

---

# PROGRAMME DE PHYSIQUE

## SECTIONS MP et PT

### DEUXIÈME ANNÉE

---

## FORMATION DISCIPLINAIRE

### 1. Éléments de traitement du signal

Dans la partie intitulée « signaux périodiques », l'accent est mis sur l'action d'un filtre linéaire sur un signal périodique, l'objectif étant de comprendre le rôle central de la linéarité des systèmes pour interpréter la forme du signal de sortie.

La partie à vocation expérimentale, 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.

Les compétences suivantes seront développées dans cette partie du programme :

- exploiter la décomposition sinusoïdale d'un signal pour prévoir son évolution à travers un système linéaire ;
- relier les représentations temporelle et fréquentielle d'un signal ;
- illustrer expérimentalement la condition de Shannon ;
- expliquer et mettre en œuvre un filtrage numérique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1.1. Signaux périodiques</b>	
Signaux périodiques.	<i>Commenter le spectre d'un signal périodique : selon leur rang, attribuer aux différents harmoniques le rôle qu'elles jouent dans la forme du signal analysé.</i>  <i>Savoir que le carré de la valeur efficace d'un signal périodique est la somme des carrés des valeurs efficaces de ses harmoniques.</i>
Action d'un filtre linéaire du premier ou du second ordre sur un signal périodique.	<i>Prévoir l'effet d'un filtrage linéaire sur la composition spectrale d'un signal périodique.</i>  <i>Expliciter les conditions pour obtenir un comportement intégrateur ou dérivateur.</i>

	<p><i>Mettre en œuvre un dispositif expérimental illustrant l'action d'un filtre sur un signal périodique.</i></p> <p><i>Détecter le caractère non linéaire d'un système par l'apparition de nouvelles fréquences en sortie pour une entrée sinusoïdale.</i></p>
<b>1.2. Électronique numérique</b>	
<p>Échantillonnage : fréquence d'échantillonnage, théorème de Shannon.</p> <p>Filtrage numérique.</p>	<p><i>Réaliser l'échantillonnage d'un signal numérique. Commenter la structure du spectre du signal obtenu après échantillonnage.</i></p> <p><i>Choisir la fréquence d'échantillonnage afin de respecter la condition de Shannon.</i></p> <p><i>Mettre en évidence le phénomène de repliement de spectre au moyen d'un oscilloscope numérique ou d'un logiciel de calcul numérique.</i></p> <p><i>Mettre en œuvre un convertisseur analogique/numérique et un traitement numérique afin de réaliser un filtre passe-bas ; utiliser un convertisseur numérique/analogique pour restituer un signal analogique.</i></p>

## 2. INDUCTION ET FORCES DE LAPLACE

**La notion du champ électromoteur ne relève pas du programme.**

### 2.1 ACTIONS D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE

NOTIONS ET CONTENUS	CAPACITES EXIGIBLES
Densité de la force de Laplace dans les différents types de distributions de courant (linéique, surfacique et volumique).	<p><i>Connaître la notion de densité surfacique de courant. Le calcul de l'intensité de courant à travers un segment ne relève pas du programme.</i></p> <p><i>Différencier le champ magnétique extérieur subi du champ magnétique propre créé par la distribution de courant.</i></p>
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 à la barre.	<p><i>Établir et connaître l'expression de la résultante des forces de Laplace dans le cas d'une barre conductrice placée dans un champ magnétique extérieur uniforme et stationnaire.</i></p> <p><i>Évaluer la puissance des forces de Laplace.</i></p>
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.	<p><i>Établir et connaître l'expression du moment du couple subi en fonction du champ magnétique extérieur et du moment magnétique de la spire rectangulaire.</i></p>

Effet moteur d'un champ magnétique tournant.	<i>Créer un champ magnétique tournant à l'aide de deux ou trois bobines et mettre en rotation une aiguille aimantée.</i>
--	--

## 2.2 LOIS DE L'INDUCTION

Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.	<i>Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.</i>
Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.	<i>Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.</i>
Loi de modération de Lenz. Force électromotrice induite, loi de Faraday.	<i>Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés. Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.</i>

### a. CIRCUIT FIXE DANS UN CHAMP MAGNETIQUE QUI DEPEND DU TEMPS

Auto-induction. Flux propre et inductance propre.	<i>Différencier le flux propre des flux extérieurs. Utiliser la loi de modération de Lenz. Évaluer et connaître l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur, le champ magnétique créé par une bobine infinie étant donné. Mesurer la valeur de l'inductance propre d'une bobine.</i>
Étude énergétique	<i>Conduire 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.</i>
Cas de deux bobines en interaction. Inductance mutuelle entre deux bobines.	<i>Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale », le champ magnétique créé par une bobine infinie étant donné.</i>
Circuits électriques à une maille couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.	<i>Connaître des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante. Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.</i>
Transformateur de tension.	<i>Établir la loi des tensions</i>
Étude énergétique.	<i>Conduire un bilan de puissance et d'énergie.</i>

