

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

CLASSES PRÉPARATOIRES AUX
GRANDES ÉCOLES

Voie : Mathématiques et physique (MP)

PROGRAMME DE PHYSIQUE
Seconde année

Table des matières

Approche théorique MP

1. Électronique : éléments de traitement du signal
 - 1.1 Composition en fréquence d'un signal périodique
 - 1.2 Effet d'un filtre sur un signal périodique
 - 1.3 Électronique numérique

2. Mécanique du solide
 - 2.1 Cinématique du solide et des solides en contact
 - 2.2 Modélisation des efforts entre solides en contact
 - 2.3 Mouvement d'un solide autour d'un axe de direction fixe

3. Électromagnétisme
 - 3.1 Formulation locale des lois de l'électromagnétisme en régime statique
 - 3.2 Forces de Laplace
 - 3.3 Induction électromagnétique
 - 3.4 Équations de Maxwell
 - 3.5 Énergie électromagnétique

4. Physique des ondes
 - 4.1 Phénomènes de propagation unidimensionnels non dispersifs
 - 4.2 Propagation du champ électromagnétique dans une région sans charges ni courants
 - 4.3 Réflexion sous incidence normale d'une onde électromagnétique sur un conducteur parfait
 - 4.4 Guide d'onde à section rectangulaire
 - 4.5 Rayonnement dipolaire

5. Optique
 - 5.1 Modèle scalaire de la lumière
 - 5.2 Interférences des ondes lumineuses
 - 5.2.1 Interférences non localisées de deux ondes totalement cohérentes
 - 5.2.2 Interférences localisées de deux ondes totalement cohérentes
 - 5.3 Diffraction des ondes lumineuses
 - 5.4 Diffraction par un réseau plan

6. Thermodynamique
 - 6.1 Conduction thermique
 - 6.2 Éléments de thermodynamiques statistiques
 - 6.2.1 Facteur de Boltzmann
 - 6.2.2 Systèmes à spectre discret d'énergies
 - 6.2.3 Capacités thermiques classiques des gaz et des solides

7. Physique quantique

- 7.1 Introduction au monde quantique
- 7.2 Équation de Schrödinger
- 7.3 Particule libre
- 7.4 États stationnaires d'une particule dans des potentiels constants par morceaux
- 7.5 États non stationnaires d'une particule

Approche expérimentale MP

- 8. TP-cours
 - 8.1 Analyse spectrale
 - 8.2 Électronique numérique
 - 8.3 Multiplication des signaux. Application à la modulation et la détection synchrone
 - 8.4 Guide d'onde à section rectangulaire
 - 8.5 Interféromètre de Michelson
 - 8.6 Spectroscopie à réseau
- 9. Travaux pratiques

L'enseignement de la physique en deuxième année s'inscrit dans la continuité de celui de première année. Les principes directeurs et les objectifs du programme de la première année MPSI 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 physiques 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 sept parties : électronique, mécanique du solide, électromagnétisme, physique des ondes, optique, thermodynamique et physique quantique.

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 des 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 :

Électronique, mécanique du solide, électromagnétisme, physique des ondes, optique, thermodynamique et physique quantique.

Approche théorique MP

1. Électronique : éléments de traitement du signal

Les composants électroniques au programme de seconde année MP sont les mêmes que ceux du programme de première année MPSI. En particulier, aucune connaissance particulière sur les diodes et les diodes Zener ne peut être exigée.

La composante expérimentale est très forte dans cette partie et les capacités exigibles ont vocation à être principalement développées au cours de séances de TP-cours.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- exploiter un développement en série de Fourier fourni par un formulaire pour prévoir son évolution à travers un système linéaire ;
- comprendre le rôle central de la linéarité des systèmes pour interpréter la forme du signal de sortie et relier linéarité et superposition ;
- relier les représentations temporelle et fréquentielle d'un signal ;
- illustrer expérimentalement la condition de Nyquist-Shannon ;
- expliquer et mettre en œuvre un filtrage numérique.

1.1 Composition en fréquence d'un signal périodique

Programme	Commentaire
Composition en fréquence d'un signal périodique. Théorème de Fourier. Valeur moyenne, valeur efficace, fondamental et harmoniques. Spectre d'un signal périodique.	On fait remarquer qu'un signal possède une représentation dans l'espace des temps et dans l'espace des fréquences. On attribue aux différentes harmoniques le rôle qu'elles jouent dans la forme du signal analysé.

1.2 Effet d'un filtre sur un signal périodique

Programme	Commentaire
Effet d'un filtre du premier ou du second ordre sur la composition spectrale d'un signal périodique ; utilisation de la fonction de transfert ; filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande.	On insiste sur l'intérêt de l'étude de la réponse d'un système linéaire à un signal sinusoïdal entamée en première année et on dégage l'importance du critère de linéarité du système. L'utilisation, en TP-cours et TP, des moyens numériques d'analyse harmonique permet des comparaisons immédiates entre fonction de transfert et représentation spectrale d'une réponse du système. On illustre en travaux pratiques cet effet.
Caractères moyenneur, intégrateur ou dérivateur dans un domaine limité de fréquences.	On illustre quantitativement ces différents comportements. On fait remarquer, à travers un exemple choisi, que le caractère non linéaire d'un système se manifeste par l'apparition de nouvelles fréquences en sortie pour une entrée sinusoïdale.

