

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

**CLASSES PRÉPARATOIRES AUX**  
**GRANDES ÉCOLES**  
**PROGRAMME DE PHYSIQUE**  
**MPSI**

**Table des matières**

Approche théorique MPSI

**1 Mécanique**

**1.1** Description du mouvement d'un point matériel.

**1.2** Dynamique du point matériel dans un référentiel galiléen

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

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

**1.5** Oscillateur linéaire à un degré de liberté

**1.6** Théorème du moment cinétique

**1.7** Mouvements dans un champ de forces centrales conservatives, mouvement newtonien

**1.8** Dynamique dans un référentiel non galiléen

**1.9** Système fermé de points matériels

**2 Optique**

**2.1** Approximation de l'optique géométrique : rayon lumineux

**2.2** Formation des images dans les conditions de GAUSS

**3 Thermodynamique**

**3.1** Modèle du gaz parfait

**3.2** Éléments de statique des fluides

**3.3** Systèmes thermodynamiques

**3.4** Premier principe de la thermodynamique

**3.5** Second principe pour un système fermé

**3.6** Changement d'état d'un corps pur

**3.7** Machines thermiques

**4 Électronique**

**4.1** Approximation des régimes quasi-permanents

**4.2** Éléments de circuits linéaires en régime continu ou quasi-permanent

**4.3** Régime transitoire

**4.4** Régime sinusoïdal forcé

**4.5** Filtrage linéaire

**4.6** Amplificateur opérationnel

**5 Électromagnétisme**

**5.1** Champ et potentiel électrostatiques

**5.2** Dipôle électrostatique

**5.3** Aspects énergétiques

**5.4** Champ magnétostatique

**5.5** Dipôle magnétique

Approche expérimentale MPSI

**6** TP-cours

**7** Travaux pratiques

**Approche théorique MPSI**

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

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

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

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

Le programme a été rédigé et abondamment commenté, avec le souci majeur de faciliter la transition avec l'enseignement secondaire. Pour atteindre ce but, il a été jugé indispensable :

- d'introduire progressivement les outils et les méthodes de l'enseignement de physique post-baccalauréat sur des situations conceptuelles aussi proches que possible de celles qui ont été rencontrées au lycée ; en évitant, quand c'est possible, l'emploi d'outils mathématiques non encore maîtrisés, liés à des concepts physiques nouveaux ;
- de coordonner entre les enseignements de mathématiques, sciences industrielles, physique chimie utilisant des outils souvent communs, 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 ;
- de valoriser l'approche expérimentale des phénomènes pour stimuler chez l'étudiant une attitude active et créatrice, favorisant l'appropriation des connaissances et le développement d'un certain savoir faire manuel. Les TP-cours et les travaux pratiques (TP) sont les temps forts de cette valorisation.

Ces différentes contraintes ont conduit à placer les différentes parties du programme dans l'ordre suivant :

### **Mécanique, Optique, Thermodynamique, Electronique et Electromagnétisme.**

L'ordre d'exposition, dans chaque partie, relève bien sûr de la liberté pédagogique du professeur.

Les têtes de chapitre sont très classiques, de façon à ce que les acquis des étudiants soient clairement identifiés. L'enseignement est toutefois renouvelé par une réhabilitation des travaux pratiques (TP) qui justifie que des connaissances actuellement enseignées en cours soient transférées en TP et/ou TP- cours.

Le choix des expériences de cours et des TP relève de la responsabilité du professeur : les thèmes de TP proposés par le programme sont purement indicatifs, ceux-ci peuvent être remplacés par tout thème à l'initiative du professeur et ne faisant appel qu'aux connaissances du programme de la classe. En revanche le contenu des TP-cours de physique, fixé par le programme est exigible aux concours dans toutes les épreuves, écrites, orales et éventuellement pratiques.

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

## **1 Mécanique**

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.

L'objectif est d'introduire progressivement quelques-uns des concepts de base de la mécanique tridimensionnelle ainsi que les outils nécessaires, 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 d'une part 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 par la suite 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.

L'enseignement de mécanique de première année est limité à l'étude du point matériel et du système de deux points matériels.

Les systèmes ouverts, par exemple faisant intervenir une masse variable (fusée...) sont hors programme.

