

PROGRAMME DE PHYSIQUE DE 2^{ème} ANNEE DE LA VOIE PHYSIQUE CHIMIE (PC)

I. OBJECTIFS DE FORMATION

L'enseignement de la physique dans la classe de deuxième année PC s'inscrit dans la continuité de l'enseignement de première année PCSI. Les principes directeurs du programme de PCSI sont donc conservés : promotion résolue de l'expérience et de la compréhension physique du phénomène étudié, réduction significative, en ce qui concerne les calculs, du recours à la technicité nécessaire à la résolution des exercices et problèmes.

Dans un monde en évolution rapide, où une somme énorme de connaissances est disponible, l'enseignement dispensé par le professeur doit éveiller la curiosité face au monde réel, promouvoir le sens de l'observation qui est à l'origine des grandes découvertes et développer chez l'étudiant le goût de l'expérience et du concret.

La formation dispensée au cours des deux années de préparation doit, dans une approche équilibrée entre théorie et expérience, apporter à l'étudiant les outils conceptuels et méthodologiques pour lui permettre de comprendre le monde naturel et technique qui l'entoure et de faire l'analyse critique des phénomènes étudiés.

L'objectif essentiel est que l'étudiant devienne graduellement acteur de sa formation, qu'il comprenne mieux l'impact de la science et que, plus assuré dans ses connaissances, il soit préparé à poursuivre son cursus d'études dans les grandes écoles.

La méthode scientifique utilisée, empreinte de rigueur et de sens critique permanent, doit permettre à l'étudiant, sur toute question du programme :

- de communiquer l'essentiel des résultats sous forme claire et concise, tant à l'oral qu'à l'écrit ;
- d'en analyser le caractère de pertinence : modèle utilisé, limites du modèle, influence des paramètres, homogénéité des formules, symétries, interprétation des cas limites, ordres de grandeur et précision ;
- d'en rechercher l'impact pratique.

II. PROGRAMME

PREAMBULE

1) A propos de la démarche expérimentale

Dans la filière PC, l'approche expérimentale de la physique est fortement affirmée et valorisée, ce qui se manifeste notamment par un horaire de travaux pratiques important et par le regroupement sous forme de séances de quatre heures. La formation expérimentale est proposée aux élèves sous des formes variées et complémentaires :

- les expériences de cours ;
- les TP-cours, nouveauté introduite dans ces classes par la réforme de 1995 ;
- les travaux pratiques (TP) ;
- les travaux d'initiative personnelle encadrés (TIPE), autre nouveauté de cette réforme.

Si le TIPE relève de l'initiative de l'étudiant, l'expérience de cours et le TP relèvent de la responsabilité professorale : si le programme propose des thèmes de TP choisis notamment pour illustrer le cours de physique, ceux-ci peuvent être remplacés par tout thème à l'initiative du professeur et ne faisant appel qu'aux connaissances au programme de la classe. En revanche le contenu des TP-Cours, fixé par le programme est exigible aux concours dans toutes les épreuves, écrites, orales et pratiques. Dans le programme qui suit, chaque rubrique de TP-Cours correspond à un thème ; chaque thème correspond à une ou plusieurs séances de deux heures, le choix du découpage d'un thème relevant de l'initiative pédagogique du professeur.

Enfin la valorisation des savoir-faire acquis dans la partie « démarche expérimentale » du programme suppose que dans tous les dispositifs globaux d'évaluation figurent des épreuves de travaux pratiques affectées de coefficients crédibles.

2) A propos des techniques de calcul

Il convient dans ce domaine de naviguer entre deux écueils : en mettant la barre trop haut on risque de décourager les étudiants et de leur donner une image desséchée de la physique, mais en la plaçant trop bas on les prive des outils nécessaires pour progresser dans l'étude de la physique.

Les calculs ne doivent en aucun cas passer au premier plan. S'il s'agit bien de savoir mettre en équations la situation modélisée, la résolution mathématique ne doit en aucun cas obérer la compréhension physique du phénomène étudié. Les exercices ne faisant appel qu'aux seules techniques de calcul étant bannis, l'attention de l'étudiant, libérée d'une charge lourde et inappropriée doit être reportée sur la conceptualisation et/ou l'approche expérimentale du phénomène lui-même, stimulant ainsi une attitude active et créatrice. Questions et exercices seront orientés dans ce sens.

Les techniques de calcul ne doivent pas constituer un obstacle infranchissable empêchant par exemple les étudiants de suivre un cours avec profit. Aussi il importe de ne pas sous-estimer leurs besoins de formation dans ce domaine et par conséquent de consacrer un temps suffisant en cours et en travaux dirigés à leur faire acquérir **progressivement** un minimum d'aisance sur les techniques de calcul indispensables.