1.3 Électronique numérique

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

2. Mécanique du solide

Le programme de mécanique de MP vise à compléter les acquis de mécanique du cours de MPSI. Il est structuré en trois parties consacrées à la mécanique du solide et aux lois phénoménologiques de Coulomb.

Les lois de la mécanique des systèmes sont formulées pour les systèmes fermés. Aucune connaissance ne peut être exigée sur la mise en œuvre de ces lois pour un système ouvert. Les théorèmes généraux sont déduits des lois de Newton.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- conduire de manière autonome l'étude d'un problème avec ou sans frottement solide : définir un système, choisir un référentiel d'étude éventuellement non galiléen en évaluant les avantages et les inconvénients de ce choix, choisir un système de repérage, procéder à un bilan complet des forces appliquées, choisir une méthode de mise en équations lorsque plusieurs méthodes sont possibles ;
- effectuer un bilan énergétique en mécanique ;
- identifier et utiliser des grandeurs conservatives ;
- utiliser divers outils (discussions graphiques, résolution analytique, résolution numérique) pour discuter les solutions de la ou des équations différentielles modélisant l'évolution temporelle d'un

- systeme ;
- faire apparaître et exploiter des analogies : circuit RLC en électrocinétique, pendule pesant aux « petits » angles.

2.1 Cinématique du solide et des solides en contact

Cette partie est une approche de la cinématique du solide, limitée aux cas de la translation et de la rotation autour d'un axe fixe. Dans ce dernier cas, il s'agit simplement de définir le mouvement en remarquant que tout point du solide décrit un cercle autour de l'axe avec une même vitesse angulaire ω et d'expliciter la vitesse de chaque point en fonction de ω et de la distance à l'axe de rotation.

Programme	Commentaire
Définition d'un solide. Centre de masse ou d'inertie d'un solide. Champ de vitesse d'un solide. Mouvements de translation et de rotation autour d'un axe fixe. Quantité de mouvement totale ou résultante cinétique d'un solide. Lois de composition des vitesses. Solides en contact. Mouvements de glissement, de roulement et de pivotement.	On différencie un solide d'un système déformable. Les théorèmes de Guldin sont hors programme. Il s'agit de faire une approche de la cinématique du solide, limitée aux cas de la translation et de la rotation autour d'un axe fixe.

2.2 Modélisation des efforts entre solides en contact

L'étude des lois de Coulomb, limitée au seul cas de la translation, permet de mettre en œuvre un mode de raisonnement spécifique et particulièrement formateur, sans pour autant omettre les conséquences expérimentales.

Programme	Commentaire
Contact de deux solides. Lois phénoménologiques de Coulomb relatives au frottement de glissement dans le seul cas d'un solide en translation.	Les frottements de roulement et de pivotement sont hors programme. On exploite les lois de Coulomb dans les trois situations : équilibre, mise en mouvement, freinage.
Puissance totale des actions de contact. Modèle des liaisons parfaites. Liaisons rotule et pivot.	L'étude des systèmes articulés de plusieurs solides est exclusivement du ressort des sciences industrielles. On définit les liaisons rotule et pivot. On précise dans le cas d'une liaison pivot, même parfaite, que les actions de liaison ne peuvent pas en général être représentées par une seule force rencontrant l'axe.

2.3 Dynamique du solide

On introduit des exemples de dynamique du solide (translation et rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen), avec toutefois des limitations strictes : l'étude générale d'un mouvement composé d'une translation dans un référentiel galiléen et d'une rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel barycentrique ne figure pas au programme.

L'étude du mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe gardant une direction fixe dans un référentiel galiléen mais pour lequel l'axe de rotation ne serait pas fixe est exclue.

Programme	Commentaire
Théorème de la résultante cinétique. Loi de conservation de la quantité de mouvement pour un système isolé.	On souligne le lien avec la deuxième loi de Newton vue en première année.
Moment d'inertie d'un solide par rapport à un axe. Théorème d'Huygens.	L'opérateur d'inertie est hors programme. La démonstration du théorème d'Huygens est hors programme.