### b. CIRCUIT MOBILE DANS UN CHAMP MAGNETIQUE STATIONNAIRE

Conversion de puissance mécanique en puissance électrique.	
--	--

<p>Rail de Laplace. Spire rectangulaire soumise à un champ magnétique extérieur uniforme et en rotation uniforme autour d'un axe fixe orthogonal au champ magnétique.</p> <p>Freinage par induction.</p>	<p><i>Interpréter qualitativement les phénomènes observés.</i></p> <p><i>Écrire les équations électrique et mécanique en précisant les conventions de signe.</i></p> <p><i>Effectuer un bilan énergétique.</i></p> <p><i>Connaître des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.</i></p> <p><i>Expliquer l'origine des courants de Foucault et en connaître des exemples d'utilisation.</i></p> <p><i>Mettre en évidence qualitativement les courants de Foucault.</i></p>
<p>Conversion de puissance électrique en puissance mécanique</p> <p>Moteur à courant continu à entrefer plan.</p> <p>Haut-parleur électrodynamique.</p>	<p><i>Décrire qualitativement le principe du moteur à courant continu à entrefer plan.</i></p> <p><i>Citer des exemples d'utilisation du moteur à courant continu.</i></p> <p><i>Expliquer le principe de fonctionnement d'un haut-parleur électrodynamique.</i></p> <p><i>Effectuer un bilan énergétique.</i></p>

### 3. ÉQUATIONS DE MAXWELL

**La loi de Biot et Savart et la notion de potentiel vecteur ne relèvent pas du programme.**

**Les relations de passage relatives au champ électromagnétique sont données.**

Les compétences suivantes seront développées dans cette partie du programme :

- énoncer des lois de l'électromagnétisme sous formes locale et intégrale et faire le lien entre les deux formulations ;
- conduire des bilans énergétiques mettant en jeu matière et champ électromagnétique ;
- associer au phénomène de propagation un couplage entre les champs, une équation locale et des solutions dans des cas simples ;
- décrire la propagation d'une onde électromagnétique dans le vide et dans un milieu dispersif ;
- relier un champ électromagnétique à ses sources dans le cas d'un dipôle oscillant.

Le principe de relativité d'Einstein est introduit en termes d'invariance des lois de la physique, mécanique et électromagnétisme, par changement de référentiel galiléen ; **celui-ci est simplement énoncé et ne doit en aucun cas faire l'objet de développements calculatoires.** On peut souligner que l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide par changement de référentiel galiléen peut se déduire de l'invariance des équations de Maxwell.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Équations de Maxwell	

Principe de la conservation de la charge : formulation locale.	<i>Établir l'équation locale de la conservation de la charge.</i>
Équations de Maxwell : formulations locale et intégrale.	<i>Interpréter qualitativement le lien entre l'équation de Maxwell-Faraday et la loi de Faraday.</i>  <i>Écrire, utiliser et interpréter les équations de Maxwell sous forme intégrale.</i>  <i>Faire le lien entre les deux formulations.</i>  <i>Relier qualitativement le couplage spatio-temporel entre champ électrique et champ magnétique au phénomène de propagation.</i>  <i>Vérifier la cohérence des équations de Maxwell avec l'équation locale de la conservation de la charge.</i>
Équations de propagation des champs dans une région vide de charges et de courants.	<i>Établir les équations de propagation à partir des équations de Maxwell.</i>
Principe de relativité d'Einstein : invariance des lois de la physique (mécanique et électromagnétisme) par changement de référentiel galiléen.	<i>Énoncer le principe de relativité d'Einstein et relier l'invariance par changement de référentiel galiléen de la vitesse de la lumière dans le vide à celle des équations de Maxwell.</i>  <b>Approche documentaire :</b> <i>utiliser la transformation de Lorentz-Poincaré pour illustrer le caractère relatif du temps.</i>
Cas des champs statiques : équations locales.	<i>Établir les lois locales des champs statiques à partir des équations de Maxwell.</i>
Équation de Poisson et équation de Laplace de l'électrostatique.	<i>Établir les équations de Poisson et de Laplace de l'électrostatique.</i>  <b>Approche numérique :</b> <i>mettre en œuvre une méthode de résolution numérique pour déterminer une solution à l'équation de Laplace, les conditions aux limites étant données.</i>

#### **4. Énergie du champ électromagnétique**

L'accent est mis sur les échanges d'énergie entre la matière et le champ électromagnétique, 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.