3) A propos de l'évaluation

Les pratiques d'évaluation doivent être cohérentes avec l'esprit même du programme. Il va de soi que les spécificités de la filière PC doivent se retrouver dans les modalités d'évaluation et de contrôle des connaissances. Celles-ci doivent respecter l'esprit des objectifs : tester l'aptitude de l'étudiant moins à résoudre les équations qu'à les poser, puis à analyser les résultats, tant dans leur caractère théorique que pratique.

Le programme a été rédigé et abondamment commenté de façon à limiter toute dérive inflationniste. Afin de revaloriser les contenus au détriment des calculs, il est souhaitable de diversifier les modes d'évaluation : questions qualitatives, questions synthétiques, questions de culture, ordres de grandeurs, discussion d'ordre expérimental...

Enfin la valorisation des savoir-faire acquis dans la partie « démarche expérimentale » du programme suppose que dans tous les dispositifs globaux d'évaluation figurent des épreuves de travaux pratiques affectées de coefficients crédibles.

I. APPROCHE THÉORIQUE

A) Mécanique des fluides

S'agissant des écoulements visqueux, la mémorisation de l'équation de Navier-Stokes et des expressions des forces surfaciques de viscosité n'est pas exigible : ces éléments doivent être fournis dans les épreuves écrites ou orales qui y font appel.

Les bilans d'énergie interne et d'entropie en dynamique des fluides compressibles sont l'occasion de compléter l'enseignement de thermodynamique par l'étude de systèmes ouverts simples, en régime permanent d'écoulement, généralisant la détente de Joule-Thomson. Aucune question ne peut porter sur de tels bilans pour des systèmes autres qu'unidimensionnels.

| Programme | Commentaires |
|---|--|
| 1. Etude phénoménologique des fluides | <i>L'approche du libre parcours moyen est purement descriptive ; la notion de section efficace et le modèle des sphères dures sont hors-programme. On mentionne les trois échelles spatiales : échelle microscopique (moléculaire), échelle mésoscopique (de la particule de fluide), échelle macroscopique.</i> |
| Notion de libre parcours moyen ; modèle du fluide continu. | |
| Pression. Notion élémentaire de viscosité. | <i>En liaison avec la rubrique E) du programme, on signale que la viscosité est un transport diffusif de quantité de mouvement. Toute modélisation microscopique de la viscosité est exclue. On définit la viscosité via les expressions phénoménologiques des forces surfaciques de viscosité dans la situation simplifiée d'un champ de vitesses $\mathbf{v} = v_x(\mathbf{y}) \mathbf{u}_x$; on en déduit l'expression de la force volumique de viscosité, dont on admet le caractère général pour un fluide newtonien en écoulement incompressible. La deuxième viscosité (de compressibilité) est hors-programme.</i> |
| Traînée d'une sphère solide dans un fluide : distinction entre écoulement laminaire et écoulement turbulent ; nombre de Reynolds. | <i>L'approche est purement descriptive. On s'intéresse à l'écoulement engendré par le mouvement rectiligne et uniforme d'une sphère. En exploitant d'une part les graphes expérimentaux donnant la traînée en fonction du nombre de Reynolds et d'autre part des cartes de lignes de champ, des photos ou des films de cet écoulement, on fait apparaître les modèles limites de l'écoulement laminaire et de l'écoulement turbulent, ainsi que les expressions correspondantes de la traînée. Les écoulements turbulents en tant que tels ne sont pas au programme : aucune question ne peut porter sur de tels écoulements.</i> |

Définition d'un écoulement parfait.

Un écoulement parfait est un écoulement où tous les phénomènes diffusifs, notamment la viscosité, sont négligeables : les particules de fluide évoluent de manière adiabatique et réversible.

On introduit qualitativement la notion de couche limite afin de préciser le domaine de validité du modèle de l'écoulement parfait.

2. Cinématique des fluides

La cinématique des fluides est considérée exclusivement comme un outil : elle ne peut être l'objet principal d'un problème écrit ou d'un exercice d'oral. On peut s'appuyer sur la lecture de cartes d'écoulements. La distribution locale des vitesses dans un milieu continu et la matrice des taux de déformation sont hors-programme : on se limite à illustrer sur quelques exemples pertinents la signification physique de $\text{div } \mathbf{v}$ et de $\text{rot } \mathbf{v}$.

Description de Lagrange, description d'Euler : champ des vitesses.

Dérivée particulaire d'un champ.

On se limite au champ de masse volumique et au champ des vitesses.

Densité de courant. Débit massique. Débit volumique.

On signale que le vocabulaire de l'analyse vectorielle (circulation, flux...) est issu de la mécanique des fluides.

Bilans de masse : équation locale de conservation de la masse.

Définition d'un écoulement stationnaire, d'un écoulement incompressible, d'un écoulement irrotationnel (potentiel des vitesses).