	On se limite à la définition et à l'utilisation du moment d'inertie. Tout calcul de moment d'inertie est hors programme.
Moment d'une force par rapport à un point ou un axe orienté. Couple.	On calcule le moment d'une force par rapport à un point ou un axe orienté. On définit un couple de forces et le moment d'un couple. On justifie le moment que la liaison pivot peut produire.
Mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe dont la direction reste fixe par rapport à un référentiel galiléen : moment cinétique, théorème scalaire du moment cinétique, énergie cinétique, théorème de l'énergie cinétique, équation horaire du mouvement. Lois de conservation du moment cinétique et de l'énergie mécanique pour un système isolé.	Le mouvement d'un solide ne peut pas faire intervenir plus d'un degré de liberté de rotation. Toute étude de l'équilibrage statique ou dynamique d'un solide en rotation est hors programme.
Pendule pesant : équation du mouvement, analogie avec l'équation de l'oscillateur harmonique, portrait de phase.	A l'aide d'une acquisition expérimentale du portrait de phase d'un pendule pesant, on précise la bifurcation entre un mouvement pendulaire et un mouvement révolitif, on met en évidence le non isochronisme des oscillations et une diminution de l'énergie mécanique.

3. Électromagnétisme

L'enseignement de l'électromagnétisme aborde trois régimes :

1. le régime statique : l'électrostatique et la magnétostatique (abordées en première année et complétées par une approche locale en deuxième année).
2. le régime lentement variable : l'induction électromagnétique dans le cadre de l'ARQP.
3. le régime variable quelconque : propagation des ondes électromagnétiques intégrée dans la partie physique des ondes.

L'étude de l'électrostatique et de la magnétostatique n'est pas centrée sur les calculs mais sur les propriétés des champs. Aucune technicité mathématique n'est recherchée dans les calculs ; ces derniers ne concernent que des situations proches du cours et d'intérêt pratique évident ; en revanche, on insiste sur la comparaison des propriétés respectives de **E** (ou **A**) et **B**.

Le formalisme quadridimensionnel, la transformation relativiste des champs, le vecteur excitation électrique **D** et le vecteur excitation magnétique **H** sont exclus.

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
- effectuer des bilans énergétiques ;
- 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.

3.1 Formulation locale des lois de l'électromagnétisme en régime statique

Programme	Commentaire
Forme locale de la conservation de la circulation du champ électrostatique. Forme locale du théorème de Gauss. Forme locale de la conservation du flux du champ magnétostatique. Forme locale du théorème d'Ampère. Equation de Poisson, équation de Laplace.	On admet la forme de la solution de l'équation de Poisson en précisant les conditions de validité. On traite des exemples simples de calcul du champ et du potentiel par les équations locales. On fait remarquer la non unicité des potentiels. On met en œuvre une méthode de résolution

	numérique fournie pour déterminer une solution à l'équation de Laplace, les conditions aux limites étant fixées.
--	--

3.2 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.	On différencie le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par le courant filiforme. La densité volumique de la force de Laplace $\mathbf{j} \wedge \mathbf{B}$ est simplement affirmée.
Travail des forces de Laplace sur un circuit filiforme fermé : flux coupé, théorème de Maxwell	Le calcul de la résultante et du moment résultant des forces de Laplace exercées sur un circuit à partir du flux magnétique ou de l'énergie magnétique est hors programme.
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 s'exerçant sur la barre conductrice en translation rectiligne sur les deux rails parallèles.
Spire rectangulaire 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 s'exerçant sur la spire.
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.

3.3 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
Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté. Loi de Faraday $e = -\frac{d\Phi}{dt}$, loi de modulation de Lenz.	On utilise la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
Cas d'un circuit fixe dans un champ magnétique non permanent : circulation du champ électrique.	
Cas d'un circuit mobile dans un champ magnétique permanent : circulation de $\mathbf{v}_e \wedge \mathbf{B}$.	On se borne à vérifier sur un exemple simple la loi de Faraday dont on affirme la généralité. On évite les situations particulières où la loi de Faraday ne s'applique pas. On fait remarquer sur un exemple simple que dans le cas d'un champ magnétique permanent la puissance de la f.e.m. induite est opposée à la puissance des forces de Laplace (conversion

	électromécanique d'énergie). On effectue le lien avec le cours d'électrocinétique de première année.
Auto-induction : flux propre et inductance propre. Induction mutuelle entre deux circuits filiformes fermés. Etude énergétique.	On effectue un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.
Énergie magnétique d'un ensemble de deux circuits électriques filiformes fermés indéformables et fixes : expression en fonction des intensités des courants et des coefficients d'inductance. Cas du régime sinusoïdal forcé.	L'expression de l'énergie magnétique en fonction de \mathbf{j} et \mathbf{A} est hors programme. On établit le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.
Conversion de puissance mécanique en puissance électrique : Rails de Laplace. Spire rectangulaire en rotation autour d'un axe fixe et placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire orthogonal à l'axe. Freinage par induction. Conversion de puissance électrique en puissance mécanique : haut-parleur électrodynamique.	On interprète qualitativement les phénomènes observés. On établit les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe. On effectue un bilan énergétique. On cite des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante. On explique l'origine des courants de Foucault et on en donne des exemples d'utilisation. On explique le principe de fonctionnement d'un haut-parleur électrodynamique dans la configuration simplifiée des rails de Laplace.

