

## ANNEXE 12

### PROGRAMME DE PHYSIQUE DE LA VOIE PTSI

Le programme valorise l'approche expérimentale des phénomènes pour stimuler chez l'étudiant une attitude active et créatrice, favorisant l'appropriation des connaissances ainsi que le développement d'une certaine dextérité manuelle. Les travaux pratiques (TP) et les TP-COURS sont les temps forts de cette valorisation.

Des TP-COURS sont mis en place en optique et en électricité. Leur but est l'acquisition de savoir-faire expérimentaux de base dans le cadre d'un travail interactif : au tableau et au poste de démonstration du professeur, au tableau et au poste de TP pour l'étudiant.

Leur durée est limitée à 2 heures prises sur la plage horaire des séances de TP. Ceci permet de dispenser en PTSI une formation expérimentale limitée dans ses contenus, mais approfondie.

Chaque fois que cela est possible, l'ordinateur interfacé doit être utilisé pour l'acquisition et le traitement des données expérimentales. Il devient ainsi un instrument courant des laboratoires, au service de l'expérience.

Le contenu des TP reste, dans un cadre plus souple, de la responsabilité et de la liberté pédagogique du professeur. Si le programme propose des thèmes de TP choisis notamment pour illustrer le cours de physique, ceux-ci peuvent être remplacés par tout autre thème à l'initiative du professeur et ne faisant appel qu'aux connaissances au programme de la classe. A la différence des séances de TP-COURS nécessairement très cadrées, les séances de TP sont orientées vers l'acquisition d'une autonomie progressive dans la démarche expérimentale. On habitue notamment les étudiants à rédiger un compte-rendu présentant les manipulations, les éventuels réglages préliminaires, les résultats des mesures et les commentaires que ceux-ci suscitent.

Les pratiques d'évaluation doivent être cohérentes avec l'esprit même du programme. La spécificité de la filière PT doit donc se retrouver dans le contrôle des connaissances. Ces évaluations doivent respecter les objectifs suivants : tester l'aptitude de l'étudiant à comprendre le phénomène physique, savoir mettre en équation la situation modélisée, obtenir par les méthodes du programme des résultats concrets et les analyser. Elles doivent privilégier le contenu physique et limiter la technicité des calculs. En particulier, le formalisme mathématique des calculs d'incertitude par différenciation linéaire ou logarithmique est hors programme.

Les thèmes de TP n'étant que des propositions, ils ne correspondent pas à des connaissances ou des savoir-faire exigibles.

Ceux-ci se limitent aux contenus du cours décrits dans la rubrique « Approche théorique » et aux parties de la rubrique « Démarche expérimentale » abordées en cours et en TP-COURS.

Le programme est découpé en deux parties. La première, qui devra être traitée en début d'année (dix à douze semaines), a pour objectif majeur de faciliter la transition avec l'enseignement secondaire. Trois idées ont guidé sa rédaction :

- i) En raison du nombre important d'outils et de méthodes nécessaires à la construction d'un enseignement de physique post-baccalauréat, il convient d'introduire ces outils et ces méthodes de manière progressive.
- ii) Par ailleurs, il est préférable qu'en début d'année ces outils nouveaux soient introduits sur des situations conceptuelles aussi proches que possible de celles qui ont été rencontrées au lycée ; de même l'introduction à ce stade de concepts physiques nouveaux doit éviter au mieux l'emploi d'outils mathématiques non encore maîtrisés.
- iii) Enfin, dès lors que ces outils sont souvent communs à plusieurs disciplines scientifiques, la recherche d'une cohérence maximale entre les enseignements de mathématiques, sciences industrielles, physique et chimie est indispensable pour faciliter le travail d'assimilation des étudiants. Ceci interdit tout cloisonnement des enseignements scientifiques et suppose au contraire une concertation importante au sein de l'équipe pédagogique.

Ces différentes contraintes ont conduit à placer dans la première partie des éléments d'optique géométrique, de mécanique du point et d'électrocinétique. Il est important que les enseignants des classes

préparatoires connaissent précisément les rubriques des programmes de l'enseignement secondaire qu'ils sont amenés à approfondir.

Pour que les objectifs de la première partie soient atteints, il est essentiel d'éviter tout débordement, même par simple anticipation sur le programme de deuxième partie. Par ailleurs à ce stade, on ne saurait exiger des étudiants qu'ils puissent traiter des exercices et problèmes directement issus des épreuves de concours sans que ceux-ci aient fait l'objet d'adaptations.

Dans la deuxième partie du programme, l'ordre d'exposition relève de la liberté pédagogique du professeur. Les outils mathématiques sont introduits au fur et à mesure que leur nécessité apparaît. Une bonne concertation au sein de l'équipe pédagogique peut permettre de bénéficier de synergies : le produit vectoriel, les nombres complexes, des notions sur les équations différentielles linéaires, font par exemple partie de l'enseignement de mathématiques de début d'année ; par ailleurs la cinématique du solide enseignée en sciences industrielles fournit l'outil nécessaire pour aborder les changements de référentiel en physique.

## PREMIÈRE PARTIE

### I. APPROCHE THÉORIQUE

#### A) Mécanique du point

L'objectif est d'introduire progressivement quelques-uns des concepts de base de la mécanique tridimensionnelle ainsi que les premiers outils nécessaires à l'étude de la mécanique du point, et cela en accord avec les idées mises en œuvre dans l'enseignement de sciences industrielles.

Le programme ci-dessous est fondé sur l'introduction d'un objet conceptuel, "le point matériel". Cette notion permet de modéliser des "particules" quasi-ponctuelles au mouvement desquelles on s'intéresse ; elle est d'autre part utilisable pour le centre d'inertie d'un système. Enfin, elle permettra ultérieurement l'analyse et l'étude du mouvement d'un système quelconque (solide, fluide), à l'aide d'une décomposition "par la pensée" en éléments matériels considérés comme quasi-ponctuels.

#### Outils mathématiques

Pour cette première partie, les outils mathématiques nécessaires sont volontairement limités :

- Pour la cinématique : à la géométrie dans  $\mathbb{R}^2$  et dans  $\mathbb{R}^3$  (vecteurs, produit scalaire) ainsi qu'aux notions de dérivée temporelle d'un vecteur dans un référentiel donné et de dérivée d'une fonction composée.
- Pour la dynamique : à la distinction entre équation différentielle linéaire ou non-linéaire (superposition de solutions ou non) ; à la résolution d'équations différentielles linéaires d'ordre un ou deux à coefficients constants, sans second membre ou avec second membre ; aux idées sur les méthodes numériques de résolution d'équations différentielles (méthode d'Euler).
- Pour les aspects énergétiques : à l'intégrale première de l'énergie mécanique (équation différentielle du premier ordre) et au développement limité d'une fonction d'une variable à l'ordre 2 au voisinage d'une valeur de la variable. La notion de gradient n'est pas introduite à ce stade.

