

PROGRAMME PCSI (DEUXIÈME 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.

L'électrocinétique et l'électronique recourent 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	Commentaires
Signaux sinusoïdaux : amplitude, phase, pulsation, fréquence, différence de phase entre deux signaux synchrones.	<i>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.</i>
Étude du circuit RLC série ; résonance (intensité, tension aux bornes du condensateur).	<i>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.</i>
Régime sinusoïdal forcé. Impédance et admittance complexes ; lois d'association. Loi des mailles. Loi des nœuds ; son expression en termes de potentiels.	<i>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.</i>

Puissance instantanée, puissance moyenne en régime sinusoïdal forcé. Valeur efficace. Facteur de puissance ($\cos \varphi$).

Aspects énergétiques de l'étude du circuit RLC série.

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.

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

Critère de stabilité pour les systèmes du premier et du deuxième ordre.

La notion de puissance réactive et le théorème de Boucherot sont hors programme.

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 ; on étudie la résonance en puissance.

La fonction de transfert est étudiée et utilisée en première approche pour calculer un rapport d'amplitudes et un déphasage en régime sinusoïdal forcé.

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.

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. Toute référence au critère de Routh-Hurwitz est hors programme.

B) Mécanique

L'enseignement de mécanique de première année est limité à l'étude du point matériel et du système de deux points ; la dynamique des systèmes matériels est au programme de deuxième année PC. Les systèmes ouverts faisant par exemple intervenir une masse variable (fusée ...) sont hors programme en première année.

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 $d(r \mathbf{u}_r) = dr \mathbf{u}_r + r d\mathbf{u}_r$ 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, en vitesse et en puissance.

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 RLC 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.
Moment cinétique par rapport à un point, par rapport à un axe orienté.
Théorème du moment cinétique en un point fixe, théorème du moment cinétique par rapport à un axe fixe.
Application au pendule simple.

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.

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.

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.

Le mouvement de rotation d'un solide autour d'un axe fixe est au programme de deuxième année PC.

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.

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.

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.

Étude des trajectoires elliptiques : relation entre l'énergie et le demi grand axe, 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 $d(\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}_r) = dr \mathbf{u}_r + r d\mathbf{u}_r$ avec $\mathbf{u}_r \cdot d\mathbf{u}_r = 0$. 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 validité 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'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).

Aucune démarche n'est imposée pour l'établissement de la nature des trajectoires. Aucune méthode (formules de Binet, vecteur excentricité, invariants dynamiques de Laplace ou Runge-Lenz) ne peut donc être exigée.

Les relations faisant intervenir le paramètre de la conique, le demi grand axe, le demi petit axe et l'excentricité ne sont pas exigibles. Elles doivent être données, tant dans les épreuves écrites qu'orales.

La troisième loi de Kepler est établie pour les trajectoires elliptiques, de même que la relation entre l'énergie et le demi grand axe. On prend l'habitude de les retrouver sur le cas particulier des trajectoires circulaires.

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

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

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.

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.

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.

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.

5. Système formé de deux points matériels.

5.1) Éléments cinétiques.

Quantité de mouvement ou résultante cinétique, moment cinétique en un point, énergie cinétique.

Centre de masse (ou centre d'inertie).

Référentiel barycentrique.

Moment cinétique barycentrique, énergie cinétique barycentrique, théorèmes de Kœnig.

5.2) Dynamique 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 de l'énergie cinétique dans un référentiel galiléen.

Puissance des forces intérieures.

Énergie potentielle.

Énergie mécanique.

5.3) 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 barycentrique.

Réduction du problème à deux corps à un problème à un corps (masse réduite, mobile équivalent).

Il s'agit d'amener, sur l'exemple du système de deux points matériels, les bases de la cinétique et de la dynamique newtonienne des systèmes matériels qui sera étudiée en deuxième année.

Aucun mode de présentation n'est imposé, l'objectif étant l'acquisition rapide des théorèmes fondamentaux. Il s'agit de dégager des idées fortes :

- les théorèmes du centre de masse et du moment cinétique ne font intervenir que les forces extérieures ;

- la puissance des forces intérieures est indépendante du référentiel ; elle est en général non nulle bien que la somme des forces et la somme de leurs moments soient nulles ; le théorème de l'énergie cinétique fait donc généralement intervenir le travail des forces intérieures ;

- le travail de l'ensemble des forces d'interaction à distance entre les deux points permet de définir la même énergie potentielle que si l'une des particules était fixe ;

- dans le cas particulier d'un système rigide, la puissance des forces intérieures est nulle.