Il s'agit simplement d'introduire les définitions et le contenu physique. Un écoulement est incompressible si $\text{Dr}/\text{Dt} = 0$ ou $\text{div } \mathbf{v} = 0$ en tout point. Un écoulement est stationnaire si tous les champs eulériens sont indépendants du temps. Les notions de fonction de courant, de potentiel complexe des vitesses, de fonction holomorphe et de transformation conforme sont hors-programme.

3. Bilans dynamiques et thermodynamiques

Exemples de bilans de quantité de mouvement, de moment cinétique, d'énergie cinétique, d'énergie interne et d'entropie pour un écoulement unidimensionnel en régime permanent.

On se ramène à un système fermé. L'enseignement de cette partie a pour but l'acquisition d'un savoir-faire. Toute formulation générale, notamment le théorème d'Euler et le théorème de Reynolds, est hors-programme. La formulation locale de ces bilans est hors-programme.

4. Equations dynamiques locales

La relation de Bernoulli pour les écoulements compressibles est hors-programme.

- a) Ecoulements parfaits : équation d'Euler, relation de Bernoulli pour les écoulements incompressibles et homogènes.
- b) Ecoulements visqueux incompressibles : équation de Navier-Stokes

La mémorisation de l'équation de Navier-Stokes n'est pas exigible. On fait apparaître par une analyse en ordre de grandeur, le nombre de Reynolds comme le rapport du terme convectif sur le terme diffusif. Aucune étude d'écoulements visqueux particuliers (Couette, Poiseuille...) ne figure au programme. Toute étude générale de la similitude est hors-programme.

B) Electromagnétisme

L'enseignement de l'électromagnétisme est centré d'une part sur l'étude des phénomènes d'induction et de leurs applications et d'autre part sur l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques (intégrée dans la partie Physique des ondes du programme).

Cet enseignement s'appuie sur l'enseignement d'électromagnétisme de PCSI. En ce qui concerne les forces de Laplace, seules les expressions des forces volumiques et linéiques qui figurent dans le programme de PCSI sont connues. On se limite à des modèles simples pour lesquels le calcul des forces de Laplace ne requiert aucune technicité. Toute étude du travail des forces de Laplace (flux coupé, théorème de Maxwell) est hors-programme. Tout calcul de forces de Laplace à partir de l'énergie magnétique est hors-programme. Dans le cas du dipôle magnétique les expressions de la résultante et du moment des forces de Laplace sont hors-programme : elles sont fournies par l'énoncé lorsqu'elles sont utiles.

L'électrostatique des conducteurs en équilibre est hors-programme.

L'enseignement d'électrostatique et de magnétostatique de PCSI est complété par une approche locale (équations de Maxwell et relations de passage). Aucune technicité supplémentaire ne doit être recherchée dans les calculs de champs magnétiques dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ARQS) ou quasi-permanents ; en particulier le calcul de champs magnétiques créés par une distribution volumique ou surfacique de courants par la loi de Biot et Savart reste hors-programme.

| Programme | Commentaires |
|--|---|
| 1. Equations locales de l'électromagnétisme. | |
| a) Généralités | <i>Dans le paragraphe 1a) on présente les outils de l'électromagnétisme. On insiste sur le contenu physique. Aucune démonstration n'est exigible. Toute question de cours sur ce paragraphe est exclue.</i> |
| Densité volumique de courant. Equation locale de conservation de la charge. | |
| Equations de Maxwell. Relations entre les composantes du champ électromagnétique de part et d'autre d'une interface (relations de passage). | <i>On indique que les relations de passage se substituent aux équations de Maxwell dans le cas d'une modélisation surfacique. Leur démonstration est hors-programme. On fait le lien avec les discontinuités de champs rencontrées sur des exemples en PCSI.</i> |
| Existence des potentiels (\mathbf{A}, V). | <i>On fait remarquer que les potentiels ne sont pas uniques. La notion de jauge est hors-programme. Les équations de propagation des potentiels et les potentiels retardés sont hors-programme. L'expression de \mathbf{A} en fonction des sources est fournie par l'énoncé lorsqu'elle est utile.</i> |
| Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de Poynting. Equation locale de Poynting. | <i>On affirme la signification physique du vecteur de Poynting. On interprète l'équation locale de Poynting comme la traduction d'un bilan d'énergie électromagnétique.</i> |

b) Cas particulier de l'ARQS. Application à l'étude de l'effet de peau dans un conducteur ohmique. Modèle limite du conducteur parfait.

Les conditions de validité de l'ARQS sont précisées en physique des ondes.

On se limite au cas d'un demi-espace conducteur limité par un plan. On signale la validité de ce modèle lorsque l'épaisseur de peau est faible devant le rayon de courbure. On se borne au domaine de fréquences où l'ARQS et la loi d'Ohm locale avec une conductivité réelle et indépendante de la fréquence sont valables : l'étude en très haute fréquence (transparence U.V...) est hors-programme. On définit le modèle limite du conducteur parfait et on dégage un critère de validité de ce modèle mettant en jeu l'épaisseur de peau.

c) Cas particulier des régimes stationnaires

On fait le lien avec les propriétés des champs statiques énoncées en PCSI. Les calculs de potentiel-vecteur \mathbf{A} sont hors-programme.

