

# **PROGRAMME DE PHYSIQUE DE 2<sup>ème</sup> ANNEE DE LA VOIE PHYSIQUE ET SCIENCES DE L'INGENIEUR (PSI)**

## ***I. OBJECTIFS DE FORMATION***

L'enseignement de la physique dans la classe de deuxième année PSI s'inscrit dans la continuité de l'enseignement de première année PCSI-option PSI. Les principes directeurs du programme de PCSI-option PSI sont donc conservés : promotion résolue de l'expérience, de la compréhension physique du phénomène étudié et réduction significative du recours à la technicité calculatoire 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 PSI, l'approche expérimentale de la physique est fortement affirmée et valorisée, ce qui se manifeste notamment par un horaire de travaux pratiques de Sciences Physiques et Chimiques soutenu. La formation expérimentale est proposée aux élèves sous des formes variées et complémentaires qui permettent d'aborder les phénomènes physiques et chimiques de manière inductive :

- 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 de physique, 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, le choix du découpage d'un thème relevant de l'initiative pédagogique du professeur.

Les TP-cours de chimie représentent le volume horaire minimum nécessaire à l'acquisition d'un savoir-faire expérimental en chimie indispensable au futur ingénieur. Leurs contenus ne correspondent pas à des connaissances nouvelles exigibles. Les TP-cours de chimie sont des outils de transmission des connaissances exigibles fixées par le programme.

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 du squelette algébrique nécessaire 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. 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 PSI 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 de protocoles expérimentaux...

Le contenu des TP relève de la responsabilité professorale : les thèmes proposés par le programme sont purement indicatifs. En revanche le contenu des TP-cours de physique, fixé par le programme, est exigible aux concours dans toutes les épreuves, écrites, orales et pratiques. 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.

#### ***Note de lecture spécifique au programme PSI :***

L'esprit du programme de seconde année de la filière PSI. est celui du programme de première année de la filière PCSI-option PSI. ( promotion résolue de l'approche expérimentale, priorité du raisonnement sur la technicité mathématique.)  
Les chapitres : A ( Mécanique des fluides.), B ( Électromagnétisme.), D ( Optique ondulatoire.), E ( Diffusion thermique.), sont communs avec le programme de seconde année de la filière PC.

Le chapitre C ( Physique des ondes.), fait l'objet d'une rédaction spécifique de la filière PSI.

Les chapitres : F ( Conversion de puissance.) et G ( Électronique des signaux et des systèmes.) sont spécifiques à la filière PSI. Ces enseignements assurent la liaison avec ceux de Sciences Industrielles pour l'ingénieur (SII) et permettent une ouverture vers l'électronique industrielle. Dans la filière PSI, l'enseignement de mécanique du solide relève des SII.  
Les directives générales du programme de première année de la filière PCSI sont applicables en deuxième année PSI.

## 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
<b>1. Etude phénoménologique des fluides</b>	<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 <math>\mathbf{v} = v_x(y) \mathbf{u}_x</math> ; 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.	<i>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</i>

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 particulière 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  $D\rho/Dt = 0$  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

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

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

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
<b>1. Equations locales de l'électromagnétisme.</b>	
a) Généralités	
Densité volumique de courant. Equation locale de conservation de la charge.	<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>
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 des sources. 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 <math>\mathbf{A}</math> en fonction des sources est fournie par l'énoncé lorsqu'elle est utile.</i>
Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de	<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</i>

Poynting. Equation locale de Poynting.

*électromagnétique.*

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

*Le terme  $\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{B}$  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 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

<b>Programme</b>	<b>Commentaires</b>
<b>1. Phénomènes de propagation unidimensionnels non dispersifs – Equation de d'Alembert</b>	
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 <math>f(x+ct) + g(x-ct)</math> ou <math>\mathbf{f}(t-x/c) + \mathbf{y}(t+x/c)</math> 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.

