

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

CLASSES PRÉPARATOIRES AUX
GRANDES ÉCOLES
PROGRAMME DE PHYSIQUE
PCSI-PSI

Table des matières

Approche théorique PCSI-PSI

- 1 Électronique**
 - 1.1** Lois générales dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-permanents
 - 1.2** Éléments de circuits linéaires en régime continu ou quasi-permanent
 - 1.3** Régime transitoire
 - 1.4** Régime sinusoïdal forcé
 - 1.5** Filtrage linéaire
 - 1.6** Amplificateur Opérationnel ou Amplificateur Linéaire Intégré
- 2 Optique**
 - 2.1** Approximation de l'optique géométrique : rayon lumineux
 - 2.2** Formation des images dans les conditions de GAUSS
- 3 Mécanique**
 - 3.1** Description du mouvement d'un point matériel
 - 3.2** Dynamique du point matériel dans un référentiel galiléen
 - 3.3** Puissance et travail d'une force. Théorème de l'énergie cinétique
 - 3.4** Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétique, uniformes et stationnaires
 - 3.5** Oscillateur linéaire à un degré de liberté
 - 3.6** Théorème du moment cinétique
 - 3.7** Mouvements dans un champ de forces centrales conservatives, mouvement newtonien
 - 3.8** Dynamique dans un référentiel non galiléen.
 - 3.9** Système fermé de points matériels.
 - 3.10** Mécanique du solide en rotation autour d'un axe fixe
- 4 Thermodynamique**
 - 4.1** Modèle du gaz parfait
 - 4.2** Diffusion des particules
 - 4.3** Statique des fluides
 - 4.4** Premier principe de la thermodynamique
 - 4.5** Second principe pour un système fermé
 - 4.6** Changement d'état d'un corps pur
 - 4.7** Étude des machines thermiques
- 5 Électromagnétisme**
 - 5.1** Champ et potentiel électrostatiques.
 - 5.2** Dipôle électrostatique
 - 5.3** Aspects énergétiques
 - 5.4** Champ magnétostatique
 - 5.5** Dipôle magnétique

Approche expérimentale PCSI-PSI

- 6** TP-cours
- 7** Travaux pratiques

Approche théorique PCSI-PSI

La réforme du programme de Physique de la classe de PCSI est rendue nécessaire par l'évolution des contextes scientifique, technique et pédagogique sur le plan international. Elle s'inscrit aussi dans la continuité de l'esprit des programmes du secondaire qualifiant menant au baccalauréat scientifique. Il vise à apporter les connaissances fondamentales indispensables à la formation générale d'un futur ingénieur, enseignant ou chercheur.

L'enseignement de la Physique dans la classe de PCSI est basé sur une approche équilibrée entre théorie et expérience. La formation doit apporter à l'étudiant les outils conceptuels et méthodologiques pour lui permettre de comprendre le monde naturel et technique qui l'entoure et de faire l'analyse critique des phénomènes étudiés. Les méthodes utilisées doivent encourager l'étudiant à devenir graduellement acteur de sa formation, qu'il comprenne mieux l'impact de la science et que, plus assuré dans ses connaissances, il soit préparé à poursuivre son cursus d'études dans les grandes écoles.

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

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

Bien que le langage mathématique ait un intérêt particulier dans l'enseignement de la physique, il ne doit en aucun cas se substituer à l'aspect physique et à l'analyse qualitative des phénomènes étudiés. L'enseignement de la physique, dans la classe de PCSI, est basé sur la compréhension physique du phénomène étudié et une réduction significative du recours à la technicité calculatoire. Les outils mathématiques sont introduits au fur et à mesure que leur nécessité apparaît.

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

Dans la classe de PCSI, l'approche expérimentale de la physique est fortement affirmée et valorisée. La formation expérimentale est proposée aux étudiants sous des formes variées et complémentaires qui permettent d'aborder les phénomènes physiques de manière inductive :

- Les expériences de cours
- Les TP-cours
- Les travaux pratiques (TP).

Le choix des expériences de cours et des TP relève de la responsabilité professorale : les thèmes de TP proposés par le programme sont purement indicatifs, 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.

L'approche théorique se compose de cinq parties abordées selon la progression suivante :

Électronique – optique – mécanique – thermodynamique - électromagnétisme.

Dans le programme, chaque rubrique de TP-cours correspond à un thème ; chaque thème correspond à une ou plusieurs séances. Le choix du découpage d'un thème de cours ou de TP-cours relève de l'initiative pédagogique du professeur. Il convient de remarquer que les thèmes de TP-cours sont conçus pour être traité conjointement aux thèmes de cours correspondants.

1. Électronique

Les notions de courant et de tension, la loi des nœuds et la loi des mailles ont été abordées au cycle du baccalauréat. Le régime transitoire, dans les circuits RC, RL et RLC, a été vu pendant l'année terminale ; les étudiants sont initiés à manipuler les équations différentielles qui régissent ces phénomènes. Il convient d'exploiter ces acquis pour aborder les nouvelles notions et de traiter les difficultés correspondantes. En revanche, les théorèmes de base de l'électrocinétique, le régime sinusoïdal, les grandeurs efficaces, l'impédance, le filtrage,... sont des notions nouvelles. Il convient de les introduire de manière progressive.

L'électronique recoupe fortement l'automatique qui est enseignée par le professeur de sciences industrielles. Il importe donc chaque fois que cela est possible d'adopter un vocabulaire commun. Le professeur de sciences industrielles et le professeur de physique se concertent à cet effet.

L'outil mathématique nécessaire à l'étude de cette partie se limite en pratique aux équations différentielles linéaires à coefficients constants du premier et du deuxième ordre.

1.1 Lois générales dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-permanents

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Approximation des régimes quasi-permanents | L'ARQP sera présentée d'une façon qualitative. L'origine théorique de cette approximation sera discutée dans le cours d'électromagnétisme en deuxième année. |
| Courant électrique, bilan de charges, loi des nœuds. | L'intensité du courant électrique dans une branche orientée de circuit est définie comme le débit de charges à travers une section du conducteur. La loi des nœuds traduit une conservation de la charge en régime stationnaire. On admet l'extension de cette loi aux régimes lentement variables ou quasi-permanents. La forme locale de l'équation de conservation de la charge électrique est hors programme. On cite les ordres de grandeur des intensités et des tensions dans différents domaines d'application. |
| Potentiel, référence de potentiel, tension électrique, loi des mailles. Puissance électrique reçue par un dipôle. Caractère générateur et récepteur. | |

1.2 Éléments de circuits linéaires en régime continu ou quasi-permanent

| | |
|---|--|
| Modélisation de dipôles R, L et C. Relation tension - courant. | On cite les ordres de grandeurs des composants R, L, C. Un comportement linéaire est décrit par une équation différentielle linéaire à coefficients constants. On signale que tous les éléments d'un circuit réel sont représentés par des modèles dont les domaines de validité possèdent des limites ; cet aspect est surtout vu en travaux pratiques. On affirme les relations $q = Cu_C$ et $u_L = ri + Ldi/dt$. |
| Association des résistances et des capacités en série, en parallèle. | Le théorème de KENNELY est hors programme. |
| Diviseurs de tension et de courant. | |
| Aspects énergétiques : énergie emmagasinée dans un condensateur et dans une bobine, puissance dissipée dans une résistance (effet JOULE). | On montre, par des considérations énergétiques, que la charge d'un condensateur et le courant qui traverse une bobine sont continus en fonction du temps. |
| Modélisation linéaires d'un dipôle actif : générateur de courant (représentation de NORTON) et générateur de tension (représentation de THEVENIN) ; équivalence entre les deux modélisations. | On montre à travers des exemples que l'équivalence THEVENIN - NORTON permet de simplifier l'étude des circuits. |
| Caractéristique d'un dipôle. Point de fonctionnement. | On étudie la caractéristique d'un dipôle pouvant être éventuellement non-linéaire. |
| Sources libres ou indépendantes, sources liées ou contrôlées. | |
| Loi des nœuds exprimée en termes de potentiels ou théorème de MILLMAN. | La mémorisation de toute formulation mathématique du théorème de MILLMAN est exclue. |