On se trouve ramené à l'étude d'un mouvement dans un champ de forces centrales exercées par un centre fixe dans un référentiel galiléen. La trajectoire du mobile réduit dans le référentiel barycentrique donne, par homothétie, celles des deux particules dans ce référentiel.

Les chocs sont hors programme.

6. Caractère galiléen approché de quelques référentiels d'utilisation courante.

Influence d'un champ extérieur de gravitation sur un système de deux points matériels en interaction gravitationnelle. Quelques référentiels d'utilisation courante : référentiel de Copernic, référentiel de Kepler (héliocentrique), référentiel géocentrique, référentiel lié à la Terre. Poids d'un corps, champ de pesanteur.

Il s'agit simplement de montrer que, dans le référentiel barycentrique, le champ extérieur de gravitation n'intervient sur le mouvement de l'un ou l'autre point que par un terme différentiel appelé terme de marée.

On précise ici les conditions pour lesquelles on peut considérer ces référentiels comme localement galiléens et on fait mieux comprendre les choix des référentiels supposés galiléens dans les exemples antérieurs.

On se borne à signaler l'existence du terme de marée et à évoquer ses effets, mais aucune connaissance à ce sujet n'est exigible.

L'étude détaillée des variations du champ de pesanteur est hors programme.

On signale, sans les étudier, quelques effets de la force de Coriolis en dynamique terrestre, mais aucune connaissance à ce sujet n'est exigible.

C) Thermodynamique

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_m » 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 $C_p - C_v$ (relation de Mayer) sont hors programme.

Cette partie fait appel aux notions élémentaires sur les fonctions de deux variables : différentielle, 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

1. Du gaz parfait monoatomique aux fluides réels et aux phases condensées.

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.

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.

Énergie interne. Capacité thermique à volume constant.

On indique que pour un gaz parfait non monoatomique C_V dépend de la température ; dans le cas du gaz parfait diatomique, on présente la courbe $C_V(T)$ mais aucune théorie à ce sujet ne figure au programme.

Expressions de l'énergie interne du gaz parfait monoatomique, puis du gaz parfait non monoatomique.

On affirme l'équation d'état et l'expression de l'énergie interne pour un gaz réel dans le modèle de Van der Waals et on dégage la signification physique des termes correctifs. La mémorisation des formules correspondantes n'est pas exigible.

Notions sommaires sur les fluides réels.

On se borne à définir les coefficients α et χ_T ; le coefficient β est hors programme. L'utilisation des coefficients α et χ_T en liaison avec l'équation d'état est hors programme en première année.

Notion de dilatation et notion de compressibilité d'un fluide.

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

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

2. Éléments de statique des fluides dans le champ de pesanteur.

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.

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.

L'étude de l'atmosphère isotherme permet de faire apparaître le rôle de $k_B T$. Par ailleurs cette étude permet de justifier par un calcul d'ordre de grandeur que la pression dans un gaz soit en général considérée comme uniforme en thermodynamique.

La tension superficielle est hors programme.

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

Poussée d'Archimède.

3. Premier principe. Bilans d'énergie.

Premier principe. Énergie 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 pour un fluide homogène $dU = TdS - pdV$; 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.

Notions élémentaires sur l'interprétation statistique de l'entropie : formule de Boltzmann.

Troisième principe de la thermodynamique.

5. Machines thermiques.

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 difficultés. Pour les transferts (travail, chaleur) on adopte les notations W , Q , δW et δQ et, pour les variations des fonctions d'état, les notations ΔU , ΔH , dU et dH . On insiste sur la signification de ces notations. Les notations ΔW et ΔQ sont proscrites.

L'enthalpie est utilisée pour l'étude de la détente de Joule-Thomson et pour exprimer le transfert thermique lors de certaines évolutions, notamment 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 l'on peut confondre C_p et C_v .

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

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 l'on peut confondre C_p et C_v .

On se limite à l'étude d'un système à deux états. Toute étude de la thermodynamique statistique est hors programme. Le lien avec la notion d'information manquante (entropie de Shannon) est hors programme.