#### Programme

#### Commentaires

##### 1. Description du mouvement d'un point et paramétrage d'un point.

Espace et temps.

À ce stade, le point n'a aucune matérialité.

Référentiel d'observation.

Description du mouvement : vecteurs position, vitesse et accélération.

Il est important de faire la distinction entre la description du mouvement et l'étude de ses causes.

Deux exemples de bases de projection orthogonales : vitesse et accélération en coordonnées cartésiennes (base fixe) et

Un point essentiel est de souligner que le paramétrage et la base de projection doivent être adaptés au problème posé. Ainsi, pour le mouvement de vecteur accélération constant, la

en coordonnées cylindro-polaires (base mobile).

Exemples du mouvement de vecteur accélération constant, du mouvement rectiligne sinusoïdal, du mouvement circulaire.

## 2. Dynamique du point en référentiel galiléen.

Notion de force.

Référentiels galiléens.

Lois de Newton : loi de l'inertie, loi fondamentale de la dynamique du point matériel, loi des actions réciproques.

Équation du mouvement.

Applications : mouvement dans le champ de pesanteur uniforme sans résistance de l'air puis avec résistance de l'air, mouvement d'une masse accrochée à un ressort dont l'autre extrémité est fixe.

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

## 3. Problèmes à un degré de liberté.

3.1. Énergie potentielle dans les problèmes à un degré de liberté.  
Énergie potentielle : exemples de l'énergie potentielle de pesanteur et de l'énergie potentielle élastique.  
Énergie mécanique.

Cas de conservation de l'énergie mécanique.  
Intégrale première de l'énergie.  
Utilisation d'une représentation graphique de l'énergie potentielle : caractère borné ou non d'un mouvement.

Positions d'équilibre, stabilité.

base cartésienne de projection doit être judicieusement orientée. De même, pour le mouvement circulaire, le paramétrage cartésien est moins adapté que le paramétrage polaire.

On se limite à des mouvements plans. L'utilisation de la base de Frenet (même plane) est exclue. On se borne à rappeler que dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme il existe un vecteur accélération lié au changement de direction du vecteur vitesse.

On souligne que la dynamique relie le mouvement observé à ses causes, qu'elle fait intervenir une caractéristique matérielle de l'objet (sa masse ou inertie) et que les causes admettent une représentation vectorielle sous le nom de forces.

On ne soulève pas de difficulté sur les répartitions de forces (étendue des systèmes) ni sur la notion de point matériel.

À ce stade, l'existence de référentiels galiléens est simplement affirmée et on ne se préoccupe pas de la recherche de tels référentiels. On indique que le référentiel terrestre peut être considéré comme galiléen dans la plupart des expériences usuelles.

L'inventaire des forces associé au principe fondamental de la dynamique conduit à une équation différentielle. Sur des exemples déjà étudiés dans l'enseignement secondaire, l'objectif est de passer lorsque c'est possible à une résolution analytique de l'équation différentielle (cas d'une force de frottement proportionnelle à la vitesse) et de mettre en œuvre sur d'autres exemples une résolution numérique (cas d'une force de frottement proportionnelle au carré de la vitesse).

L'objectif est de fonder le concept d'énergie potentielle, déjà utilisé en première, sur l'expression du travail de la force considérée. Le gradient n'est pas utilisé à ce stade. Il est important de dégager l'idée que l'énergie potentielle est une fonction de la position seulement.

Le pendule simple est un exemple qui permet de mettre en œuvre et de comparer différentes méthodes pour obtenir l'équation du mouvement d'un point matériel.

La notion d'oscillateur harmonique apparaît ici comme un cas limite. Les oscillateurs couplés sont hors programme. La notion de portrait de phase est hors programme.

Petits mouvements au voisinage d'une position d'équilibre stable.

3.2 Oscillateur harmonique à un degré de liberté.

Régimes libres d'un oscillateur harmonique à un degré de liberté amorti par frottement visqueux. Rôle de l'amortissement, facteur de qualité.

On met l'équation différentielle sous une forme canonique.

Une fois traités le circuit R-L-C série en régime libre et l'oscillateur harmonique amorti, on insiste sur le fait qu'un même squelette algébrique conduit à une analyse analogue pour des situations physiques a priori très différentes.

## B) Électrocinétique

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.

Programme	Commentaires
<b>1. Lois générales dans le cadre de l'approximation quasi-stationnaire.</b>	Le cadre précis de l'approximation des régimes quasi-stationnaires (ou quasi-permanents) sera discuté en seconde année. On se contente ici d'en affirmer les modalités d'application. La théorie générale des réseaux est hors programme.
Notion d'intensité du courant Loi des nœuds.	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. L'intensité du courant dans une branche orientée de circuit est le débit de charges à travers une section du conducteur. La loi des nœuds traduit une conservation de la charge en régime stationnaire dont on ne donne aucune formulation locale ; on admet l'extension de la loi des nœuds aux régimes lentement variables.
Différence de potentiel (ou tension), potentiel Loi des mailles.	La notion de champ électrique n'a pas encore été introduite à ce stade.
Puissance électrocinétique reçue par un dipôle. Caractère générateur et récepteur du dipôle.	
<b>2. Circuits linéaires.</b>	Un comportement linéaire est décrit par une équation différentielle linéaire à coefficients constants.
Dipôles modèles, R,L,C	On affirme la relation $q = Cu$ entre charge du condensateur et tension à ses bornes qui sera établie dans le cours d'électromagnétisme en première année ; on établit ensuite la relation $i = dq/dt$ à partir de la conservation de la charge. On affirme de même pour une bobine, en convention récepteur, la relation $u = r i + L di/dt$ qui sera établie en deuxième année, où seront aussi étudiés les circuits couplés par mutuelle.
Association des résistances en série, en parallèle.	A cette occasion on introduit les outils diviseur de tension et diviseur de courant.

Aspects énergétiques : énergie emmagasinée dans un condensateur et dans une bobine, puissance dissipée dans une résistance (effet Joule).

Modélisations linéaires d'un dipôle actif : générateur de courant (représentation de Norton) et générateur de tension (représentation de Thévenin) ; équivalence entre les deux modélisations.

On se limite à des circuits à petit nombre de mailles. Outre la loi des nœuds et la loi des mailles, on utilise les outils diviseur de tension, diviseur de courant, équivalence entre les modèles de Thévenin et de Norton. On se limite à des situations ne comportant pas de sources liées et pour lesquelles la détermination des éléments des modèles de Thévenin et de Norton est immédiate.

Étude des circuits R,C série, R,L série, R,L,C série soumis à un échelon de tension.

L'objectif est d'aborder l'étude de ces systèmes simples en s'appuyant sur les solutions analytiques des équations différentielles et en déterminant les constantes à partir des paramètres du circuit et des conditions initiales.