1.3 Régime transitoire

| Programme | Commentaire |
|--|--|
| Étude des circuits RC, RL et RLC série soumis à un échelon de tension. Régime libre. Régime transitoire et régime permanent. Pulsation propre. Facteur de qualité. | On écrit les équations différentielles sous les formes canoniques. Cette écriture est l'occasion pour habituer les élèves à faire un rapprochement avec un autre phénomène physique analogue. On distingue, sur un relevé expérimental, régime transitoire et régime permanent au cours de l'évolution d'un système du premier ordre soumis à un échelon. On détermine un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire. On met en évidence la similitude des comportements des oscillateurs mécanique et électronique. |
| Aspect énergétique. | On se contente de reconnaître le type de régime transitoire à partir du portrait de phase. |
| Portrait de phase. | On peut utiliser un logiciel approprié pour le tracé des portraits de phase. |

1.4 Régime sinusoïdal forcé

| Programme | Commentaire |
|---|---|
| Régime alternatif sinusoïdal forcé ou établi. Signaux sinusoïdaux : amplitude, phase, pulsation, fréquence, différence de phase entre deux signaux synchrones. | Les concepts de régime transitoire et de régime sinusoïdal établi sont dégagés à partir de l'équation différentielle. On justifie qualitativement l'intérêt des régimes sinusoïdaux forcés par leur rôle générique pour l'étude des régimes périodiques forcés. |
| Représentation complexe d'une grandeur sinusoïdale. | On insiste sur la simplification apportée par la notation complexe qui permet de remplacer une équation différentielle par une équation algébrique sur le corps des nombres complexes. On utilise la notation symbolique (p ou $j\omega$ ou d/dt) pour une détermination rapide des régimes sinusoïdaux établis ou des régimes transitoires. |
| Impédance et admittance complexes. Associations série et parallèle. Construction de FRESNEL. | |
| Loi des nœuds, loi des mailles, théorème de MILLMAN. | |
| Étude du circuit RLC série : résonance du courant et de la tension aux bornes du condensateur, facteur de qualité, acuité d'une résonance. | |
| Puissance instantanée, puissance moyenne en régime sinusoïdal forcé. Valeur efficace. Facteur de puissance ($\cos(\varphi)$). | La notion de puissance réactive et le théorème de BOUCHEROT sont hors programme. |
| Aspects énergétiques du circuit RLC série. | On établit le bilan énergétique dans le circuit RLC série sous la forme : $d/dt(1/2Li^2 + 1/(2C)q^2) + Ri^2 = P$ On fait remarquer que le condensateur et la bobine ne participent pas au bilan énergétique moyen en régime sinusoïdal forcé alors qu'ils jouent un rôle essentiel pendant le régime transitoire. |
| Transfert maximal de puissance d'un générateur vers une impédance de charge : notion de charge adaptée, résonance en puissance. | |

1.5 Filtrage linéaire

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| <p>Signaux périodiques. Composition en fréquence d'un signal périodique. Théorème de FOURIER. Valeur moyenne, valeur efficace, fondamental et harmoniques. Identité de PARSEVAL. Spectre d'un signal périodique.</p> | <p>On fait remarquer qu'un signal possède une représentation dans l'espace des temps et dans l'espace des fréquences.</p> |
| <p>Filtres du premier et du second ordre, passifs ou actifs : comportements asymptotiques, fonction de transfert, gain en décibels, déphasage, diagramme de BODE, comportements asymptotiques, fréquence(s) de coupure à -3 décibels, bande passante, facteur de qualité. Établissement du gabarit d'un filtre en fonction du cahier des charges</p> <p>Mises en cascade de filtres linéaires. Étude du filtrage linéaire d'un signal non sinusoïdal à partir d'une analyse spectrale.</p> | <p>On habitue les étudiants à prévoir les comportements asymptotiques à haute fréquence et à basse fréquence avant tout calcul explicite de la fonction de transfert. On utilise la forme canonique de la fonction de transfert. On ne cherche pas à développer une technicité de calcul pour le tracé du diagramme de BODE. Les filtres actifs font appel à l'amplificateur opérationnel. Celui-ci, présenté en TP-cours, est supposé idéal et en fonctionnement linéaire. On exploite le diagramme de BODE pour prévoir le comportement du circuit attaqué par un signal périodique de forme quelconque en liaison avec l'analyse de FOURIER. On signale le passage de l'expression de la fonction de transfert à l'équation différentielle. On explicite les conditions d'utilisation d'un filtre afin de l'utiliser comme moyenneur, intégrateur, ou dérivateur. On précise l'intérêt, pour garantir leur fonctionnement lors de mises en cascade, de réaliser des filtres de tension de faible impédance de sortie et forte impédance d'entrée. On explique, à travers un exercice, la nature du filtrage introduit par un dispositif mécanique (sismomètres, amortisseurs, accéléromètre...).</p> |
| <p>Critère de stabilité pour les systèmes du premier et du deuxième ordre.</p> | <p>Cette rubrique apparaît comme la conclusion de l'étude des circuits linéaires et ne fait l'objet d'aucun développement excessif. Pour les systèmes du deuxième ordre, il s'agit de faire remarquer que la stabilité est assurée dès lors que tous les coefficients de l'équation différentielle homogène sont de même signe. Cette partie sera traitée en TP-cours. Une synthèse sera donnée dans une séance de cours.</p> |

1.6 Amplificateur Opérationnel ou Amplificateur Linéaire Intégré

| Programme | Commentaire |
|--|--|
| <p>Régime linéaire. Régime non linéaire.</p> | <p>Cette partie sera traitée en TP-cours. Une synthèse sera donnée dans une séance de cours.</p> |

2. Optique

Les étudiants sont initiés à l'ensemble des aspects expérimentaux de l'optique géométrique. Il convient de renforcer leur niveau sur le plan expérimental et de présenter quelques notions théoriques. L'objectif est de ramener les étudiants à maîtriser les constructions géométriques et l'utilisation des relations

de conjugaison, et de les préparer à l'utilisation des composants dans le thème de l'optique ondulatoire en seconde année.

Les outils mathématiques nécessaires sont ceux de la trigonométrie élémentaire : angles orientés, lecture des lignes trigonométriques dans un triangle rectangle, cas des petits angles.

2.1 Approximation de l'optique géométrique : rayon lumineux

| Programme | Commentaire |
|---|---|
| Approximation de l'optique géométrique. | On introduit l'approximation de l'optique géométrique lors d'une approche descriptive et expérimentale de la diffraction. Cette notion sera détaillée dans le cours de diffraction en deuxième année. |
| Sources lumineuses. Modèle de la source ponctuelle monochromatique. Notion de rayon lumineux. Limite du modèle. Indice d'un milieu transparent. Réflexion, réfraction. Lois de DESCARTES-SNELL. | On se limite aux milieux transparents, linéaires, isotropes et homogènes. La notion du rayon lumineux est l'occasion pour mettre en valeur l'importance du modèle dans la physique. Les lois de DESCARTES-SNELL sont introduites en TP-cours. Le dioptré sphérique est hors programme. |
| Étude du prisme : formules générales, condition d'émergence, minimum de déviation. | On exploite l'unicité du minimum de déviation et le principe du retour inverse pour montrer l'égalité des angles d'incidence et d'émergence. |

2.2 Formation des images dans les conditions de GAUSS

| Programme | Commentaire |
|--|--|
| Système optique centré. Notion de stigmatisme et d'aplanétisme. Lentilles sphériques minces et miroirs sphériques dans les conditions de GAUSS : formation d'image, relations de conjugaison, grandissement transversal. | On admet le stigmatisme et l'aplanétisme dans les conditions de GAUSS (vues en TP-cours). On relie les conditions de GAUSS aux caractéristiques d'un détecteur. On montre que les constructions géométriques permettent d'obtenir les formules de conjugaison et de grandissement. On insiste sur la construction des rayons lumineux. L'étude générale des systèmes centrés, des associations de lentilles minces et des systèmes catadioptriques est hors programme. La formule de GULLSTRAND est hors programme. |

3. Mécanique

Hormis l'étude du mouvement dans un référentiel non galiléen, la majorité des notions ont été abordées en secondaire. Il convient de les rappeler et de traiter les difficultés correspondantes en insistant sur les applications.