## 4. Phénomènes linéaires de propagation unidimensionnels dispersifs

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

*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. sans aucune application. L'étude des lames à retard est hors programme.*

*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  $\exp(j\mathbf{w}t - j\mathbf{k}x)$  avec  $\mathbf{w}$  réel et  $\mathbf{k}$  a priori complexe pour le traitement des phénomènes de propagation linéaires.*

Paquet d'ondes ; vitesse de groupe.

b) Propagation d'une onde plane transverse progressive monochromatique dans un plasma. Fréquence de coupure. Dispersion, vitesse de phase et vitesse de groupe.

*Pour le plasma, on utilise le modèle le plus simple : celui d'un milieu dilué dont les charges sont sans interaction entre elles et où les ions sont immobiles. Le but est uniquement de faire apparaître la relation de dispersion et ses conséquences. Toute étude des champs dans les milieux matériels est exclue.*

*On établit la relation de dispersion et on définit l'indice complexe par la relations  $k = n\omega/c$*

c) Réflexion-réfraction d'une onde plane progressive sinusoïdale polarisée rectilignement à l'interface entre deux milieux isolants, non chargés, 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.

*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, réfléchi 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) Réflexion sous incidence normale d'une onde plane, progressive et monochromatique sur un plan conducteur parfait. Onde stationnaire.

*L'étude se limite à celle des champs de l'onde réfléchi et de l'onde stationnaire.*

## 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
<b>1. Modèle scalaire de la lumière</b>	
Propagation d'une vibration scalaire le long d'un rayon lumineux : chemin optique.	<i>On définit les surfaces d'ondes relatives à une source ponctuelle <math>S</math> par l'ensemble des points <math>M</math> tels que <math>(SM) = \text{constante}</math>.</i>
Surfaces d'ondes ; onde plane, onde sphérique. Théorème de Malus.	<i>On admet le théorème de Malus, outil nécessaire à l'étude de l'optique ondulatoire.</i>
Eclairement.	<i>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.</i>
<b>2. Interférences</b>	
Interférences non localisées entre deux ondes totalement cohérentes.	<i>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.</i>
Exemple de diviseur d'ondes : l'interféromètre de Michelson éclairé par une source ponctuelle.	<i>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.</i>
Figure d'interférences, champ d'interférences, franges, ordre d'interférences et défilement éventuel de franges, contraste de la figure d'interférences.	<i>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.</i>
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.	<i>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.</i>

### 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  $\mathbf{j} = h(T-T_e)$  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) CONVERSION DE PUISSANCE

Cet enseignement est conçu comme un exemple d'approche synthétique de phénomènes d'électromagnétisme et d'électrocinétique s'appuyant sur la transmission de puissance. L'objectif est de faire comprendre les concepts physiques en œuvre dans ces phénomènes. Il s'agit donc d'un enseignement général portant sur des modèles de connaissance ou d'action bien délimités dont toute spécification technique est exclue et strictement hors-programme. En particulier les courants triphasés et la notion de puissance réactive ne sont pas au programme.

### Programme

### Commentaires

#### 1. CONVERSION ÉLECTROMAGNÉTIQUE STATIQUE.

Couplage parfait de deux bobines à l'aide d'un circuit ferromagnétique torique fonctionnant linéairement et sans fuites : flux magnétique commun, circulation de l'excitation magnétique, inductances. Application au modèle parfait du transformateur monophasé : rapports de transformations en tension et en intensité ; transfert d'impédance.

*Le formalisme des circuits magnétiques (réductance, formule d'Hopkinson) n'est pas au programme. La courbe d'aimantation et le cycle d'hystérésis seront vus uniquement en T.P. au cours de l'étude du transformateur. Toute étude en triphasé ainsi que les calculs de pertes sont strictement hors-programme.*

#### 2. CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE.

Force de Lorentz exercée sur un porteur de charge dans un conducteur en mouvement dans un champ magnétique statique, force de Laplace et fém d'induction.

*La notion de flux coupé ainsi que le théorème de Maxwell ne sont pas au programme.*

Bilan de puissance de la force de Lorentz sur un porteur : puissance mécanique de la force de Laplace, puissance électrique de la fém d'induction ; conversion électromécanique de la puissance. Application à la machine à courant continu.