À cette occasion, on habitue les étudiants à trouver dans le problème, des grandeurs physiques caractéristiques qui permettent d'aboutir à une réduction canonique, en vue d'un traitement numérique éventuel ou du rapprochement avec un autre phénomène physique analogue. Une fois que le circuit R-L-C série en régime transitoire et l'oscillateur harmonique amorti ont tous deux été traités, on insiste sur le fait qu'un même squelette algébrique conduit à une analyse analogue pour des situations physiques a priori très différentes.

## II. APPROCHE EXPÉRIMENTALE

### A) Formation des images optiques

L'objectif de cette partie est de maîtriser les applications pratiques de l'optique géométrique dans les conditions de Gauss. À l'exception du cours d'optique géométrique, cette rubrique est traitée au laboratoire, en TP ou en TP-COURS, et conduit les étudiants à se familiariser avec des montages simples. De cette approche expérimentale, complétée avantageusement par l'utilisation de logiciels de simulation, on dégage et on énonce quelques lois générales. Le caractère de cet enseignement donne inévitablement au professeur l'occasion de faire observer des phénomènes, tels les aberrations, dont le traitement est hors programme ; on se borne dans ces conditions à leur observation, en l'accompagnant éventuellement d'un bref commentaire, mais on ne cherche en aucun cas à en rendre compte de façon théorique.

La rédaction des rubriques TP-COURS est détaillée car elle constitue un ensemble de compétences exigibles. En revanche, les thèmes de TP ne sont que des propositions ; le contenu et l'organisation des TP relèvent de l'initiative pédagogique du professeur et ne doivent faire appel qu'aux connaissances au programme de la classe.

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

#### Programme

#### Commentaires

### 1. Cours : formation des images dans les conditions de Gauss.

Notion de rayon lumineux.

On se limite à une présentation qualitative de l'approximation de l'optique géométrique. Cette notion sera reprise en deuxième année à propos du cours sur la diffraction.

Réfraction. Réflexion.  
Miroir plan.

Les lois de Descartes sont présentées comme des lois d'origine expérimentale.

L'étude de la propagation des rayons lumineux dans un milieu d'indice continûment variable est hors programme.

Miroirs sphériques et lentilles minces dans l'approximation de Gauss. Image réelle, image virtuelle. Relations de conjugaison et de grandissement.

L'approximation de Gauss est avantageusement introduite par l'intermédiaire d'un logiciel de simulation de trajets lumineux. À cette occasion, on met en évidence les aberrations géométriques et chromatiques qui sont aussi observées en TP.

Le dioptrique sphérique est hors programme. L'expression de la distance focale d'une lentille à bords sphériques en fonction de l'indice et des rayons de courbure est hors programme.

L'objectif premier est de maîtriser la construction des rayons lumineux. Le stigmatisme approché et l'aplanétisme étant admis, on montre que les constructions géométriques permettent d'obtenir des formules de conjugaison et de grandissement.

Toute étude générale des systèmes centrés, des associations de lentilles minces et des systèmes catadioptriques est hors programme, notamment la notion de plan principal et la formule de Gullstrand.

## **2. TP-COURS : Connaissances de base en optique géométrique**

La rédaction de la rubrique TP-COURS est détaillée car elle constitue un ensemble de compétences exigibles. Le but poursuivi est de maîtriser la mise en œuvre des montages qui seront notamment utilisés en optique ondulatoire en seconde année.

On peut répartir les TP-COURS d'optique sur 3 séances de 2 heures.

Présentation succincte des sources de lumière : lampes spectrales, sources de lumière blanche, laser.

Aucune connaissance sur les sources de lumière, notamment les mécanismes d'émission n'est exigible.

Reconnaissance rapide du caractère convergent ou divergent d'une lentille mince, du caractère convexe ou concave d'un miroir sphérique ou de son caractère plan.

Projection : obtention d'une image réelle d'un objet réel à l'aide d'une lentille mince convergente.

On insiste sur les contraintes de distance objet-image et de grandissement transversal pour le choix des lentilles de projection.

Autocollimation avec une lentille mince convergente et un miroir plan.

On dispose ainsi d'une méthode permettant de placer avec précision une source dans le plan focal objet d'une lentille

Principe de la lunette réglée à l'infini (avec oculaire convergent et réticule) ; grossissement angulaire.

L'objectif et l'oculaire sont modélisés par deux lentilles minces formant un système afocal. 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.

On insiste sur le fait que l'étendue transversale d'un objet ou d'une image à l'infini est caractérisée par un angle.

Aucune connaissance relative au fonctionnement de l'œil n'est exigible.

Principe du collimateur, réglage.	L'objectif est modélisé par une lentille mince
Réglage d'un goniomètre : réglage de la lunette autocollimatrice et du collimateur. Mesures d'angles.	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.
Mesure de distances longitudinales au banc d'optique à l'aide d'un viseur à frontale fixe.	Ce domaine est particulièrement adapté pour sensibiliser les étudiants aux incertitudes de mesure.

Le matériel nécessaire à l'acquisition des connaissances et savoir-faire exigibles en optique géométrique comprend : sources de lumière (blanche, lampes spectrales, laser), banc d'optique, lentilles minces convergentes et divergentes, miroirs sphériques et plan, collimateur, lunette autocollimatrice, viseur à frontale fixe, goniomètre.

## DEUXIEME PARTIE

### III. APPROCHE THÉORIQUE (DEUXIÈME PARTIE)

Le programme se place dans le cadre de la physique dite classique (non relativiste et non quantique). Chaque fois que c'est judicieux, on signale les limites de la théorie classique et l'existence de théories relativistes et quantiques.

#### A) Électrocinétique : circuits linéaires en régime sinusoïdal forcé

Il convient de consacrer un temps suffisant à familiariser les étudiants avec les caractéristiques des signaux sinusoïdaux : amplitude, phase, fréquence, pulsation, différence de phase entre deux signaux synchrones.

Ce programme s'appuie exclusivement sur les composants suivants : résistance, condensateur, bobine inductive et amplificateur opérationnel ; ce dernier est présenté en travaux pratiques. Tout autre composant (en particulier diode, diode Zener, transistor ...) est hors programme.

L'électrocinétique et l'électronique recoupent 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 et signalent aux étudiants les mots qui revêtent de manière irréductible des significations différentes en électronique et en automatique.

Dans cette partie on introduit la notation complexe pour déterminer la solution sinusoïdale d'une équation différentielle linéaire d'ordre un ou deux à coefficients constants dont le second membre est une fonction sinusoïdale du temps.

#### Programme

Signaux sinusoïdaux : amplitude, phase, pulsation, fréquence, différence de phase entre deux signaux synchrones.