Les outils mathématiques nécessaires sont :

- La géométrie dans \mathbb{R}^2 et dans \mathbb{R}^3 (vecteurs, produit scalaire, produit vectoriel, le produit mixte),
- Les notions de dérivée temporelle d'un vecteur dans un référentiel donné et de dérivée d'une fonction composée.
- Le développement limité d'une fonction d'une variable à l'ordre 2 au voisinage d'une valeur de la variable.
- Les équations différentielles linéaire et non linéaire.
- La résolution d'équations différentielles linéaires d'ordre un ou deux à coefficients constants, sans second membre ou avec un second membre constant.
- La notation complexe, utilisée pour la résolution de l'équation différentielle linéaire du second ordre à coefficients constants dont le second membre est une fonction sinusoïdale du temps.

3.1 Description du mouvement d'un point matériel

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Espace et temps. Référentiel d'observation. Notion du point matériel. Paramétrage d'un point matériel en mouvement. Vecteurs position, vitesse et accélération | On se limite à la description du mouvement sans s'intéresser aux causes du mouvement. On précise la différence entre référentiel et repère. |
| Exemples de bases de projection : vitesse et accélération en coordonnées cartésiennes et cylindriques, vitesse en coordonnées sphériques. Expression intrinsèque de la vitesse et de l'accélération : coordonnée curviligne, rayon de courbure, repère de FRENET. | On définit les coordonnées cartésiennes, cylindriques et sphériques, ainsi que les bases associées. On souligne que le paramétrage et la base de projection doivent être adaptés au problème posé. |
| Exemples de mouvement : mouvement de vecteur accélération constant, mouvement rectiligne sinusoïdal, mouvement circulaire uniforme et non uniforme, mouvement hélicoïdal. | |

3.2 Dynamique du point matériel dans un référentiel galiléen

| Programme | Commentaire |
|--|--|
| Notion de force. Quantité de mouvement. Lois de NEWTON : loi de l'inertie, loi fondamentale de la dynamique du point matériel, loi des actions réciproques. Référentiel galiléen. | On affirme l'existence de référentiels galiléens sans se préoccuper de les rechercher. Les référentiels d'études sont supposés galiléens. Les notions de force de gravitation, force de COULOMB, tension d'un ressort, force de frottement, force de LORENTZ seront introduites au fur et à mesure du besoin. |
| Applications : - mouvement dans le champ de pesanteur uniforme sans résistance de l'air puis avec résistance de l'air. - pendule élastique, - pendule simple. | On exploite l'équation différentielle du pendule simple ou de la chute sous l'influence de la résistance de l'air pour faire une approche numérique : analyse en ordres de grandeur, détermination de la vitesse limite, utilisation des résultats fournis par un logiciel d'intégration numérique. On se limite aux forces de frottements fluides linéaires et quadratiques. |

3.3 Puissance et travail d'une force. Théorème de l'énergie cinétique

| Programme | Commentaire |
|--|--|
| Puissance et travail d'une force. Énergie cinétique. Théorème de l'énergie cinétique. | On signale le caractère moteur ou résistant d'une force dans un référentiel. On précise que la puissance dépend du référentiel. |
| Champ de force conservative, énergie Potentielle. Énergie mécanique. Intégrale première de l'énergie. | On fonde le concept d'énergie potentielle sur l'expression du travail de la force considérée. On calcule les énergies potentielles de pesanteur (g supposé constant), gravitationnelle, coulombienne, élastique. |
| Application : utilisation d'une représentation graphique de l'énergie potentielle. Positions d'équilibre d'un point matériel, stabilité. Petits mouvements au voisinage d'une position d'équilibre stable pulsation propre. Approximation locale par un puits de potentiel harmonique. | On s'intéresse à des mouvements à un seul degré de liberté. On utilise les résultats fournis par une méthode numérique pour mettre en évidence des effets non linéaires. |
| Barrière de potentiel. | On évalue l'énergie minimale nécessaire pour franchir la barrière. |

3.4 Mouvement de particules chargées dans des champs électrique et magnétique, uniformes et stationnaires

| | |
|--|---|
| Force de Lorentz exercée sur une particule chargée par les champs électrique et magnétique uniformes et indépendants du temps. | On justifie par un calcul d'ordre de grandeur que le poids d'une particule chargée est négligeable devant la force électromagnétique. |
| Puissance de la force de LORENTZ. | On précise qu'un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule. |
| Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme dans le vide. | On caractérise le mouvement de la particule chargée comme un mouvement à vecteur-accelération constant. On effectue un bilan énergétique pour calculer la vitesse d'une particule chargée accélérée par une différence de potentiel. On signale la limite du domaine de validité de la mécanique newtonienne en s'appuyant sur les expressions fournies $E_c = (\gamma-1)mc^2$ et $p = \gamma mv$. |
| Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétostatique uniforme dans le vide. | |
| Mouvement d'une particule chargée dans des champs électrique et magnétique uniformes et indépendants du temps dans un métal : vecteur densité de courant électrique, intensité. Modèle des collisions pour la loi d'Ohm locale dans un métal. Modèle de DRUDE. Conductivité, résistivité. Résistance électrique d'un conducteur cylindrique. | On se limite au cas où le champ magnétique est perpendiculaire à la direction du courant. On affirme l'isotropie statistique de la vitesse des électrons de conduction après un choc et on introduit la durée moyenne séparant deux chocs On fait remarquer que l'effet moyen des collisions sur la vitesse des électrons de conduction est analogue à celui d'un freinage visqueux. |
| Force de LAPLACE : densité volumique, densité linéique pour un courant filiforme. | |

3.5 Oscillateur linéaire à un degré de liberté

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Régimes libres d'un oscillateur harmonique à un degré de liberté amorti par frottement visqueux. Rôle de l'amortissement. Facteur de qualité. Oscillateur harmonique à un degré de liberté amorti par frottement visqueux et soumis à une excitation sinusoïdale. Régime transitoire. Régime établi. Résonance en élongation, en vitesse. Analogie avec le dipôle R-L-C série. | On met l'équation différentielle sous une forme canonique. |
| Portrait de phase. | Il s'agit d'apprendre à lire, commenter et interpréter un portrait de phase : savoir s'il y a ou non des frottements, identifier les positions d'équilibre stables ou instables, faire le lien entre le caractère fermé d'un portrait de phase et le caractère périodique du mouvement du point matériel. |

3.6 Théorème du moment cinétique

| Programme | Commentaire |
|--|--|
| Moment d'une force et moment cinétique par rapport à un point et par rapport à un axe orienté. | On insiste sur le fait que le théorème du moment cinétique fournit, pour un point matériel, une autre méthode pour obtenir des résultats |

| | |
|--|---|
| | accessibles par la deuxième loi de NEWTON ou par le théorème de l'énergie cinétique. |
| Théorème du moment cinétique en un point fixe, théorème du moment cinétique par rapport à un axe fixe. Conservation du moment cinétique. | |
| Applications : pendule simple, pendule de torsion. | Le pendule simple est un exemple qui permet de mettre en œuvre et de comparer simplement différentes méthodes pour obtenir l'équation du mouvement d'un point matériel. |