*Sur le cas particulier d'un mouvement de translation (rails de Laplace) on fera l'analyse de l'incidence de la puissance nulle de la force de Lorentz sur la puissance mécanique de la force de Laplace et la puissance électrique de la fém d'induction. La machine à courant continu sera décrite hors de toute connaissance technique comme un système réalisant un moment proportionnel au courant ( $C = \mathbf{F} \cdot \mathbf{l}$ ), une fém proportionnelle à la vitesse ( $E = \mathbf{F} \cdot \mathbf{W}$ ) et assurant la conversion électromécanique. Toute considération technologique est hors-programme.*

Réalisation de champs magnétiques tournants.

*On se limitera au cas d'un système diphasé (quadratures spatiales et temporelles).*

Interaction d'un moment magnétique permanent et d'un champ tournant ; réversibilité. Couple électromagnétique, fém.

### 3. CONVERSION ÉLECTRONIQUE.

Ordre de grandeur des puissances mises en jeu. Nécessité de la commutation et d'éléments de réserve d'énergie : interrupteurs, inductances et capacités.

*On soulignera le rôle essentiel de la continuité de l'énergie et ses conséquences sur la continuité du flux magnétique et de la charge.*

Interrupteurs idéaux. Fonctions de commutation : fonction diode à commutation spontanée à l'amorçage et au blocage, fonction transistor à commutation commandée à l'amorçage et au blocage.

*On ne considérera dans tout ce programme que des interrupteurs idéaux : courant nul dans l'interrupteur bloqué (ouvert), tension nulle aux bornes de l'interrupteur amorcé (fermé). L'étude des limites du modèle idéal et des pertes de puissance n'est pas au programme.*

*Les diodes et les transistors ne seront considérés que sous leur aspect fonctionnel de commutation. Toute considération technologique est hors-programme.*

Modélisation des générateurs et récepteurs par des sources de courant ou de tension.

*La conversion entre sources non parfaites ainsi que la décomposition de Fourier de la puissance sont exclues du programme.*

Sources parfaites, puissance échangée.

*On signalera l'intérêt de condensateurs ou de bobines pour parfaire une source.*

Application au transfert de puissance entre un générateur de tension continue et un récepteur de courant continu par une cellule à deux interrupteurs.

*La connaissance des circuits de commande est hors programme.*

*On illustrera l'intérêt de cette conversion pour assurer la variation de vitesse d'une machine à courant continu.*

## G) ÉLECTRONIQUE DES SIGNAUX ET SYSTÈMES

### Programme

### Commentaires

Cette partie a pour objectif, en révisant les connaissances et les savoir-faire sur les circuits électroniques acquis en première année en cours et en travaux pratiques, de les reprendre dans l'esprit du traitement du signal et de l'étude des systèmes. Tout calcul théorique, notamment de transformée (de Fourier, de Laplace ou autre), est exclu du programme

### 1. APPROFONDISSEMENT DE L'ÉLECTRONIQUE DES SYSTÈMES LINÉAIRES.

Réponse d'un système linéaire permanent à un signal sinusoïdal (réponse harmonique).

*Un système est linéaire quand son opérateur de transfert est linéaire.*

*On signalera que les signaux sinusoïdaux sont des fonctions isomorphes des systèmes linéaires et on en dégagera l'importance comme critère de linéarité.*

*On fera remarquer le caractère non physique de l'infinité dans le temps d'un signal sinusoïdal et on rappellera les conditions de sa réalisation pratique dans le régime forcé sinusoïdal vu en première année.*

Fonction de transfert ou transmittance. Représentation de Bode (diagrammes d'amplitude et de phase) ; tracés asymptotiques.

*On utilisera la notation  $H(p)$  pour la fonction de transfert en se limitant aux valeurs de  $p$  imaginaires pures. Les relations de causalité sont hors-programme.*

Réponse d'un système linéaire électronique à constantes localisées à un signal échelon ; équation différentielle du système. Cas particuliers de la réponse libre.