#### Commentaires

De façon uniquement qualitative, on justifie l'intérêt des régimes sinusoïdaux forcés par leur rôle générique pour l'étude des régimes périodiques forcés. Aucun développement quantitatif sur l'analyse de Fourier n'est au programme de première année. Le calcul analytique des coefficients du développement en série de Fourier est hors programme; il relève du cours de mathématiques de deuxième année.

Étude du circuit R,L,C série ; résonances (intensité, tension aux bornes du condensateur).

Partant de l'équation différentielle établie dans le programme de première partie, on dégage les concepts de régime transitoire et de régime sinusoïdal forcé en s'appuyant notamment sur l'expérience. 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. Ce chapitre est rapproché de l'étude de l'oscillateur harmonique amorti par frottement visqueux et excité par une force sinusoïdale. On souligne que l'identité formelle conduit à des similitudes de comportement entre grandeurs électriques et mécaniques analogues.

Régime sinusoïdal forcé.  
Impédance et admittance complexes; lois d'association.  
Loi des mailles. Loi des nœuds ; son expression en termes de potentiels.

Il s'agit de généraliser l'usage de la notation complexe aux circuits linéaires. On introduit ici un outil commode : sous certaines réserves qu'on indique, le potentiel d'un nœud est le barycentre des potentiels des nœuds voisins affectés des admittances correspondantes. On se limite à des circuits à petit nombre de mailles. Les méthodes matricielles sont hors programme.

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 en première année.

Aspects énergétiques de l'étude du circuit RLC série.

On fait apparaître un bilan énergétique  $d/dt(Li^2/2 + q^2/2C) + Ri^2 = P$  ; 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.

Filtres du premier et du second ordre passifs ou actifs : fonction de transfert, diagramme de Bode, comportements asymptotiques, pulsation(s) de coupure à  $-3$  décibels, bande passante, facteur de qualité.

La fonction de transfert est étudiée et utilisée en première approche pour calculer un rapport d'amplitudes et un déphasage en régime sinusoïdal forcé. L'utilisation de la décomposition en série de Fourier pour la détermination de la réponse à un signal périodique relève du cours de seconde année.

La synthèse des filtres est hors programme.

Les exemples de filtres actifs font appel à l'amplificateur opérationnel introduit en TP-COURS. L'amplificateur opérationnel est supposé idéal, en fonctionnement non saturé (linéaire) et son gain est supposé infini.

L'étude des diagrammes de Bode est menée en liaison avec le cours de sciences industrielles. 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. Aucune technicité ne doit être recherchée dans les calculs.

Utilisation de notations symboliques ( $j\omega$  ou  $d/dt$ ) pour une détermination rapide des régimes sinusoïdaux établis ou des régimes transitoires.

Cette rubrique apparaît comme la conclusion de l'étude des circuits linéaires et ne fait l'objet d'aucun développement excessif.

L'étude de la stabilité des montages est hors programme.

## B) Mécanique

L'enseignement de mécanique de première année est limité à l'étude du point matériel. Par conséquent, les systèmes ouverts faisant par exemple intervenir une masse variable (fusée ...) sont hors

programme. La dynamique des systèmes matériels n'est abordée qu'en deuxième année et s'appuie sur le cours de mécanique de sciences industrielles.

À partir des notions de base introduites en première partie, il s'agit désormais d'aller plus loin avec de nouveaux outils mathématiques :

- 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, dans le chapitre sur les oscillations forcées.
- le produit vectoriel et le produit mixte, utilisés pour le théorème du moment cinétique, les champs de forces centrales, les changements de référentiel.
- les coordonnées sphériques pour lesquelles la seule relation utile à ce stade est  $d(\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}_r) = dr \mathbf{u}_r + r d\mathbf{u}_r$  avec  $\mathbf{u}_r \cdot d\mathbf{u}_r = 0$ .

## Programme

## Commentaires

### 1. Oscillations forcées dans les problèmes mécaniques à un seul paramètre.

Oscillateur harmonique amorti par frottement visqueux et soumis à une excitation sinusoïdale. Régime transitoire. Solution particulière sinusoïdale : résolution par la méthode complexe. Résonance en élongation et en vitesse.

De façon uniquement qualitative, on justifie l'intérêt des régimes sinusoïdaux forcés par leur rôle générique pour l'étude des régimes périodiques forcés. Aucun développement quantitatif sur l'analyse de Fourier n'est au programme de première année. Le calcul analytique des coefficients du développement en série de Fourier est hors programme; il relève du cours de mathématiques de deuxième année.

Ce chapitre est rapproché de l'étude des oscillations électriques forcées dans le dipôle R-L-C série. On souligne que l'identité formelle conduit à des similitudes de comportement entre grandeurs électriques et mécaniques analogues.

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.

### 2. Théorème du moment cinétique

Moment d'une force par rapport à un point, par rapport à un axe orienté.

On dégage le rôle du « bras de levier », c'est-à-dire de la distance entre le support de la force et l'axe considéré.

Moment cinétique par rapport à un point, par rapport à un axe orienté.

On souligne la relation entre le signe du moment par rapport à un axe orienté et le fait que la force tende à faire tourner le point dans un sens ou dans l'autre autour de cet axe.

Théorème du moment cinétique en un point fixe, théorème du moment cinétique par rapport à un axe fixe.

On insiste sur le fait que le théorème du moment cinétique fournit, pour une masse ponctuelle, une autre méthode pour obtenir des résultats accessibles par la deuxième loi de Newton.

Application au pendule simple.

### 3. Mouvements dans un champ de forces centrales conservatives

#### 3.1) Forces centrales conservatives

Forces centrales  $\mathbf{F} = F(r) \mathbf{u}_r$  où  $\mathbf{u}_r$  est le vecteur unitaire radial des coordonnées sphériques. Forces attractives et forces répulsives. Fonction énergie potentielle associée.

Exemple des forces de gravitation entre deux masses ponctuelles et des forces électrostatiques entre deux charges ponctuelles. Énergies potentielles associées.

#### 3.2) Lois générales de conservation

Conservation du moment cinétique par rapport au centre de forces et planéité du mouvement. Cas particulier des mouvements rectilignes.

Utilisation des coordonnées polaires.

Intégrale première associée.

Interprétation cinématique : loi des aires.

Conservation de l'énergie et intégrale première de l'énergie.

Utilisation d'une énergie potentielle effective pour ramener, grâce aux lois de conservation, le problème primitif à l'étude du mouvement radial. Relation entre l'énergie mécanique et le type de trajectoire : états liés, états de diffusion.

#### 3.3) Mouvement dans un champ de forces centrales newtonien attractif.

Énoncé des lois de Kepler.

Vitesse de libération.

Étude directe et propriétés particulières des trajectoires circulaires : relation entre énergie cinétique et énergie potentielle, relation entre rayon et vitesse, troisième loi de Kepler.

On se limite à des forces centrales conservatives passant par un point fixe dans un référentiel galiléen.