3.7 Mouvements dans un champ de forces centrales conservatives, mouvement newtonien

| Programme | Commentaire |
|--|--|
| Force centrale. Conservation du moment cinétique. Mouvement plan. Loi des aires. | On définit une force centrale comme étant une force dont le support passe par un point fixe. |
| Force centrale conservative. Énergie potentielle. Conservation de l'énergie mécanique. Intégrale première de l'énergie. | L'énergie potentielle est introduite à partir du travail élémentaire de la force centrale considérée. |
| Cas du champ newtonien. Utilisation d'une représentation graphique de l'énergie potentielle effective pour les interactions gravitationnelle et coulombienne. Relation entre l'énergie mécanique et le type de trajectoire : états liés, états de diffusion. Énoncé des lois de KEPLER. Nature des trajectoires dans le cas d'une force attractive (ellipses, paraboles et hyperboles, existence de trajectoires circulaires) et dans le cas d'une force répulsive (diffusion de RUTHERFORD). Étude directe et propriétés particulières des trajectoires circulaires : satellite, planète, relation entre énergie cinétique et énergie potentielle, relation entre rayon et vitesse, troisième loi de KEPLER. Satellite géostationnaire. Étude des trajectoires elliptiques : relation entre l'énergie et le demi-grand axe. Vitesses cosmiques : vitesse en orbite basse et vitesse de libération. | On assimile le champ gravitationnel d'un astre à symétrie sphérique à celui d'une masse ponctuelle. Cette hypothèse sera justifiée dans le cours d'électromagnétisme (théorème de GAUSS). La connaissance des formules de BINET, du vecteur excentricité et des invariants dynamiques de LAPLACE ou RUNGE-LENZ n'est pas exigible. A l'occasion de l'étude des mouvements dans un champ gravitationnel, on souligne l'identité de la masse inerte et de la masse gravitationnelle. On exprime les vitesses cosmiques et on donne leur ordre de grandeur en dynamique terrestre. |

3.8 Dynamique dans un référentiel non galiléen

| Programme | Commentaire |
|---|--|
| Cinématique : Mouvement d'un référentiel par rapport à un autre. Cas particuliers du mouvement de translation et du mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe. Vecteur instantané de rotation. Définition des vitesses et des accélérations dans les deux référentiels. Lois de composition des vitesses et accélérations : vitesse d'entraînement, vitesse relative, accélération relative, d'entraînement et de CORIOLIS. Application au mouvement de translation et au mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe. | A l'aide de la dérivée d'un vecteur de la base locale par rapport au référentiel absolu on introduit la notion du vecteur instantané de rotation. On admet la relation fondamentale de la dérivation vectorielle. La vitesse et l'accélération d'entraînement sont interprétées comme la vitesse et l'accélération d'un point (point coïncidant) d'un référentiel par rapport à l'autre. |
| Dynamique dans un référentiel non galiléen : Principe de la relativité galiléenne, référentiels galiléens. Invariance galiléenne des forces d'interaction. | On remarque que les forces d'inertie ne résultent pas d'une interaction mais du caractère non galiléen du référentiel utilisé. Les applications concernent uniquement le cas où |

| | |
|--|---|
| Lois de la dynamique du point en référentiel non galiléen : " forces d'inertie " (pseudo-forces). Énergie potentielle dans un référentiel entraîné. | le référentiel entraîné est en translation ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe. |
| Caractère galiléen approché de quelques référentiels d'utilisation courante : référentiel de COPERNIC, référentiel de KEPLER (héliocentrique), référentiel géocentrique, référentiel lié à la Terre. | On précise les conditions dans lesquelles on peut considérer certains référentiels comme galiléen. |
| Applications : définition du poids d'un point matériel, effet de marée. | L'étude d'autres applications (déviations vers l'Est, pendule de FOUCAULT...) pourrait être faite en travaux dirigés. |

3.9 Système fermé de points matériels

Ce chapitre constitue une introduction à l'étude du solide. On traite le cas d'un système fermé de deux points matériels. On généralise ensuite sans démonstration les notions relatives à ce système au cas d'un système fermé de plusieurs points matériels.

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Centre de masse (ou centre d'inertie), référentiel barycentrique. Quantité de mouvement (ou résultante cinétique), énergie cinétique et moment cinétique en un point et par rapport à un axe orienté. Éléments cinétiques barycentriques du système. | |
| Forces intérieures, forces extérieures. Théorèmes du centre de masse (ou de la quantité de mouvement) dans un référentiel galiléen, du moment cinétique en un point fixe d'un référentiel galiléen, du moment cinétique par rapport à un axe fixe d'un référentiel galiléen. Théorème du moment cinétique au centre de masse ou dans le référentiel barycentrique. | On peut utiliser indifféremment les termes "forces", "actions" ou "efforts". On montre que le théorème du centre de masse et le théorème du moment cinétique ne font intervenir que les forces extérieures. |
| Théorème de l'énergie cinétique dans un référentiel galiléen. Puissance des forces intérieures. Énergie potentielle. Énergie mécanique. | On montre que le travail des forces intérieures (lorsqu'il est non nul) est indépendant du référentiel bien que leur résultante et la somme de leurs moments soient toujours nulles. On signale que ce travail est nul dans le cas particulier d'un système rigide. |
| Cas d'un système isolé de deux points matériels : conservation de la quantité de mouvement, caractère galiléen du référentiel barycentrique, conservation du moment cinétique barycentrique et de l'énergie mécanique barycentrique. Réduction du problème à deux corps à un problème à un corps (masse réduite, mobile réduit équivalent). | On ramène l'étude du système isolé de deux points matériels à celle du mouvement dans un champ de forces centrales exercées par un centre fixe dans un référentiel galiléen. On montre que la trajectoire du mobile réduit dans le référentiel barycentrique donne, par homothétie, celles des deux particules dans ce référentiel. Les chocs sont hors programme. |

3.10 Mécanique du Solide

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.

| Programme | Commentaire |
|--|-------------|
| Cinématique du solide et des solides en contact | |

| | |
|---|--|
| Définition d'un solide. | On différencie un solide d'un système déformable. |
| Champ de vitesse d'un solide. Mouvements de translation et de rotation autour d'un axe fixe. Lois de composition des vitesses. | |
| Modélisation des efforts entre solides en contact | |
| Solides en contact. Lois phénoménologiques de COULOMB relatives au frottement de glissement. | Les frottements de roulement et de pivotement sont hors programme. |
| 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 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. |
| Mouvement d'un solide en rotation autour d'un axe de direction fixe par rapport à un référentiel galiléen | |
| 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 axe orienté. Couple. Notions simples sur les moteurs ou freins dans les dispositifs rotatifs. | On définit un couple de forces, le moment d'un couple. On justifie le moment que la liaison pivot peut produire. |
| Moment cinétique, théorème scalaire du moment cinétique ; énergie cinétique, théorème de l'énergie cinétique ; équation horaire du mouvement. | 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 de torsion, pendule pesant : équation du mouvement, analogie avec l'équation de l'oscillateur harmonique. | A l'aide acquisition expérimentale du portrait de phase d'un pendule pesant, on précise la bifurcation entre un mouvement pendulaire et un mouvement révolutif, on met en évidence le non isochronisme des oscillations et une diminution de l'énergie mécanique. |
| Cas d'un système déformable | |
| Théorème de l'énergie cinétique pour un système déformable, tabouret d'inertie. | On prend en compte le travail des forces intérieures et on fait le bilan énergétique du tabouret d'inertie. |

4. Thermodynamique

La thermodynamique est, en majeure partie, une discipline nouvelle. Il convient d'introduire les notions de manière progressive et sans formalisme excessif. Cette partie fait appel aux notions élémentaires sur les fonctions de plusieurs variables : différentielle, dérivées partielles. Il convient de savoir exprimer les principes de la thermodynamique au cours d'une évolution infinitésimale.

On notera le long du cours ΔX comme variation de la grandeur X entre deux états macroscopiques initial et final, δX une quantité élémentaire de la grandeur X et dX comme variation élémentaire d'une grandeur d'état X .

