bilan de charge. Équation locale de la conservation de la charge.	Établir, en coordonnées cartésiennes, l'équation locale traduisant la conservation de la charge électrique. Énoncer l'équation locale et en interpréter chacun des termes.
Régime stationnaire.	Définir une ligne de courant et un tube de courant. Exploiter le caractère conservatif du vecteur densité de courant électrique en régime stationnaire et relier cette propriété à la loi des nœuds usuelle de l'électrocinétique.
<b>1.2. Conducteur ohmique</b>	
Loi d'Ohm locale.	Relier le vecteur densité de courant au champ électrique dans un conducteur ohmique. Citer des ordres de grandeur de la conductivité.
Modèle de Drude.	Établir, en régime stationnaire, une expression de la conductivité électrique à l'aide d'un modèle microscopique.
Résistance d'un conducteur cylindrique.	Établir l'expression de la résistance d'un câble cylindrique parcouru uniformément par un courant parallèle à son axe.
Puissance électrique. Effet Joule.	Établir l'expression de la puissance volumique reçue par un conducteur ohmique. Interpréter l'effet Joule.

La partie « **transfert thermique par conduction** » est consacré à la conduction thermique en relation avec le cours de thermodynamique de première année. Après avoir écrit les premier et deuxième principes sous forme infinitésimale, on s'attache à l'étude de la diffusion thermique avec une visée appréciative et résolument concrète.

L'établissement de l'équation de diffusion thermique est limité au cas des systèmes de volume constant et les mises en équation locale sont faites exclusivement en géométries unidimensionnelles. On admet ensuite les formes générales des équations en utilisant les opérateurs d'analyse vectorielle. Cette partie contribue aussi à asseoir la maîtrise des opérateurs d'analyse vectorielle (gradient, divergence, laplacien), sans dérive calculatoire.

L'étude de l'équation de diffusion thermique sans terme source, en régime stationnaire ou dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS), est menée par analogie avec l'électrocinétique. La notion de résistance thermique, dont la connaissance des conditions d'application est aussi importante que son utilisation, doit être illustrée par des exemples pratiques.

Aucune connaissance sur les termes sources n'est exigible sauf pour l'effet Joule. On néglige le rayonnement thermique. Dans le cadre de l'interface liquide-solide, la loi de Newton peut être utilisée, mais ni sa mémorisation, ni aucune connaissance sur son établissement ne peuvent être exigées.

Aucune méthode générale de résolution ne peut être demandée aux étudiants, mais les solutions de l'équation de diffusion en géométrie unidimensionnelle cartésienne, sans terme source, en régime stationnaire ou en régime d'ondes harmoniques doivent être connues.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2. Transport thermique par conduction</b>	
<b>2.1. Formulation infinitésimale des principes de la thermodynamique</b>	
Premier principe. Deuxième principe : $dS = \delta S_c + \delta S_e$ avec $\delta S_e = \frac{\delta Q}{T_0}$ pour une évolution monotherme.	Énoncer et exploiter les principes de la thermodynamique pour une transformation élémentaire. Utiliser avec rigueur les notations $d$ et $\delta$ en leur attachant une signification.
<b>2.2. Étude de la diffusion thermique</b>	
Les différents modes de transfert thermique : diffusion, convection et rayonnement.	Décrire les trois modes de transfert thermique.
Flux thermique. Vecteur densité de courant thermique $\vec{j}_Q$ .	Exprimer le flux thermique comme le flux du vecteur $\vec{j}_Q$ à travers une surface orientée.
Équilibre thermodynamique local.	Énoncer l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local. Utiliser les champs scalaires intensifs (volumiques ou massiques) associés à des grandeurs extensives de la thermodynamique.
Loi de Fourier.	Citer et utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeurs de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, béton, acier.
Bilan d'énergie.	Établir, pour un milieu évoluant à volume constant, l'équation locale traduisant le premier principe dans le cas d'un problème ne dépendant que d'une seule coordonnée d'espace en coordonnées cartésiennes, cylindriques ou sphériques. Utiliser une généralisation admise en géométrie quelconque à l'aide de l'opérateur divergence et son expression fournie.
Équation de la diffusion thermique.	Établir l'équation de diffusion vérifiée par la température, avec ou sans terme de source. 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. Capacité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre l'équation de la diffusion par une méthode de différences finies dérivée de la méthode d'Euler explicite de résolution des équations différentielles ordinaires.
Conditions aux limites.	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.

<b>2.3. Régime stationnaire, ARQS</b>	
Résistance ou conductance thermique.	Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique et 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.
ARQS, analogie électrocinétique avec un circuit <i>RC</i> .	Mettre en évidence un temps caractéristique d'évolution avec la température. Justifier l'ARQS. Établir l'analogie avec un circuit électrique <i>RC</i> .
<b>2.4. Ondes thermiques</b>	
Relation de dispersion.	Établir la relation de dispersion des ondes thermiques en géométrie unidirectionnelle.
Effet de peau thermique.	Mettre en évidence le déphasage lié à la propagation. Établir une distance caractéristique d'atténuation.