Les outils mathématiques nécessaires sont :

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

### 1.1 Description du mouvement d'un point matériel

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

### 1.2 Dynamique du point matériel dans un référentiel galiléen

Programme	Commentaire
Notion de force. Quantité de mouvement. Lois de NEWTON: loi de l'inertie, loi fondamentale de la dynamique du point matériel, loi des actions réciproques. Référentiel galiléen.	On affirme l'existence de référentiels galiléens sans se préoccuper de les rechercher. Les référentiels d'études sont supposés galiléens. Les notions de force de gravitation, force de COULOMB, tension d'un ressort, force de frottement, force de LORENTZ seront introduites au fur et à mesure du besoin.
Applications : <ul style="list-style-type: none"> <li>• mouvement dans le champ de pesanteur uniforme sans résistance de l'air puis avec résistance de l'air,</li> <li>• pendule élastique,</li> <li>• pendule simple,</li> </ul>	On exploite l'équation différentielle du pendule simple ou de la chute sous l'influence de la résistance de l'air pour faire une approche numérique : analyse en ordres de grandeur, détermination de la vitesse limite, utilisation des résultats fournis par un logiciel d'intégration numérique.

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

Programme	Commentaire
-----------	-------------

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

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

Force de Lorentz exercée sur une particule chargée par les champs électrique et magnétique uniformes et indépendants du temps.	On justifie par un calcul d'ordre de grandeur que le poids d'une particule chargée est négligeable devant la force électromagnétique.
Puissance de la force de LORENTZ.	On précise qu'un champ électrique peut modifier l'énergie cinétique d'une particule alors qu'un champ magnétique peut courber la trajectoire sans fournir d'énergie à la particule.
Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique uniforme dans le vide.	On caractérise le mouvement de la particule chargée comme un mouvement à vecteur-accelération constant.  On effectue un bilan énergétique pour calculer la vitesse d'une particule chargée accélérée par une différence de potentiel. On signale la limite du domaine de validité de la mécanique newtonienne en s'appuyant sur les expressions fournies $E_c = (\gamma-1)mc^2$ et $p=\gamma mv$ .
Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétostatique uniforme dans le vide.	

#### 1.5 Oscillateur linéaire à un degré de liberté

Programme	Commentaire
Régimes libres d'un oscillateur harmonique à un degré de liberté amorti par frottement visqueux. Rôle de l'amortissement. Facteur de qualité. Oscillateur harmonique à un degré de liberté amorti par frottement visqueux et soumis à une excitation sinusoïdale. Régime transitoire. Régime établi. Résonance en élongation, en vitesse. Analogie avec le dipôle RLC série.	On met l'équation différentielle sous une forme canonique.
Portrait de phase.	Il s'agit d'apprendre à lire, commenter et interpréter un portrait de phase sans avoir besoin de la solution analytique : savoir s'il y a ou non des frottements, identifier les positions d'équilibre

	stables ou instables, faire le lien entre le caractère fermé d'un portrait de phase et le caractère périodique du mouvement du point matériel.
--	--

### 1.6 Théorème du moment cinétique

Programme	Commentaire
Moment d'une force et moment cinétique par rapport à un point fixe et par rapport à un axe orienté.	
Théorème du moment cinétique en un point fixe, théorème du moment cinétique par rapport à un axe fixe. Conservation du moment cinétique.	On insiste sur le fait que le théorème du moment cinétique fournit, pour un point matériel, une autre méthode pour obtenir des résultats accessibles par la deuxième loi de NEWTON ou par le théorème de l'énergie cinétique.
Application : pendule simple.	Le pendule simple est un exemple qui permet de mettre en œuvre et de comparer simplement différentes méthodes pour obtenir l'équation du mouvement d'un point matériel.

### 1.7 Mouvements dans un champ de forces centrales conservatives, mouvement newtonien

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

### 1.8 Dynamique dans un référentiel non galiléen

Programme	Commentaire
<b>Cinématique</b>	
Mouvement d'un référentiel par rapport à un autre. Cas particuliers du mouvement de translation et du mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe. Vecteur instantané de rotation d'un référentiel par rapport à un autre. Définition des vitesses et des accélérations dans les	A l'aide de la dérivée d'un vecteur de la base locale par rapport au référentiel absolu on introduit la notion du vecteur instantané de rotation. On admet la relation fondamentale de la dérivation vectorielle. La vitesse et l'accélération d'entraînement sont