<b>Notions et contenus</b>	<b>Capacités exigibles</b>
<b>1 Énergie du champ électromagnétique</b>	
Densité volumique de force électromagnétique. Puissance volumique cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge.	<i>Établir et utiliser l'expression de la puissance volumique cédée par le champ électromagnétique aux porteurs de charge.</i>
Loi d'Ohm locale ; densité volumique de puissance Joule.	<i>Analyser les aspects énergétiques dans le cas particulier d'un milieu ohmique.</i>

<p>Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de Poynting : bilan d'énergie.</p>	<p><i>Connaître des ordres de grandeur de flux énergétiques moyens (flux solaire, laser,...)</i></p> <p><i>Utiliser le flux du vecteur de Poynting à travers une surface orientée pour évaluer la puissance rayonnée.</i></p> <p><i>Effectuer un bilan d'énergie sous forme locale et intégrale.</i></p> <p><i>Interpréter chaque terme de l'équation locale de Poynting.</i></p>
--	---

## 5 : Propagation et rayonnement

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>Propagation et rayonnement</b>	
<p>Onde plane dans l'espace vide de charge et de courant ; onde plane progressive et aspects énergétiques.</p>	<p><i>Citer les solutions de l'équation de d'Alembert à une dimension.</i></p> <p><i>Décrire la structure d'une onde plane et d'une onde plane progressive dans l'espace vide de charge et de courant.</i></p>
<p>Onde plane progressive monochromatique.</p> <p>Etats de polarisation d'une onde plane monochromatique.</p> <p>Onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement.</p>	<p><i>Expliquer le caractère idéal du modèle de l'onde plane monochromatique.</i></p> <p><i>Citer les domaines du spectre des ondes électromagnétiques et leur associer des applications.</i></p> <p><i>Reconnaitre la nature de la polarisation d'une onde.</i></p> <p><b>Utiliser des polariseurs et étudier quantitativement la loi de Malus.</b></p>
<p>Propagation d'une onde plane progressive monochromatique dans un plasma localement neutre et peu dense. Vitesse de phase, vitesse de groupe. Cas de l'ionosphère.</p>	<p><i>Utiliser la notation complexe et établir la relation de dispersion.</i></p> <p><i>Définir le phénomène de dispersion.</i></p> <p><i>Expliquer la notion de fréquence de coupure et donner son ordre de grandeur dans le cas de l'ionosphère.</i></p> <p><i>Décrire la propagation d'un paquet d'ondes dans un milieu linéaire dispersif par superposition d'ondes planes progressives monochromatiques.</i></p> <p><i>Calculer la vitesse de groupe à partir de la relation de dispersion. Associer la vitesse de groupe à la propagation de l'enveloppe du paquet d'ondes.</i></p> <p><b>Approche documentaire :</b> à l'aide de données sur</p>

	<i>l'ionosphère illustrer quelques aspects des télécommunications.</i>
<p>Régime lentement variable (ARQS)</p> <p>Propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu ohmique en régime lentement variable. Effet de peau.</p> <p>Réflexion sous incidence normale d'une onde plane, progressive et monochromatique polarisée rectilignement sur un plan conducteur parfait. Onde stationnaire.</p> <p>Applications aux cavités à une dimension. Mode d'onde stationnaire.</p>	<p><i>Connaitre que le retard lié à la propagation est négligeable devant le temps caractéristique d'évolution des sources.</i></p> <p><i>Établir et interpréter l'expression de la grandeur caractéristique d'atténuation de l'onde électromagnétique dans un milieu ohmique.</i></p> <p><i>Établir l'expression de l'onde réfléchie en exploitant les relations de passage fournies.</i></p> <p><i>Interpréter qualitativement la présence de courants localisés en surface.</i></p> <p><i>Reconnaître et caractériser une onde stationnaire.</i></p> <p><i>Utiliser la méthode de séparation des variables.</i></p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques.</b></p>
<p>Champ électromagnétique rayonnée par un dipôle oscillant dans la zone de rayonnement. Puissance rayonnée.</p>	<p><i>Justifier le choix du modèle du dipôle oscillant et citer des exemples dans différents domaines.</i></p> <p><i>Formuler et commenter les approximations reliant les trois échelles de longueur pertinentes.</i></p> <p><i>Analyser la structure du champ électromagnétique rayonné, les expressions des champs étant fournies, en utilisant des arguments généraux : symétrie, conservation de l'énergie et analyse dimensionnelle.</i></p> <p><i>Conduire un bilan énergétique, les expressions des champs étant fournies.</i></p> <p><i>Construire le diagramme de rayonnement (indicatrice de rayonnement).</i></p> <p><b>Détecter une onde électromagnétique rayonnée.</b></p> <p><b>Approche documentaire :</b> Expliquer certaines propriétés optiques (couleur du ciel, du Soleil couchant, polarisation,...) de l'atmosphère en lien avec le thème du rayonnement dipolaire.</p>

## 6. Optique

Les compétences suivantes seront développées dans cette partie du programme :