La partie « **diffusion de particules** » est traitée par analogie avec les autres phénomènes de transport évoqués (transport de charge, conduction thermique). On peut également utiliser la loi de Fick pour interpréter les paliers de diffusion en électrochimie.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>3. Diffusion de particules</b>	
Les différents modes de transfert de masse : diffusion et convection. Vecteur densité de courant de particules $\vec{j}_N$ .	Citer les deux modes de transfert de particules.  Exprimer le débit de particules comme le flux du vecteur $\vec{j}_N$ à travers une surface orientée.
Loi de Fick.	Énoncer et utiliser la loi de Fick.
Bilan de particules.  Équation de diffusion.	Établir l'équation locale de bilan de particules avec ou sans terme source. Établir l'équation de diffusion. Relier l'équation de diffusion à l'irréversibilité temporelle du phénomène.

L'objectif de la partie « **fluides en écoulement** » est d'introduire les grandeurs pertinentes caractérisant un écoulement, en cohérence avec les autres phénomènes de transport. L'expression de l'accélération comme la dérivée particulaire de la vitesse est abordée mais les équations d'Euler ou de Navier-Stokes ne sont pas au programme.

La notion de viscosité est introduite sur un exemple d'écoulement de cisaillement simple. Le nombre de Reynolds est présenté comme le rapport de deux temps caractéristiques construits par analyse dimensionnelle. Il est exploité afin d'évoquer les propriétés de similitude entre des systèmes réalisés à des échelles différentes et caractérisés par les mêmes nombres sans dimension.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>4. Fluides en écoulement</b>	
<b>4.1. Débits et lois de conservation</b>	
Particule de fluide.	Définir la particule de fluide comme un système mésoscopique de masse constante.
Champ eulérien des vitesses.	Distinguer vitesse microscopique et vitesse mésoscopique. Définir une ligne de courant, un tube de courant.
Dérivée particulaire du vecteur vitesse : terme local, terme convectif.	Associer la dérivée particulaire du vecteur vitesse à l'accélération de la particule de fluide qui passe en un point. Citer et utiliser l'expression de l'accélération avec le terme convectif sous la forme $(\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v}$ .

Masse volumique $\mu$ .	Citer des ordres de grandeur des masses volumiques de l'eau et de l'air dans les conditions usuelles.
Débit massique.	Définir le débit massique et l'écrire comme le flux du vecteur $\mu \vec{v}$ à travers une surface orientée.
Conservation de la masse.	Énoncer l'équation locale traduisant la conservation de la masse.
Écoulement stationnaire.	Exploiter la conservation du débit massique le long d'un tube de courant.
Débit volumique	Définir le débit volumique et l'écrire comme le flux de $\vec{v}$ à travers une surface orientée.
Écoulement incompressible et homogène.	Définir un écoulement incompressible et homogène par un champ de masse volumique constant et uniforme et relier cette propriété à la conservation du volume pour un système fermé. Exploiter la conservation du débit volumique le long d'un tube de courant indéformable.

<b>4.2. Actions de contact sur un fluide</b>	
Pression.	Identifier la force de pression comme étant une action normale à la surface. Utiliser l'équivalent volumique des actions de pression $-\text{grad}P$ .
Élément de statique des fluides.	Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans les cas d'un fluide incompressible et de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait.
Viscosité dynamique.	Relier l'expression de la force surfacique de viscosité au profil de vitesse dans le cas d'un écoulement parallèle. Citer l'ordre de grandeur de la viscosité de l'eau. Exploiter la condition d'adhérence à l'interface fluide-solide.
<b>4.3. Écoulement interne incompressible et homogène dans une conduite cylindrique</b>	
Écoulements laminaire, turbulent. Vitesse débitante.	Décrire les différents régimes d'écoulement (laminaire et turbulent). Relier le débit volumique à la vitesse débitante.
Nombre de Reynolds.	Décrire qualitativement les deux modes de transfert de quantité de mouvement : convection et diffusion. Interpréter le nombre de Reynolds comme le rapport d'un temps caractéristique de diffusion de quantité de mouvement sur un temps caractéristique de convection. Évaluer le nombre de Reynolds et l'utiliser pour caractériser le régime d'écoulement.
Chute de pression dans une conduite horizontale. Résistance hydraulique.	Dans le cas d'un écoulement à bas nombre de Reynolds, établir la loi de Hagen-Poiseuille et en déduire la résistance hydraulique. Exploiter le graphe de la chute de pression en fonction nombre de Reynolds, pour un régime d'écoulement quelconque. Exploiter un paramétrage adimensionné permettant de transposer des résultats expérimentaux ou numériques sur des systèmes similaires réalisés à des échelles différentes.
<b>4.4. Écoulement externe incompressible et homogène autour d'un obstacle</b>	
Force de traînée subie par une sphère solide en mouvement rectiligne uniforme. Coefficient de traînée $C_x$ ; graphe de $C_x$ en fonction du nombre de Reynolds.	Associer une gamme de nombre de Reynolds à un modèle de traînée linéaire ou un modèle quadratique.
Notion de couche limite.	Pour les écoulements à grand nombre de Reynolds décrire qualitativement la notion de couche limite.
Forces de traînée et de portance d'une aile d'avion à haut Reynolds.	Définir et orienter les forces de portance et de traînée. Exploiter les graphes de $C_x$ et $C_z$ en fonction de l'angle d'incidence.