3.4 Equations 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'établir le lien avec le cours sur l'induction étudiée précédemment.

Programme	Commentaire
Densité de charge et vecteur densité volumique de courant électrique. Formulation locale de la conservation de la charge. Force de Lorentz.	
Équations de Maxwell dans le vide : formulations locale et intégrale.	On évoque le problème de la nature du référentiel par rapport auquel les équations de Maxwell sont postulées et on insiste sur le contenu physique de ces équations.
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.
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.	
Cas du régime stationnaire.	On se limite à écrire les équations de Maxwell en régime stationnaire.
Relations entre les composantes du champ électromagnétique de part et d'autre d'une interface.	On indique que les relations de passage se substituent aux équations de Maxwell dans le cas d'une modélisation surfacique.

3.5 Énergie électromagnétique

Cette partie s'intéresse à l'aspect énergétique de l'électromagnétisme. On met l'accent sur les échanges d'énergie entre la matière et le champ électromagnétique, sur la signification physique du vecteur de Poynting, sur l'utilisation du flux du vecteur de Poynting pour évaluer une puissance rayonnée à travers une surface et sur les bilans d'énergie et de puissance.

Programme	Commentaire
Densité volumique de force électromagnétique. Puissance volumique cédée par le champ aux porteurs de charge. Cas particulier d'un conducteur ohmique. Loi d'Ohm locale, densité volumique de puissance Joule.	On présente la forme locale de la loi d'Ohm comme une loi phénoménologique. La justification microscopique n'est pas demandée.
Expression de la densité volumique d'énergie électromagnétique. Vecteur de Poynting. Bilan d'énergie électromagnétique : équations intégrale et locale de conservation de l'énergie électromagnétique (identité de Poynting)	On peut affirmer l'expression de la densité d'énergie électromagnétique sur les exemples du condensateur plan et du solénoïde infini. On affirme la signification physique du vecteur de Poynting.

4. Physique des ondes

L'étude des ondes transversales sur une corde vibrante constitue une introduction à la physique des ondes.

L'étude de la propagation des ondes électromagnétiques est limitée au vide, au plasma et à un conducteur métallique (effet de peau, absorption).

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 ;
- interpréter l'expression à grande distance du champ électromagnétique d'un dipôle électrique oscillant.

4.1 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 mécaniques.	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.	

4.2 Propagation du champ électromagnétique

Programme	Commentaire
Équations de propagation des champs 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.	On associe à chaque domaine du spectre des ondes électromagnétiques des applications.
États de polarisation d'une onde plane progressive monochromatique.	Les polariseurs et les lames à retard sont introduits de façon simple en TP.
Propagation d'une onde plane transverse progressive monochromatique dans un plasma. Fréquence de coupure. Dispersion, relation de dispersion, vitesse de phase et vitesse de groupe. Cas de l'ionosphère.	Le plasma est considéré comme un milieu dilué localement neutre et dont les charges sont sans interaction entre elles et où les ions sont immobiles. L'objectif de cette étude est d'introduire la notion de dispersion. L'étude de la propagation dans les milieux matériels est hors programme.
Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu ohmique en régime lentement variable. Effet de peau.	

4.3 Réflexion sous incidence normale d'une onde électromagnétique sur un conducteur parfait

Programme	Commentaire
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. Onde stationnaire.	On limite l'étude à celle des champs de l'onde réfléchie et de l'onde stationnaire.
Applications aux cavités à une dimension. Mode d'onde stationnaire.	On utilise la méthode de séparation des variables.

4.4 Guide d'onde à section rectangulaire

Programme	Commentaire
Guide d'ondes infini à section rectangulaire.	Cette partie est étudiée en TP-cours.

4.5 Rayonnement dipolaire

Programme	Commentaire
Structure à grande distance du champ électromagnétique d'un dipôle électrique oscillant.	On admet les expressions des potentiels retardés. La mémorisation des résultats n'est pas exigible. Cependant, l'élève doit connaître les étapes qui conduisent à ces résultats, justifier le choix du modèle du dipôle oscillant et citer des exemples dans différents domaines.

Puissance rayonnée. Indicatrice de rayonnement.	On se limite à présenter les expressions de E et B uniquement dans la zone de rayonnement définie par $r \gg \lambda$. On explique certaines propriétés optiques de l'atmosphère (couleur du ciel, du Soleil couchant, polarisation,...) en lien avec le thème du rayonnement dipolaire.
---	--

5. Optique

On se restreint au domaine d'approximation où une description de la lumière par des ondes scalaires est suffisante.

Le formalisme utilisé en optique a son importance dans la modélisation des phénomènes décrits. On veillera donc à privilégier les aspects expérimentaux et à utiliser tous les supports de visualisation (expériences de cours, simulations, animations,...) pour aider les élèves dans la construction de leurs représentations.

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.

Le théorème de Malus-Dupin, outil nécessaire à l'étude de l'optique ondulatoire, est admis.

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.