- 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, interfrange) 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, durée d'un train d'onde, temps de réponse d'un capteur) ; faire le lien avec les problèmes de cohérence ;
- maîtriser les outils de l'optique géométrique (rayon lumineux, principe du retour inverse, lois de conjugaison) et de l'optique ondulatoire (chemin optique, surface d'onde, théorème de Malus) afin de conduire un calcul de différence de marche entre deux rayons lumineux dans des situations simples ;
- Relier, pour le dispositif des trous d'Young, le manque de cohérence de la source primaire à la diminution de la visibilité.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>6.1. Modèle scalaire des ondes lumineuses</b>	
Chemin optique. Déphasage dû à la propagation. Surfaces d'ondes. Théorème de Malus (admis).	<i>Exprimer le retard de phase en un point (par rapport à un autre) en fonction de la durée de propagation ou du chemin optique.</i>
Onde plane, onde sphérique ; effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss.	<i>Associer une description de la formation des images en termes de rayon lumineux et en termes de surfaces d'onde.</i>  <i>Utiliser la propriété énonçant que le chemin optique séparant deux points conjugués est indépendant du rayon lumineux choisi.</i>
Modèle d'émission. Relation (admise) entre la durée des trains d'ondes et la largeur spectrale.	<i>Connaître l'ordre de grandeur du temps de cohérence <math>\Delta t</math> de quelques sources lumineuses. Utiliser la relation <math>\Delta f \cdot \Delta t \approx 1</math> pour lier la durée des trains d'ondes et la largeur spectrale <math>\Delta \lambda</math> de la source.</i>
Détecteurs. Intensité lumineuse.	<i>Exploiter la propriété qu'un capteur lumineux quadratique fournit un signal proportionnel à l'énergie lumineuse reçue pendant son temps de réponse.</i>  <i>Connaître l'ordre de grandeur du temps de réponse de quelques capteurs lumineux.</i>  <b>Mettre en œuvre des expériences utilisant un capteur CCD.</b>
<b>6.2. Superposition d'ondes lumineuses</b>	
Superposition de deux ondes incohérentes entre elles.	<i>Justifier et utiliser l'additivité des intensités.</i>
Superposition de deux ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles : formule de Fresnel $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi$ . Facteur de contraste.	<i>Connaître les principales conditions pour que le phénomène d'interférences apparaisse (ondes quasi synchrones, déphasage constant dans le temps ou très lentement variable).</i>  <i>Justifier, connaître et utiliser la formule de Fresnel.</i>  <i>Associer un bon contraste à des intensités <math>I_1</math> et <math>I_2</math> voisines.</i>
<b>6.3. Exemple de dispositif interférentiel par</b>	



<b>division du front d'onde : trous d'Young</b>	
<p>Trous d'Young ponctuels dans un milieu non dispersif : source ponctuelle à distance finie et observation à grande distance. Champ d'interférence. Ordre d'interférence <math>p</math>.</p> <p>Variations de l'ordre d'interférences <math>p</math> avec la position du point d'observation ; franges d'interférence.</p> <p>Variations de l'ordre d'interférence <math>p</math> avec la position de la source ; perte de contraste par élargissement spatial de la source.</p> <p>Variations de <math>p</math> avec la longueur d'onde. Perte de contraste par élargissement spectral de la source.</p>	<p><i>Définir, exprimer et utiliser l'interfrange et l'ordre d'interférence.</i></p> <p><i>Justifier que les franges ne sont pas localisées.</i></p> <p><i>Interpréter la forme des franges observées.</i></p> <p><i>Utiliser le critère de brouillage des franges <math>\Delta p &gt; 1/2</math> pour interpréter des observations expérimentales.</i></p> <p><i>Utiliser le critère de brouillage des franges <math>\Delta p &gt; 1/2</math> pour interpréter des observations expérimentales.</i></p> <p><i>L'étude d'autres dispositifs par division de front d'onde se fera en TD.</i></p>
<b>6.4. Exemple de dispositif interférentiel par division d'amplitude : interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue</b>	
<p>Interféromètre de Michelson éclairé par une source spatialement étendue. Localisation (constatée) des franges.</p> <p>Lame d'air : franges d'égale inclinaison.</p> <p>Étude expérimentale en coin d'air : franges d'égale épaisseur.</p>	<p><i>Connaître les conditions d'éclairage et d'observation en lame d'air et en coin d'air.</i></p> <p><b><i>Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue à l'aide d'un protocole fourni.</i></b></p> <p><i>Établir et utiliser l'expression de l'ordre d'interférence en fonction de la longueur d'onde, de l'épaisseur de la lame d'air équivalente et de l'angle d'inclinaison des rayons.</i></p> <p><b><i>Mettre en œuvre un protocole pour accéder au profil spectral d'une raie ou d'un doublet à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</i></b></p> <p><i>Utiliser l'expression de la différence de marche en fonction de l'épaisseur pour exprimer l'ordre d'interférence.</i></p> <p><b><i>Analyser un objet (miroir déformé, lame de phase introduite sur un des trajets...) à l'aide d'un interféromètre de Michelson.</i></b></p> <p><b><i>Interpréter qualitativement les observations en lumière blanche.</i></b></p>
<p>Superposition de <math>N</math> ondes quasi-monochromatiques cohérentes entre elles, de même amplitude et dont les phases sont en progression arithmétique.</p>	<p><i>Déterminer l'amplitude diffractée par un réseau plan par transmission et par réflexion (l'amplitude diffractée par une fente fine ou un miroir est donnée).</i></p> <p><i>Établir 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.</i></p>