2. Induction électromagnétique : cas d'un circuit fixe dans un champ magnétique dépendant du temps

Circulation du champ électrique. Loi de Faraday.

La notion de «champ électromoteur» – $\partial\mathbf{A}/\partial t$ n'est pas exigible.

Auto-induction. Induction mutuelle entre deux circuits filiformes fermés.

Tout calcul de coefficients L et M est hors-programme : les expressions de ces coefficients sont données lorsqu'elles sont utiles. Le théorème de Neumann ($M_{1,2}=M_{2,1}$) est simplement affirmé. L'étude systématique de deux oscillateurs couplés par induction mutuelle (modes propres, pulsations propres, résonances...) est hors-programme.

Bilan énergétique de l'établissement du courant dans un ensemble de deux circuits filiformes fermés indéformables et fixes : énergie magnétique (expression en fonction des intensités des courants et des coefficients d'inductance)

On vérifie sur l'exemple du solénoïde long la cohérence de cette expression de l'énergie magnétique avec celle qui a été obtenue à partir des équations de Maxwell. L'expression de l'énergie magnétique en fonction de \mathbf{j} et \mathbf{A} est hors-programme.

3. Induction électromagnétique : cas d'un circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire

Circulation de $\mathbf{v}_e \cdot \dot{\mathbf{U}}\mathbf{B}$. Loi de Faraday.

Le terme $\mathbf{v}_e \cdot \dot{\mathbf{U}}\mathbf{B}$ peut être introduit en utilisant les transformations non relativistes des forces et des vitesses, sans que cette démarche soit imposée. On vérifie sur un exemple simple la validité de la loi de Faraday dont on affirme la généralité. On évite les situations particulières où la loi de Faraday ne s'applique pas. La notion de flux coupé est hors-programme.

Application au haut-parleur électrodynamique : couplage électromécanique, bilan énergétique.

On fait remarquer sur l'exemple du haut-parleur que dans le cas d'un champ magnétique stationnaire, la puissance de la fem induite est opposée à la puissance des forces de Laplace (conversion électromécanique d'énergie). On affirme la généralité de ce résultat dans

les problèmes de couplage électromécanique de ce type.

C) Physique des ondes

| Programme | Commentaires |
|--|---|
| 1. Phénomènes de propagation unidimensionnels non dispersifs – Equation de d'Alembert | |
| Ondes transversales sur une corde vibrante. | <i>On se limite aux petits mouvements d'une corde sans raideur dans un plan fixe.</i> |
| Ondes sonores longitudinales dans une tige solide. | <i>On introduit l'approximation des milieux continus à partir du modèle de la chaîne infinie d'oscillateurs harmoniques identiques couplés. On exprime la célérité des ondes en fonction du module d'Young E qu'on introduit à cette occasion. L'étude de la chaîne dans le cas où l'approximation des milieux continus ne convient pas (zone de Brillouin, relation de dispersion, pulsation maximale, vitesse de phase, vitesse de groupe...) est hors-programme. Il ne s'agit ici en aucun cas d'introduire un cours, même élémentaire, sur les solides déformables, mais simplement d'exprimer la célérité des ondes en fonction du module d'Young et de la masse volumique.</i> |
| Familles de solutions de l'équation de d'Alembert : | |
| - ondes progressives | <i>On se borne à vérifier que $f(x+ct) + g(x-ct)$ ou $\mathbf{f}(t-x/c) + \mathbf{y}(t+x/c)$ sont solutions de l'équation de d'Alembert et à dégager le contenu physique.</i> |
| - ondes progressives harmoniques (ou monochromatiques) | <i>On fait apparaître le rôle simplificateur de la notation complexe pour les ondes progressives harmoniques.</i> |
| - ondes stationnaires | <i>On introduit la méthode de séparation des variables.</i> |
| Applications : | |
| - modes propres d'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités ; | <i>On fait constater sur ces exemples que les familles de solutions précédemment introduites permettent de construire la solution.</i> |
| - résonances sur la corde de Melde. | |

2. Ondes sonores dans les fluides

Mise en équations des ondes sonores dans l'approximation acoustique : équation de d'Alembert pour la surpression.

Structure des ondes planes progressives harmoniques : caractère longitudinal, impédance acoustique.

Aspects énergétiques : densité volumique d'énergie sonore, vecteur densité de courant énergétique.

Réflexion, transmission d'une onde sonore plane progressive sous incidence normale sur une interface plane infinie entre deux fluides : coefficients de réflexion et de transmission des vitesses, des surpressions et des puissances sonores.