5.1 Modèle scalaire des ondes lumineuses

Programme	Commentaire
Modèle scalaire des ondes lumineuses. Chemin optique le long d'un rayon lumineux et retard de phase associé.	On admet qu'une onde lumineuse monochromatique peut être décrite par une onde scalaire progressive, composante du champ électrique, qui se propage le long du rayon lumineux.
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.	On définit les surfaces d'ondes relatives à une source ponctuelle S par l'ensemble des points M tels que $(SM) = \text{constante}$. 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.

5.2 Interférences des ondes lumineuses

5.2.1 Interférences non localisées de deux ondes totalement cohérentes

Programme	Commentaire
Superposition de deux ondes lumineuses. Cohérence mutuelle. Notions de trains d'ondes. 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

Formule de Fresnel : $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi)$.	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) de la figure d'interférences. 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.
Applications : - trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif : source à distance finie et observation à grande distance finie et à l'infini, perte de contraste par élargissement angulaire de la source ; - interféromètre de Michelson.	On justifie que les franges ne sont pas localisées. On compare expérimentalement les deux dispositifs, trous d'Young et fentes d'Young, en mettant en évidence les analogies et les différences. 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 utilisant des lentilles et/ou des prismes (miroirs de Fresnel, bilentilles de Billet, de Meslin, biprisme de Fresnel ...) peut être faite en travaux dirigés. On montre l'équivalence, du point de vue chemin optique, de ces dispositifs avec celui des trous d'Young.

5.2.2 Interférences localisées de deux ondes totalement cohérentes

Programme	Commentaire
Interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue. Localisation (constatée) des franges. Franges d'égale inclinaison. Franges d'égale épaisseur. Défilement des franges d'interférences.	On se limite au seul cas où le dispositif interférentiel est l'interféromètre de Michelson. On fait remarquer expérimentalement que la localisation des franges est liée à l'étendue spatiale de la source. Toute étude générale de la localisation est exclue. On montre l'équivalence de l'interféromètre de Michelson à une lame d'air à faces parallèles ou à un coin d'air.
Interférences en lumière polychromatique : cas d'un doublet, cas d'une source à profil rectangulaire. Notion élémentaire de cohérence temporelle.	On étudie simplement l'influence de la largeur spectrale d'une source sur le contraste du système de franges d'interférences et on relie cette largeur à la longueur de cohérence. La théorie générale de la cohérence temporelle est hors programme.

5.3 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, d'une pupille circulaire.	Dans le cas de la pupille circulaire, on présente qualitativement l'allure de la figure de diffraction à

Limite de l'optique géométrique. Critère de Rayleigh.	l'infini et on souligne 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, par une fente-source parallèle : influence de la largeur de la fente-source sur la visibilité des franges.	

5.4 Étude du réseau plan

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

6. Thermodynamique

Le cours de thermodynamique en deuxième année MP est consacré à la conduction (ou diffusion) thermique et à des éléments de thermodynamique statistique en relation avec le cours de thermodynamique de première année. Il est souhaitable, à l'occasion d'exercices ou de problèmes, de reprendre certains acquis de thermodynamique (en particulier les premier et second principes) enseignés en première année.

6.1 Conduction thermique

Le cours de conduction thermique permet un réinvestissement du cours de thermodynamique de MPSI 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.

L'étude du rayonnement thermique se limite à l'introduction du vocabulaire relatif à ce mode de transfert et à l'affirmation de la loi de Wien et celle de Stefan. Toute étude théorique du rayonnement thermique est hors programme.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- identifier la nature des transferts thermiques sous forme globale et locale ;
- réaliser des bilans d'énergie ;
- 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}_Q . Conductivité thermique. Loi phénoménologique de Fourier relative à la conduction 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 sans terme de source. Analyse dimensionnelle. Généralisation de l'équation de la diffusion en présence d'un terme de source.	On établit, à l'aide du premier principe appliqué à un volume élémentaire, l'équation de la diffusion thermique. On se limite à des problèmes unidimensionnels en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique. On signale la relation de l'équation de diffusion avec l'irréversibilité temporelle du phénomène. On analyse l'équation de diffusion en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle. On admet une généralisation en géométrie quelconque en utilisant les opérateurs divergence et laplacien et leurs expressions fournies. On donne le terme source local et intégral correspondant à l'effet Joule.
Conditions aux limites : continuité du flux thermique,	Les transferts thermiques à l'interface entre un