*On illustrera cette étude sur les exemples de signaux et de circuits linéaires vus en première année. On soulignera l'intérêt de chacune des caractérisations d'un système électronique linéaire : fonction de transfert ; équation différentielle ou réponse libre.*

Modèle linéaire idéal de l'amplificateur opérationnel comme passe-bas du premier ordre.

*On montrera les conséquences de la bande passante des amplificateurs opérationnels sur les limitations linéaires des fonctions réalisées au moyen de ces composants.*

Présentation de grandes fonctions linéaires : amplification, intégration, dérivation, filtrage, passe-tout déphaseur. Fonctions linéaires à plusieurs entrées : amplificateur différentiel, sommateur, soustracteur.

*Cette étude s'appuiera sur les montages à amplificateurs opérationnels vus en première année. Aucun montage particulier n'est exigible.*

En conclusion de cette étude, on fera remarquer qu'un signal ou un système possèdent une représentation dans l'espace des temps et une représentation dans l'espace des fréquences.

*L'utilisation en travaux pratiques de moyens numériques d'analyse harmonique permettra des comparaisons immédiates entre fonction de transfert et représentation spectrale d'une réponse du système. Aucune justification théorique de ces observations n'est exigible.*

## **2. COMMANDE D'UN SYSTÈME**

Structure d'un système asservi linéaire : capteur, comparateur, actionneur.

*On insistera sur les avantages de la rétroaction dans les systèmes électroniques : stabilité (moindre sensibilité aux variabilités, aux décalages et aux dérives des composants), création de fonctions de transfert nouvelles. On signalera la généralité des notions introduites et leur utilisation dans d'autres domaines que la physique.*

Transmittance d'un système électronique bouclé.

*On pourra retrouver les montages linéaires ou en comparateur de l'amplificateur opérationnel vus en première année.*

Cas d'une chaîne directe à grand gain.

*On se limitera au deuxième ordre au plus.*

Régime propre et stabilité d'un système bouclé.

Cas d'une chaîne directe du premier ordre et d'un retour réel : bande passante, temps caractéristique.

*Cet exemple fournira l'occasion de préciser la relation entre les représentations d'un signal en temps et en fréquence.*

Schéma fonctionnel de génération d'un signal quasi-sinusoïdal.

*On donnera un exemple simple de réalisation pour chaque type de générateur. Aucun montage particulier n'est exigible*

Comparateur à hystérésis. Fonction mémoire. Schéma fonctionnel de génération d'un signal rectangulaire.

*Le rôle des limitations non-linéaires des amplificateurs opérationnels sera étudié en T.P.*

## II - APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Cette partie est traitée en TP-Cours et en TP. La rédaction des rubriques " TP-Cours " est volontairement détaillée, parce qu' elle correspond à un ensemble de compétences exigibles. Celle des TP est sommaire : elle relève de l'initiative pédagogique du professeur

### 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.

*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.*

## 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.

• 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.

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

*Dans cette partie du TP-Cours, les notions introduites sont le 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.*

*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 son axe de rotation n'est pas exigible. La connaissance d'un protocole de réglage de la perpendicularité de la normale au réseau à l'axe de rotation n'est pas exigible.*

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

## ÉLECTRONIQUE DES SIGNAUX ET DES SYSTEMES

### 3. TP-COURS.

#### MULTIPLICATION DE SIGNAUX

a) Etude d'un composant multiplicateur analogique.

Présentation de la fonction et du composant, limites et précaution d'emploi.

Observation des signaux en entrée et en sortie dans les cas suivants :

- multiplication d'un signal continu et d'un signal sinusoïdal ;
- de deux signaux sinusoïdaux identiques ;
- de deux signaux sinusoïdaux de fréquences différentes.

*On s'attache à mesurer et interpréter dans chaque cas la valeur moyenne, l'amplitude et la fréquence du signal de sortie. On envisage l'effet d'un décalage en entrée et en sortie et l'intérêt de le compenser.*

*Dans le cas de deux fréquences très différentes, on effectue l'analyse spectrale du signal de sortie et on signalera l'intérêt d'une telle opération dans la transmission des signaux sur des supports dispersifs. On complète cette dernière observation par l'étude du cas d'un signal basse fréquence de forme non-sinusoïdale.*

b) Application à la détection synchrone.