	<p><i>Établir la demi-largeur <math>2\pi/N</math> des pics principaux de la courbe d'intensité en fonction du déphasage.</i></p> <p><i>Etude du filtre interférentiel.</i></p> <p><i>Reconnaitre la notion de finesse et du pouvoir de résolution.</i></p> <p><b><i>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant un phénomène d'interférences à N ondes.</i></b></p>
--	--

## 7. Thermodynamique

Cette partie du programme s'articule autour de la problématique des transferts thermiques.

- la loi phénoménologique de Newton à l'interface entre un solide et un fluide est introduite.
- les transferts thermiques par rayonnement sont abordés à l'aide d'une approche documentaire et d'un thème expérimental.

Les compétences développées sont :

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

Le rayonnement d'équilibre thermique est traité sous forme d'approche documentaire.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>7.1. Transferts thermiques</b>	
Présentation et phénoménologie des modes de transfert thermique d'énergie : conduction, convection et rayonnement.	<i>Reconnaitre un mode de transfert thermique.</i>
Vecteur densité de flux thermique.	<i>Calculer un flux thermique à travers une surface orientée et interpréter son signe.</i>
Premier principe de la thermodynamique.	<i>Établir un bilan local d'énergie interne pour un solide dans le cas d'une situation à une variable d'espace en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique.</i>
Loi de Fourier.	<p><i>Interpréter et utiliser la loi phénoménologique de Fourier.</i></p> <p><i>Connaître quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, verre, acier.</i></p> <p><b><i>Mesurer la conductivité thermique d'un matériau.</i></b></p>

Équation de la diffusion thermique.	<p><i>Établir l'équation de la diffusion thermique sans terme de source au sein d'un solide dans le cas d'une situation à une variable d'espace en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique.</i></p> <p><i>Utiliser une généralisation de l'équation de la diffusion en présence d'un terme de source.</i></p> <p><i>Utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur laplacien et son expression fournie.</i></p> <p><i>Analyser une équation de diffusion thermique en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle.</i></p> <p><b>Approche numérique :</b> <i>mettre en œuvre une méthode de résolution numérique pour déterminer une solution à l'équation de la diffusion thermique, les conditions aux limites et les conditions initiales étant données.</i></p>
Régime stationnaire. Résistance thermique.	<p><i>Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique.</i></p> <p><i>Déterminer l'expression de la résistance thermique d'un solide dans le cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne.</i></p> <p><i>Exploiter les lois d'association de résistances thermiques.</i></p>
Coefficient de transfert thermique de surface h, loi de Newton.	<p><i>Utiliser la loi de Newton comme condition aux limites à une interface solide-fluide.</i></p>
Rayonnement d'équilibre thermique.	<p><b>Approche documentaire :</b> <i>utiliser les expressions fournies des lois de Wien et de Stefan pour analyser des documents scientifiques portant sur le rayonnement dans le modèle du corps noir.</i></p> <p><b>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.</b></p>

## 8. Physique quantique

Les compétences suivantes seront développées dans cette partie du programme :

- 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 ;
- utiliser le principe de superposition.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>8.1. Introduction au monde quantique</b>	
<p>Dualité onde-particule pour la lumière et la matière. Relations de Planck-Einstein et de Louis de Broglie.</p>	<p><i>Évaluer des ordres de grandeurs typiques intervenant dans des phénomènes quantiques.</i></p> <p><b>Approche documentaire :</b> décrire un exemple d'expérience mettant en évidence la nécessité de la notion de photon.</p> <p><b>Approche documentaire :</b> décrire un exemple d'expérience illustrant la notion d'ondes de matière.</p>
<p>Interprétation probabiliste associée à la fonction d'onde : approche qualitative.</p>	<p><i>Interpréter une expérience d'interférences (matière ou lumière) « particule par particule » en termes probabilistes.</i></p> <p><i>Expliquer qualitativement la nécessité d'une amplitude de probabilité dont le carré est associé à la probabilité.</i></p>
<p>Quantification de l'énergie d'une particule libre confinée 1D.</p>	<p><i>Obtenir les niveaux d'énergie par analogie avec les modes propres d'une corde vibrante.</i></p> <p><i>Établir le lien qualitatif entre confinement spatial et quantification.</i></p>
<b>8.2. Fonction d'onde et équation de Schrödinger</b>	
<p>Fonction d'onde <math>\psi</math> d'une particule sans spin et densité de probabilité de présence.</p> <p>Équation de Schrödinger à une dimension dans un potentiel <math>V(x)</math>.</p> <p>États stationnaires de l'équation de Schrödinger.</p>	<p><i>Interpréter en termes de probabilité l'amplitude d'une onde associée à une particule.</i></p> <p><i>Utiliser le caractère linéaire de l'équation (principe de superposition).</i></p> <p><i>Procéder à la séparation des variables temps et espace.</i></p> <p><i>Relier l'énergie de la particule à l'évolution temporelle de sa fonction d'onde et faire le lien avec la relation de Planck-Einstein.</i></p> <p><i>Identifier le terme associé à l'énergie cinétique.</i></p>
<b>8.3. Particule libre</b>	
<p>Fonction d'onde d'une particule libre non localisée.</p> <p>Relation de Broglie.</p> <p>Inégalité (indétermination) d'Heisenberg spatiale et paquet d'ondes.</p>	<p><i>Établir les solutions.</i></p> <p><i>Connaître et interpréter la difficulté de normalisation de cette fonction d'onde.</i></p> <p><i>Relier l'énergie de la particule et le vecteur d'onde de l'onde plane associée.</i></p> <p><i>Interpréter et exploiter l'expression fournie de la densité courant de probabilité par analogie avec la densité de courant électrique.</i></p> <p><i>Expliquer, en s'appuyant sur l'inégalité d'Heisenberg spatiale, que la localisation de la particule peut s'obtenir par superposition d'ondes planes.</i></p>