Dans l'hypothèse où l'une des particules est fixe, l'énergie potentielle est introduite à partir du travail élémentaire de la force  $\mathbf{F} = F(r) \mathbf{u}_r$ . La seule relation utile à ce stade est  $d(r \mathbf{u}_r) = dr \mathbf{u}_r + r d\mathbf{u}_r$  avec  $\mathbf{u}_r \cdot d\mathbf{u}_r = 0$ . Le gradient est introduit dans la partie électromagnétisme.

La masse gravitationnelle et la charge sont définies au travers des lois d'interaction correspondantes.

C'est l'occasion de signaler une des limites de la mécanique newtonienne : en relation avec le cours de chimie, on souligne que toute valeur de l'énergie mécanique est a priori permise, contrairement à ce qui se passe dans l'atome où les valeurs de l'énergie sont quantifiées.

On prend comme exemples les interactions gravitationnelle et coulombienne.

L'expérience de Rutherford est hors programme ; elle peut être mentionnée seulement pour son intérêt historique.

L'assimilation du champ gravitationnel d'un astre à symétrie sphérique à celui d'une masse ponctuelle est justifiée dans le cours d'électromagnétisme (théorème de Gauss).

Cette rubrique est abordée essentiellement en raison de son importance culturelle. L'étude est limitée au cas des trajectoires circulaires. Toute étude géométrique des trajectoires elliptiques, hyperbolique ou parabolique est hors programme. On signale simplement que la troisième loi de Kepler ainsi que la relation entre l'énergie et le demi grand axe, peuvent être généralisées aux trajectoires elliptiques.

L'étude des mouvements dans un champ gravitationnel est l'occasion de souligner l'identité de la masse inerte et de la masse gravitationnelle.

Les formules de Binet, le vecteur excentricité, les invariants dynamiques de Laplace ou Runge-Lenz, sont hors programme.

## 4.Changements de référentiel.

### 4.1) 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.

Définition des vitesses et des accélérations dans les deux référentiels.

Lois de composition des vitesses et des accélérations dans le cas d'une translation ou d'une rotation uniforme autour d'un axe fixe : vitesse d'entraînement, accélérations d'entraînement et de Coriolis.

L'ensemble du paragraphe 4.1) ne peut faire l'objet d'aucune question de cours.

On s'appuie sur le cours de sciences industrielles pour décrire le mouvement d'un référentiel par rapport à l'autre comme celui d'un solide caractérisé à chaque instant par son vecteur rotation et la vitesse de l'un quelconque de ses points (éléments qui définissent le torseur cinématique d'entraînement en sciences industrielles).

On utilise les lois de composition des vitesses et des accélérations établies en sciences industrielles.

La vitesse et l'accélération d'entraînement sont interprétées comme la vitesse et l'accélération d'un point d'un référentiel par rapport à l'autre (vitesse et accélération du point coïncident).

On fait remarquer que les champs des vitesses d'entraînement et des accélérations d'entraînement sont uniformes lorsque le référentiel « relatif » est en translation.

### 4.2) Dynamique en référentiel non galiléen.

Principe de relativité galiléenne, référentiels galiléens. Invariance galiléenne des forces d'interaction.

Lois de la dynamique du point en référentiel non galiléen : « forces d'inertie » (pseudo-forces).

Les applications concernent uniquement le cas où le référentiel entraîné est en translation ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe.

On insiste sur le fait que l'écriture des lois de la dynamique dans un référentiel non galiléen nécessite la connaissance de son mouvement par rapport à un référentiel galiléen.

On remarque que les termes nouveaux qui apparaissent dans la traduction de la loi fondamentale de la dynamique ont les dimensions de forces et qu'ils ne résultent pas d'une interaction mais du caractère non galiléen du référentiel utilisé.

L'appellation pseudo-forces ou la mise entre guillemets du vocable forces d'inertie est destinée, dans un premier temps, à éviter les confusions.

4.3) Caractère galiléen approché de quelques référentiels d'utilisation courante : référentiel de Copernic, référentiel de Kepler (héliocentrique), référentiel géocentrique, référentiel lié à la Terre.

On indique les conditions dans lesquelles on peut considérer certains référentiels comme galiléens et on fait mieux comprendre les choix des référentiels supposés galiléens dans les différents exemples traités antérieurement.

Les effets du caractère non galiléen de ces référentiels (force de Coriolis en dynamique terrestre...) peuvent être mentionnés seulement pour leur intérêt culturel ; mais leur étude est hors programme.

On donne la définition du poids d'un point matériel mais toute étude du champ de pesanteur est hors programme.

## C) Thermodynamique

Le but recherché en première année est la compréhension des deux principes de la thermodynamique et l'étude de leurs applications à des systèmes fermés simples. Le professeur s'attache, chaque fois que cela est possible, à choisir des exemples concrets.

En première année, l'enseignement de la thermodynamique est limité à l'étude du corps pur. Toute étude des mélanges monophasés ou diphasés, notamment de l'air humide est hors programme.

Cet enseignement est fondé sur le concept de fonction d'état d'équilibre : les différents concepts utilisés dérivent donc des fonctions d'état. On définit notamment les capacités thermiques comme des dérivées partielles de l'énergie interne et de l'enthalpie. Lorsque le fluide étudié ne relève pas du modèle du gaz parfait ou du modèle d'une phase condensée incompressible et indilatable, les expressions des équations d'état et des fonctions d'état doivent être fournies. Pour une grandeur extensive « A » on note « a » la grandeur massique associée et « A<sub>m</sub> » la grandeur molaire associée.

Les coefficients calorimétriques l, h (ou k), λ, μ, ainsi que les expressions générales de l et h (relations de Clapeyron) et de C<sub>p</sub>-C<sub>v</sub> sont hors-programme.

Cette partie fait appel aux notions élémentaires sur les fonctions de deux variables : différentielles, dérivées partielles. Il convient de savoir exprimer les principes de la thermodynamique au cours d'une évolution infinitésimale. Aucune dextérité ne doit être recherchée dans la manipulation des dérivées partielles : l'obtention d'une équation d'état à partir de coefficients thermoélastiques et le calcul de coefficients thermoélastiques à partir d'une équation d'état ne sont pas des objectifs du programme. La traduction différentielle des principes via le théorème de Schwartz est hors-programme. L'intégration d'une différentielle  $df = A(x,y)dx + B(x,y)dy$  dans le cas général où A dépend de y et où B dépend de x est hors-programme.

