

Royaume du Maroc
Ministère de l'éducation nationale de l'enseignement supérieur
de la formation des cadres et de la recherche scientifique

CLASSES PRÉPARATOIRES AUX
GRANDES ÉCOLES

Voie : Physique et sciences de l'ingénieur (PSI)

PROGRAMME DE PHYSIQUE
Seconde année

Table des matières

Approche théorique PSI

1. Mécanique des fluides
 - 1.1 Étude phénoménologique des fluides
 - 1.2 Cinématique des fluides
 - 1.3 Dynamique des fluides
 - 1.4 Bilans dynamiques et thermodynamiques
2. Électronique
 - 2.1 Stabilité et réponse d'un système linéaire
 - 2.2 Système asservi linéaire
 - 2.3 Oscillateurs
 - 2.4 Électronique numérique
3. Électromagnétisme
 - 3.1 Condensateur
 - 3.2 Équations de Maxwell
 - 3.3 Forces de Laplace
 - 3.4 Induction électromagnétique
 - 3.5 Lois de l'électromagnétisme dans un milieu linéaire homogène et isotrope
4. Physique des ondes
 - 4.1 Oscillateurs harmoniques couplés
 - 4.2 Phénomènes de propagation unidimensionnels non dispersifs
 - 4.3 Ondes sonores dans les fluides
 - 4.4 Ondes électromagnétiques dans le vide
 - 4.5 Phénomènes linéaires de propagation unidimensionnels dispersifs
 - 4.6 Ondes électromagnétiques dans un milieu diélectrique linéaire homogène et isotrope
5. Introduction au monde quantique
6. Optique
 - 6.1 Interférences non localisées de deux ondes cohérentes
 - 6.2 Diffraction des ondes lumineuses
 - 6.3 Diffraction par un réseau plan
7. Conversion de puissance
 - 7.1 Conversion électromagnétique statique

7.2 Conversion électromécanique

7.3 Conversion électronique

8. Thermodynamique : diffusion thermique

Approche expérimentale PSI

9. TP-cours

9.1 Multiplication des signaux

9.2 Modulation et démodulation d'amplitude

9.3 Oscillateurs

9.4 Électronique numérique

9.5 Interféromètre de Michelson

9.6 Spectroscopie à réseau

9.7 Ferromagnétisme et application

9.8 Conversion électronique de puissance

10. Travaux pratiques

Approche théorique PSI

L'enseignement de la physique en deuxième année PSI s'inscrit dans la continuité de l'enseignement de première année. Les principes directeurs et les objectifs du programme de la première année PCSI restent alors d'actualité.

Le programme de physique s'articule sur une approche équilibrée entre théorie et expérience afin d'apporter à l'élève 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. Ce programme a été rédigé et abondamment commenté dans le but de définir clairement les objectifs spécifiques à chaque thème et d'identifier les connaissances exigibles aux concours.

L'approche théorique se compose de huit parties : mécanique des fluides, électronique, électromagnétisme, physique des ondes, introduction au monde quantique, optique, conversion de puissance et thermodynamique.

L'approche expérimentale est composée d'expériences de cours, de TP-cours et de travaux pratiques. Les TP-cours ont pour but l'acquisition de connaissances et d'un savoir faire expérimental dans le cadre d'un travail interactif et encadré.

Les TP sont orientés vers l'acquisition d'une autonomie progressive dans la démarche expérimentale. Chaque fois que cela est possible, l'ordinateur interfacé doit être utilisé pour l'acquisition et le traitement des données expérimentales. Il devient ainsi un instrument courant des laboratoires, au service de l'expérience.

Les expériences de cours et les TP relèvent de l'initiative pédagogique du professeur : 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 du 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 éventuellement 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 relève de l'initiative pédagogique du professeur.

Il convient de remarquer que les thèmes de TP-cours sont conçus pour être traités conjointement aux thèmes de cours correspondants.

Il est fortement conseillé de suivre la progression des thèmes dans l'ordre suivant :

Mécanique des fluides, électronique, électromagnétisme, physique des ondes, introduction au monde quantique, optique, conversion de puissance et thermodynamique.

Approche théorique PSI

1. Mécanique des fluides

L'enseignement de la mécanique des fluides est centré sur l'étude phénoménologique, la cinématique, la dynamique et les bilans en dynamique des fluides.

La notion de viscosité est introduite pour classer les écoulements et évoquer la résolution des paradoxes auxquels peut conduire le modèle de l'écoulement parfait.

Pour les écoulements visqueux, la mémorisation de l'équation de Navier-Stokes et des expressions des forces surfaciques de viscosité n'est pas exigible.

Les bilans d'énergie interne et d'entropie en dynamique des fluides compressibles sont l'occasion de compléter l'enseignement de thermodynamique de première année par l'étude de systèmes ouverts simples, en régime permanent d'écoulement, généralisant la détente de Joule-Thomson. On se limite à des bilans pour des systèmes unidimensionnels.

Le professeur pourra aborder les différentes notions de cette partie dans l'ordre qu'il souhaite en fonction du besoin pédagogique.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- utiliser les trois échelles macroscopique, microscopique, mésoscopique ;
- définir avec rigueur un système approprié ;
- réaliser des bilans sous forme globale et locale ;
- utiliser des modèles et analyser leurs limites ;
- appliquer les lois générales de la mécanique des fluides et de la thermodynamique ;
- étudier des systèmes d'intérêt industriel.

L'enseignement de la mécanique de solide relève du cours des sciences industrielles.

1.1. Étude phénoménologique des fluides

Programme	Commentaire
Définition d'un fluide. Modèle du fluide continu.	On utilise la notion du libre parcours moyen de manière purement descriptive ; la notion de section efficace et le modèle des sphères dures sont hors-programme.
Particule de fluide.	On mentionne les trois échelles spatiales : échelle microscopique (moléculaire), échelle mésoscopique (de la particule fluide), échelle macroscopique. On définit la particule de fluide comme un système mésoscopique de masse constante.
Champ eulérien des vitesses : vitesse de la particule de fluide.	On distingue vitesse microscopique et vitesse mésoscopique.
Pression. Viscosité dynamique. Equivalents volumiques des forces de pression et des forces de viscosité.	On définit la viscosité via les expressions phénoménologiques des forces surfaciques de viscosité dans la situation simplifiée d'un champ de vitesses $\mathbf{V} = V_x(y) \mathbf{u}_x$; on en déduit l'expression de la force volumique de viscosité, dont on admet le caractère général pour un fluide newtonien en écoulement incompressible. On donne l'ordre de grandeur de la viscosité de l'eau. On signale la condition d'adhérence à l'interface fluide-solide. Toute modélisation microscopique de la viscosité est exclue. La deuxième viscosité (de compressibilité) est hors programme.

1.2. 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 $\text{rot}(\mathbf{v})$.

Programme	Commentaire
Description de Lagrange, description d'Euler : champ des vitesses.	
Dérivée particulaire d'un champ.	On définit la dérivée particulaire d'une grandeur

	eulérienne comme étant la dérivée totale de cette grandeur en suivant le mouvement de la particule fluide. On se limite au champ de masse volumique et au champ des vitesses.
Densité de courant de masse. Débit massique.	On signale que le vocabulaire de l'analyse vectorielle (circulation, flux ...) est issu de la mécanique des fluides.
Bilans de masse : équations globale et locale de conservation de la masse.	On déduit la condition imposée au champ des vitesses à la limite d'un obstacle imperméable. On signale l'analogie entre les lois de conservation de la masse et de la charge électrique dans le cours l'électromagnétisme. Il s'agit simplement d'introduire les définitions en dégagant le contenu physique des notions introduites
Écoulement stationnaire. Ligne et tube de courant de masse.	Un écoulement est stationnaire si tous les champs eulériens sont indépendants du temps. A partir d'une carte de champ des vitesses en régime stationnaire, on décrit qualitativement le champ des accélérations.
Écoulement incompressible et homogène. Débit volumique.	On définit un écoulement incompressible et homogène par la propriété d'une masse volumique constante et uniforme ($\frac{D\rho}{DT} = 0$, $\text{div}(\mathbf{v}) = 0$ en tout point). On relie cette propriété à la conservation du volume pour un système fermé. On signale la conservation du débit volumique le long d'un tube de courant indéformable et on définit la notion de vitesse débitante également appelée vitesse moyenne.
Écoulement irrotationnel. Potentiel des vitesses.	Les notions de fonction de courant et de potentiel complexe des vitesses sont hors-programme.