3. Ondes électromagnétiques dans le vide

Equations de propagation des champs **E** et **B**.

Structure des ondes planes progressives harmoniques.

Etats de polarisation.

Rayonnement d'un dipôle oscillant : structure d'onde localement plane, puissance rayonnée.

Notions élémentaires sur la diffusion.

On s'appuie sur les notions introduites pour les phénomènes unidimensionnels tout en soulignant les éléments nouveaux liés au caractère tridimensionnel.

On adopte une démarche eulérienne en liaison avec le cours de mécanique des fluides. On adopte le modèle de l'écoulement parfait.

On définit l'impédance acoustique comme le rapport de la surpression sur la vitesse. Si un énoncé envisage une autre définition (par exemple en faisant intervenir la section d'un tuyau sonore) il doit le préciser. On signale que la structure s'étend aux ondes planes progressives de forme quelconque grâce à l'analyse de Fourier.

On se borne à affirmer les expressions correspondantes sans démonstration et à les illustrer sur des cas simples.

On justifie les relations de passage (continuité de la vitesse et de la surpression) dans ce seul cas ; en particulier le cas de l'interface entre deux tuyaux de sections distinctes (continuité du débit volumique et de la surpression) est hors-programme. La mémorisation des coefficients de réflexion et de transmission n'est pas exigible.

A cette occasion on précise les conditions de l'ARQS. Les équations de propagation des potentiels sont hors-programme.

On signale que la structure s'étend aux ondes planes progressives de forme quelconque grâce à l'analyse de Fourier.

On se limite ici à définir les différents états de polarisation. Leur mise en évidence et leur modification sont étudiées en TP-Cours.

*On se borne à présenter les trois échelles caractéristiques du problème, à affirmer les expressions de **E** et **B** lorsque $a \ll \lambda \ll r$ et à dégager le contenu physique. Les potentiels retardés sont hors-programme.*

On adopte le modèle de l'électron « élastiquement lié » excité par une onde plane progressive harmonique et on calcule la puissance rayonnée dans la limite de la diffusion Rayleigh. On interprète la polarisation par diffusion dans une direction transversale.

4. Phénomènes linéaires de propagation unidimensionnels dispersifs

Relation de dispersion : vitesse de phase, dispersion, absorption.

Paquet d'ondes ; vitesse de groupe.

5. Ondes électromagnétiques dans un milieu diélectrique

a) Réponse d'un milieu diélectrique linéaire et isotrope à un champ électrique sinusoïdal :

- déplacement de charges liées, vecteur \mathbf{P} ; densité de courants $\mathbf{j} = \partial\mathbf{P}/\partial t$ et densité volumique de charges $\rho = -\text{div } \mathbf{P}$ associées

- cas d'un milieu peu dense dans le modèle de l'électron « élastiquement lié » ;

- susceptibilité complexe d'un milieu linéaire et isotrope.

b) Propagation d'une onde plane transversale de dépendance spatio-temporelle en $\exp(j\omega t - jkx)$ avec ω réel et k a priori complexe dans un diélectrique linéaire homogène, isotrope, non magnétique ; permittivité relative complexe, indice complexe ; dispersion, absorption.

c) Réflexion-réfraction d'une onde plane progressive sinusoïdale polarisée rectilignement à l'interface entre deux diélectriques linéaires homogènes et isotropes :

- lois de Descartes
- coefficients de réflexion et de transmission de l'amplitude du champ électrique et de la puissance dans le cas de l'incidence normale.

On introduit les notions du programme sur un exemple de phénomène unidimensionnel linéaire laissé à la libre appréciation du professeur. On insiste sur l'intérêt de la décomposition en ondes planes proportionnelles à $\exp(j\omega t - jkx)$ avec ω réel et k a priori complexe pour le traitement des phénomènes de propagation linéaires.

Le but de ce paragraphe est de faire un lien avec le cours d'optique en n'introduisant que les concepts nécessaires. L'étude est limitée à des milieux non magnétiques. Les vecteurs \mathbf{D} , \mathbf{M} et \mathbf{H} , les équations de Maxwell dans les milieux et les relations de passage correspondantes sont hors programme. L'électrostatique des milieux diélectriques est hors programme.

On se limite au cas d'un diélectrique dépourvu de porteurs de charges libres.

On introduit le vecteur \mathbf{P} et on établit la relation $\mathbf{j} = \partial\mathbf{P}/\partial t$. On en déduit la densité volumique de charges $\rho = -\text{div } \mathbf{P}$ via l'équation locale de conservation de la charge.

La notion de champ local pour un milieu dense est hors programme.

On définit un milieu linéaire et isotrope par une liaison de la forme $\mathbf{P} = \epsilon_0 \mathbf{c} \mathbf{E}$ où la dépendance de \mathbf{c} avec ω rend compte des propriétés du milieu.