Densité de courant de probabilité associé à une particule libre.	Utiliser l'expression admise $\vec{J} =  \psi ^2 \frac{\hbar \vec{k}}{m}$ par analogie avec la densité de courant électrique
<b>8.4. Etats stationnaires d'une particule dans des potentiels constants par morceaux</b>	
États stationnaires d'une particule dans le cas d'une marche de potentiel.	<p>Citer des exemples physiques illustrant cette problématique.</p> <p>Exploiter les conditions de continuité (admises) relatives à la fonction d'onde.</p> <p>Établir la solution dans le cas d'une particule incidente sur une marche de potentiel.</p> <p>Expliquer les différences de comportement par rapport à une particule classique.</p>
Cas $E > V$ : probabilité de transmission et de réflexion.	Déterminer les coefficients de transmission et de réflexion en utilisant les courants de probabilités.
Cas $E < V$ : évanescente.	Reconnaître l'existence d'une onde évanescente et la caractériser.
Barrière de potentiel et effet tunnel.	<p>Décrire qualitativement l'influence de la hauteur ou de largeur de la barrière de potentiel sur le coefficient de transmission.</p> <p>Exploiter un coefficient de transmission fourni.</p> <p><b>Approche documentaire :</b> en utilisant le coefficient de transmission fourni, expliquer le rôle de l'effet tunnel dans la radioactivité <math>\alpha</math> ou la microscopie à effet tunnel.</p>
États stationnaires d'une particule dans un puits de potentiel infini.	Établir les solutions et les niveaux d'énergie de la particule confinée.
Énergie de confinement.	<p>Identifier les analogies avec la corde vibrante.</p> <p>Estimer l'énergie d'une particule confinée dans son état fondamental pour un puits non rectangulaire.</p> <p>Associer l'analyse à l'inégalité d'Heisenberg.</p>
<b>8.5. Etats non stationnaires d'une particule</b>	
Combinaison linéaire d'états stationnaires.	<p>Expliquer qu'une superposition de deux états stationnaires engendre une évolution au cours du temps de l'état de la particule.</p> <p>Établir l'expression de la densité de probabilité de présence de la particule dans le cas d'une superposition de deux états stationnaires ; interpréter le résultat.</p> <p><b>Approche numérique :</b> décrire l'évolution</p>

## 9. Éléments de thermodynamique statistique

L'objectif de cette partie est 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. Le calcul de la pression cinétique et plus généralement la théorie cinétique des gaz ne constitue en aucun cas un objectif du programme.

Les compétences suivantes seront développées dans cette partie du programme :

- 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 ;
- affiner la compréhension de certaines grandeurs de la thermodynamique classique comme l'énergie, la température, la capacité thermique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>9.1. Monde microscopique, monde macroscopique</b>	
Échelles microscopique, mésoscopique, et macroscopique.	<i>Définir chacune de ces échelles et en expliquer la pertinence.</i>
<b>9.2. Facteur de Boltzmann</b>	
Modèle de l'atmosphère isotherme.  Poids de Boltzmann d'une particule indépendante à l'équilibre avec un thermostat.	<i>Établir la variation de la pression avec l'altitude dans l'hypothèse d'une atmosphère isotherme.  Interpréter la loi du nivellement barométrique avec le poids de Boltzmann.  Reconnaître un facteur de Boltzmann.  Comparer <math>k_B T</math> à des écarts d'énergie et estimer les conséquences d'une variation de température.</i>
<b>9.3. Systèmes à spectre discret d'énergies</b>	
Probabilité d'occupation d'un état d'énergie non dégénéré par une particule indépendante.  Énergie moyenne et écart quadratique moyen.  Cas d'un système à N particules indépendantes.	<i>Exprimer la probabilité d'occupation d'un état d'énergie en utilisant la condition de normalisation.  Exploiter un rapport de probabilités entre deux états.  Exprimer sous forme d'une somme sur ses états l'énergie moyenne et l'écart-quadratique énergétique d'un système.  Expliquer pourquoi les fluctuations relatives d'énergie régressent quand la taille du système augmente et relier cette régression au caractère quasi-certain des grandeurs thermodynamiques.</i>