continuité de la température pour un contact thermique parfait, loi de Newton. Coefficient de transfert thermique de surface h .	fluide et une paroi solide sont décrits par l'expression phénoménologique $\varphi = h(T_{\text{Paroi}} - T_{\text{Fluide}})$, appelée loi de Newton. On met en œuvre une méthode de résolution numérique fournie pour déterminer une solution à l'équation de la diffusion thermique, les conditions aux limites et les conditions initiales étant fixées.
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. Seule la mémorisation de l'expression de la résistance thermique d'un barreau cylindrique calorifugé latéralement est exigible.
Rayonnement thermique : milieux transparents et milieux opaques, notions qualitatives d'absorption, de réflexion, de transmission et d'émission de rayonnement. Flux hémisphérique. Flux partant et flux radiatif. Équilibre radiatif. Flux surfacique émis par un matériau absorbeur intégral (dit "corps noir") isotherme. Bilan radiatif à la paroi d'un corps noir isotherme convexe recevant un flux connu ou un rayonnement d'équilibre.	On ne considère la propagation de rayonnement que dans un milieu non absorbant. La loi de Planck est hors programme. On se limite à des corps totalement transparents ou totalement absorbants quelles que soient la longueur d'onde et la direction. On admet les lois de Wien et Stefan. La linéarisation du flux radiatif à la paroi d'un corps noir en fonction de la différence des températures permet de revenir sur le coefficient de transfert de surface h et d'évaluer un ordre de grandeur de la contribution radiative.

6.2 Éléments de thermodynamique statistique

Il s'agit dans cette partie de relier certaines propriétés macroscopiques d'un système constitué d'un grand nombre de particules avec celles des constituants microscopiques.

Le facteur de Boltzmann est introduit de manière inductive à partir du modèle d'atmosphère isotherme. L'étude des systèmes à spectre discret d'énergies est l'occasion de montrer, qu'à température donnée, l'énergie fluctue et que les fluctuations relatives diminuent avec la taille du système. L'étude des systèmes à deux niveaux, conduite de manière plus exhaustive, permet une analyse plus fine des phénomènes. Le théorème d'équipartition de l'énergie est l'occasion de procéder à une évaluation des capacités thermiques des gaz et des solides. Soulignons que le calcul de la pression cinétique et la théorie cinétique des gaz ne relèvent pas du programme.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- évaluer certaines grandeurs macroscopiques en fonction de paramètres microscopiques ;
- mettre en œuvre des modes de raisonnement relevant du domaine de l'analyse statistique et probabiliste ;
- relier l'étude des systèmes à spectre discret d'énergies avec le phénomène de quantification de l'énergie vu dans le cours d'introduction à la physique quantique (chimie MPSI) ;
- affiner la compréhension de certaines grandeurs de la thermodynamique classique comme l'énergie, la température, la capacité thermique.

6.2.1 Facteur de Boltzmann

Programme	Commentaire
Échelles microscopique, mésoscopique et macroscopique.	On définit chacune de ces échelles et on en explique la pertinence.
Modèle de l'atmosphère isotherme.	On rappelle la variation de la pression avec l'altitude dans l'hypothèse d'une atmosphère isotherme déjà vue en première année.
Poids de Boltzmann d'une particule indépendante à l'équilibre avec un thermostat.	On interprète la loi du nivellement barométrique avec le poids de Boltzmann. On compare le terme $k_B T$ à des écarts d'énergie et on estime les conséquences d'une variation de température.

6.2.2 Systèmes à spectre discret d'énergies

Programme	Commentaire
Probabilité d'occupation d'un état d'énergie non dégénéré par une particule indépendante.	On exprime la probabilité d'occupation d'un état d'énergie en utilisant la condition de normalisation. On exploite un rapport de probabilités entre deux états.
Énergie moyenne et écart quadratique moyen.	On exprime sous forme d'une somme sur ses états l'énergie moyenne et l'écart-quadratique énergétique d'un système.
Cas d'un système à N particules indépendantes.	On explique pourquoi les fluctuations relatives d'énergie régressent quand la taille du système augmente et on associe cette régression au caractère quasi-certain des grandeurs thermodynamiques.
Système à deux niveaux non dégénérés d'énergies $\pm \varepsilon$.	On donne des exemples de systèmes modélisables par un système à deux niveaux et on détermine l'énergie moyenne et la capacité thermique de ce système. On interprète l'évolution de l'énergie moyenne avec la température, notamment les limites basse et haute température. On relie les fluctuations d'énergies à la capacité thermique.

6.2.3 Capacités thermiques classiques des gaz et des solides

Programme	Commentaire
Théorème d'équipartition pour un degré de liberté énergétique indépendant quadratique.	
Capacité thermique molaire des gaz classiques dilués monoatomiques et diatomiques. Capacité thermique molaire des solides dans le modèle d'Einstein classique : loi de Dulong et Petit.	On dénombre les degrés de libertés énergétiques quadratiques indépendants et en on déduit la capacité thermique molaire d'un système.

7. Physique 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 MPSI.

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. 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.

Dans un deuxième temps, on donne aux étudiants leurs premiers outils quantitatifs d'analyse. Le cœur de cet enseignement est construit sur la mécanique ondulatoire de Schrödinger et propose des résolutions complètes d'exemples simples mais fondamentaux pour la bonne compréhension de problèmes plus complexes : particule dans une marche de potentiel et effet tunnel, particule dans un puits de potentiel infini et quantification de l'énergie d'une particule confinée.