On établit la relation de dispersion et on définit la permittivité relative complexe et l'indice complexe par les relations $k^2 = \epsilon_r \omega^2 / c^2$ et $k = n\omega/c$.

Partant de la continuité des composantes tangentielles des champs \mathbf{E} et \mathbf{B} on montre que la composante tangentielle du vecteur d'onde est commune aux ondes incidente, réfléchie et réfractée ; on en déduit les lois de Descartes pour les vecteurs d'onde. La mémorisation des coefficients de réflexion et de transmission n'est pas exigible.

D) Optique ondulatoire

On signale le caractère très général des phénomènes d'interférences et de diffraction étudiés en optique en insistant notamment sur le rôle des ordres de grandeur des longueurs d'onde rencontrées dans les différents domaines de la physique ondulatoire. On se limite aux situations telles qu'une description en termes d'ondes scalaires est suffisante.

Programme

Commentaires

1. Modèle scalaire de la lumière

Propagation d'une vibration scalaire le long d'un rayon lumineux : chemin optique.

On définit les surfaces d'ondes relatives à une source ponctuelle S par l'ensemble des points M tels que $(SM) = \text{constante}$.

Surfaces d'ondes ; onde plane, onde sphérique. Théorème de Malus.

On admet le théorème de Malus, outil nécessaire à l'étude de l'optique ondulatoire.

Eclairement.

Il ne s'agit en aucun cas de réintroduire par le biais du théorème de Malus un exposé théorique d'optique géométrique. Le programme d'optique géométrique reste celui défini dans la partie expérimentale du cours de première année : le principe de Fermat et la condition de stigmatisme sont hors-programme.

2. Interférences

Interférences non localisées entre deux ondes totalement cohérentes.

La comparaison des prévisions théoriques et des réalités expérimentales conduit à affirmer un critère opérationnel de cohérence mettant en œuvre les notions de trains d'ondes, de sources synchrones, de diviseur d'ondes et de longueur de cohérence.

Exemple de diviseur d'ondes : l'interféromètre de Michelson éclairé par une source ponctuelle.

On montre l'équivalence de l'interféromètre de Michelson à un coin d'air ou à une lame d'air à faces parallèles et on raisonne à l'aide des sources images secondaires.

Figure d'interférences, champ d'interférences, franges, ordre d'interférences et défilement éventuel de franges, contraste de la figure d'interférences.

L'essentiel est de maîtriser la physique du phénomène d'interférences ; l'étude de tout dispositif utilisant des lentilles et/ou des prismes (bientilles de Billet, de Meslin, biprisme de Fresnel, etc...) est hors programme.

Notion élémentaire de cohérence temporelle limitée à l'étude de l'interféromètre de Michelson éclairé par une source ponctuelle : modèles du doublet spectral et du profil spectral rectangulaire en nombre d'onde.

Il s'agit simplement de mettre en évidence de la façon la plus élémentaire possible, l'influence de la largeur spectrale d'une source sur le contraste du système de franges d'interférences. La théorie générale de la cohérence temporelle (définition du degré de cohérence partielle etc...) est hors-programme. Les interférences en lumière blanche sont étudiées uniquement en TP-Cours.

3. Diffraction à l'infini

Principe de Huygens-Fresnel

Le principe de Huygens - Fresnel est énoncé de façon qualitative. Lors de sa mise en œuvre mathématique pour la diffraction à l'infini, on s'attache uniquement aux différences de phase entre les ondes secondaires, sans se préoccuper des facteurs d'amplitude.

Diffraction à l'infini d'une onde plane par une pupille rectangulaire ; cas de la pupille fente. Limite de l'optique géométrique.

On présente l'allure de la figure de diffraction à l'infini par une pupille circulaire (la démonstration de la formule correspondante est hors-programme). On souligne sans démonstration aucune, le rôle de la diffraction à l'infini dans la formation des images.

Diffraction à l'infini par les fentes d'Young éclairées par une source ponctuelle à l'infini, par une fente-source parallèle : influence de la largeur de la fente-source sur la visibilité des franges.

Les réseaux sont abordés exclusivement en TP-Cours.

E) Diffusion de particules - Diffusion thermique

On souligne les analogies et les différences entre les différents phénomènes de transport abordés : diffusion de particules et diffusion thermique (en deuxième année), conduction électrique (en première année).

Programme

Commentaires

1. Diffusion de particules

Bilan de particules. Loi phénoménologique de Fick. Equation de la diffusion.

Toute modélisation microscopique de la loi de Fick est hors-programme.

Aucune méthode de résolution de l'équation de la diffusion ne peut être supposée connue.

2. Diffusion thermique

Présentation des différents modes de transfert thermique : convection, rayonnement, diffusion.

On se borne à présenter succinctement les différents modes de transfert thermiques. L'étude de la convection thermique et l'étude du rayonnement thermique sont hors-programme.