1.3. Dynamique des fluides

Programme	Commentaire
Écoulements parfaits :	
Équation d'Euler, théorèmes de Bernoulli pour les écoulements incompressibles et homogènes.	A ce stade, un écoulement parfait est un écoulement de fluide sans viscosité. La forme généralisée du théorème de Bernoulli pour les écoulements compressibles est hors-programme.
Applications	On traite des applications telles que : effet Venturi, débitmètre, tube de Pitot.
Écoulements visqueux incompressibles :	
Équation de Navier-Stokes. Nombre de Reynolds.	On décrit qualitativement les deux modes de transfert de quantité de mouvement : convection et diffusion. On fait apparaître par une analyse d'ordre de grandeur, le nombre de Reynolds comme le rapport du terme convectif sur le terme diffusif. On signale que la viscosité est un transport diffusif de quantité de mouvement.
Pertes de charge régulière et singulière dans une conduite.	On présente la notion de perte de charge régulière que l'on peut introduire par la résolution de l'équation de Navier-Stokes pour un écoulement stationnaire et dans la situation simplifiée du champ de vitesses $\mathbf{v} = v_x(y)\mathbf{u}_x$.
Notion de similitude et adimensionnement des	On signale l'existence de perte de charge singulière.

équations en mécanique des fluides.	On illustre l'adimensionnement des équations sur un exemple simple. On indique l'utilité de la similitude pour le passage des résultats expérimentaux ou numériques concernant un prototype vers le système réel correspondant. Toute étude générale de la similitude est hors programme.
Force de traînée d'une sphère solide dans un fluide. Loi de Stokes. Coefficient de traînée C_x ; graphe de C_x en fonction du nombre de Reynolds. Notion d'écoulement laminaire et d'écoulement turbulent.	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.
Chute de pression dans une conduite horizontale. Loi de Hagen-Poiseuille. Résistance hydraulique.	On établit la loi de Hagen-Poiseuille pour un écoulement laminaire incompressible homogène se produisant dans une conduite cylindrique. On signale que pour un écoulement quelconque, on utilise des abaques donnant la chute de pression en fonction du nombre de Reynolds.
Notion d'écoulement parfait et de couche limite. Forces de traînée et de portance d'une aile d'avion à nombre de Reynolds élevé.	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. On reformule la condition à la limite d'un obstacle imposée au champ des vitesses. On donne et on exploite les allures des graphiques de C_x et C_z et on les utilise pour préciser l'influence de l'angle d'incidence sur les forces de traînée et de portance.

1.4. Bilans dynamiques et thermodynamiques

Cette partie a pour objectif d'effectuer des bilans de grandeurs extensives thermodynamiques et mécaniques. Ces bilans sont illustrés sur des situations d'intérêt industriel (réacteur, éolienne, turbine, machines thermiques...).

Programme	Commentaire
Système ouvert, système fermé. Exemples de bilans de quantité de mouvement, de moment cinétique, d'énergie cinétique, d'énergie mécanique, d'énergie interne et d'entropie pour un écoulement unidimensionnel en régime permanent.	À partir d'une surface de contrôle ouverte vis-à-vis des échanges, on se ramène à un système fermé approprié. L'enseignement de cette partie a pour but l'acquisition d'un savoir-faire qui ne peut être développé qu'à travers des applications sur des exemples concrets d'intérêt industriel. On affirme que la puissance des actions intérieures est nulle pour un écoulement parfait et incompressible. Toute formulation générale, notamment le théorème d'Euler et le théorème de Reynolds, est hors-programme.

2. Électronique

Cette partie a pour objectif, en révisant les savoir et les savoir-faire sur les circuits électroniques acquis en première année en cours, en TP-cours et en travaux pratiques, de les reprendre dans l'esprit du traitement du signal et de l'étude des systèmes (stabilité, oscillateur, réalisation de filtres actifs à forte impédance d'entrée pour une association en cascade). Ces différentes thématiques sont illustrées à l'aide de l'amplificateur opérationnel.

On complète l'approche analogique des circuits électriques par un chapitre à vocation expérimentale consacré au traitement numérique des signaux à travers les sujets suivants :

- l'échantillonnage et le repliement de spectre ;
- le filtrage numérique ;
- les conversions analogique/numérique et numérique/analogique.

Enfin, la problématique de la transmission d'un signal temporel codant une information est abordée dans l'étude et la réalisation d'une modulation, en relation avec la partie du programme consacrée à la propagation des ondes électromagnétiques.

Tout calcul théorique, notamment de transformée (de Fourier, de Laplace ou autre), est exclu du programme. Néanmoins, dans le but de faciliter le lien avec le cours de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur, la notation symbolique de la fonction de transfert $H(p)$ sera utilisée.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- passer d'une représentation temporelle à une représentation fréquentielle et réciproquement ;
- analyser la stabilité d'un système linéaire du premier et du second ordre ;
- étudier des manifestations des non linéarités ;
- effectuer une analyse spectrale de signaux ;
- effectuer quelques opérations de traitement du signal en électronique analogique et numérique.

2.1 Stabilité et réponse d'un système linéaire

Programme	Commentaire
Réponse d'un système linéaire à un signal sinusoïdal en régime établi (réponse harmonique).	Un système est linéaire quand il est formé par des composants linéaires.
Fonction de transfert d'un système linéaire continu et invariant. Représentation de Bode. Tracés asymptotiques.	On fait remarquer qu'un signal possède 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.
Réponse d'un système électronique linéaire à un signal échelon. Equation différentielle du système. Réponse libre.	On illustre cette étude sur des exemples de circuits linéaires simples. On souligne, sur un exemple de système de premier ordre, les liens entre les caractérisations par la fonction de transfert (bande passante, comportement en HF et en BF), et par l'équation différentielle (temps de réponse, réponse initiale et réponse permanente).
Stabilité.	On discute la stabilité d'un système d'ordre 1 ou 2 d'après les signes des coefficients de la relation différentielle ou de la fonction de transfert.
Modèle linéaire idéal de l'amplificateur opérationnel comme passe-bas du premier ordre.	On montre les conséquences de la bande passante des amplificateurs opérationnels sur les limitations linéaires des fonctions réalisées au moyen de ce composant.
Présentation des grandes fonctions linéaires : amplification, intégration, dérivation, filtrage. Fonctions linéaires à plusieurs entrées : sommation, soustraction.	Cette étude s'appuie sur les montages à AO vus en première année. Aucun montage particulier n'est exigible.

2.2 Système asservi linéaire

Programme	Commentaire
-----------	-------------

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 signale la généralité des notions introduites et leur utilisation dans d'autres domaines que la physique.
Transmittance d'un système électronique asservi. Cas d'une chaîne directe à grand gain.	On traite les montages linéaires ou non linéaires de l'amplificateur opérationnel vus en première année.
Régime propre et stabilité d'un système asservi.	On se limite au deuxième ordre au plus.
Cas d'une chaîne directe du premier ordre et d'un retour réel : bande passante, temps caractéristique.	Cet exemple fournit l'occasion de préciser la relation entre les représentations d'un signal en temps et en fréquence.

2.3 Oscillateurs

Programme	Commentaire
Oscillateur quasi-sinusoïdal. Oscillateur de relaxation	Cette partie est étudiée en TP-cours.

2.4 Électronique numérique

Programme	Commentaire
Échantillonnage. Filtrage numérique.	Cette partie est étudiée en TP-cours.

3. Électromagnétisme

L'enseignement de l'électromagnétisme est centré d'une part sur l'étude des phénomènes d'induction électromagnétique et de leurs applications dont certaines sont développées dans la partie " Conversion de puissance ", et d'autre part, sur l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques (intégrée dans la partie " Physique des ondes "). Cet enseignement s'appuie sur l'enseignement d'électromagnétisme de PCSI.

En ce qui concerne les forces de Laplace, on traite des modèles simples pour lesquels le calcul des forces de Laplace ne requiert aucune technicité et on se limite aux expressions des forces volumiques et linéiques. Le flux coupé et le théorème de Maxwell sont hors-programme. Tout calcul de forces de Laplace à partir de l'énergie magnétique est hors-programme.