4.1 Modèle du gaz parfait

| Programme | Commentaire |
|---|---|
| Échelles microscopique, mésoscopique et | On cite quelques ordres de grandeur de libres |

| | |
|---|---|
| macroscopique. Libre parcours moyen. | parcours moyens. |
| Description des caractères généraux de la distribution des vitesses moléculaires d'un gaz (homogénéité et isotropie). Vitesse quadratique moyenne. Pression cinétique. Température cinétique. Exemple du gaz parfait monoatomique : $E_c = 3/2kT$. Équation d'état d'un gaz parfait. | L'étude du gaz parfait sert à introduire le vocabulaire de la thermodynamique sans formalisme excessif : système homogène, pression, température, équilibre thermodynamique, variable extensive, variable intensive, équation d'état, fonction d'état. Un des objectifs du programme est de faire apparaître ce qui est particulier au gaz parfait monoatomique, ce qui est généralisable au gaz parfait et ce qui est généralisable aux fluides réels. Pour établir la relation entre la pression cinétique et la vitesse quadratique moyenne, on considère le cas d'un gaz parfait monoatomique où toutes les particules sont animées de la même vitesse égale à la vitesse quadratique. On utilise un modèle unidirectionnel avec une distribution discrète de vitesse pour montrer que la pression est proportionnelle à la masse des particules, à la densité particulaire et à la vitesse quadratique moyenne au carré. On calcule l'ordre de grandeur d'une vitesse quadratique moyenne dans un gaz parfait. La loi de distribution des vitesses et le théorème du VIRIEL sont hors programme. |
| Écart au modèle du gaz parfait. Notion de gaz réel. | On compare le comportement d'un gaz réel au modèle du gaz parfait sur des réseaux d'isothermes expérimentales en coordonnées de Clapeyron ou d'Amagat. L'équation d'état du gaz de VAN DER WAALS peut être donnée. |

4.2 Diffusion des particules

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Les différents modes de transfert de masse : diffusion et convection. | |
| Vecteur densité de courant de particules \mathbf{J}_N . | |
| Bilan de particules. Loi phénoménologique de FICK. Équation de la diffusion. | On précisera que la diffusion particulaire traduit une situation d'un système hors-équilibre. Toute modélisation microscopique de la loi de FICK est hors-programme. Aucune méthode de résolution de l'équation de la diffusion ne peut être supposée connue. |

4.3 Statique des fluides

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Forces surfaciques, forces volumiques. | On se limite au cas du champ de pesanteur uniforme. |
| Champ de pression. Résultante de forces de pression. Équivalent volumique des forces de pression. | On cite des ordres de grandeur des champs de pression dans le cas de l'océan et de l'atmosphère. |
| Équation fondamentale de la statique des fluides. Forme locale de l'équation locale de la statique des fluides. Cas d'un fluide incompressible et homogène. Théorème de PASCAL. | L'étude de l'atmosphère isotherme permet de justifier par un calcul d'ordre de grandeur que la pression dans un gaz est en général considérée comme uniforme en thermodynamique. Par ailleurs cette étude permet de reconnaître un |

| | |
|---|---|
| Cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait. Facteur de BOLTZMANN. | facteur de BOLTZMANN et de faire apparaître son rôle. |
| Poussée d'ARCHIMEDE. | On explique l'origine de la poussée d'ARCHIMEDE. |

4.4 Systèmes thermodynamiques

| Programme | Commentaire |
|--|--|
| Système thermodynamique : définition du système, système ouvert, système fermé, système isolé. | |
| Équilibre thermodynamique d'un système soumis aux seules forces de pression. Variables thermodynamiques d'états, équation d'état, variables extensives et intensives. Transformations thermodynamiques subies par le système : isochore, isotherme, isobare, monobare, monotherme. Notion de transformation quasi-statique. | On cite quelques ordres de grandeur de volumes molaires ou massiques dans les conditions usuelles de pression et de température. |
| Coefficients thermoélastiques | On définit les coefficients α , β et χ_T et on établit la relation entre eux. |

4.5 Premier principe de la thermodynamique

| Programme | Commentaire |
|--|--|
| Travail échangé par un système, cas particulier du travail des forces de pression. Interprétation géométrique du travail des forces de pression dans un diagramme de CLAPEYRON. Transfert thermique. Thermostat. | On distingue qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement. |
| Énergie interne U, fonction d'état thermodynamique. Premier principe de la thermodynamique : $\Delta U + \Delta E_m = Q + W$. Forme infinitésimale $dU + dE_m = \delta W + \delta Q$. Enthalpie d'un système. Capacités thermiques à volume constant et à pression constante. | Le premier principe est énoncé dans le cas général faisant intervenir un terme d'énergie mécanique macroscopique. On souligne que le premier principe est un principe de conservation. On insiste sur la démarche pour évaluer le transfert thermique Q et de travail W lors d'une évolution d'un système fermé. On fait le bilan de l'énergie interne (U) et de l'enthalpie (H) pour des transformations simples tout en insistant sur la notion de fonction d'état. |
| Détente de JOULE - GAY LUSSAC. Détente de JOULE - THOMSON. | L'énergie interne est utilisée d'une part pour l'étude de la détente de JOULE - GAY LUSSAC et d'autre part pour exprimer le transfert thermique lors d'une évolution à volume constant, notamment en chimie. L'enthalpie est utilisée d'une part pour l'étude de la détente de JOULE - THOMSON et d'autre part pour exprimer le transfert thermique lors d'une évolution à pression constante, notamment en chimie. On insiste sur l'intérêt de ces détentes pour l'étude des fluides réels. |
| Applications au gaz parfait. Lois de Joule. | On exprime l'énergie interne d'un gaz parfait monoatomique à partir de l'interprétation microscopique de la température. |

| | |
|--|---|
| Energie interne et capacité thermique à volume constant d'une phase condensée incompressible et indilatable. | Pour les phases condensées, il s'agit simplement d'utiliser la relation approchée : $dU = C(T)dT$ |
| Enthalpie et capacité thermique à pression constante d'une phase condensée dans le modèle incompressible et indilatable. | On utilise simplement, en le justifiant, la relation approchée $dH = C(T)dT$ en se limitant aux cas où on peut confondre C_p et C_v . |
| Approximation des phases condensées peu compressibles et peu dilatables. | Interpréter graphiquement la différence de compressibilité entre un liquide et un gaz à partir d'isothermes expérimentales. |

3.11 Second principe pour un système fermé

| Programme | Commentaire |
|---|--|
| Entropie S, fonction d'état. Entropie créée, entropie échangée. Énoncé du deuxième principe : $\Delta S = S_{ech} + S_{créé}$ avec $S_{ech} = \sum Q_i/T_i$. Forme infinitésimale $dS = \delta S_{ech} + \delta S_{créé}$ avec $\delta S_{ech} = \sum \delta Q_i/T_i$. Bilans entropiques. Notion de réversibilité. Expressions différentielles des fonctions d'état. | On affirme que le second principe est un principe d'évolution. On fait le bilan d'entropie pour des transformations particulières et on analyse les causes d'irréversibilité. |
| Pression et température thermodynamiques. | On affirme l'équivalence entre les définitions thermodynamiques et les définitions cinétiques de la pression et de la température. |
| Entropie d'un gaz parfait. Loi de LAPLACE. Applications aux détente de JOULE - GAY LUSSAC et JOULE - THOMSON. | |
| Entropie d'une phase condensée dans le modèle incompressible et indilatable. | On utilise simplement la relation approchée $dS = C(T)/TdT$ en se limitant aux cas où on peut confondre C_p et C_v . |
| Notions élémentaires sur l'interprétation statistique de l'entropie : formule de BOLTZMANN. | On se limite à l'étude d'un système à deux états. Toute étude de la thermodynamique statistique est hors programme. Le lien avec l'information manquante (entropie de SHANNON) est hors programme. |
| Enthalpie libre, fonction d'état. Expression différentielle. | On signale l'importance de l'enthalpie libre, particulièrement en chimie. |
| Troisième principe de la thermodynamique. | On affirme que le troisième principe est un principe de référence. |

4.6 Changement d'état d'un corps pur

| Programme | Commentaire |
|---|--|
| Notion générale sur le changement d'état solide-liquide-gaz. Condition d'équilibre. Diagramme d'état. Point triple. Point critique. Variation des fonctions d'état lors d'un changement d'état. | |
| Diagramme de CLAPEYRON. Isothermes d'ANDREWS. Règle des moments. Formule de CLAPEYRON. | On utilise les diagrammes (P, T) et (P, V). On établit la règle des moments. On établit la formule de CLAPEYRON. On explique la problématique du stockage des fluides. |
| Équilibre liquide-vapeur de l'eau en présence d'une atmosphère inerte. | On utilise la notion de pression partielle pour adapter les connaissances sur l'équilibre liquide-vapeur d'un corps pur au cas de l'évaporation en présence d'une atmosphère inerte. |

4.7 Étude des machines thermiques

| Programme | Commentaire |
|---|---|
| <p>Machines dithermes : moteur thermique, machine frigorifique et pompe à chaleur. Rendement, efficacité. Théorème de CARNOT. Premier et second principes de la thermodynamique pour un système ouvert en écoulement permanent unidimensionnel : $\Delta h + \Delta e_c + \Delta(gz) = w_l + q_e$ et $\Delta s = s_{éch} + s_{créée}$.</p> <p>Application à l'étude des machines dithermes.</p> | <p>Outre l'étude générale des divers types de machines dithermes cycliques, on analyse et on modélise une machine réelle au choix en insistant sur la modélisation des évolutions. Cette présentation ne fait l'objet de l'acquisition d'aucune connaissance spécifique exigible.</p> <p>On donne quelques ordres de grandeur des rendements des machines thermiques réelles actuelles</p> <p>On étudie des exemples de machines dithermes réelles à l'aide de diagrammes (p, h).</p> |

5. Électromagnétisme

L'étude de l'électrostatique et de la magnétostatique est centrée sur les propriétés des champs **E** et **B** et non sur les calculs. Aucune technicité de calcul n'est donc recherchée dans l'évaluation des champs ; en revanche, on insiste sur la comparaison des propriétés respectives de **E** et **B**.