Bilan d'énergie. Loi phénoménologique de Fourier. Equation de la diffusion thermique.

Toute modélisation microscopique de la loi de Fourier est hors-programme.

Aucune méthode de résolution de l'équation de la diffusion thermique ne peut être supposée connue. L'étude de la diffusion thermique en régime sinusoïdal forcé (ondes thermiques) est hors-programme.

La loi phénoménologique de Newton $\mathbf{j} = h(T-Te)$ à une interface est hors-programme : elle est fournie par l'énoncé lorsqu'elle est utile.

Régime continu : conductance thermique.

On fait remarquer que les calculs sont identiques à ceux des conductances électriques. On se limite aux calculs ne faisant intervenir qu'une seule variable d'espace. Seule la mémorisation de l'expression de la conductance thermique d'un barreau rectiligne unidimensionnel est exigible.

F) Thermodynamique :

Cette rubrique constitue un prolongement du programme de thermodynamique de PCSI et en permet ainsi la révision.

Programme

Commentaires

1. Potentiels thermodynamiques

Condition d'évolution et d'équilibre d'un système thermodynamique fermé :

- a) évolution monotherme ; travail maximum récupérable ; potentiel thermodynamique $F^* = U - T_0 S$
- b) évolution monobare et monotherme ; travail maximum récupérable ; potentiel thermodynamique $G^* = U - T_0 S + p_0 V$

Toute étude des mélanges (potentiels chimiques, grandeurs molaires partielles) est hors-programme en physique et relève exclusivement du programme de chimie.

2. Energie libre - Enthalpie libre

Définitions. Identités thermodynamiques $dF = -pdV - SdT$ et $dG = Vdp - SdT$

A l'aide des identités thermodynamiques, on fait ressortir le fait que $F(V,T)$ et $G(p,T)$ sont non seulement des potentiels thermodynamiques mais aussi des fonctions caractéristiques. La manipulation des dérivées secondes de ces fonctions (coefficients calorimétriques l et k , relations de Clapeyron, relation de Mayer...) est hors-programme.

3. Corps pur sous deux phases

Condition d'équilibre, condition d'évolution. Formule de Clapeyron.

Cette étude approfondit l'approche descriptive du programme de PCSI.

G) Mécanique du solide

Pour ce qui concerne les théorèmes généraux (théorèmes de Koenig, théorème de la résultante dynamique, théorèmes du moment cinétique en un point fixe ou dans le référentiel barycentrique, théorème de l'énergie cinétique) on utilise les résultats de l'étude des systèmes de deux points matériels figurant au programme de première année, dont on admet la généralisation. On insiste sur la nullité de la puissance des forces intérieures à un solide. Aucune démonstration n'est exigible. Toute question de cours sur la mécanique du solide est exclue.

Programme

Commentaires

1. Cinématique

Champ des vitesses d'un solide et vecteur instantané de rotation.

La structure du champ des vitesses et l'existence du vecteur rotation sont affirmées et utilisées sans justification. On se limite aux mouvements d'un solide en rotation autour d'un axe fixe ou gardant une direction fixe dans le référentiel d'étude.

Cinématique du contact de deux solides : vitesse de glissement, condition de roulement sans glissement.

2. Actions de contact entre deux solides

Lois phénoménologiques de Coulomb limitées au frottement de glissement.

S'agissant des liaisons surfaciques, on se limite aux cas où les lois de Coulomb du frottement de glissement sont applicables ou au cas de la liaison pivot parfaite.

Puissance des actions de contact.

Liaison pivot parfaite.

3. Exemples d'étude dynamique

Mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.

On affirme l'expression de la composante du moment cinétique sur l'axe de rotation et de l'énergie cinétique en fonction de la vitesse angulaire de rotation et du moment d'inertie. Le calcul des moments d'inertie et le théorème de Huygens sont hors-programme. Toute étude de l'équilibrage statique ou dynamique des solides en rotation est hors-programme.

Mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe dont la direction reste fixe dans un référentiel galiléen.

Le théorème du moment dynamique et le théorème du moment cinétique en un point mobile sont hors-programme. On habitue les étudiants à exploiter le théorème du moment cinétique barycentrique pour se ramener au cas du solide en rotation autour d'un axe fixe. En revanche on évite toute situation nécessitant l'utilisation explicite des forces d'inertie. S'agissant du calcul de l'énergie cinétique, on habitue les étudiants à exploiter le théorème de Koenig.

II- APPROCHE EXPERIMENTALE

Programme

Commentaires

1. TP-Cours

Interférométrie à deux ondes : l'interféromètre de Michelson.

- Présentation de l'appareil.
Reconnaissance de l'optique : miroirs, séparatrice, compensatrice.
Reconnaissance de la mécanique : axes de rotation et vis de réglages, translation du chariot.
- Réglage et utilisation du Michelson.

Utilisation d'une source étendue spatialement : localisation des franges d'interférences.