L'enseignement d'électrostatique et de magnétostatique de la classe 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 électrique ou magnétique 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.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- maîtriser le concept de champ scalaire et de champ de vecteurs et manipuler les opérateurs vectoriels relatifs aux champs scalaires et vectoriels ;
- établir le lien entre des lois locales et des propriétés intégrales ;
- évaluer les actions d'un champ magnétique extérieur sur un circuit parcouru par un courant ou par analogie sur un aimant ;
- analyser qualitativement les systèmes où les phénomènes d'induction sont à prendre en compte ;
- conduire des bilans énergétiques mettant en jeu matière et champ électromagnétique ;
- connaître des applications relevant du domaine de l'industrie ou de la vie courante où les phénomènes d'induction sont présents et déterminants dans le fonctionnement des dispositifs ;
- mettre en œuvre des expériences illustrant la manifestation des phénomènes d'induction.

3.1 Condensateur

L'étude du condensateur dans la géométrie plane permet d'introduire l'expression de l'énergie volumique du champ électrique. La généralité de cette expression est admise. Aucune notion sur les conducteurs en équilibre électrostatique n'est exigible.

Programme	Commentaire
Approche expérimentale du phénomène d'influence électrostatique.	On décrit qualitativement le phénomène d'influence électrostatique.
Condensateur plan. Capacité d'un condensateur plan idéal. Rôle des isolants.	On établit l'expression du champ d'un condensateur plan en négligeant les effets de bord et on déduit l'expression de la capacité. On affirme la modification de la permittivité par la présence d'un isolant sans relation avec une description microscopique de la polarisation.
Énergie d'un condensateur. Densité volumique d'énergie électrique.	On établit l'expression de la densité volumique d'énergie électrique dans le cas du condensateur plan à partir de la relation $E = \frac{1}{2}CU^2$.

3.2 Équations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont introduites comme des postulats de l'électromagnétisme. Elles permettent une première approche quantitative du phénomène de propagation et, également, d'évoquer le lien avec l'induction électromagnétique étudiée dans la suite.

Programme	Commentaire
Densité volumique de charge électrique ρ et vecteur densité de courant électrique $\mathbf{j}$. Bilan de charge. Formulation locale de la conservation de la charge. Force de Lorentz.	On décrit les différents types de porteurs de charge et on fait la distinction entre charges mobiles et charges fixes. On signale les analogies avec l'équation locale de conservation de la masse en mécanique des fluides.
Équations de Maxwell dans le vide.	On se limite au cas où le référentiel est considéré galiléen et on insiste sur le contenu physique de ces équations.
Relations entre les composantes du champ électromagnétique de part et d'autre d'une interface.	On souligne que les relations de passage se substituent aux équations de Maxwell dans le cas d'une modélisation surfacique ; on fait le lien avec les discontinuités rencontrées sur des exemples vus en PCSI.
Potentiels vecteur $\mathbf{A}$ et scalaire V : existence, non unicité, jauge de Lorentz. Équations de Poisson généralisées. Potentiels retardés.	On fait remarquer la non unicité des potentiels. Les transformations de jauge sont hors programme. Les expressions des potentiels retardés sont admises.
Puissance volumique cédée par le champ à la matière. Expression de la densité volumique d'énergie électromagnétique. Vecteur de Poynting. Équation locale de conservation de l'énergie électromagnétique (identité de Poynting).	L'expression de la densité d'énergie électromagnétique peut être affirmée sur les exemples du condensateur plan et d'un solénoïde infini. On affirme la signification physique du vecteur de Poynting. On interprète l'équation locale de Poynting comme un bilan d'énergie électromagnétique. Sur l'exemple d'un conducteur cylindrique parcouru uniformément par un courant parallèle à son axe, on montre que la puissance fournie par le champ électromagnétique à un conducteur ohmique, est intégralement dissipée par effet Joule.
Cas de l'approximation des régimes quasi-permanents (ARQP) ou quasi-stationnaires (ARQS). Limite de validité. Equations de Maxwell dans le cadre de l'ARQP.	On exploite le caractère conservatif du flux du vecteur densité de courant électrique dans l'ARQS, pour interpréter la loi des nœuds et l'uniformité de l'intensité du courant électrique dans une branche d'un circuit.
Application à l'étude de l'effet de peau dans un conducteur ohmique ; puissance volumique cédée par le champ. Modèle limite du conducteur parfait.	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.

Cas du régime stationnaire.	On se limite à écrire les équations de Maxwell en régime stationnaire et en déduire les résultats établis en première année.
-----------------------------	--

3.3 Forces de Laplace

Les forces de Laplace dans un circuit mobile sont introduites dans le cas d'un champ uniforme et stationnaire, soit dans le modèle des rails de Laplace, soit dans celui d'un cadre rectangulaire en rotation. L'objectif de cette partie est d'évaluer les actions d'un champ magnétique extérieur sur un circuit parcouru par un courant ou par analogie sur un aimant représenté par un moment magnétique.

Programme	Commentaire
Action d'un champ magnétique extérieur sur un circuit filiforme fermé : résultante et moment résultant des forces de Laplace. Puissance des forces de Laplace.	On différencie le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme. On exprime les forces de Laplace s'exerçant sur un conducteur filiforme, sur une distribution volumique de courant. La notion de flux coupé ainsi que le théorème de Maxwell ne sont pas au programme.
Résultante et puissance des forces de Laplace s'exerçant sur une barre conductrice en translation rectiligne sur deux rails parallèles (rails de Laplace) dans un champ magnétique extérieur uniforme, stationnaire et orthogonal aux rails.	On établit l'expression de la résultante et on évalue la puissance des forces de Laplace.
Couple et puissance des actions mécaniques de Laplace dans le cas d'une spire rectangulaire, parcourue par un courant, en rotation autour d'un axe de symétrie de la spire passant par les deux milieux de côtés opposés et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe.	On établit l'expression du couple et on évalue la puissance des forces de Laplace.
Action d'un champ magnétique extérieur uniforme sur un aimant. Positions d'équilibre et stabilité.	On associe à un aimant un moment magnétique.
Effet moteur d'un champ magnétique tournant.	On étudie l'effet d'un champ magnétique tournant sur un dipôle magnétique permanent.

3.4 Induction électromagnétique

Dans cette partie, on cherche à mettre l'accent sur les applications relevant du domaine de l'industrie ou de la vie courante où les phénomènes d'induction sont présents et déterminants dans le fonctionnement des dispositifs. Elle s'appuie sur les nombreuses applications présentes dans notre environnement immédiat : boussole, moteur électrique, alternateur, transformateur, haut-parleur, plaques à induction, frein électromagnétique, carte RFID (Radio Frequency Identification)...

Programme	Commentaire
Circuit fixe dans un champ magnétique variable :	
Loi de Faraday $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$, loi de modération de Lenz, champ électromoteur induit.	On introduit la fem induite par la circulation du champ électromoteur le long du circuit. On souligne les applications de l'induction (alternateur, four à induction...)
Courants de Foucault.	Sur l'exemple d'un conducteur cylindrique soumis à un champ magnétique parallèle à son axe, uniforme et oscillant, on décrit la géométrie des courants de Foucault et on exprime la puissance dissipée par effet Joule en négligeant le champ propre. On explique l'influence du feuilletage sur la dissipation de l'énergie électromagnétique par effet Joule.
Auto-induction : flux propre et inductance propre. Induction mutuelle entre deux circuits filiformes fermés.	Le théorème de Newmann ($M_{12} = M_{21}$) est

Inductance mutuelle entre deux bobines.	simplement affirmé. On détermine l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en "influence totale".
Bilan énergétique de l'établissement du courant dans un ensemble de deux circuits filiformes fermés indéformables et fixes : énergie magnétique. Densité volumique d'énergie magnétique. Couplage partiel, couplage parfait.	On exprime l'énergie magnétique en fonction des coefficients d'inductance et des intensités. 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. On établit l'expression de la densité volumique d'énergie magnétique dans le cas d'une bobine dont on néglige les effets de bord à partir de la relation $E = \frac{1}{2} LI^2$. L'expression de l'énergie magnétique en fonction de $\mathbf{j}$ et $\mathbf{A}$ est hors programme. On établit la relation $M^2 \leq L_1 L_2$ dans le cas de deux bobines couplées et on affirme le résultat pour deux circuits quelconques en interaction mutuelle.
Circuit mobile dans un champ magnétique permanent :	
Champ électromoteur induit, loi de Faraday.	Le champ électromoteur $\mathbf{V} \wedge \mathbf{B}$ peut être introduit par la transformation galiléenne du champ électromagnétique. On se borne à vérifier sur un exemple la loi de Faraday dont on affirme la généralité. On évite les situations où la loi de Faraday n'est pas applicable.
Applications : - rails de Laplace dans un champ magnétique extérieur uniforme, stationnaire et orthogonal aux rails. - spire rectangulaire soumise à un champ magnétique extérieur uniforme et en rotation uniforme autour d'un axe fixe orthogonal au champ magnétique. - freinage par induction.	On interprète qualitativement les phénomènes observés. On écrit les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. On explique le principe du freinage par induction et on en donne des exemples d'utilisation.
Haut parleur électrodynamique : principe de fonctionnement, couplage électromécanique, bilan d'énergie.	On fait remarquer que la puissance de la f.é.m. induite est opposée à la puissance de la force de Laplace (conversion électromécanique).