Hormis le gradient, toute utilisation des opérateurs d'analyse vectorielle est exclue en première année.

On peut avantageusement utiliser un logiciel pour obtenir des cartes de lignes de champ. En revanche, l'utilisation d'un logiciel de calcul formel pour calculer des champs n'est pas un objectif du programme.

Cette partie fait appel à des notions mathématiques nouvelles qu'il convient de présenter simplement en insistant sur leur contenu physique : les intégrales, simples, doubles, triples, curvilignes doivent être présentées comme des sommes d'une grandeur physique élémentaire (flux, circulation, charge...). Le calcul d'intégrales doubles et triples doit être évité en se limitant aux cas où les symétries permettent de ramener le calcul à celui d'une seule intégrale simple.

5.1 Champ et potentiel électrostatiques

| Programme | Commentaire |
|---|--|
| <p>Loi de COULOMB dans le vide, champ électrostatique créé par une charge ponctuelle et par un ensemble de charges ponctuelles (principe de superposition).</p> | |
| <p>Distributions macroscopiques de charges réparties, densité volumique de charge. Modélisation à l'aide d'une densité surfacique ou linéique de charge. Recherche des plans de symétrie et d'antisymétrie, recherche des invariances par rotation, par translation, pour les distributions de charges.</p> | |
| <p>Circulation du vecteur champ électrostatique, potentiel électrostatique. Expression de l'opérateur gradient en coordonnées cartésiennes. Relation locale $\mathbf{E} = -\text{grad } V$. Topographie : lignes de champ, tube de champ et surfaces équipotentielles. Propriétés de symétrie et d'invariance du champ et du potentiel électrostatiques. Caractère polaire du champ électrostatique.</p> | <p>On montre le lien entre la circulation du champ électrostatique et le travail de la force électrostatique.</p> <p>On fait le lien avec la notion de potentiel utilisée dans le cours d'électrocinétique.</p> <p>Sur des exemples de cartes de champ et de potentiel électrostatiques, on fait apparaître le lien entre les propriétés de symétrie des sources (distributions de charges) et celles de leurs effets (champ et potentiel).</p> <p>On pourrait pour cela utiliser un logiciel de simulation ou de calcul formel.</p> |
| <p>Applications : champ et potentiel créés par un segment fini uniformément chargé en un point de son plan médiateur, champ sur l'axe d'un disque uniformément chargé, cas d'un plan illimité, mise en</p> | <p>Sur ces exemples, on met en évidence le fait que le champ électrostatique en un point des sources n'est pas défini lors qu'elles sont modélisées par une densité surfacique ou linéique de charge.</p> <p>Les relations de passages ne sont pas au</p> |

| | |
|--|--|
| évidence de la discontinuité. | programme de première année. On donne quelques ordres de grandeur de champs électrostatiques. |
| Flux du vecteur champ électrostatique, théorème de GAUSS. | On admet le théorème de GAUSS. |
| Applications : fil rectiligne et plan illimités et uniformément chargés, cylindre illimité et sphère chargée uniformément en surface et en volume. | On met en évidence l'équivalence du champ électrostatique d'une distribution à symétrie sphérique à celui d'une charge ponctuelle. |
| Analogie formelle avec le champ de gravitation : théorème de GAUSS pour le champ de gravitation. Application : équivalence du champ de gravitation d'une distribution à symétrie sphérique à celui d'une masse ponctuelle | On transpose le théorème de GAUSS au cas de la gravitation. |

5.2 Dipôle électrostatique

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Dipôle électrostatique : définition et modélisation, moment dipolaire. | On prend comme modèle un doublet rigide de deux charges ponctuelles +q et -q. |
| Approximation dipolaire : potentiel et champ créés à grande distance. Lignes de champ et surfaces équipotentielles. | On explicite les conditions de l'approximation dipolaire. Le potentiel et le champ créés sont exprimés à la fois en coordonnées sphériques et sous forme intrinsèque. On définit de façon plus générale les notions de distribution dipolaire de charges et de moment dipolaire. Ceci permet de faire le lien avec la chimie: on peut alors à travers un exemple expliquer les interactions ion-dipôle ou dipôle - dipôle lors de la mise en solution aqueuse d'un soluté. On affirme que les expressions du potentiel et du champ créés à grande distance d'une distribution dipolaire sont identiques à celles d'un doublet. Tout développement multipolaire est hors programme. |
| Action d'un champ électrostatique extérieur sur un dipôle rigide : - cas d'un champ uniforme. - cas d'un champ non uniforme. | On montre que l'action subie par le dipôle rigide se réduit à un couple dans le cas d'un champ uniforme. Dans le cas d'un champ non uniforme, on limite les calculs à l'ordre le plus bas non-nul. On met en évidence la tendance des dipôles à s'aligner sur le champ et à se déplacer alors vers les zones de champ fort. |

5.3 Aspects énergétiques

| Programme | Commentaire |
|---|---|
| Énergie potentielle électrostatique d'une charge ponctuelle dans un champ électrostatique extérieur. | |
| Relation entre la force et le gradient de l'énergie potentielle. Énergie d'interaction d'un système de charges discret ou continu. | On signale que la relation $\mathbf{F} = -\mathbf{grad}(E_p)$, tout comme le travail en mécanique, permet de définir le concept de force conservative. |
| Énergie potentielle d'un dipôle électrostatique rigide dans un champ extérieur. | |

5.4 Champ magnétostatique

| Programme | Commentaire |
|---|---|
| Distributions de courant électrique. Recherche des invariances par rotation, par translation ; recherche de plans de symétrie et d'antisymétrie. | |
| Champ magnétostatique : loi de BIOT et SAVART pour les circuits fermés filiformes. Principe de superposition. | On donne quelques ordres de grandeur de champs magnétostatiques : au voisinage d'aimants, dans une machine électrique, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre... Le potentiel-vecteur est hors programme en première année. |
| Topographie : lignes de champ et tubes de champ. | Les équations différentielles des lignes de champ et leur intégration sont exclues en première année. Sur des exemples de cartes de champ magnétique, on fait apparaître le lien entre les propriétés de symétrie des sources et celles du champ créé. On peut comparer des spectres magnétiques avec des cartes de champ tracées à l'aide d'un logiciel. |
| Propriétés de symétrie du champ magnétostatique ; caractère axial du champ. | |
| Exemples de calcul de champ magnétostatique : champs d'un segment, d'un fil rectiligne illimité, d'une spire circulaire et d'un solénoïde à section circulaire en un point de leurs axes. | On fait remarquer que le fil rectiligne illimité modélise un circuit fermé comportant une portion rectiligne dont la longueur est grande devant sa distance au point où le champ magnétostatique est évalué. Aucune technicité de calcul ne doit être recherchée. |
| Flux du champ magnétostatique, sa conservation. | On admet que le flux du champ magnétostatique se conserve à travers une surface fermée. |
| Circulation du champ magnétostatique, théorème d'AMPERE. Application : fil rectiligne infini, nappe infinie de courant surfacique, solénoïde infini. Mise en évidence de la discontinuité. | On admet le théorème d'AMPERE. |