On se limitera à l'introduction heuristique de la dualité onde/particule et de la densité de courant de probabilité pour une particule libre sans développer la notion de paquet d'ondes. L'accent doit être mis sur l'interprétation et l'exploitation des résultats et non pas sur les calculs, non exigibles pour l'exemple plus délicat de la barrière de potentiel. Le professeur pourra au contraire, s'il le souhaite, proposer des analyses de graphes, des exploitations de formules analytiques fournies, des estimations numériques, des simulations... afin d'aborder des modélisations plus réalistes.

Les objectifs généraux de cette partie sont :

- mettre en relation les effets quantiques avec les prédictions classiques ;
- mobiliser les 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 ;
- utiliser le principe de superposition.

7.1 Introduction au monde quantique

Programme	Commentaire
Principes et limites de la mécanique classique. Dualité onde-particule pour la lumière et la matière. Principe d'incertitude de Heisenberg. 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.
Quantification de l'énergie d'une particule libre confinée 1D.	On cherche les niveaux d'énergie par analogie avec les modes propres d'une corde vibrante. On établit le lien qualitatif entre confinement spatial et quantification.

7.2 Equation de Schrödinger

Programme	Commentaire
Fonction d'onde Ψ d'une particule sans spin et densité de probabilité de présence. Équation de Schrödinger à une dimension dans un potentiel $V(x)$. États stationnaires de l'équation de Schrödinger.	On interprète en termes de probabilité l'amplitude d'une onde associée à une particule. On utilise le caractère linéaire de l'équation (principe de superposition). On procède à la séparation des variables temps et espace. On distingue l'onde associée à un état stationnaire en mécanique quantique d'une onde stationnaire au sens usuel de la physique des ondes. On relie l'énergie de la particule à l'évolution temporelle de sa fonction d'onde et on fait le lien avec la relation de Planck-Einstein. On identifie le terme associé à l'énergie cinétique.

7.3 Particule libre

Programme	Commentaire
Fonction d'onde d'une particule libre non localisée. Relation de De Broglie. Densité de courant de probabilité $\mathbf{J} = \Psi ^2 \frac{\hbar \mathbf{k}}{m}$. Inégalité d'Heisenberg spatiale et paquet d'ondes.	On interprète la difficulté de normalisation de cette fonction d'onde. On relie l'énergie de la particule et le vecteur d'onde de l'onde plane associée. On interprète et on exploite l'expression fournie de la densité de courant de probabilité par analogie avec la densité de courant électrique. On explique, en s'appuyant sur l'inégalité d'Heisenberg spatiale, que la localisation de la particule peut s'obtenir par superposition d'ondes planes.

7.4 États stationnaires d'une particule dans des potentiels constants par morceaux

Programme	Commentaire
États stationnaires d'une particule dans le cas d'une marche de potentiel.	On cite des exemples physiques illustrant cette problématique. On exploite les conditions de continuité (admissibles) relatives à la fonction d'onde.

Cas $E > V$: probabilité de transmission et de réflexion. Cas $E < V$: évanescence.	On établit la solution dans le cas d'une particule incidente sur une marche de potentiel. On explique les différences de comportement par rapport à une particule classique. On détermine les coefficients de transmission et de réflexion en utilisant les courants de probabilités. On reconnaît l'existence d'une onde évanescente et on la caractérise.
Barrière de potentiel et effet tunnel.	On décrit qualitativement l'influence de la hauteur ou de la largeur de la barrière de potentiel sur le coefficient de transmission. On explique le rôle de l'effet tunnel dans la radioactivité α ou la microscopie à effet tunnel en utilisant le coefficient de transmission fourni.
États stationnaires d'une particule dans un puits de potentiel infini.	On établit les solutions et les niveaux d'énergie de la particule confinée. On identifie les analogies avec la corde vibrante.
Énergie de confinement.	On estime l'énergie d'une particule confinée dans son état fondamental pour un puits non rectangulaire. On associe l'analyse à l'inégalité d'Heisenberg.

7.5 États non stationnaires d'une particule

Programme	Commentaire
Combinaison linéaire d'états stationnaires. Expression de la densité de probabilité de présence de la particule dans le cas d'une superposition de deux états stationnaires ; interprétation du résultat.	On explique qu'une superposition de deux états stationnaires engendre une évolution au cours du temps de l'état de la particule. En utilisant un logiciel dédié, on décrit l'évolution temporelle d'une particule confinée (puits infini, oscillateur harmonique,...).

Approche expérimentale MP

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 et 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 comprend les TP et les TP-cours.

8. 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.

8.1 Analyse spectrale

Ce TP-cours est traité en parallèle avec le cours correspondant.