Réglage géométrique de l'interféromètre.

Obtention des franges du coin d'air, d'égale épaisseur avec une lampe spectrale : conditions d'éclairage et de projection.
Obtention des franges de la lame d'air, d'égale inclinaison avec une lampe spectrale : conditions d'éclairage et de projection.

Passage à la teinte plate et contrôle de sa qualité en lumière blanche.
Franges du coin d'air en lumière blanche.

Influence de la translation d'un miroir sur la figure d'interférences.

2. TP-Cours

Spectroscopie à réseau.

- Eléments théoriques.
Formule des réseaux par transmission.
Minimum de déviation dans un ordre donné : intérêt expérimental.
Dispersion par le réseau dans un ordre donné : spectre d'ordre p , mélange des ordres.

En élargissant progressivement la source à l'aide d'un diaphragme, on met en évidence la diminution du contraste et la localisation des franges d'interférences. L'objectif est de comprendre pourquoi, selon l'expérience, on utilise soit un éclairage convergent soit un éclairage quasi-parallèle, pourquoi, on observe soit l'image des miroirs soit une projection dans le plan focal d'une lentille convergente de sortie.

A cette occasion, on montre que l'ordre d'utilisation des différentes sources (laser éventuellement, puis lampe spectrale, enfin lumière blanche) est lié à la cohérence temporelle des sources lumineuses.

Dans cette partie du TP-Cours, les notions introduites sont la plus naturellement possible issues de l'expérimentation.

Les positions des raies observées sont interprétées comme résultant d'une condition d'interférences exactement constructives. On souligne qualitativement l'effet de l'interférence d'un grand nombre d'ondes cohérentes sur la directivité de l'onde résultante, mais le calcul et les expressions de l'intensité diffractée et du pouvoir de résolution théorique sont hors programme.

- Présentation du goniomètre.
Reconnaissance de l'optique : viseur à l'infini, lunette de lecture éventuelle, collimateur, fente source réglable.
Reconnaissance de la mécanique : axes de rotation et vis de réglages.

Pour le réglage, on s'appuie sur les techniques vues dans la partie expérimentale du programme de première année. La connaissance d'un protocole de réglage de la perpendicularité de l'axe optique de la lunette et de l'axe de rotation de la plate-forme n'est pas exigible. La connaissance d'un protocole de réglage de la perpendicularité de la normale au réseau à l'axe de rotation de la plate-forme n'est pas exigible.

- Réglage du goniomètre et utilisation du spectroscope : lampe étalon, courbe d'étalonnage, mesure de longueurs d'onde.

Le choix des exemples sur lesquels la spectroscopie à réseau est mise en œuvre relève de l'initiative du professeur.

3. TP-Cours

Polarisation de la lumière.

- Éléments du modèle vectoriel de la lumière.
Vibration vectorielle propagée.
Caractère transversal de la vibration vectorielle.
Définition des polarisations rectiligne, circulaire, elliptique.
Lumière naturelle.

On met en évidence la polarisation par réflexion vitreuse (incidence de Brewster) et par diffusion. L'étude théorique des coefficients de réflexion et transmission sur un dioptre sous incidence oblique est hors-programme.

Interprétation élémentaire des propriétés des lames quart d'ondes et demi-onde : existence des axes rapide et lent, indices n_x et n_y .

On néglige, à ce stade de la modélisation, les réflexions sur les faces de la lame et l'absorption interne à la lame. On insiste sur la dénomination demi-onde ou quart d'onde pour telle ou telle longueur d'onde.

On insiste sur l'intérêt de la décomposition d'une vibration quelconque en deux vibrations rectilignes, orthogonales, adaptées.

- Production et analyse de lumière polarisée.
Utilisation de polaroïds, lames demi-onde et quart d'onde pour la fabrication de lumière polarisée.
Analyse de lumière polarisée : reconnaissance de la polarisation, des axes et de l'excentricité éventuels.

On considère que la lumière obtenue par un polaroïd est totalement polarisée.

4. TP-Cours Multivibrateur astable

Ce TP-Cours est l'occasion de réviser le cours et les TP-Cours d'électronique de première année.

Fonctionnement d'un amplificateur opérationnel en régime linéaire ou en régime saturé (en tension).

Comparateur à hystérésis, caractéristique de transfert, bistabilité.

Multivibrateur astable : génération de signaux triangulaires, de signaux carrés. Contrôle de la fréquence et du rapport cyclique. Génération de signaux sinusoïdaux par filtrage.

On signale la limitation en fréquence due à la "vitesse de balayage" de l'amplificateur opérationnel.

5. TP

Aucune liste de thèmes n'est proposée. Le choix des thèmes de TP relève de l'initiative du professeur. Toutefois ceux-ci doivent être en relation avec les connaissances du programme et doivent favoriser l'acquisition progressive d'une démarche autonome.