## Programme

## Commentaires

### 4.TP-COURS.

#### ÉTUDE DU FERROMAGNÉTISME ET DE SES APPLICATIONS.

*Le formalisme des circuits magnétiques (réductance...) est hors-programme*

#### CYCLE D'HYSTÉRÉSIS.

- relevé du cycle d'hystérésis de la carcasse magnétique torique d'un transformateur démontable : champ coercitif, aimantation rémanente, aimantation à saturation, pertes par hystérésis.

*- Partant des équations de Maxwell d'un milieu magnétique dans l'ARQS, on établit la loi de Faraday et le théorème d'Ampère . Pour la géométrie torique adoptée on fait l'approximation des champs unidimensionnels . On en déduit comment relever  $\mathbf{H}$  et  $\mathbf{B}$  à partir de mesures de tensions électriques . On peut utiliser une interface et un logiciel pour accéder au cycle de  $\mathbf{M}$  en fonction de  $\mathbf{B}$  , à la susceptibilité en fonction de  $\mathbf{H}$  et à l'aire du cycle dont on donne l'interprétation énergétique . On dégage la notion de milieu doux et de milieu dur en liaison avec les applications du ferromagnétisme.  
On signale l'intérêt des ferrites pour la réalisation de transformateurs haute-fréquence.*

#### APPLICATION AU TRANSFORMATEUR.

Transformateur de tensions.  
Transformateur de courants.  
Adaptateur d'impédances.

*On met en équation le transformateur en régime sinusoïdal forcé dans le modèle torique unidimensionnel*

Travaux pratiques : TP.

Les thèmes de TP présentés ne sont que des propositions spécifiques à la filière PSI, la liberté de choix du professeur restant entière : ils ne correspondent pas à des connaissances exigibles, mais exclusivement à l'acquisition d'une pratique expérimentale. D'autres thèmes de TP peuvent être choisis en liaison avec l'ensemble du programme PSI.

#### 5 TP : CONVERSION DE PUISSANCE.

À partir d'une source de tension constante (continue) et d'un hacheur à transistor, réalisation d'une variation de vitesse sur une machine à courant continu (alimentation en tension variable).

Analyse du fonctionnement du hacheur sur charge R L et de sa limitation de fréquence.  
Étude de l'ondulation.

Obtention d'un fonctionnement en hacheur survolteur et analyse des caractéristiques principales de fonctionnement.

#### 6.TP : ASSERVISSEMENT DE VITESSE D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU.

Relevé de la caractéristique tension-vitesse du moteur à vide.

Essai indiciel : détermination des caractéristiques dynamiques (constante de temps).

Régulation de vitesse

Commande en chaîne bouclée : examen des nouvelles performances.

#### 7.TP : DÉTECTION SYNCHRONE.

A l'aide d'un convertisseur tension-courant à amplificateur opérationnel, on appliquera un courant sinusoïdal, proportionnel à une tension sinusoïdale de référence, à un dipôle linéaire.

En mesurant la valeur moyenne du signal résultant de la multiplication de la tension aux bornes du dipôle par la tension de référence, on déterminera la partie réelle de l'impédance.

Mesure de la réactance à l'aide d'un signal en quadrature.

On interprétera la méthode précédente en terme de projection, dans une représentation géométrique dans le plan complexe (figure de Fresnel).

8.TP : CHANGEMENT DE  
FRÉQUENCE.

Emission d'ondes ultrasonores en direction d'une cible mobile, observation du signal réfléchi. Effet Doppler : mesure de la différence des fréquences entre les deux signaux ; difficulté et imprécision d'une mesure directe.

Intérêt de la multiplication du signal reçu par le signal d'émission : changement de fréquence. Réalisation et exploitation d'un dispositif comportant multiplicateur, filtre et fréquencemètre.