deux référentiels. Lois de composition des vitesses et accélérations : vitesse d'entraînement, vitesse relative, accélération relative, d'entraînement et de CORIOLIS. Application au mouvement de translation et au mouvement de rotation uniforme autour d'un axe fixe.	interprétées comme la vitesse et l'accélération d'un point (point coïncident) d'un référentiel par rapport à l'autre.
<b>Dynamique en référentiel non galiléen</b>	
Principe de la 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).	On fait remarquer que les forces d'inertie ne résultent pas d'une interaction mais du caractère non galiléen du référentiel utilisé. Les applications concernent uniquement le cas où le référentiel entraîné est en translation ou en rotation uniforme autour d'un axe fixe.
Énergie potentielle d'entraînement. Caractère galiléen approché de quelques de référentiels d'utilisation courante : référentiel de COPERNIC, référentiel de KEPLER (héliocentrique), référentiel géocentrique, référentiel lié à la Terre.	On précise les conditions dans lesquelles on peut considérer certains référentiel comme galiléen.
Applications : définition du poids d'un point matériel, effet de marée.	L'étude d'autres applications (déviation vers l'Est , pendule de FOUCAULT...) pourrait être faite en travaux dirigés.

### 1.9 Système fermé de points matériels

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

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

## 2 Optique

L'enseignement de l'optique géométrique en première année est essentiellement expérimental.

L'objectif est de maîtriser ses applications pratiques dans les conditions de Gauss.

L'enseignement de cette partie se fait en cours, en TP-cours et en travaux pratiques, aux cours desquels les étudiants se familiarisent avec des montages simples. De cette approche empirique et 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 l'observation de ces phénomènes, en l'accompagnant éventuellement d'un bref commentaire, mais on ne cherche pas à en rendre compte par une théorie détaillée.

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

### 2.1 Approximation de l'optique géométrique : rayon lumineux

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

### 2.2 Formation des images dans les conditions de GAUSS

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

## 3 Thermodynamique

Le programme de cet enseignement se répartit sur les deux années. 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.

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.

On note le long du cours  $\Delta X$  comme variation de la grandeur X entre deux états macroscopiques initial et final,  $\delta X$  une quantité élémentaire de la grandeur X et  $dX$  comme variation élémentaire d'une grandeur d'état X.

### 3.1 Modèle du gaz parfait

Programme	Commentaire
Modèle microscopique du gaz parfait : pression cinétique, vitesse quadratique, température cinétique. Équation d'état d'un gaz parfait.	Pour établir la relation entre la pression cinétique et la vitesse quadratique moyenne, on considère le cas d'un gaz parfait monoatomique où toutes les particules sont animées de la même vitesse égale à la vitesse quadratique. On admet le théorème d'équipartition. La loi de distribution des vitesses et le théorème de VIRIEL sont hors programme.
Écart au modèle du gaz parfait. Notion de gaz réel.	On compare le comportement d'un gaz réel au modèle du gaz parfait sur des réseaux d'isothermes en coordonnées de CLAPEYRON ou d'AMAGAT. L'équation d'état du gaz de VAN DER WAALS pourra être donnée.

### 3.2 Éléments de statique des fluides

Programme	Commentaire
Forces surfaciques, forces volumiques. Champ de pression. Équivalent volumique des forces de pression. Équation fondamentale de la statique des fluides : fluide homogène, incompressible, dans un champ de pesanteur uniforme.	On établit l'équation fondamentale de la statique des fluides projetée sur un axe en écrivant la relation d'équilibre pour une tranche élémentaire de fluide.
Équilibre d'une atmosphère isotherme. Facteur de BOLTZMANN.	Cette étude permet de justifier par un calcul d'ordre de grandeur que la pression dans un gaz est en général considérée comme uniforme en thermodynamique.
Poussée d'ARCHIMEDE.	On admettra le théorème d'ARCHIMEDE.

### 3.3 Systèmes thermodynamiques

Programme	Commentaire
Échelles microscopique et macroscopique.	
Système thermodynamique : définition du système, système ouvert, système fermé, système isolé.	
Équilibre thermodynamique. Variables thermodynamiques d'états, variables extensives et intensives. Transformations thermodynamiques subies par le système : isochore, isotherme, isobare, monobare, monotherme. Notion de transformation quasi-statique.	On donne quelques ordres de grandeur de volumes molaires ou massiques dans les conditions usuelles de pression et de température.
Coefficients thermoélastiques	On définit les coefficients $\alpha$ , $\beta$ et $\chi_T$ et on établit la