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

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

Outre l'étude générale des divers types de machines dithermes cycliques on s'attache à présenter une machine réelle au choix en insistant sur la modélisation des évolutions, mais cette présentation ne fait l'objet de l'acquisition d'aucune connaissance spécifique exigible. La méthode d'étude de la détente de Joule-Thomson peut être généralisée dans un exercice ou un problème pour étudier une machine où le fluide est en écoulement, mais aucune connaissance à ce sujet n'est exigible : la formulation générale des principes de la thermodynamique pour de tels systèmes est hors-programme.

6. Étude descriptive du corps pur diphase en équilibre.

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

En première année, l'approche est descriptive et la formule de Clapeyron est hors programme. L'étude sera complétée en deuxième année PC (condition d'équilibre, formule de Clapeyron).

On se limite aux changements d'état solide-liquide-gaz. Le diagramme (T,s) est hors-programme.

Cas de l'équilibre liquide-vapeur : diagramme (p,v) (dit de Clapeyron), titre en vapeur, bilans d'enthalpie et d'entropie pour un système diphase.

Il s'agit seulement d'exploiter sur des exemples les expressions de ΔH et ΔS d'une part pour le mélange diphase le long d'un palier isotherme et d'autre part pour le liquide dans le modèle d'une phase condensée incompressible et indilatable. L'étude des capacités thermiques le long des courbes de changement d'état 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) Électrostatique

Le programme de première année ne fait pas appel à la notion d'angle solide.

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.	<i>L'introduction de la notion de champ est ici un objectif essentiel.</i>
Distributions macroscopiques de charges réparties, densité volumique de charge. Modélisation à l'aide d'une densité surfacique ou linéique de charge.	<i>On souligne l'importance de la notion de densité surfacique pour la modélisation de la distribution de charges des milieux conducteurs.</i>
Exemples de champ électrostatique créé par une distribution de charges continûment répartie : <ul style="list-style-type: none">- champ dans le plan médiateur d'un segment uniformément chargé- champ sur l'axe d'un disque uniformément chargé.	<i>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.</i>
Recherche des plans de symétrie et d'antisymétrie, recherche des invariances par rotation, par translation, pour les distributions de charges.	<i>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.</i>
Circulation du champ électrostatique ; potentiel électrostatique. Relation locale $\mathbf{E} = -\text{grad } V$.	<i>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.</i>
Énergie potentielle d'une charge ponctuelle dans un champ électrostatique extérieur. Relation entre la force et le gradient de l'énergie potentielle.	<i>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.</i>
Énergie potentielle d'interaction d'un système de deux charges ponctuelles.	<i>L'énergie potentielle électrostatique d'une distribution de plus de deux charges, a fortiori d'une distribution continue, est hors programme.</i>
Topographie : lignes de champ, tubes de champ, surfaces équipotentielles ; propriétés de symétrie du champ et du potentiel électrostatiques ; caractère polaire du champ électrostatique.	<i>Les équations différentielles des lignes de champ et leur intégration sont exclues en première année. 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.</i>
Flux du champ électrostatique.	<i>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.</i>

Théorème de Gauss.

La démonstration du théorème de Gauss et la notion d'angle solide sont hors programme en première année. Propriété fondamentale du champ, 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.

Dipôle électrostatique : moment dipolaire électrique, potentiel et champ créés.

On prend comme modèle un doublet de deux charges ponctuelles q et $-q$. On fait apparaître les conditions de l'approximation dipolaire. Le potentiel et le champ créés sont donnés à la fois en coordonnées sphériques et sous forme intrinsèque ; la mémorisation de leurs expressions n'est pas exigible. On insiste sur le fait que la seule caractéristique du doublet qui intervient dans ces expressions est le moment dipolaire.

On définit plus généralement les notions de distribution dipolaire de charges et de moment dipolaire, ce qui permet de faire le lien avec la chimie. 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 exclu.

Action d'un champ électrostatique extérieur sur un dipôle :

- moment des forces

Dans cette rubrique, le champ n'est pas nécessairement uniforme. On se place dans l'approximation dipolaire : l'extension du dipôle est faible devant la distance caractéristique des variations de \mathbf{E} et on limite les calculs à l'ordre le plus bas non-nul.