Programme	Commentaire
Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier.	On admet le théorème de Fourier. On donne la décomposition en série de Fourier des signaux sinusoïdal, carré et triangulaire.
Caractéristiques d'un signal périodique : valeur moyenne, valeur efficace, valeur efficace vraie, fréquence fondamentale et harmonique.	On détermine ces caractéristiques pour des signaux usuels : signal sinusoïdal avec composante continue, rectangulaire et triangulaire.
Effet d'un filtre linéaire sur un signal périodique.	On interprète le spectre du signal de sortie à partir du spectre du signal d'entrée et de la fonction de transfert du filtre. On utilise un logiciel et/ou un oscilloscope numérique.

8.2 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. Il constitue une initiation au traitement numérique des signaux à travers les points suivants : l'échantillonnage et le repliement de spectre, la conversion analogique/numérique et le filtrage numérique. Le phénomène de repliement de spectre est présenté qualitativement au moyen d'illustrations démonstratives, l'objectif étant de mettre en place la condition de Nyquist-Shannon afin de réaliser convenablement une acquisition numérique. Un filtrage numérique, du type passe-bas, est réalisé à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique et d'un traitement numérique, un convertisseur numérique/analogique restitue ensuite un signal de sortie analogique.

Le professeur introduira les thèmes proposés au fur et à mesure des besoins et en relation avec les autres sujets d'étude.

Programme	Commentaire
Échantillonnage : réalisation, choix de la fréquence d'échantillonnage, théorème de Nyquist-Shannon, 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.	On réalise de manière comparative un filtre analogique passe-bas et un filtre numérique remplissant la même fonction. On met en œuvre un convertisseur analogique/numérique et un traitement numérique afin de réaliser un filtre passe-bas.
Restitution d'un signal analogique.	On utilise un convertisseur numérique/analogique pour restituer un signal analogique.

8.3 Multiplication des signaux. Application à la modulation et la détection synchrone

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
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 $v_s(t) = k \cdot v_{e1}(t) \cdot v_{e2}(t)$, 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.
Application à la modulation d'amplitude :	
Intérêt de la modulation.	On explique l'intérêt de la modulation analogique dans la transmission des signaux.
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.	

8.4 Guide d'onde à section rectangulaire

Programme	Commentaire
Aspect théorique :	

Guide d'ondes infini à section rectangulaire. Structure du champ électrique guidé. Modes de propagation dans le guide. Dispersion. Vitesse de phase. Vitesse de et la présence d'une fréquence de coupure groupe.	On cherche la structure du champ électromagnétique des modes TE_{n0} . On montre que le phénomène de dispersion sont dus aux conditions aux limites.
Aspect expérimental :	
Présentation de l'ensemble pour l'étude des ondes électromagnétiques guidées. Source hyperfréquence, détection et modulation, modes de propagation, longueur d'onde et vitesse de phase à l'intérieur du guide d'onde. Mesure de puissance, d'impédance, taux d'ondes stationnaires et de l'atténuation.	Aucune connaissance sur les différents éléments n'est exigible. On étudie expérimentalement une source hyperfréquence fonctionnant par résistance négative.

8.5 Interféromètre de Michelson

Programme	Commentaire
Présentation de l'appareil : miroirs, séparatrice, compensatrice, vis de réglages.	On fait remarquer le rôle de chaque élément de l'appareil.
Réglage de l'appareil en lame d'air à faces parallèles avec une source spectrale étendue : franges d'égalé inclinaison, conditions d'éclairage et d'observation, défilement des anneaux.	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 source spectrale étendue : franges d'égalé épaisseur. Conditions d'éclairages et d'observation.	Les interférences en lumière polarisée sont hors programme.

8.6 Spectroscopie à réseau

Ce TP-cours est l'occasion de rappeler les constituants et le fonctionnement du goniomètre vu en première année.

Programme	Commentaire
Superposition de N ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique. Formule des réseaux plans par transmission.	On établit la relation fondamentale des réseaux liant la condition d'interférences constructives à l'expression de la différence de marche entre deux ondes issues de motifs consécutifs. On établit la demi-largeur $2\pi/N$ des pics principaux de la courbe d'intensité en fonction du déphasage.
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
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.
--	--

9. 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	Pendule pesant. Mesure d'un moment d'inertie.
2	Etude des défauts de l'amplificateur opérationnel.
3	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.
4	Oscillateur auto-entretenu quasi sinusoïdal.
5	Conversion alternatif-continu.
6	Oscillateur de relaxation.
7	Montages à amplificateur opérationnel (intégration, dérivation).
8	Effet d'un filtre linéaire sur un signal périodique.
9	Étude d'un guide d'onde centimétrique.
10	Propagation libre d'une onde électromagnétique.
11	Polarisation des ondes lumineuses.
12	Interférence et diffraction des ondes lumineuses.
13	Mesures optiques à l'aide de l'interféromètre de Michelson. Mise en œuvre d'un photodétecteur (photorésistance, capteur CCD) en sortie d'un interféromètre.
14	Mesure de longueurs d'onde optique, centimétriques, mécanique et acoustique. Études de spectre à l'aide d'un spectromètre à fibre optique.