<p>Système à deux niveaux non dégénérés d'énergies <math>\pm \epsilon</math>.</p>	<p><i>Citer des exemples de systèmes modélisables par un système à deux niveaux.</i></p> <p><i>Déterminer l'énergie moyenne et la capacité thermique de ce système.</i></p> <p><i>Interpréter l'évolution de l'énergie moyenne avec la température, notamment les limites basse et haute température.</i></p> <p><i>Relier les fluctuations d'énergies à la capacité thermique.</i></p>
<p><b>9.4. Capacités thermiques classiques des gaz et des solides</b></p>	
<p>Théorème d'équipartition pour un degré de liberté énergétique indépendant quadratique.</p>	<p><i>Connaître et exploiter la contribution <math>k_B T/2</math> par degré quadratique à l'énergie moyenne.</i></p>
<p>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.</p>	<p><i>Estimer le nombre de degrés de libertés énergétiques quadratiques indépendants et en déduire la capacité thermique molaire d'un système.</i></p>

## Annexe 1 : outils mathématiques

Les expressions des opérateurs en coordonnées cylindriques et sphériques et les formules d'analyse vectorielle ne sont pas exigibles ; elles doivent donc être systématiquement rappelées.

Le thème « analyse de Fourier » prolonge l'étude de l'outil « séries de Fourier » en admettant la décomposition d'une fonction non périodique en une somme infinie de fonctions sinusoïdales. Aucun résultat n'est exigible, on souligne en revanche la relation liant en ordre de grandeur la largeur spectrale « utile » ( $\Delta\omega$  ou  $\Delta k_x$ ) et l'étendue caractéristique d'un signal non périodique ( $\Delta t$  ou  $\Delta x$ ).

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>1. Analyse vectorielle</b>	
a) gradient	<i>Connaître le lien entre le gradient et la différentielle. Exprimer les composantes du gradient en coordonnées cartésiennes. Utiliser le fait que le gradient d'une fonction <math>f</math> est perpendiculaire aux surfaces iso-<math>f</math> et orienté dans le sens des valeurs de <math>f</math> croissantes.</i>
b) divergence	<i>Citer et utiliser le théorème d'Ostrogradski. Exprimer la divergence en coordonnées cartésiennes.</i>
c) rotationnel	<i>Citer et utiliser le théorème de Stokes. Exprimer le rotationnel en coordonnées cartésiennes.</i>
d) laplacien d'un champ scalaire	<i>Définir <math>\Delta f = \text{div}(\mathbf{grad} f)</math>. Exprimer le laplacien en coordonnées cartésiennes.</i>
e) laplacien d'un champ de vecteurs	<i>Exprimer le laplacien d'un champ de vecteurs en coordonnées cartésiennes.</i>
<b>2. Analyse de Fourier</b>	
Décomposition d'une fonction périodique en série de Fourier.	<i>Utiliser un développement en série de Fourier fourni. Utiliser un raisonnement par superposition. Transposer l'analyse de Fourier du domaine temporel au domaine spatial.</i>
Décomposition d'une fonction non périodique en une somme continue de fonctions sinusoïdales.	<i>Utiliser un raisonnement par superposition. Transposer l'analyse de Fourier du domaine temporel au domaine spatial. Citer et utiliser la relation liant en ordre de grandeur la largeur spectrale « utile » (<math>\Delta\omega</math> ou <math>\Delta k_x</math>) et l'étendue caractéristique d'un signal non périodique (<math>\Delta t</math> ou <math>\Delta x</math>).</i>
<b>3. Équations aux dérivées partielles</b>	
Exemples d'équations aux dérivées partielles : équation de Laplace, équation de diffusion, équation de d'Alembert, équation de Schrödinger.	<i>Identifier une équation aux dérivées partielles connue. Transposer une solution fréquemment rencontrée dans un domaine de la physique à un autre domaine. Obtenir des solutions de forme donnée par substitution. Utiliser des conditions initiales et des conditions aux limites.</i>
<b>4. Calcul différentiel</b>	



Différentielle d'une fonction de plusieurs variables. Dérivée partielle.	<i>Connaître l'expression de la différentielle en fonction des dérivées partielles. Identifier la valeur d'une dérivée partielle, l'expression de la différentielle étant donnée.</i>
<b>5. Variables aléatoires</b>	
Variables aléatoires discrètes.  Variables aléatoires continues.	<i>Espérance et écart-type d'une variable aléatoire discrète. Espérance d'une variable aléatoire continue. Valeur la plus probable. (valeur modale).</i>

## Formation expérimentale des filières MP et PT Deuxième année

La composante expérimentale est forte dans le thème du traitement de signal et les capacités exigibles ont vocation à être principalement développées au cours de séances de travaux pratiques. La partie de ce thème, à vocation expérimentale, 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 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.