- nullité de la somme des forces dans le cas d'un champ uniforme

- énergie potentielle d'interaction d'un dipôle dans un champ extérieur ; analyse qualitative des effets d'un champ non uniforme sur un dipôle rigide.

On met en évidence sur l'expression de l'énergie potentielle la tendance des dipôles à s'aligner sur le champ et à se déplacer alors vers les zones de champ fort. Ce dernier point montre que la somme des forces est non nulle. L'expression de cette somme est hors-programme.

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 E , champ magnétique B .	<i>On exclut tout changement de référentiel galiléen en électromagnétisme.</i>
Puissance de la force de Lorentz.	<i>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.</i>
Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme.	<i>C'est l'occasion de signaler une limite du domaine de validité de la mécanique newtonienne.</i>
Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme et indépendant du temps.	<i>L'utilisation de la base de Frenet est exclue en première année.</i>
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. Modèle des collisions pour la loi d'Ohm locale dans un métal.	<i>On note que dans un conducteur, homogène et à température uniforme, à l'absence de courant correspond l'uniformité de son potentiel électrique.</i>
Résistance électrique d'un conducteur « filiforme ».	<i>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.</i>
Effet Hall dans un conducteur métallique rectiligne de section rectangulaire.	<i>Tout autre calcul de résistance électrique est exclu en première année.</i>
Force de Laplace : densité volumique, densité linéique pour un courant filiforme.	<i>On se limite au cas où le champ magnétique est perpendiculaire à la direction du courant.</i>

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. Champ magnétostatique \mathbf{B} : loi de Biot et Savart pour les circuits fermés filiformes.	<i>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. Le potentiel-vecteur est hors programme en première année.</i>
Topographie : lignes de champ et tubes de champ. Propriétés de symétrie du champ magnétostatique ; caractère axial du champ \mathbf{B} .	<i>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.</i>
Flux de \mathbf{B} , sa conservation Circulation de \mathbf{B} , théorème d'Ampère.	<i>Ces propriétés sont admises.</i>
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.	<i>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.</i>
Limite du solénoïde infiniment long : champ en tout point intérieur.	<i>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.</i>
Champ \mathbf{B} créé par un dipôle magnétique.	<i>On prend comme modèle la spire circulaire ; on définit son moment magnétique \mathbf{M} ; on donne les conditions de l'approximation dipolaire ; on admet l'expression du champ à la fois en coordonnées sphériques et sous forme intrinsèque. On rapproche ces expressions de celle du champ créé en un point éloigné sur l'axe d'une spire circulaire. On exploite à cette occasion toutes les propriétés de symétrie de cette situation. On fait remarquer enfin qu'en dehors de l'approximation dipolaire, les lignes de champ du doublet de charges électriques et de la spire circulaire ne sont pas les mêmes. 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.</i>

IV. APPROCHE EXPÉRIMENTALE (DEUXIÈME PARTIE)

La rédaction des rubriques TP-COURS est détaillée car elles constituent un ensemble de compétences exigibles.

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

Programme	Commentaires
a) Présentation des appareils usuels	<p><i>L'utilisation d'une instrumentation actuelle remplace l'ensemble de l'instrumentation ancienne aujourd'hui désuète. 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 la table traçante, le fréquencemètre, les ampèremètres et voltmètres magnétoélectriques ou ferromagnétiques n'est donc exigible.</i></p>
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.	<p><i>On présente les caractéristiques essentielles de ces appareils : impédance d'entrée, impédance de sortie, bande passante selon le cas.</i></p> <p><i>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.</i></p>
b) Réglage et utilisation des appareils.	<p><i>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).</i></p>
Fonctionnement et utilisation de l'oscilloscope : couplages d'entrée AC et DC, mode X-Y, mode balayage (déclenchement, synchronisation), mesures de tensions, périodes, différences de phases.	<p><i>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).</i></p>
Utilisation des multimètres : mesure de la valeur moyenne et de la valeur efficace vraie, fonctionnement en ohmmètre.	<p><i>Sur des exemples, on fait réfléchir au fait que la mise en place d'un appareil de mesure modifie le circuit.</i></p>
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.	<p><i>Les méthodes de zéro, notamment les ponts d'impédances, sont hors programme.</i></p>