3.5 Lois de l'électromagnétisme dans un milieu linéaire homogène et isotrope

L'objectif de cette partie est d'introduire les concepts nécessaires aux cours de la conversion électromagnétique statique et de la propagation des ondes dans un diélectrique, linéaire, homogène, isotrope et non magnétique.

L'électrostatique des milieux diélectriques étant hors programme, aucun calcul des champs $\mathbf{D}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$ et $\mathbf{H}$ n'est demandé.

Programme	Commentaire
Aimant permanent, champ magnétique créé dans son environnement.	On se base sur la formule exprimant le champ d'un dipôle magnétique pour décrire le champ créé par un aimant à grande distance et on représente qualitativement les lignes de champ magnétique.
Vecteurs polarisation $\mathbf{P}$ et aimantation $\mathbf{M}$; notions élémentaires sur les charges de polarisation, courants de polarisation et d'aimantation ; vecteurs $\mathbf{D}$ et $\mathbf{H}$.	On précise les milieux paramagnétiques, diamagnétiques et ferromagnétiques.
Equations de Maxwell dans un milieu matériel.	La notion du champ local pour un milieu dense est

Définitions de la permittivité diélectrique et de la permittivité magnétique des milieux linéaires, homogènes et isotropes.	hors programme.
Permittivité diélectrique d'un milieu peu dense dans le modèle de l'électron élastiquement lié.	

4. Physique des ondes

L'enseignement de cette partie est basé sur une approche synthétique : les concepts sont introduits sur un exemple et utilisés ensuite dans d'autres cas.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- comprendre le rôle joué par une équation différentielle dans l'étude de l'évolution temporelle d'un système physique ;
- relier linéarité et superposition ;
- interpréter physiquement et savoir reconnaître la forme analytique d'un signal qui se propage ;
- relier conditions aux limites et quantification, conditions aux limites et décomposition en ondes stationnaires ;
- dégager les similitudes de comportement entre systèmes analogues par une mise en équation pertinente utilisant variables réduites et paramètres caractéristiques adimensionnés.

4.1 Oscillateurs harmoniques couplés

Programme	Commentaire
Cas de deux oscillateurs identiques couplés.	La méthode matricielle est hors programme.
Régime libre : modes propres, battement. Régime sinusoïdal forcé : résonance.	On se limite à des situations sans frottement permettant une résolution simplifiée. On décrit qualitativement l'influence de frottements fluides faibles sur la résonance.
Cas d'une chaîne infinie d'oscillateurs : approximation des milieux continus, équation d'onde de D'Alembert.	On fait apparaître de façon simple le rôle essentiel du couplage dans la propagation d'ondes. On se limite au cas de masses identiques reliées par des ressorts identiques.

4.2 Phénomènes de propagation unidimensionnels non dispersifs

Programme	Commentaire
Ondes transversales sur une corde vibrante. Equation d'onde.	On se limite aux petits mouvements d'une corde sans raideur dans un plan fixe.
Solutions de l'équation de D'Alembert sous forme d'onde plane progressive.	
Cas particulier de l'onde plane progressive harmonique : déphasage, double périodicité spatiale et temporelle. Vecteur d'onde.	On souligne le caractère idéal du modèle de l'onde plane harmonique et on montre simplement (grâce à l'analyse de Fourier) qu'une telle onde constitue une composante élémentaire d'un paquet d'ondes. On fait apparaître le rôle simplificateur de la notation complexe pour les ondes progressives harmoniques.
Interférences entre deux ondes acoustiques ou mécaniques de même fréquence.	On utilise la représentation de Fresnel pour déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage. On exprime les conditions d'interférences constructives ou destructives.
Ondes stationnaires.	On introduit la méthode de séparation des variables. On détermine les positions relatives des ventres et des nœuds de vibrations. On montre qu'on peut décomposer une onde stationnaire en ondes progressives et vice-versa.
Oscillations libres d'une corde fixée à ses extrémités: modes propres. Oscillations forcées d'une corde fixée à une extrémité (corde de Melde) : ondes	

stationnaires, résonance.	
Ondes de tension et de courant dans un câble coaxial sans pertes. Impédance caractéristique. Réflexion en amplitude sur une impédance terminale.	On établit les équations de propagation dans le câble coaxial modélisé comme un milieu continu, caractérisé par une inductance linéique et une capacité linéique. On étudie la réflexion en amplitude de tension pour une impédance terminale nulle, infinie ou résistive.

4.3 Ondes sonores dans les fluides

Programme	Commentaire
Mise en équation des ondes acoustiques dans l'approximation acoustique, équation de D'Alembert, célérité, caractère longitudinal. Ondes planes progressives. Domaine fréquentiel des ondes sonores.	On s'appuie sur les notions introduites pour les phénomènes unidimensionnels, tout en soulignant les apports nouveaux liés au caractère tridimensionnel. On justifie les hypothèses de l'approximation acoustique par des ordres de grandeur. On exprime la célérité en fonction de la température pour un gaz parfait. On adopte la description eulérienne en liaison avec le cours de mécanique des fluides. On suppose l'écoulement parfait.
Structure d'ondes planes progressives harmoniques, impédance acoustique.	On définit l'impédance acoustique comme le rapport de la surpression sur la vitesse. Aucune autre définition de l'impédance acoustique ne peut être exigée.
Ondes sonores longitudinales dans une tige solide.	On utilise l'approximation des milieux continus. On exprime de façon simple la célérité des ondes en fonction du module de Young E (qu'on introduit à cette occasion) et de la masse volumique.
Aspects énergétiques : densité volumique d'énergie sonore, vecteur densité de courant énergétique, bilan énergétique de la propagation d'une onde sonore. Intensité sonore. Niveau sonore. Réflexion, transmission d'une onde sonore plane progressive sur une interface plane, sous incidence normale. Conditions aux limites. Coefficients de réflexion et de transmission des vitesses, des surpressions et des puissances sonores. Adaptation des impédances.	On relie l'adaptation des impédances au transfert maximum de puissance. On signale l'utilisation des ondes ultra-sonores pour l'échographie médicale.
Onde sonore sphérique.	On commente l'expression de la surpression $p(r,t) = \frac{1}{r} \cos(\omega(t - \frac{r}{c}))$ générée par une sphère pulsante.
Effet Doppler pour les ondes sonores.	On présente le principe d'une détermination de vitesse par effet Doppler.

4.4 Ondes électromagnétiques dans le vide

Programme	Commentaire
Equations de propagation des champs et des potentiels électromagnétiques dans une région sans charges ni courants. Onde plane. Structure de l'onde plane progressive. Cas particulier de l'onde monochromatique (harmonique ou sinusoïdale).	

Domaines spectraux et applications des ondes électromagnétiques. Relation entre le flux du vecteur de Poynting et le flux de photons.	On associe à chaque domaine du spectre des ondes électromagnétiques des applications. On fournit la relation d'Einstein-Planck et on l'utilise pour établir la correspondance entre le flux de photons et le flux du vecteur de Poynting.
Polarisation rectiligne d'une onde plane progressive monochromatique. Loi de Malus. États de polarisation d'une onde plane progressive monochromatique.	Les polariseurs et les lames à retard sont introduits de façon simple en TP.