L'outil informatique sera utilisé :

- dans le domaine de la simulation : pour interpréter et anticiper des résultats ou des phénomènes, pour comparer des résultats obtenus expérimentalement à ceux fournis par un modèle et pour visualiser, notamment dans les domaines de la cristallographie, de la modélisation moléculaire, et plus généralement dans les situations exigeant une représentation tridimensionnelle.
- pour l'acquisition de données, en utilisant un appareil de mesure interfacé avec l'ordinateur.
- pour la saisie et le traitement de données à l'aide d'un tableur ou d'un logiciel dédié.

Nature et méthodes	Capacités exigibles
- <b>Mesures de longueur et d'angles</b>	<i>Mesurer le déplacement du miroir mobile d'un interféromètre de Michelson.</i>
- <b>Mesures de temps et de fréquences</b> Analyse spectrale.	<i>Mettre en évidence le phénomène de repliement du spectre provoqué par l'échantillonnage avec un oscilloscope numérique ou une carte d'acquisition.</i>  <i>Choisir les paramètres d'une acquisition numérique destinée à une analyse spectrale afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon, tout en optimisant la résolution spectrale.</i>
- <b>Électricité</b> Filtrage analogique d'un signal périodique.  Électronique numérique  Échantillonnage : fréquence d'échantillonnage, théorème de Shannon.  Filtrage numérique	<i>Mettre en évidence l'action d'un filtre linéaire sur un signal périodique dans les domaines temporel et fréquentiel.</i>  <i>Numériser un signal et utiliser un traitement numérique pour effectuer un filtrage numérique de ce signal.</i>  <b><i>Détecter le caractère non linéaire d'un système par l'apparition de nouvelles fréquences en sortie pour une entrée sinusoïdale.</i></b>  <i>Élaborer un protocole permettant de déterminer le nombre de bits d'une conversion A/N et N/A.</i>  <b><i>Réaliser l'échantillonnage d'un signal numérique. Commenter la structure du spectre du signal obtenu après échantillonnage. Choisir la fréquence d'échantillonnage afin de respecter la condition de Nyquist-Shannon. Mettre en évidence le phénomène de repliement</i></b>

<p>Applications aux cavités à une dimension. Mode d'onde stationnaire.</p> <p>Onde électromagnétique</p>	<p><i>de spectre au moyen d'un oscilloscope numérique ou d'un logiciel de calcul numérique.</i></p> <p><b><i>Mettre en œuvre un convertisseur analogique/numérique et un traitement numérique afin de réaliser un filtre passe-bas ; utiliser un convertisseur numérique/analogique pour restituer un signal analogique.</i></b></p> <p><i>Mettre en œuvre un détecteur dans le domaine des ondes centimétriques.</i></p> <p><b><i>Mettre en œuvre un dispositif permettant d'étudier une onde électromagnétique, dans le domaine des ondes centimétriques.</i></b></p>
<p><b>- Optique</b></p> <p>Analyser une lumière.</p> <p>Analyser une figure d'interférence.</p> <p>Étudier la cohérence temporelle d'une source.</p>	<p><i>Identifier, à l'aide d'un polariseur, une onde polarisée rectilignement et repérer sa direction de polarisation.</i></p> <p><i>Mesurer une longueur d'onde à l'aide d'un goniomètre équipé d'un réseau.</i></p> <p><i>Mettre en œuvre un photodétecteur en sortie d'un interféromètre.</i></p> <p><i>Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue à l'aide d'un protocole fourni.</i></p> <p><i>Obtenir une estimation de la longueur de cohérence d'une source et de l'écart <math>\Delta\lambda</math> d'un doublet spectral à l'aide d'un interféromètre de Michelson en lame d'air.</i></p>
<p><b>- Thermodynamique</b></p> <p>Conduction thermique et rayonnement.</p>	<p><i>Mettre en œuvre un dispositif de mesure de conductivité thermique.</i></p> <p><b><i>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.</i></b></p>

## Annexe 2 ; Liste de matériel de deuxième année

### 1. Domaine optique

- Polariseur dichroïque
- Interféromètre de Michelson motorisé
- Capteur CCD

### 2. Domaine électrique

- Oscilloscope numérique avec analyseur de spectre
- Émetteur et récepteur dans le domaine des ondes centimétriques

### 3. Domaine thermodynamique

- Caméra thermique