Programme	Commentaires
<b>1. Du gaz parfait monoatomique aux fluides réels et aux phases condensées</b>	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. L'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.
Description des caractères généraux de la distribution des vitesses moléculaires (homogénéité, isotropie, vitesse quadratique moyenne).	La loi de distribution des vitesses, la théorie des capacités thermiques (théorème d'équipartition) et le théorème du viriel sont hors programme.
Définition cinétique de la température, de la pression. Relation entre pression et vitesse quadratique moyenne.	On adopte un modèle élémentaire où les particules ont toutes la même vitesse en norme et ne se déplacent que dans les deux sens de trois directions orthogonales privilégiées. On admet la validité de l'expression de la pression, sous réserve de remplacer la vitesse des particules par la vitesse quadratique moyenne.
Équation d'état du gaz parfait. Energie interne. Capacité thermique à volume constant. Expressions de l'énergie interne du gaz parfait monoatomique, puis du gaz parfait non monoatomique.	L'équation d'état massique $Pv=rT$ est utilisée lors de travaux dirigés. On indique que pour un gaz parfait non monoatomique C <sub>v</sub> dépend de la température ; dans le cas du gaz parfait diatomique, on présente la courbe C <sub>v</sub> (T) mais aucune théorie à ce sujet ne figure au programme.
Notions qualitatives sur les fluides réels.	Aucune équation d'état de gaz réel n'est exigible.
Notion de dilatation et notion de compressibilité d'un fluide.	On se borne à définir les coefficients α et χ <sub>T</sub> ; le coefficient β est hors-programme. L'utilisation des coefficients α et χ <sub>T</sub> en liaison avec l'équation d'état est hors programme en première année.

Modèle d'une phase condensée incompressible et indilatable : énergie interne.

## 2. Eléments de statique des fluides dans le champ de pesanteur.

Relation  $dp/dz = -\rho g$ .  
Applications au cas d'un fluide incompressible et homogène et au cas de l'atmosphère isotherme dans le modèle du gaz parfait.

Poussée d'Archimède.

## 3. Premier principe . Bilans d'énergie.

Premier principe. Energie interne.  
Transferts : transfert thermique (ou chaleur), travail ; cas particulier du travail des forces de pression.

Enthalpie ; capacité thermique à pression constante.

Enthalpie du gaz parfait.  
Enthalpie d'une phase condensée dans le modèle incompressible et indilatable.

Détente de Joule – Gay Lussac. Détente de Joule-Kelvin (ou Joule-Thomson).

## 4. Deuxième principe. Bilans d'entropie.

Deuxième principe. Évolutions réversibles et irréversibles. Fonction d'état entropie. Entropie créée, entropie échangée.

Identité thermodynamique fondamentale  $dU = TdS - PdV$ , définitions thermodynamiques de la pression et de la température.

Entropie du gaz parfait. Loi de Laplace.  
Entropie d'une phase condensée dans le modèle incompressible et indilatable.

Il s'agit simplement d'utiliser la relation approchée :  
 $dU = C_V(T) dT$ .

On se limite au cas du champ de pesanteur uniforme. La relation générale faisant intervenir le gradient du champ de pression est hors programme en première année.

L'étude de l'atmosphère isotherme sert à justifier par un calcul d'ordre de grandeur que la pression dans un gaz est en général considérée comme uniforme en thermodynamique.

La tension superficielle est hors programme.

Le calcul du torseur des forces de pression exercées par un fluide sur une paroi solide est hors programme.

L'étude des rotations des corps flottants (roulis, tangage) est hors programme.

Aucune démarche n'est imposée. Un objectif majeur est d'apprendre aux étudiants à évaluer le transfert thermique lors d'une évolution non adiabatique en utilisant le premier principe. Le premier principe est énoncé dans le cas général faisant intervenir un terme d'énergie cinétique macroscopique. On se limite aux cas où la séparation entre l'énergie interne et l'énergie cinétique macroscopique ne soulève pas de difficulté. Pour les transferts (travail, chaleur) on adopte les notations  $W$ ,  $Q$ ,  $\delta W$  et  $\delta Q$  et pour les variations des fonctions d'état les notations  $\Delta U$ ,  $\Delta H$ ,  $dU$  et  $dH$ . On insiste sur la signification de ces notations. Les notations  $\Delta W$  et  $\Delta Q$  sont proscrites.

L'enthalpie est utilisée d'une part pour l'étude de la détente de Joule-Kelvin et d'autre part pour exprimer le transfert thermique lors d'une évolution à pression constante, situation courante en chimie.

Pour les gaz parfaits, on signale que  $C_{pm} - C_{vm} = R$ . Pour les phases condensées, il s'agit simplement d'utiliser la relation approchée  $dH = C_p(T) dT$  ; on se limite aux cas où on peut confondre  $C_p$  et  $C_v$ .

On insiste sur l'intérêt de ces détentes pour l'étude des fluides réels.

L'interprétation statistique de l'entropie est hors programme.

L'objectif ne se limite pas au calcul de l'entropie créée : il convient d'analyser les causes d'irréversibilité.

On en déduit l'identité thermodynamique  $dH = TdS + VdP$ .  
L'équivalence entre les définitions thermodynamiques et les définitions cinétiques de la pression et de la température est simplement affirmée.

Pour les phases condensées, il s'agit simplement d'utiliser la relation approchée  $dS = C_p dT/T$  ; on se limite aux cas où on peut confondre  $C_p$  et  $C_v$ .

Troisième principe de la thermodynamique.

On se contente d'affirmer que l'entropie d'un corps pur cristallisé parfait tend vers zéro lorsque la température thermodynamique tend vers zéro.

## 5. Machines thermiques

L'étude des fluides en écoulement se limite, en première année, à la détente de Joule-Thomson. La formulation systématique des principes de la thermodynamique des fluides en écoulement est hors programme en première année, mais figure au programme de seconde année.

Application du premier principe et du deuxième principe aux machines thermiques cycliques dithermes ; rendement, efficacité, théorème de Carnot.

Outre l'étude générale des divers types de machines dithermes cycliques, on s'attache à présenter comment, à partir du cycle réel du moteur à explosion, on passe à un cycle modélisé tracé en diagramme (P,v) dit de Clapeyron. Cette présentation ne fait l'objet de l'acquisition d'aucune connaissance spécifique exigible. La notion de travail de transvasement est hors programme en première année.

## 6. Notions sur les changements d'état du corps pur.

L'approche est descriptive ; la formule de Clapeyron est hors programme.

On se limite aux changements d'état solide – liquide – gaz.

Diagramme (P,T), point triple, point critique. Enthalpie et entropie de changement d'état.

Cas de l'équilibre liquide-vapeur : diagramme (P,v) dit de Clapeyron.

La notion de titre massique en vapeur est hors programme en première année.

Le diagramme (T, s) est hors-programme.

## D) 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 à l'aide du théorème de Fubini doit être évité en se limitant aux cas où les symétries permettent de ramener le calcul à celui d'une seule intégrale simple. On se limite en première année à une approche élémentaire : ces notions seront approfondies en deuxième année.

### D.1) Electrostatique

La notion d'angle solide est hors programme.

## Programme

## Commentaires

Interaction de deux charges ponctuelles : loi de Coulomb. Champ électrostatique créé par une charge ponctuelle et par un ensemble de charges ponctuelles ; additivité des champs.