4.5 Phénomènes linéaires de propagation unidimensionnels dispersifs

Programme	Commentaire
Relation de dispersion, vitesse de phase, vitesse de groupe, dispersion, absorption. Paquet d'ondes ; vitesse de groupe. Domaine spectral d'un paquet d'onde de durée finie.	Ces notions sont introduites sur un exemple de phénomène unidimensionnel linéaire. On insiste sur l'intérêt de la décomposition en ondes planes proportionnelles à $\exp(i(\omega t - kx))$ avec ω réel et k a priori complexe pour le traitement des phénomènes de propagation linéaires.
Propagation d'une onde plane transverse progressive harmonique dans un plasma. Fréquence de coupure. Dispersion, vitesse de phase et vitesse de groupe. Conductivité imaginaire pure. Interprétation énergétique. Équation de propagation dans le plasma. Onde plane progressive harmonique dans le plasma. Onde évanescence dans le domaine réactif ; absence de propagation de l'énergie.	On considère un plasma comme un milieu dilué localement neutre, dont les charges sont sans interaction entre elles et où les ions sont immobiles. On décrit le modèle de la conduction électrique dans un plasma et on construit une conductivité complexe en justifiant les approximations. On associe le caractère imaginaire pur de la conductivité complexe à l'absence de puissance échangée entre le champ et les porteurs.

4.6 Ondes électromagnétiques dans un milieu diélectrique linéaire homogène et isotrope

Programme	Commentaire
Propagation d'une onde plane harmonique proportionnelle à $\exp(i(\omega t - kx))$ avec ω réel et k a priori complexe dans un diélectrique linéaire homogène, isotrope, non magnétique. Transversalité des ondes dans un D.L.H.I.	On considère un milieu non magnétique, diélectrique linéaire, isotrope, homogène, sans charges et courants libres (milieu DLHI parfait). Pour le calcul des flux énergétiques, on affirme l'expression du vecteur de Poynting dans un milieu diélectrique.
Relation de dispersion, absorption, indice complexe.	On fait le lien avec le cours d'électromagnétisme des milieux.
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.	
Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu ohmique en régime lentement variable.	On repère une analogie formelle avec les phénomènes de diffusion. On établit la relation de dispersion et on associe l'atténuation de l'onde à une dissipation d'énergie. On donne l'ordre de grandeur de l'épaisseur de peau du cuivre à 50 Hz.
Conducteur parfait. Relation de passage du champ électromagnétique à l'interface vide conducteur parfait. Réflexion sous incidence normale d'une onde électromagnétique plane, progressive et monochromatique sur un plan conducteur parfait.	On limite l'étude à celle des champs de l'onde réfléchie et de l'onde stationnaire.

5. Introduction au monde quantique

Cette partie est une introduction au monde quantique. Elle s'inscrit dans la continuité du programme de la classe de Terminale scientifique et de la classe de PCSI.

Dans une approche descriptive et qualitative, on aborde les concepts de la dualité onde-corpuscule, de la fonction d'onde et de son interprétation probabiliste et les conséquences de l'inégalité de Heisenberg spatiale dans des situations confinées. Les ondes stationnaires étudiées dans la partie (Physique des ondes) permettent d'illustrer le rôle des conditions aux limites dans l'apparition de modes propres et de préparer à la quantification de l'énergie en mécanique quantique.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- mettre en relation les effets quantiques avec les prédictions classiques ;
- mobiliser ses savoir-faire sur les ondes pour interpréter les phénomènes quantiques ;
- être en mesure de prévoir des effets quantiques grâce à des estimations numériques ;
- passer de la description corpusculaire à une description ondulatoire d'une particule.

Programme	Commentaire
Principes et limites de la mécanique classique. Dualité onde-particule pour la lumière et la matière. Relations de Planck-Einstein et de Louis de Broglie.	On évalue des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques. Dans une réflexion qualitative et descriptive, on décrit l'exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon et celui d'expérience illustrant la notion d'ondes de matière.
Fonction d'onde ψ . Interprétation probabiliste associée à la fonction d'onde : approche qualitative.	On interprète une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes.
Inégalité de Heisenberg spatiale $\Delta p \Delta x \geq \hbar$.	A l'aide d'une analogie avec la diffraction des ondes lumineuses, on établit l'inégalité en ordre de grandeur : $\Delta p \Delta x \geq \hbar$.
Énergie minimale de l'oscillateur harmonique quantique.	On établit le lien entre confinement spatial et énergie minimale (induit par l'inégalité de Heisenberg spatiale).
Quantification de l'énergie d'une particule libre confinée 1D.	On détermine les niveaux d'énergie par analogie avec les modes propres d'une corde vibrante. On montre le lien qualitatif entre confinement spatial et quantification.

6. Optique

On se restreint au domaine d'approximation où une description par des ondes scalaires est suffisante. Le théorème de Malus-Dupin, outil nécessaire à l'étude de l'optique ondulatoire, est admis.

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 évite les démonstrations mathématiques compliquées.

L'interféromètre de Michelson est étudié exclusivement en TP-cours.

Toute étude générale de la cohérence est exclue.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- maîtriser la notion de phase d'une vibration harmonique et de sa variation au cours d'une propagation ;
- associer les caractéristiques géométriques d'un phénomène d'interférences (position et forme des franges, interférence) à celles du dispositif interférentiel et du milieu de propagation ;
- connaître certains ordres de grandeur propres aux phénomènes lumineux dans le domaine du visible (longueur d'onde, temps de cohérence, temps de réponse d'un récepteur) ; faire le lien avec les problèmes de cohérence ;
- maîtriser les outils de l'optique géométrique (rayon lumineux, loi du retour inverse, relations de conjugaison) et de l'optique ondulatoire (chemin optique, surface d'onde, théorème de Malus-Dupin) afin de conduire un calcul de différence de marche entre deux rayons lumineux dans des situations simples.

6.1 Interférences non localisées de deux ondes cohérentes

Modèle scalaire des ondes lumineuses.	On admet qu'une onde lumineuse
---------------------------------------	--------------------------------

Chemin optique le long d'un rayon lumineux et retard de phase associé. Surfaces d'onde (ou équiphases). Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss. Théorème de Malus-Dupin. Récepteurs. Eclairement ou intensité lumineuse. Densité spectrale.	monochromatique peut être décrite par une onde scalaire progressive, composante du champ électrique, qui se propage le long du rayon lumineux. On définit les surfaces d'ondes relatives à une source ponctuelle S par l'ensemble des points M tels que (SM) = constante. Le théorème de Malus-Dupin est admis. On donne l'ordre de grandeur du temps de réponse de quelques récepteurs de lumière et on évoque leurs conséquences sur la détection des signaux lumineux.
Superposition de deux ondes lumineuses. Cohérence mutuelle. Formule de Fresnel : $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi)$. Conditions d'interférences.	On compare les prévisions théoriques et les réalités expérimentales et on affirme une méthode opérationnelle de cohérence mutuelle mettant en œuvre les notions de trains d'ondes, de sources synchrones, de diviseur d'ondes et de longueur de cohérence. Cependant, l'étude générale de la cohérence (cohérence partielle, cohérence spatiale ...) est hors programme.
Diviseurs d'ondes. Champ d'interférence, surfaces d'égale intensité, frange d'interférence, différence de marche, ordre d'interférence, facteur de contraste (ou visibilité). Relation (admise) entre la durée des trains d'ondes et la largeur spectrale.	On donne l'ordre de grandeur du temps de cohérence de quelques radiations visibles.
Application : trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif : source à distance finie et observation à grande distance finie et à l'infinie. Perte de contraste par élargissement angulaire de la source.	On justifie que les franges ne sont pas localisées. On utilise le critère semi-quantitatif de brouillage des franges $\Delta p \geq \frac{1}{2}$ (où $ \Delta p $ est évalué sur la moitié de l'étendue spectrale de la source) pour interpréter des observations expérimentales. L'étude de tout dispositif interférentiel autre que celui de Michelson étudié en TP-cours n'est pas exigible.

6.2 Diffraction des ondes lumineuses

Programme	Commentaire
Présentation expérimentale de la diffraction. Principe de Huygens-Fresnel.	Le principe de Huygens-Fresnel est simplement énoncé.
Diffraction de Fraunhofer : diffraction à l'infini d'une onde plane par une ouverture plane.	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.
Cas d'une ouverture rectangulaire, d'une fente allongée. Approximation de l'optique géométrique.	On souligne le rôle de la diffraction à l'infini dans la formation des images. On traite en travaux dirigés la diffraction à l'infini par les fentes d'Young éclairées par une source ponctuelle monochromatique.

6.3 Étude du réseau plan

Programme	Commentaire
Réseau plan par transmission.	Cette partie est étudiée en TP-cours.