	relation entre eux.
--	---------------------

### 3.4 Premier principe de la thermodynamique

Programme	Commentaire
Travail échangé par un système, cas particulier du travail des forces de pression. Interprétation géométrique du travail des forces de pression dans un diagramme de CLAPEYRON. Transfert thermique. Thermostat.	On distingue qualitativement les trois types de transferts thermiques : conduction, convection et rayonnement.
Énergie interne U, fonction d'état thermodynamique. Premier principe de la thermodynamique pour un système fermé : $\Delta U + \Delta E_m = Q + W$ . Forme infinitésimale $dU + dE_m = \delta W + \delta Q$ . Enthalpie d'un système. Capacités thermiques à volume constant et à pression constante.	Le premier principe est énoncé dans le cas général faisant intervenir un terme d'énergie mécanique macroscopique. On souligne que le premier principe est un principe de conservation. On insiste sur la démarche pour évaluer le transfert thermique Q et de travail W lors d'une évolution d'un système fermé. On fait le bilan de l'énergie interne (U) et de l'enthalpie (H) pour des transformations simples tout en insistant sur la notion de fonction d'état.
Détente de JOULE - GAY LUSSAC. Détente de JOULE - THOMSON.	L'énergie interne est utilisée d'une part pour l'étude de la détente de JOULE - GAY LUSSAC et d'autre part pour exprimer le transfert thermique lors d'une évolution à volume constant, notamment en chimie. L'enthalpie est utilisée d'une part pour l'étude de la détente de JOULE - THOMSON et d'autre part pour exprimer le transfert thermique lors d'une évolution à pression constante, notamment en chimie. On insiste sur l'intérêt de ces détentes pour l'étude des fluides réels.
Applications au gaz parfait. Lois de JOULE. Energie interne et enthalpie d'une phase condensée dans le modèle incompressible et indilatable.	On utilise simplement, en le justifiant, la relation approchée $dH = C(T)dT$ en se limitant aux cas où on peut confondre $C_p$ et $C_v$ .

### 3.5 Second principe pour un système fermé

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

Troisième principe de la thermodynamique	On affirme que le troisième principe est un principe de référence.
--	--

### 3.6 Changement d'état d'un corps pur

Programme	Commentaire
Notion générale sur le changement d'état solide-liquide-gaz. Condition d'équilibre. Diagramme d'état. Point triple. Point critique. Variation des fonctions d'état lors d'un changement d'état.	
Diagramme de CLAPEYRON. Isothermes d'ANDREWS. Règle des moments. Formule de CLAPEYRON.	On utilise les diagrammes (P, T) et (P, V). On établit la formule de CLAPEYRON. On établit la règle des moments. On explique la problématique du stockage des fluides.

### 3.7 Étude des machines thermiques

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

## 4 Électronique

L'électronique apparaît en cours, en TP-cours et en travaux pratiques. 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 (appelé aussi amplificateur linéaire intégré) ; ce dernier est présenté en TP-cours.

L'électronique recoupe fortement l'automatique qui est enseigné par le professeur de sciences industrielles. Il importe donc chaque fois que cela est possible d'adopter un vocabulaire commun.

Les outils mathématiques nécessaires sont :

- Les équations différentielles linéaires à coefficients constants du premier et du deuxième ordre.
- 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.

### 4.1 Approximation des régimes quasi-permanents

Programme	Commentaire
Approximation des régimes quasi-permanents.	L'ARQP sera présentée d'une façon qualitative. L'origine théorique de cette approximation sera discutée dans le cours d'électromagnétisme en deuxième année. La théorie générale des réseaux est hors programme.
Courant électrique, bilan de charges, loi des nœuds.	Le vecteur densité volumique de courant électrique sera introduit en deuxième année. L'intensité du courant électrique dans une branche orientée de circuit est définie comme le débit de

	charges à travers une section du conducteur. La loi des nœuds traduit une conservation de la charge en régime stationnaire. On admet l'extension de cette loi aux régimes lentement variables. La forme locale de l'équation de conservation de la charge électrique est hors programme. On donne les ordres de grandeur des intensités et des tensions dans différents domaines d'application.
Potentiel, référence de potentiel, tension électrique, loi des mailles. La puissance électrique reçue par un dipôle. Caractère générateur et récepteur.	