5.5 Dipôle magnétique

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Dipôle magnétique : définition et modélisation, moment dipolaire. | On prend comme modèle la spire circulaire ; on définit son moment magnétique \mathbf{M} . On évalue des ordres de grandeur du moment magnétique dans les domaines macroscopique et microscopique. |
| Approximation dipolaire : champ magnétique créé à grande distance. | On explicite les conditions de l'approximation dipolaire. On admet l'expression du champ magnétique à la fois en coordonnées sphériques et sous forme intrinsèque et on souligne l'analogie avec celle du champ électrostatique créé par un dipôle électrostatique. On présente et on exploite les propriétés de symétrie du modèle étudié. |
| Lignes de champ. | On signale que les lignes de champ du dipôle électrostatique et du dipôle magnétique sont différentes. |
| Action d'un champ magnétostatique extérieur sur un dipôle magnétique : - Cas d'un champ uniforme. - Cas d'un champ non uniforme. | On montre que l'action subie par le dipôle rigide se réduit à un couple dans le cas d'un champ uniforme. Dans le cas d'un champ non uniforme, on limite les calculs à l'ordre le plus bas non nul. |

| | |
|--|---|
| Énergie potentielle d'interaction d'un dipôle magnétique dans un champ magnétique extérieur. | On met en évidence la tendance des dipôles à s'aligner sur le champ et à se déplacer vers les zones de champ fort. En conclusion de cette partie, on compare les propriétés des champs électrostatique et magnétostatique, en particulier leur topographie et leurs symétries respectives. |
|--|---|

Approche expérimentale PCSI-PSI

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

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

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

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

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

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

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

6. 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.

6.1 Mesures et incertitudes

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

Les compétences acquises pourront être réinvesties dans le cadre des travaux d'initiative personnelle encadrés.

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 tableau ci-dessous explicite les notions exigibles sur le thème « mesures et incertitudes ».

| Programme | Commentaire |
|---|--|
| Erreur ; composante aléatoire et composante systématique de l'erreur. | On utilise le vocabulaire de base de la métrologie : mesurage, valeur vraie, grandeur d'influence, erreur aléatoire, erreur systématique. On identifie les sources d'erreurs lors d'une mesure. |
| Notion d'incertitude, incertitude type. Évaluation d'une incertitude-type. Incertitude-type composée. Incertitude élargie. | L'élève doit savoir que l'incertitude est un paramètre associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être raisonnablement attribuées à la grandeur mesurée. On procède à l'évaluation de type A de l'incertitude-type (incertitude de répétabilité). On procède à l'évaluation de type B de l'incertitude-type dans des cas simples (instruments gradués) ou à l'aide de données fournies par le constructeur (résistance, multimètre, oscilloscope, thermomètre, verrerie...). On évalue l'incertitude-type d'une mesure obtenue à l'issue de la mise en œuvre d'un protocole présentant plusieurs sources d'erreurs indépendantes à l'aide d'une formule fournie ou d'un logiciel. On compare les incertitudes associées à chaque source d'erreurs. On associe un niveau de confiance de 95 % à une incertitude élargie. |
| Présentation d'un résultat expérimental. Chiffres significatifs. | On exprime le résultat d'une mesure par une valeur et une incertitude associée à un niveau de confiance. On habitue les élèves à présenter les résultats en respectant le nombre de chiffres significatifs. |
| Acceptabilité du résultat et analyse du mesurage (ou processus de mesure). | On commente qualitativement le résultat d'une mesure en le comparant, par exemple, à une valeur de référence. On analyse les sources d'erreurs et on propose des améliorations du processus de mesure. |

6.2 Notion de rayon lumineux. Lois de la réflexion et de la réfraction.

| Programme | Commentaire |
|---|---|
| Présentation des sources de lumière : lampes spectrales, sources de lumière blanche, laser. Modèle de la source ponctuelle monochromatique. | Aucune connaissance sur les sources de lumière, notamment les mécanismes d'émission n'est exigible. On caractérise une source lumineuse par son spectre. |
| Propagation de la lumière dans les milieux matériels. Indice d'un milieu transparent. | On relie la longueur d'onde dans le vide et la longueur d'onde dans le milieu. |
| Approximation de l'optique géométrique, notion de rayon lumineux, propagation rectiligne dans un milieu homogène, cas d'un milieu non homogène. | On se limite à une présentation qualitative de l'approximation de l'optique géométrique. On limite le faisceau lumineux pour mettre en évidence la limite du modèle. Cette notion sera reprise en deuxième année à propos du cours sur la diffraction. La notion du rayon lumineux est l'occasion pour mettre en valeur l'importance du modèle dans la physique. |
| Lois de DESCARTES-SNELL : réflexion et réfraction d'un faisceau lumineux, plan d'incidence, lois de la réflexion, indice d'un milieu transparent, lois de la réfraction, réfraction limite, réflexion totale. | On vérifie expérimentalement les lois de la réflexion et de la réfraction. |

6.3 Lentilles sphériques minces et miroirs : formation d'image, relation de conjugaison, conditions de GAUSS, notions sur les aberrations

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Lentilles sphériques minces : reconnaissance rapide du caractère convergent ou divergent d'une lentille. Formation d'image, mise en œuvre d'un objet réel ou virtuel, à distance finie ou infinie. Stigmatisme et aplanétisme. Conditions de GAUSS, notions sur les aberrations. | On vérifie les conditions de GAUSS expérimentalement et on met en évidence les aberrations géométriques de distorsion et chromatiques. On relie les conditions de GAUSS aux caractéristiques d'un détecteur. |
| Relations de conjugaison, grandissement transversal. | On vérifie expérimentalement l'existence des foyers. On insiste sur les contraintes de distance objet-image et de grandissement linéaire pour le choix des lentilles de projection. On établit la condition $D \geq 4f'$ pour former l'image réelle d'un objet réel par une lentille convergente. |
| Miroirs : Reconnaissance rapide du caractère convexe ou concave d'un miroir sphérique ou de son caractère plan. Formation d'image, mise en œuvre d'un objet réel ou virtuel, à distance finie ou infinie. | |

6.4 Étude de quelques instruments optiques de laboratoire et leur utilisation

| Programme | Commentaire |
|----------------------------|---|
| L'œil, la loupe. | On modélise l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur fixe. On dégage le rôle de l'œil : processus d'accommodation, distance minimale de vision distincte, limite de résolution angulaire et vision de détails, champ visuel, profondeur de champ. Aucune question ne peut porter sur le fonctionnement de l'œil. |
| L'appareil photographique. | On compare des images produites par un appareil |

| | |
|---|--|
| | photographique numérique et on discute l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image et le rôle du capteur sur la qualité de cette image. |
| Collimateur : description, réglage, utilisation. | Le collimateur est modélisé par une lentille mince convergente. |
| Lunette simple, lunette autocollimatrice : description, réglage, utilisation. | L'ensemble objectif et oculaire est modélisé par deux lentilles minces formant un système afocal. On insiste sur le fait que l'étendue transversal d'un objet ou d'une image à l'infini est caractérisée par un angle. On indique la nécessité de faire appel à des systèmes plus complexes afin de corriger la lunette des aberrations géométriques et chromatiques, mais toute connaissance à ce sujet est hors programme. |
| Visueur, viseur à frontale fixe : description et utilisation (pointés longitudinaux et transversaux). | Ce domaine est particulièrement adapté pour sensibiliser les étudiants aux incertitudes de mesure. On sensibilise les élèves aux causes d'erreurs dans les réglages : latitude de mise au point, parallaxe... |

6.5 Goniomètre à prisme

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Description d'un goniomètre. Réglage d'un goniomètre. Mesures : angle au sommet d'un prisme, indice d'un prisme, angle de déviation, minimum de déviation, longueurs d'onde. | Le réglage de la perpendicularité de l'axe de rotation de la plate-forme et de l'axe optique de la lunette n'est pas exigible. Le réglage de la perpendicularité des normales aux faces du prisme à l'axe de rotation de la plate-forme n'est pas exigible. Mise en évidence expérimentale du minimum de déviation. |
| Spectromètre à fibre optique | On étudie un spectre à l'aide d'un spectromètre à fibre optique. |