7. Conversion de puissance

L'enseignement de cette partie fait appel à une approche synthétique de phénomènes d'électromagnétisme et d'électronique concernant la transmission de puissance. L'objectif est de faire comprendre les concepts physiques mis en œuvre dans ces phénomènes. Il s'agit donc d'un enseignement général portant sur des connaissances bien délimitées. 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.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- réaliser des bilans d'énergie ;
- appliquer l'électromagnétisme à des problématiques industrielles ;
- élaborer des modèles, analyser des limitations et des défauts ;
- associer divers éléments (sources, convertisseurs) afin de concevoir une chaîne énergétique complète.

7.1 Conversion électromagnétique statique

Programme	Commentaire
Circuit magnétique avec ou sans entrefer : canalisation des lignes de champs par le milieu magnétique. Orthogonalité des lignes de champ à l'interface dans un entrefer. Electroaimant.	On utilise un modèle linéaire pour le milieu magnétique. On établit l'expression du champ magnétique produit dans l'entrefer d'un électroaimant par application du théorème d'Ampère et la conservation du flux magnétique.
Inductance propre d'une bobine à noyau de fer doux modélisé linéairement.	On établit l'expression de l'inductance propre de la bobine à noyau et on vérifie l'expression de l'énergie magnétique $E_{mag} = \iiint \frac{B^2}{2\mu} d\tau$.
Pertes d'une bobine réelle à noyau.	On indique les différents termes de pertes d'une bobine à noyau : les pertes fer par courants de Foucault et par hystérésis, les pertes cuivre. La notion de reluctance est hors programme.
Couplage parfait de deux bobines à l'aide d'un circuit ferromagnétique torique. Fonctionnement linéaire et sans fuites. Flux magnétique commun, courant magnétisant.	La courbe d'aimantation et le cycle d'hystérésis seront vus en TP-cours : Ferromagnétisme et application.
Application au modèle de transformateur parfait : rapports de transformations en tension et en intensité. Transfert d'impédance.	On décrit des solutions permettant de réduire les pertes fer. On explique le rôle du transformateur d'isolement.

7.2 Conversion électromécanique

Programme	Commentaire
Contacteur électromagnétique en translation : Énergie et force électromagnétique d'un enroulement enlaçant un circuit magnétique présentant un entrefer variable. Fonctionnement d'un contacteur électromagnétique.	La notion de coénergie est hors programme. On admet l'expression $F = \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right)_i$ de la force électromagnétique calculée à partir de l'énergie magnétique. Pour expliquer son fonctionnement, on assimile le contacteur électromagnétique à un relai.
Machine synchrone : Structure d'un moteur synchrone diphasé et bipolaire. Champ magnétique dans l'entrefer.	On se place dans le cas d'une machine de perméabilité infinie à entrefer constant. On explique qualitativement que, dans l'entrefer, on peut obtenir un champ magnétique à dépendance angulaire sinusoïdale par association de plusieurs spires décalées.

Champ glissant statorique. Champ glissant rotorique. Énergie et couple. Condition de synchronisme. stabilité du système. Principe de l'autopilotage. Modèle électrique de l'induit. Bilan énergétique. Réversibilité d'une machine synchrone.	On exprime l'énergie magnétique emmagasinée en fonction de la position angulaire du rotor. L'expression $\Gamma = \left(\frac{\partial E}{\partial \theta} \right)_i$ du moment électromagnétique est admise. On décrit qualitativement le principe de l'autopilotage. Les expressions des coefficients d'inductance sont admises. En tenant compte uniquement des pertes cuivre, on justifie l'égalité entre la puissance électrique absorbée par les fcm et la puissance mécanique fournie. On cite quelques exemples d'application des machines synchrones.
Machine à courant continu : Structure d'un moteur à courant continu bipolaire à excitation séparée Collecteur. Couple $\Gamma = \Phi i$ et fcm $e = \Phi \Omega$. Equations électrique et mécanique. Caractéristique (Ω, Γ). Réversibilité d'une machine à courant continu.	On fait l'analogie avec le moteur synchrone pour expliquer que le collecteur assure le synchronisme entre le champ statorique stationnaire et le champ rotorique quelle que soit la position angulaire du rotor. L'expression du couple $\Gamma = \Phi i$ est admise. On analyse le démarrage d'un moteur entraînant une charge mécanique exerçant un moment de la forme $\Gamma_r = -f \Omega$. On donne quelques exemples d'application de machines à courant continu.

7.3 Conversion électronique

Programme	Commentaire
Transfert de puissance entre une source et une charge : rendement. Ordre de grandeur des puissances mises en jeu. Nécessité de la commutation et d'éléments de réserve d'énergie : interrupteurs, inductances et capacités.	On rappelle la continuité de l'énergie et ses conséquences sur la continuité du flux magnétique et de la charge électrique.
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 considère 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 leurs aspects fonctionnels de commutation. Toute considération technologique est hors programme.
Modélisation des générateurs et récepteurs par des sources de courant ou de tension. Sources parfaites, puissance échangée.	La conversion entre sources non parfaites ainsi que la décomposition de Fourier de la puissance sont exclues du programme. On signale l'intérêt de condensateurs ou de bobines pour parfaire une source.
Transfert de puissance entre un générateur et un récepteur : règle d'association. Application au transfert de puissance entre un générateur de tension continue et un récepteur de	La connaissance des circuits de commande est hors programme. On illustre l'intérêt de cette conversion pour assurer la variation de vitesse d'une machine à courant

courant continu par une cellule à deux interrupteurs. Redressement double alternance réalisé avec un pont de diodes. Onduleur.	continu. On décrit les différentes séquences de commutation des diodes pour un générateur de tension sinusoïdal alimentant une charge assimilable à une source continue de courant. On décrit la structure en pont à quatre interrupteurs et les séquences de commutation pour une fréquence de commutation fixe.
---	---

8. Thermodynamique : diffusion thermique

Le cours de conduction thermique permet un réinvestissement du cours de thermodynamique de PCSI et contribue à asseoir les compétences correspondantes. L'étude de la conduction thermique contribue aussi à consolider la maîtrise d'outils mathématiques puissants (divergence, laplacien) dans un contexte concret.

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

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- identifier la nature des transferts thermiques ;
- réaliser des bilans d'énergie sous forme globale et locale ;
- analyser et résoudre des équations aux dérivées partielles (analyse en ordre de grandeur, conditions initiales, conditions aux limites).

Programme	Commentaire
Les modes de transfert thermique d'énergie : conduction, convection et rayonnement.	
Vecteur densité de flux thermique $\mathbf{J}_0$.	
Équilibre thermodynamique local.	
Loi phénoménologique de Fourier relative à la conduction thermique, conductivité thermique.	On souligne l'analogie entre les lois phénoménologiques d'Ohm et de Fourier. Toute modélisation microscopique de la loi de Fourier est hors programme. On donne des ordres de grandeur de la conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, verre, acier...
Bilan d'énergie thermique. Equation de la diffusion thermique. Linéarité de l'équation de diffusion. Relation de l'équation de diffusion avec l'irréversibilité temporelle du phénomène. Analyse dimensionnelle.	On établit, à l'aide du premier principe appliqué à un volume élémentaire l'équation de la diffusion thermique, avec ou sans terme source. On donne le terme source local et intégral correspondant à l'effet Joule. On se limite à des problèmes unidimensionnels en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique. On admet et on utilise une généralisation en géométrie quelconque en utilisant les opérateurs divergence et laplacien et leurs expressions fournies. Aucune méthode de résolution de cette équation ne peut être supposée connue. On analyse l'équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.
Conditions aux limites : continuité du flux thermique, continuité de la température pour un contact thermique parfait, loi de Newton. Coefficient de transfert thermique de surface h.	Les transferts thermiques à l'interface entre un fluide et une paroi solide sont décrits par l'expression phénoménologique $\varphi = h(T_{\text{Paroi}} - T_{\text{Fluide}})$, appelée loi de Newton.
Conduction thermique en régime stationnaire, conductance et résistance thermiques. Associations de résistances thermiques en série ou en parallèle.	On signale les analogies avec le calcul des conductances électriques et on énonce les conditions d'application de l'analogie. Seule la mémorisation de l'expression de la résistance thermique d'un barreau cylindrique calorifugé latéralement est exigible.
ARQS, analogie électrocinétique avec un circuit RC.	On met en évidence un temps caractéristique d'évolution de la température, on justifie l'ARQS et

	on établit l'analogie avec un circuit électrique RC.
Régime sinusoïdal forcé : onde plane de diffusion thermique. Relation de dispersion. Effet de peau thermique.	On fait le lien avec l'étude générale des phénomènes de propagation dispersif. On met en évidence le déphasage lié à la propagation et on établit une distance caractéristique d'atténuation.