#### 4.2 Éléments de circuits linéaires en régime continu ou quasi-permanent

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

#### 4.3 Régime transitoire

Programme	Commentaire
Étude des circuits RC, RL et RLC série soumis à un échelon de tension. Régime libre. Régime transitoire et régime permanent. Pulsation propre. Facteur de qualité.	On écrit les équations différentielles sous les formes canoniques. Cette écriture est l'occasion pour habituer les élèves à faire un rapprochement avec un autre phénomène physique analogue. On distingue, sur un relevé expérimental, régime

	transitoire et régime permanent au cours de l'évolution d'un système du premier ordre soumis à un échelon. On détermine un ordre de grandeur de la durée du régime transitoire. On met en évidence la similitude des comportements des oscillateurs mécanique et électronique.
Bilan énergétique.	On se contente de reconnaître le type de régime transitoire à partir du portrait de phase.
Portrait de phase.	On peut utiliser un logiciel approprié pour le tracé des portraits de phase.

#### 4.4 Régime sinusoïdal forcé

Programme	Commentaire
Régime alternatif sinusoïdal forcé ou établi. Signaux sinusoïdaux : amplitude, phase, pulsation, fréquence, différence de phase entre deux signaux synchrones.	Les concepts de régime transitoire et de régime sinusoïdal établi sont dégagés à partir de l'équation différentielle. On justifie qualitativement l'intérêt des régimes sinusoïdaux forcés par leur rôle générique pour l'étude des régimes périodiques forcés. Le développement quantitatif sur l'analyse de FOURIER sera vu en deuxième année.
Représentation complexe d'une grandeur sinusoïdale.	On insiste sur la simplification apportée par la notation complexe qui permet de remplacer une équation différentielle par une équation algébrique sur le corps des nombres complexes. On utilise la notation symbolique ( $j\omega$ ou $d/dt$ ) pour une détermination rapide des régimes sinusoïdaux établis ou des régimes transitoires.
Impédance et admittance complexes. Associations série et parallèle. Construction de FRESNEL.	
Loi des nœuds, loi des mailles, théorème de MILLMAN.	
Étude du circuit RLC série : résonance du courant et de la tension aux bornes du condensateur, facteur de qualité, acuité d'une résonance.	
Puissance instantanée, puissance moyenne en régime sinusoïdal forcé, grandeurs efficaces. Facteur de puissance ( $\cos(\varphi)$ ).	La notion de puissance réactive et le théorème de BOUCHEROT sont hors programme.
Transfert maximal de puissance d'un générateur vers une impédance de charge : notion de charge adaptée, résonance en puissance.	

#### 4.5 Filtrage linéaire

Programme	Commentaire
Filtres du premier et du second ordre, passifs ou actifs : comportements asymptotiques, fonction de transfert, gain en décibels, déphasage, diagramme de BODE, fréquence(s) de coupure à -3 décibels, bande passante, facteur de qualité.	On habitue les étudiants à prévoir les comportements asymptotiques à haute fréquence et à basse fréquence avant tout calcul explicite de la fonction de transfert. On explicite les conditions d'utilisation d'un filtre afin de l'utiliser comme moyennneur, intégrateur, ou dérivateur. On utilise la forme canonique de la fonction de

	<p>transfert.</p> <p>On ne cherche pas à développer une technicité de calcul pour le tracé du diagramme de BODE.</p> <p>Les filtres actifs font appel à l'amplificateur opérationnel. Celui-ci, présenté en TP-cours, est supposé idéal et en fonctionnement linéaire.</p> <p>On signale le passage de l'expression de la fonction de transfert à l'équation différentielle.</p> <p>La synthèse des filtres est hors programme.</p>
--	---

#### 4.6 Amplificateur Opérationnel

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

### 5 Électromagnétisme

L'étude de l'électrostatique n'est pas centrée sur les calculs mais sur les propriétés du champ. Aucune technicité mathématique n'est recherchée dans les calculs ; ces derniers ne concernent que des situations proches du cours et d'intérêt pratique évident.

On montre sur des exemples que l'étude de l'électrostatique n'est pas un objectif en soi ; mais que c'est une discipline qui permet aussi de fournir des modèles mathématiques adaptables à de nombreux domaines.

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.

En dehors de la relation entre le champ électrostatique et le potentiel dont il dérive, toute autre relation locale est exclue en première année.