L'introduction de la notion de champ est ici un objectif essentiel.

Distributions macroscopiques de charges réparties ; densité volumique de charge. Modélisation à l'aide d'une densité surfacique ou linéique de charge.

Exemples de champ électrostatique créé par une distribution de charges continûment répartie :

- champ dans le plan médiateur d'un segment uniformément chargé
- champ sur l'axe d'un disque uniformément chargé.

On se limite à des exemples de distributions de charge dont la symétrie permet de ramener le calcul à une intégrale simple. Sur ces exemples, on met en évidence le fait que le champ électrostatique en un point des sources n'est pas défini lorsqu'elles sont modélisées par une densité surfacique ou linéique de charge. On fait remarquer la discontinuité du champ à la traversée du disque mais les expressions générales des relations de passage ne sont pas au programme de première année.

Recherche des plans de symétrie et d'antisymétrie, recherche des invariances par rotation, par translation, pour les distributions de charges.

On appelle antisymétrie une symétrie par rapport à un plan accompagnée du changement du signe de toutes les charges. On fait remarquer que l'invariance par translation ne peut résulter que d'une modélisation des sources par une distribution de charges illimitée.

Circulation du champ électrostatique ; potentiel électrostatique. Relation locale  $\mathbf{E} = -\text{grad } V$ .

On relie la circulation du champ électrostatique au travail de la force électrostatique. On fait le lien avec la notion de potentiel utilisée dans le cours d'électrocinétique.

Énergie potentielle d'une charge ponctuelle dans un champ électrostatique extérieur. Relation entre la force et le gradient de l'énergie potentielle.

On indique que la relation entre la force et le gradient de l'énergie potentielle a une valeur générale : elle constitue une définition du concept de force conservative équivalente à celle qui est introduite par le travail dans la partie mécanique.

Énergie potentielle d'interaction d'un système de deux charges ponctuelles.

L'énergie potentielle électrostatique d'une distribution de plus de deux charges, a fortiori d'une distribution continue, est hors programme.

Topographie : lignes de champ, tubes de champ, surfaces équipotentiels ; propriétés de symétrie du champ et du potentiel électrostatiques ; caractère polaire du champ électrostatique.

Les équations différentielles des lignes de champ et leur intégration sont hors programme. Sur des exemples de cartes de champ et de potentiel électrostatiques, on fait apparaître le lien entre les propriétés de symétrie des sources et celles du champ et du potentiel créés.

Flux du champ électrostatique.

On définit d'abord le flux élémentaire. Le symbolisme de l'intégrale de surface ne représente à ce stade que l'écriture d'une sommation.

Théorème de Gauss.

La démonstration du théorème de Gauss et la notion d'angle solide sont hors programme. Propriété fondamentale, le théorème de Gauss est aussi un outil opérationnel permettant de calculer le champ électrostatique dans des situations de haute symétrie.

Sur les deux exemples du fil rectiligne et du plan, illimités et uniformément chargés, on montre la cohérence entre le passage à la limite et les résultats du théorème de Gauss.

Modélisation du condensateur plan à l'aide de deux plans parallèles uniformément chargés.

À l'aide de ce modèle, on justifie, dans le cadre restreint de l'électrostatique, la relation  $q = C u$  qui est utilisée dans le cours d'électrocinétique dans le cadre de l'approximation des régimes quasi-stationnaires. L'électrostatique des conducteurs est hors programme.

Analogie formelle avec le champ de gravitation ; théorème de Gauss pour le champ de gravitation. Application : équivalence du champ de gravitation d'une distribution de masse à symétrie sphérique à celui d'une masse ponctuelle.

## D.2) Mouvement des particules chargées dans les champs E et B

Dans cette partie, on introduit, à partir de la force de Lorentz, la notion de champ magnétique. Les exemples choisis s'appuient sur des dispositifs réels (accélérateurs de particules, spectromètres) ou des expériences historiques.

Programme	Commentaires
2.1) Force de Lorentz	
Force de Lorentz exercée sur une charge ponctuelle ; champ électrique <b>E</b> , champ magnétique <b>B</b> .	On exclut tout changement de référentiel galiléen en électromagnétisme. On signale que pour une particule chargée, les effets de la pesanteur ou de la gravitation sont presque toujours négligeables en regard de la force électromagnétique.
Puissance de la force de Lorentz.	
Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme.	C'est l'occasion de signaler une limite du domaine de validité de la mécanique newtonienne.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme et indépendant du temps.	L'utilisation de la base de Frenet est exclue en première année.
2.2) Applications à l'électrocinétique.	
Milieux conducteurs, porteurs de charge. Densité de courant électrique, intensité. Loi d'Ohm locale dans un conducteur. Conductivité, résistivité.	On note que dans un conducteur, homogène et à température uniforme, à l'absence de courant correspond l'uniformité de son potentiel électrique. Le modèle statistique des collisions pour la loi d'Ohm locale dans un métal est hors programme. On fait juste remarquer que l'effet moyen des collisions sur la vitesse des électrons de conduction est analogue à celui d'un freinage visqueux.

Résistance électrique d'un conducteur « filiforme ».

Tout autre calcul de résistance électrique est exclu.

Effet Hall dans un conducteur métallique rectiligne de section rectangulaire.

On se limite au cas où le champ magnétique est perpendiculaire à la direction du courant.

### D.3) Magnétostatique

En première année, on se borne à admettre toutes les lois de la magnétostatique (Biot et Savart, conservation du flux de  $\mathbf{B}$ , théorème d'Ampère) et on fait constater leur cohérence sur quelques exemples simples.

Programme	Commentaires
Distributions de courant électrique filiformes : recherche des invariances par rotation, par translation ; recherche de plans de symétrie et d'antisymétrie.	En première année, on se limite aux courants filiformes. On appelle antisymétrie une symétrie par rapport à un plan accompagnée du changement de sens du courant.
Champ magnétostatique $\mathbf{B}$ : loi de Biot et Savart pour les circuits fermés filiformes.	Le potentiel-vecteur est hors programme en première année.
Topographie : lignes de champ et tubes de champ. Propriétés de symétrie du champ magnétostatique ; caractère axial du champ $\mathbf{B}$ .	Les équations différentielles des lignes de champ et leur intégration sont hors programme. 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.
Flux de $\mathbf{B}$ , sa conservation. Circulation de $\mathbf{B}$ , théorème d'Ampère.	Ces propriétés sont admises.
Exemples de calcul de champ $\mathbf{B}$ : champ d'un fil rectiligne illimité, champ sur l'axe d'une spire circulaire et sur l'axe d'un solénoïde circulaire.	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 $\mathbf{B}$ est évalué. Aucune technicité de calcul ne doit être recherchée.
Limite du solénoïde infiniment long : champ en tout point intérieur.	Aucune démonstration de la nullité du champ à l'extérieur d'un solénoïde illimité n'est exigible. L'examen qualitatif de la carte du champ d'un solénoïde de longueur finie permet de faire comprendre ce résultat.  En conclusion de cette partie, on compare les propriétés des champs $\mathbf{E}$ et $\mathbf{B}$ statiques, en particulier leur topographie et leurs symétries respectives.