Approche expérimentale PSI

Par l'importance donnée aux travaux pratiques, on souhaite améliorer dans l'esprit des étudiants la relation qu'ils ont à faire entre le cours et les TP et leur donner le goût des sciences expérimentales, même s'ils n'en découvrent, à ce stade, que quelques unes des méthodes.

Pour que les étudiants puissent atteindre un bon niveau de connaissances et de savoir faire dans le domaine expérimental, il convient que les sujets de travaux pratiques proposés leur permettent d'acquérir une bonne maîtrise des appareils et des méthodes au programme et les habituent à les utiliser, en faisant preuve d'initiative et d'esprit critique. On doit s'efforcer de développer chez eux une bonne faculté d'adaptation à un problème qui peut être nouveau, à condition qu'il soit présenté de façon progressive. La nouveauté peut résider dans le phénomène étudié, dans la méthode particulière ou dans l'appareillage.

Dans cette hypothèse la séance doit comporter non seulement la manipulation proprement dite, mais aussi des temps de réflexion, de construction intellectuelle et d'échanges avec le professeur. C'est pourquoi ce dernier choisit les sujets d'étude plus en raison de leurs qualités formatrices que des phénomènes particuliers qui en constituent le support.

Aidé par un commentaire suffisamment précis, surtout si le sujet traité fait intervenir un concept nouveau (ou un appareil nouveau), l'étudiant est amené à réfléchir, à comprendre le phénomène par une série d'hypothèses, de vérifications expérimentales qui exigent de lui initiative, savoir-faire, rigueur, honnêteté intellectuelle.

La séance de travaux pratiques donne lieu à une synthèse écrite comportant, sous forme succincte, l'indication et l'exploitation des résultats. A cet égard on attache de l'importance à leur présentation graphique. L'utilisation d'un ordinateur, soit pour l'acquisition et le traitement de données expérimentales, soit pour comparer les résultats des mesures aux données théoriques, évite des calculs longs et répétitifs et favorise le tracé de courbes.

Si les étudiants sont appelés à utiliser d'autres appareils, toutes les indications nécessaires doivent leur être fournies.

D'autre part, les activités expérimentales permettent l'acquisition de compétences spécifiques, ainsi que d'un réel savoir et savoir-faire dans le domaine des mesures, des incertitudes et des techniques associées : réalisation, analyse du protocole, choix des instruments de mesure, mesures, évaluation de la précision, validation et analyse critique des résultats obtenus.

Les étudiants doivent avoir conscience de la variabilité des résultats obtenus lors d'un processus de mesure, en connaître les origines, et comprendre et s'approprier ainsi les objectifs visés par l'évaluation des incertitudes. Ils détermineront ensuite ce qu'il faudrait faire pour améliorer la précision d'un résultat.

En fin, il est essentiel que les notions sur les mesures et incertitudes diffusent dans chacun des thèmes du programme, théorique et expérimental, tout au long des deux années préparatoires et qu'elles soient régulièrement évaluées.

Le TP-cours intitulé " **Mesures et incertitudes**" traité dans le programme de physique de première année explicite les notions exigibles sur le thème « mesures et incertitudes ».

L'approche expérimentale comprendra les TP et les TP-cours.

9. TP-cours

Les contenus des TP-cours constituent un ensemble de connaissances et de compétences exigibles.

Le principe d'un TP-cours est assez différent de celui d'un TP habituel. Son objectif est de permettre aux élèves de construire, de manière active, des savoirs ou des savoir-faire théoriques ou expérimentaux selon un plan préétabli par l'enseignant. En effet, les élèves manipulent et proposent des exploitations. Le professeur se charge alors de réaliser les conclusions. En ce sens, un TP-cours est guidé par le professeur comme pour un cours magistral habituel. Les instructions doivent être fournies aux élèves progressivement au cours du déroulement de la séance. Il est donc déconseillé de fournir aux élèves un mode opératoire similaire à celui des séances des travaux pratiques.

Un TP-cours exige de l'enseignant une certaine vigilance pour assurer une bonne gestion du temps et une synchronisation suffisante du travail des binômes.

On peut résumer les étapes du travail lors d'un TP-cours comme suit :

- Étape 1 : l'enseignant fixe un objectif, comme par exemple étudier un phénomène, modéliser une

- situation physique, ou découvrir une loi ;
- Étape 2 : l'enseignant fournit les instructions nécessaires pour guider le travail expérimental et respecter les consignes de sécurité ;
 - Étape 3 : réalisation des mesures ou observations par les élèves et expression des premières exploitations ;
 - Étape 4 : discussion des résultats dans leur ensemble et formulation des premières conclusions ;
 - Étape 5 : réalisation d'éventuelles mesures supplémentaires ou d'observations pour compléter le travail ;
 - Étape 6 : cette étape ressemble beaucoup aux activités ordinaires du professeur dans un cours magistral : explications, démonstrations, exemples d'applications, exercices simples et conclusions.
- Ce processus peut être répété jusqu'à atteindre l'ensemble des objectifs de la séance.
En cas de contrainte de temps, les montages peuvent être préparés à l'avance.

Le contenu de cette rubrique est exigible aux concours.

9.1 Multiplication des signaux

Programme	Commentaire
Etude d'un composant multiplieur analogique : schéma et relation de fonctionnement, limites et précautions d'utilisation.	Il s'agit de présenter un multiplieur analogique réalisant la fonction $v_s(t) = k \cdot v_{e1} \cdot v_{e2}(t)$, et quelques unes de ses applications.
Multiplication d'un signal par une constante. Multiplication d'un signal sinusoïdal par lui-même. Multiplication de deux signaux sinusoïdaux différents.	Dans chaque cas, on mesure et on interprète les caractéristiques du signal de sortie : amplitude, fréquence et valeur moyenne. On fait l'analyse spectrale du signal de sortie et on fait remarquer la non linéarité du composant. Dans le cas de la multiplication de deux signaux sinusoïdaux différents, on distingue les deux cas : fréquences voisines et fréquences très différentes.

9.2 Modulation et démodulation d'amplitude

La problématique de la transmission d'un signal temporel codant une information est abordée dans l'étude et la réalisation d'une modulation, en relation avec la partie du programme consacrée à la propagation des ondes électromagnétiques.

Programme	Commentaire
Transmission d'un signal codant une information variant dans le temps. Intérêt de la modulation.	On définit un signal modulé en amplitude, en fréquence, en phase. On explique l'intérêt de la modulation dans la transmission des signaux. On donne des ordres de grandeur des fréquences utilisées pour les signaux radio AM, FM, la téléphonie mobile.
Modulation d'amplitude à l'aide d'un multiplieur analogique, taux de modulation.	
Démodulation par détection d'enveloppe.	On fait constater l'influence du taux de modulation sur la démodulation d'amplitude.
Démodulation synchrone.	On explique le principe de la détection synchrone et on réalise une démodulation synchrone.

9.3 Oscillateurs

Programme	Commentaire
Comparateur à hystérésis. Fonction mémoire.	On rappelle le cycle d'un comparateur à hystérésis vu en PCSI et on décrit le phénomène d'hystérésis en relation avec la notion de fonction mémoire.
Oscillateur de relaxation associant un intégrateur et un comparateur à hystérésis.	On décrit les différentes séquences de fonctionnement d'un oscillateur de relaxation, on

Générateur de signaux non sinusoïdaux. Analyse spectrale des signaux générés.	exprime les conditions de basculement et on détermine la période d'oscillation.
Réalisation d'un oscillateur à l'aide d'une porte logique.	
Oscillateur quasi-sinusoïdal réalisé en bouclant un filtre passe-bande du deuxième ordre avec un amplificateur.	On exprime les conditions théoriques (gain et fréquence) d'auto-oscillation sinusoïdale d'un système linéaire bouclé. On analyse sur l'équation différentielle l'inégalité que doit vérifier le gain de l'amplificateur afin d'assurer le démarrage des oscillations. On interprète le rôle des non linéarités dans la stabilisation de l'amplitude des oscillations. On met en évidence la distorsion harmonique des signaux par une analyse spectrale.

9.4 Électronique numérique

Ce TP-cours est exclusivement étudié de manière expérimentale et aborde la question du traitement numérique du signal dans le prolongement du programme de première année. Le professeur introduira les thèmes proposés au fur et à mesure des besoins et en relation avec les autres sujets d'étude.