6.6 Instrumentation électronique au laboratoire (présentation, réglage, règles d'utilisation)

| Programme | Commentaire |
|---|--|
| Présentation des appareils usuels : oscilloscope analogique, oscilloscope à mémoire numérique, interfaçable numériquement, générateur de signaux électriques (BF) avec modulation interne en fréquence et sortie d'une tension image de la fréquence, carte d'acquisition, alimentation stabilisée en tension et en courant, multimètre numérique, fréquencemètre. | On présente les caractéristiques essentielles de chaque appareil : impédance d'entrée, impédance de sortie, bande passante selon le cas. |
| Réglage et utilisation des appareils : Fonctionnement et utilisation de l'oscilloscope : couplages d'entrée AC et DC, mode X-Y, mode balayage (déclenchement, synchronisation), mesures de tensions, fréquences ou périodes, décalages temporels/différences de phases. Utilisation du GBF : élaboration d'un signal électrique analogique périodique de valeur moyenne, de forme, d'amplitude et de fréquence données. | Sur les montages effectués, on fait observer les conséquences de l'existence de raccordement à la terre de certains appareils. Les élèves doivent apprendre à se placer systématiquement en couplage DC et à n'utiliser le couplage AC que dans un but précis (suppression d'un décalage constant) après s'être assuré de son innocuité (fréquence suffisante, forme des signaux). Sur des exemples, on fait réfléchir au fait que la mise en place d'un appareil de mesure modifie le circuit. Les élèves doivent apprendre à choisir de façon |

| | |
|--|---|
| Utilisation des multimètres : mesure de l'amplitude, de la valeur crête à crête, de la valeur moyenne et de la valeur efficace vraie, de la fréquence, fonctionnement en ohmmètre/capacimètre. | cohérente la fréquence d'échantillonnage, et la durée totale d'acquisition. Ils doivent aussi maîtriser l'analyse spectrale d'un signal périodique à l'aide d'un oscilloscope numérique ou d'une carte d'acquisition. On habitue les élèves à présenter les résultats en respectant le nombre de chiffres significatifs. |
|--|---|

6.7 Amplificateur opérationnel en régime linéaire

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| L'amplificateur opérationnel : - Présentation, symbole, polarisation. - Caractéristique de transfert statique : les deux régimes de fonctionnement de l'amplificateur opérationnel. | Les hypothèses du modèle idéal sont dégagées, en faisant référence à l'impédance d'entrée infinie, à l'impédance de sortie nulle, au gain infini et à l'absence de décalages constants en courant ou en tension. |
| Modélisations linéaires : - Modélisation dynamique : gain différentiel en tension (système de premier ordre), résistance d'entrée, résistance de sortie. - Modélisation simple : amplificateur opérationnel idéal. | On interprète le comportement du montage par la modélisation de l'amplificateur opérationnel par un passe-bas du premier ordre. |
| Étude du montage non inverseur : réponse fréquentielle pour différentes valeurs du gain, caractère passe-bas du montage. Produit du gain par la bande passante. Limitations en tension, en courant et en fréquence (slew-rate). | On fait constater la nécessité de bouclage sur l'entrée inverseuse pour que le régime linéaire soit possible. |
| Étude du montage suiveur : adaptation d'impédance. | On vérifie que sa résistance d'entrée est très grande et que sa résistance de sortie est très faible. |
| Étude du montage intégrateur et pseudo-intégrateur : approche fréquentielle, approche temporelle. | On fait remarquer l'existence des courants de polarisation qui conduisent à réaliser un pseudo-intégrateur plutôt qu'un intégrateur. On exploite le diagramme de BODE pour prévoir le comportement du circuit attaqué par un signal périodique de forme quelconque en relation avec l'analyse de FOURIER. On dégage la condition pour obtenir l'opérateur "valeur moyenne". L'approche temporelle est traitée à partir de l'équation différentielle. On met en évidence le caractère intégrateur du montage et la condition sur la période du signal à intégrer. Hormis leur existence, aucune connaissance au sujet des défauts de l'amplificateur opérationnel n'est exigible. |

6.8 Amplificateur opérationnel en régime non linéaire

| Programme | Commentaire |
|--|--|
| Comparateur à hystérésis : montage, caractéristique de transfert, bistabilité. | L'amplificateur opérationnel est supposé idéal. On compare le montage à l'amplificateur non inverseur et on souligne la condition d'application de la relation $v_+ = v_-$ pour les circuits à amplificateur opérationnel. L'instabilité est interprétée à partir de la solution de l'équation différentielle satisfaite par la tension de |

| | |
|---------------------------------------|--|
| Application : multivibrateur astable. | sortie, en considérant le caractère passe-bas de l'amplificateur opérationnel. On fait dégager le critère de stabilité en relation avec les coefficients de l'équation différentielle. On fait constater la limitation en fréquence due à la valeur finie de la vitesse de balayage. On réalise un montage qui permet de générer des signaux rectangulaire et triangulaire. |
|---------------------------------------|--|

6.9 Étude de la diode et de ses applications

| Programme | Commentaire |
|--|---|
| Visualisation de la caractéristique : diode, diode zener. Modèle limite de la diode idéale. Redressement simple et double alternance (pont de diodes). Application : filtrage capacitif et stabilisation de la tension. | On fait apparaître la condition de validité du modèle de la diode idéale en comparant la tension de seuil aux tensions utilisées et les résistances en polarisation directe et inverse aux autres résistances du circuit. On observe l'effet de la capacité et de la résistance de charge sur l'ondulation. On met en évidence le rôle stabilisateur de la diode zener dans le montage. |

7. 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 | Fonctionnement et utilisation de l'oscilloscope. |
| 2 | Utilisation des multimètres. |
| 3 | Présentation et 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 | Mesures de résistances : - Mesures des résistances accessibles : utilisation de l'ampèremètre et du voltmètre. Codes des couleurs. Utilisations de l'ohmmètre - Mesures des résistances non accessibles : résistance interne d'un GBF, résistance d'entrée d'un oscilloscope, résistance interne d'un ampèremètre |
| 5 | Étude de régimes transitoires dans les circuits RC et RL. |
| 6 | Étude de filtres de premier ordre. Diagramme de BODE. Caractères intégrateur et dérivateur. |
| 7 | Étude d'un filtre sélectif de second ordre. Diagramme de BODE. Application : filtrage d'un signal |

| | |
|----|---|
| | rectangulaire. |
| 8 | Étude de quelques montages à amplificateur opérationnel : inverseur, non inverseur, suiveur, sommateur, ... |
| 9 | Étude des défauts et des limitations de l'amplificateur opérationnel. |
| 10 | Réalisation d'une alimentation stabilisée en tension (conversion alternatif-continu). |
| 11 | Focométrie des lentilles minces. |
| 12 | Modélisation d'un instrument d'optique. |
| 13 | Étude de la chute libre et de quelques expériences sur le banc à coussin d'air. Mesure de longueurs à partir d'une photo ou d'une vidéo. Mise en œuvre d'une méthode de stroboscopie. Enregistrement d'un phénomène à l'aide d'une caméra numérique et repérage de la trajectoire à l'aide d'un logiciel dédié, déduction la vitesse et l'accélération. Mise en œuvre un capteur de vitesse, un accéléromètre. |
| 14 | Étude de quelques expériences de mécanique sur la table à autoporteurs. Chocs élastiques. |
| 15 | Étude d'oscillateurs mécaniques : pendule pesant, pendule de torsion. |
| 16 | Étude des isothermes d'Andrews. |
| 17 | Mesures calorimétriques. Mise en œuvre une technique de calorimétrie. |
| 18 | Changement d'état d'un corps pur. Mise en œuvre d'un capteur de pression, en distinguant son caractère différentiel ou absolu. Mise en œuvre un capteur de température : thermomètre, thermocouple, thermistance, ou capteur infrarouge. |
| 19 | Mesures de champ magnétique. Spectre magnétique. |
| 20 | Tracé de la caractéristique statique d'un capteur. Mise en œuvre d'un capteur dans un dispositif expérimental. |