## IV. APPROCHE EXPÉRIMENTALE (DEUXIÈME PARTIE)

La rédaction des rubriques TP-COURS est détaillée car celles-ci constituent un ensemble de compétences exigibles. Les TP-COURS en électricité peuvent faire l'objet de quatre séances de deux heures.

### A) TP-COURS : L'instrumentation électrique au laboratoire

## Programme

a) Présentation succincte des appareils usuels.

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.  
Alimentation stabilisée en tension.  
Multimètre numérique.

b) Réglage et utilisation des appareils.

Utilisation de l'oscilloscope : couplages d'entrée AC et DC, mode X-Y, mode balayage (déclenchement, synchronisation), mesures de tensions, périodes, différences de phases.

Utilisation des multimètres : mesure de la valeur moyenne et de la valeur efficace vraie, fonctionnement en ohmmètre.

Mesures d'impédances par diviseur de tension : résistance d'un résistor, résistance d'entrée d'un amplificateur (à ce stade, par exemple l'oscilloscope), résistance de sortie d'un amplificateur (à ce stade, par exemple l'étage de sortie d'un BF), inductance, condensateur.

## B) TP-COURS : Réalisation de fonctions élémentaires en électronique

### Programme

Modèle de l'amplificateur opérationnel idéal : zone linéaire; saturations en tension, en courant de sortie et en vitesse de balayage; cas limite du gain infini.

### Commentaires

L'utilisation d'une instrumentation actuelle remplace l'ensemble de l'instrumentation ancienne. Un oscilloscope à mémoire numérique calibré en tension, fréquence, phase, mesurant temps de montée, période, valeur moyenne ou efficace vraie remplace la table traçante et le fréquencemètre. Un multimètre numérique effectuant les mesures en valeur moyenne ou efficace vraie remplace les ampèremètres et voltmètres magnétoélectriques ou ferromagnétiques. Aucune connaissance sur le fonctionnement interne de ces appareils ou sur d'autres matériels n'est exigible.

On présente les caractéristiques essentielles de ces appareils : impédance d'entrée, impédance de sortie, bande passante selon le cas.  
Sur les montages effectués, on fait observer les conséquences de l'existence de connexions non apparentes dues au raccordement à la terre de certains appareils.

À cette occasion, il convient de familiariser les étudiants avec les tensions sinusoïdales (amplitude, valeur efficace, phase, fréquence, pulsation, différence de phase entre deux signaux synchrones).  
S'agissant des couplages AC et DC, les étudiants doivent apprendre à se placer spontanément 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.

### Commentaires

Le caractère idéal fait référence aux impédances d'entrée infinies, à l'impédance de sortie nulle et à l'absence de décalages constants en courant ou en tension ; lorsque ces défauts apparaissent dans les circuits, on signale qu'ils ne sont pas pris en compte par le modèle idéal adopté, mais aucune connaissance à leur sujet n'est exigible. La modélisation à l'aide d'une équation différentielle du comportement d'un amplificateur opérationnel de gain fini est hors programme.

Étude de deux circuits à amplificateur opérationnel : l'amplificateur non-inverseur et le comparateur à hystérésis. Caractéristique de transfert du comparateur à hystérésis.

Le but de cette approche est notamment de discuter sur deux exemples la pertinence de l'utilisation de la relation  $v_+ = v_-$  pour les circuits à amplificateur opérationnel. On fait observer sur ces montages que la stabilité du régime linéaire nécessite une rétroaction de la sortie vers l'entrée inverseuse et qu'une rétroaction vers l'autre entrée conduit à une saturation en sortie ; toute justification de cette observation, par exemple à l'aide d'une équation différentielle modélisant le comportement d'un amplificateur opérationnel de gain fini, est hors programme. Le produit gain  $\times$  bande passante est hors programme.

Adaptateur d'impédances : le suiveur.

On montre avec des diviseurs de tension que la résistance d'entrée est supérieure à  $10^6 \Omega$  et que la résistance de sortie est inférieure à  $10 \Omega$ .

### **ANNEXE COMMUNE AUX DEUX PARTIES DU PROGRAMME : THEMES DE TRAVAUX PRATIQUES PROPOSES**

A la différence des TP-COURS nécessairement très cadrés, les séances de travaux pratiques sont orientées vers l'acquisition d'une autonomie progressive dans la démarche expérimentale. Ils favorisent l'appropriation des connaissances ainsi que le développement d'une certaine dextérité expérimentale.

Les thèmes de travaux pratiques ne sont que des propositions ; le contenu et l'organisation des travaux pratiques relèvent de l'initiative pédagogique du professeur et ne doivent faire appel qu'aux connaissances au programme de la classe. La connaissance des dispositifs mentionnés ci-dessous n'est donc pas exigible.

Aucun découpage entre première et deuxième partie n'est imposé. Les contraintes de matériel peuvent conduire à organiser des séries de TP tournants.

<b>Thèmes</b>	<b>Commentaires</b>
Focométrie élémentaire : mesures de distances focales de lentilles minces et/ou de miroirs sphériques.	
Réalisation d'un système afocal : élargisseur de faisceau utilisant une lentille divergente et une lentille convergente.	
Étude expérimentale du prisme.	L'étude théorique du prisme ne figure pas au programme de cours. Pour interpréter le minimum de déviation, une approche par le calcul différentiel est exclue : l'égalité des angles d'incidence et d'émergence se déduit de la loi du retour inverse de la lumière et de l'unicité du minimum qu'on fait constater.
Étude des circuits RC, RL et RLC série en régime transitoire, en régime sinusoïdal forcé.	
Étude de quelques montages simples à amplificateur opérationnel : amplificateur inverseur de tension, sommateur inverseur, intégrateur et pseudo-intégrateur...	

Étude de filtres simples : passe-bas, passe-haut, passe-bande, déphaseur...

Étude d'un oscillateur mécanique.

Exemples de mesures calorimétriques.

Étude du changement d'état d'un corps pur.

Mesures de champ magnétique (sonde de Hall).

Le matériel nécessaire à l'acquisition des connaissances et savoir-faire exigibles en électrocinétique comprend :

Oscilloscope à mémoire numérique, interfaçable avec un ordinateur et une imprimante.

Générateur de signaux électriques (BF) avec modulation interne en fréquence et sortie d'une tension image de la fréquence.

Ordinateur avec carte d'acquisition et logiciel de traitement.

Alimentation stabilisée en tension.

Multimètre numérique.