En décrivant le mouvement apparent d'un segment tournant observé avec un stroboscope, on explique le phénomène de repliement de spectre et on met en place la condition de Niquist-Shannon. On réalise ensuite une acquisition numérique en vue d'une analyse spectrale.

Programme	Commentaire
Échantillonnage. Choix de la durée, du nombre d'échantillon et de la fréquence d'échantillonnage d'une acquisition numérique. Condition de Niquist-Shannon. Analyse spectrale numérique. Structure du spectre du signal obtenu après échantillonnage.	On met en évidence le phénomène de repliement de spectre provoqué par l'échantillonnage avec un oscilloscope numérique ou une carte d'acquisition.
Filtrage numérique. Restitution d'un signal analogique.	On réalise de manière comparative un filtre analogique passe-bas et un filtre numérique remplissant la même fonction. Le filtre numérique est réalisé à l'aide d'une feuille de calcul traitant l'acquisition numérique d'une entrée analogique, un convertisseur numérique/analogique restituant une sortie analogique.

9.5 Interféromètre de Michelson

Le réglage de l'interféromètre de Michelson, non exigible, ne doit pas constituer un objectif. La mémorisation de toute formulation mathématique relative à cette partie est exclue.

Programme	Commentaire
Présentation de l'appareil : miroirs, séparatrice, compensatrice, vis de réglages.	On fait remarquer le rôle de chaque élément de l'appareil.
Réglage géométrique de l'appareil.	On met en évidence le protocole expérimental de réglage du parallélisme entre la compensatrice et la séparatrice.
Schéma théorique de l'interféromètre de Michelson.	On modélise la séparatrice et la compensatrice réelles par une lame séparatrice théorique semi réfléchissante d'épaisseur nulle.
Réglage de l'appareil en lame d'air à faces parallèles avec une lumière spectrale : franges d'égale inclinaison, conditions d'éclairage et d'observation, défilement des anneaux. Expression de la différence de marche. Rayon des anneaux.	On montre l'équivalence de l'interféromètre de Michelson à une lame d'air à faces parallèles. On met en évidence l'influence de la largeur spatiale de la source sur la diminution du contraste et la localisation des franges d'interférence.
Réglage de l'appareil en coin d'air avec une lumière	On montre l'équivalence de l'interféromètre de

spectrale : Franges d'égale épaisseur. Conditions d'éclairages et d'observation. Expression de la différence de marche. Interfrange.	Michelson à un coin d'air.
Passage à la teinte plate et contrôle de sa qualité en lumière blanche. Franges du coin d'air en lumière blanche.	On met en évidence expérimentalement l'influence de la largeur spectrale de la source sur la diminution du contraste de la figure d'interférence.

9.6 Spectroscopie à réseau

Programme	Commentaire
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.	Les positions des raies observées sont interprétées comme résultant d'une condition d'interférences constructives.
Réglage du goniomètre et utilisation du spectroscopie : lampe étalon, courbe d'étalonnage, mesure de longueurs d'onde, mesure du pas d'un réseau.	Pour le réglage, on s'appuie sur les techniques vues dans la partie expérimentale du programme de première année. La connaissance de protocoles de réglages de la perpendicularité de l'axe optique de la lunette, de l'axe de rotation de la plate-forme et de la perpendicularité de la normale au réseau à l'axe de rotation de la plate-forme n'est pas exigible. Le choix des exemples sur lesquels la spectroscopie à réseau est mise en œuvre relève de l'initiative du professeur.
Pouvoir dispersif d'un réseau.	On définit le pouvoir dispersif d'un réseau en comparant différents réseaux.
Notion de pouvoir de résolution.	On définit le pouvoir de résolution et on indique les facteurs qui le limitent : pouvoir séparateur du détecteur, influence de la largeur de la fente source. Le calcul du pouvoir de résolution spectrale est hors programme.

9.7 Ferromagnétisme et application

Programme	Commentaire
Non linéarité d'un matériau ferromagnétique. Courbe de première aimantation. Aimantation à saturation.	On signale qu'un matériau ferromagnétique n'est pas linéaire et on décrit la courbe de première aimantation et l'existence de l'aimantation à saturation. L'interprétation microscopique du ferromagnétisme est hors programme.
Relevé expérimental du cycle d'hystérésis $B = f(H)$ de la carcasse magnétique d'un transformateur : phénomène d'hystérésis, aimantation rémanente, champ rémanent, excitation coercitive. Pertes par hystérésis.	A partir des équations de Maxwell d'un milieu magnétique dans l'ARQS, on établit la loi de Faraday et le théorème d'Ampère. Pour une géométrie torique on fait l'approximation des champs unidimensionnels. On en déduit comment relever H et B à partir de mesures de tensions électriques. On peut utiliser une interface et un logiciel pour accéder au cycle de M en fonction de B, à la susceptibilité en fonction de 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	On met en équation le transformateur en régime sinusoïdal forcé dans le modèle torique

courants. Adaptateur d'impédances.	unidimensionnel.
------------------------------------	------------------

9.8 Conversion électronique de puissance

Programme	Commentaire
Puissance électrique	On mesure une puissance moyenne à l'aide d'un wattmètre numérique.
Conversion électromagnétique statique de puissance. Mise en œuvre d'un transformateur.	
Conversion électromécanique de puissance. Mise en œuvre d'une machine à courant continu.	
Conversion électronique statique de puissance. Mise en œuvre d'un redresseur.	
A partir d'une source de tension continue et d'un hacheur, on alimente un récepteur de courant, de manière à ce que la tension moyenne entre ses bornes puisse varier suivant la séquence de commande du hacheur.	Le hacheur est un interrupteur électronique constitué à l'aide d'un transistor de puissance ou d'un thyristor et dont on peut commander la fermeture et l'ouverture.
Analyse du fonctionnement du hacheur sur une charge (R, L) et de sa limitation de fréquence. Etude de l'ondulation de courant.	
Application : Variation de vitesse d'une machine à courant continu. Influence du rapport cyclique et de la fréquence du hacheur.	On se limite à la conversion à l'aide d'un hacheur série. On met en évidence le rôle de la diode de roue libre pour un récepteur de courant.

10. Travaux pratiques

Les thèmes des travaux pratiques, dont le programme fixe le nombre et les thèmes, ne sont pas exigibles. Leurs contenus et leur progression sont entièrement fixés par l'enseignant.

Compte-rendu

Il est impératif d'exiger de l'élève la rédaction d'un compte-rendu pendant une séance de travaux pratiques. Cette aptitude constitue un des objectifs de la formation scientifique. Les activités expérimentales sont aussi l'occasion de travailler l'expression orale lors d'un point de situation ou d'une synthèse finale par exemple. Le but est de bien préparer les élèves de CPGE à la présentation des travaux et projets qu'ils auront à conduire et à exposer au cours de leur formation en école d'ingénieur et, plus généralement, dans le cadre de leur métier de chercheur ou d'ingénieur.

La structure d'un compte-rendu de travaux pratiques comprend : un titre, une introduction, une partie théorique, une partie de mise en œuvre, les résultats, leur interprétation et une conclusion.

D'autre part, les différentes activités pratiques doivent être couronnées par l'évaluation des capacités et compétences expérimentales.

Si l'intérêt du compte-rendu est évident, en revanche il faut veiller à ce qu'il ne prenne pas une importance considérable, en temps, par rapport au travail expérimental proprement dit.

TP N°	Titre du TP
1	Pendules couplés.
2	Utilisation d'une station d'acquisition et de traitement automatique des données. Acquisition et analyse spectrale d'un signal acoustique, électrique, électromagnétique ou sa synthèse.
3	Ondes acoustiques. Mesure d'une célérité. Interférences de deux ondes acoustiques. Changement de fréquence. Mise en œuvre d'une détection synchrone pour mesurer une vitesse par décalage Doppler.
4	Étude de la machine à courant continu.
5	Filtrage analogique d'un signal périodique.
6	Analyse spectrale d'un signal électronique.
7	Modulation et démodulation.
8	Polarisation des ondes lumineuses.
9	Interférence et diffraction des ondes lumineuses.
10	Oscillateur auto-entretenu quasi sinusoïdal.

11	Oscillateur de relaxation.
12	Asservissement de vitesse d'une machine à courant continu.
13	Mesure de longueurs d'onde optique, centimétriques, mécanique et acoustique. Études de spectre à l'aide d'un spectromètre à fibre optique.