B) TP-COURS : Réalisation de fonctions élémentaires

Programme	Commentaires
<p>Modèles de l'amplificateur opérationnel idéal :</p> <ul style="list-style-type: none">- caractéristique de transfert statique, zone linéaire, saturations en tension et en courant de sortie ; cas limite du gain infini.- fonction de transfert en régime linéaire (passe-bas d'ordre un).- saturation en vitesse de balayage.	<p><i>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.</i></p>
<p>Étude de deux circuits à amplificateur opérationnel : l'amplificateur non-inverseur et le comparateur à hystérésis.</p> <ul style="list-style-type: none">- stabilité du régime linéaire, cas limite du gain infini.- produit gain-bande passante pour l'amplificateur non-inverseur- caractéristique de transfert du comparateur à hystérésis, bistabilité.	<p><i>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 montre la nécessité de s'interroger sur la stabilité du régime linéaire. Dans le cas d'un système stable, on montre qu'il convient aussi de s'interroger sur la pertinence du modèle de gain infini lorsque la fréquence est élevée. Dans le cas d'un système instable, on montre que l'hypothèse selon laquelle l'amplificateur opérationnel est saturé à tout instant convient, sous réserve de l'influence de la vitesse de balayage.</i></p>
<p>Adaptateur d'impédances : le suiveur.</p>	<p><i>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 10Ω. On met en évidence la faible puissance de sortie due à la limitation du courant de sortie</i></p>
<p>Intégrateur et pseudo-intégrateur à amplificateur opérationnel : approche fréquentielle, approche temporelle.</p>	<p><i>Les courants de polarisation conduisent à réaliser un pseudo-intégrateur plutôt qu'un intégrateur. Le relevé du diagramme de Bode permet de prévoir le comportement du circuit attaqué par un signal périodique de forme quelconque en liaison avec l'analyse de Fourier. On dégage la condition pour obtenir un opérateur « valeur moyenne ».</i></p> <p><i>D'autres circuits à amplificateur opérationnel peuvent être utilisés en TP mais aucune connaissance à leur sujet n'est exigible : comparateur simple, dérivateur, sommateur, amplificateur inverseur...</i></p>
<p>Diode : visualisation de la caractéristique à l'oscilloscope, modèle limite de la diode idéale ($i = 0$ pour $v < 0$ et $v = 0$ pour $i > 0$).</p>	<p><i>Il s'agit ici de faire apparaître la condition de validité du modèle limite de la diode idéale en comparant la « tension de déchet » (ou « tension de seuil ») aux tensions utilisées et les résistances en polarisation directe et inverse aux autres résistances du circuit. Le modèle de la diode idéale ne figure pas au programme de cours. Son utilisation dans les exercices et problèmes doit respecter l'esprit du TP-COURS : il s'agit d'interpréter des observations, mais en aucun cas de prévoir ex nihilo le comportement d'un circuit.</i></p>

Redressement mono alternance, redressement double alternance (pont de diodes).

Les observations font apparaître les limites du modèle idéal.

Démodulation par détection de crête.

On démodule un signal modulé en amplitude obtenu par exemple avec un multiplieur. On fait apparaître l'influence des ordres de grandeur des différentes durées caractéristiques du problème. On se limite à une interprétation qualitative.

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 font appel qu'aux connaissances du programme de la classe. La connaissance des dispositifs mentionnés ci-dessous n'est donc pas exigible.

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

Thèmes	Commentaires
Focométrie élémentaire : mesures de distances focales de lentilles minces et/ou de miroirs sphériques.	
Étude expérimentale du prisme. Spectroscopie à prisme	<i>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.</i>
Modélisation d'un instrument d'optique par association simple de lentilles minces.	
Étude du circuit RLC série en régime transitoire, en régime sinusoïdal forcé.	
Étude de filtres simples : passe-bas, passe-haut, passe-bande, coupe-bande, déphaseur...	
Étude d'oscillateurs électriques. Étude d'un oscillateur mécanique.	
Exemples de mesures calorimétriques. Étude du changement d'état d'un corps pur.	<i>Cette étude peut servir à mettre en évidence des effets non-linéaires.</i>
Mesures de champ magnétique (sonde de Hall). Étude du mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique ou magnétique uniforme.	