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

#### 5.1 Champ et potentiel électrostatiques

Programme	Commentaire
Loi de COULOMB dans le vide, champ électrostatique créé par une charge ponctuelle et par un ensemble de charges ponctuelles (principe de superposition).	
Distributions macroscopiques de charges réparties, densité volumique de charge. Modélisation à l'aide d'une densité surfacique ou linéique de charge. Recherche des plans de symétrie et d'antisymétrie, recherche des invariances par rotation, par translation, pour les distributions de charges.	
Circulation du vecteur champ électrostatique, potentiel électrostatique. Expression de l'opérateur gradient en coordonnées cartésiennes. Relation locale $\mathbf{E} = -\mathbf{grad}(V)$ . Topographie : lignes de champ, tube de champ et surfaces équipotentielles. Propriétés de symétrie et d'invariance du champ et du potentiel électrostatiques. Caractère polaire du champ électrostatique.	<p>On montre le lien entre la circulation du champ électrostatique et le travail de la force électrostatique.</p> <p>On fait le lien avec la notion de potentiel utilisée dans le cours d'électrocinétique.</p> <p>Sur des exemples de cartes de champ et de potentiel électrostatiques, on fait apparaître le lien entre les propriétés de symétrie des sources (distributions de charges) et celles de leurs effets (champ et potentiel).</p> <p>On pourra pour cela utiliser un logiciel de simulation</p>

	ou de calcul formel.
Applications : champ créé par un segment fini uniformément chargé en un point de son plan médiateur, champ sur l'axe d'un disque uniformément chargé, cas d'un plan illimité, mise en évidence de la discontinuité.	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. Les relations de passages ne sont pas au programme de première année. On donne quelques ordres de grandeur de champs électrostatiques.
Flux du vecteur champ électrostatique, théorème de GAUSS.	On admet le théorème de GAUSS. La notion d'angle solide est hors programme.
Applications : champ et potentiel créés par un fil rectiligne et un plan illimités et uniformément chargés, par un cylindre illimité et une sphère chargés uniformément en surface et en volume.	On met en évidence l'équivalence du champ électrostatique d'une distribution à symétrie sphérique à celui d'une charge ponctuelle.
Analogie formelle avec le champ de gravitation : théorème de Gauss pour le champ de gravitation. Application : équivalence du champ de gravitation d'une distribution à symétrie sphérique à celui d'une masse ponctuelle.	On transpose le théorème de Gauss au cas de la gravitation.
Étude du condensateur plan dans le vide, expression de sa capacité. Énergie d'un condensateur.	On définit un condensateur plan dans le vide comme la superposition de deux distributions surfaciques, de charges opposées.

## 5.2 Dipôle électrostatique

Programme	Commentaire
Dipôle électrostatique : définition et modélisation, moment dipolaire.	On prend comme modèle un doublet rigide de deux charges ponctuelles $+q$ et $-q$ . On évalue des ordres de grandeur du moment dipolaire dans le domaine microscopique.
Approximation dipolaire : potentiel et champ créés à grande distance. Lignes de champ et surfaces équipotentielles.	On explicite les conditions de l'approximation dipolaire. Le potentiel et le champ créés sont exprimés à la fois en coordonnées sphériques et sous forme intrinsèque. On définit de façon plus générale les notions de distribution dipolaire de charges et de moment dipolaire. Ceci permet de faire le lien avec la chimie : on pourra alors à travers un exemple expliquer les interactions ion-dipôle ou dipôle – dipôle lors de la mise en solution aqueuse d'un soluté. On affirme que les expressions du potentiel et du champ créés à grande distance d'une distribution dipolaire sont identiques à celles d'un doublet. Tout développement multipolaire est hors programme.
Action d'un champ électrostatique extérieur uniforme sur un dipôle rigide.	On montrera que l'action subie par le dipôle rigide se réduit à un couple de forces. On justifie qualitativement que dans un champ non uniforme la résultante des forces n'est pas nulle ; l'expression générale de cette résultante est hors programme.

## 5.3 Aspects énergétiques

Programme	Commentaire
Énergie potentielle électrostatique d'une charge ponctuelle dans un champ électrostatique extérieur.	
Relation entre la force et le gradient de l'énergie	On signale que la relation $\mathbf{F} = -\text{grad}(E_p)$ , tout

potentielle. Énergie d'interaction d'un système de charges discret ou continu. Énergie potentielle d'un dipôle électrostatique rigide dans un champ extérieur.	comme le travail en mécanique, permet de définir le concept de force conservative.
--	--

#### 5.4 Champ magnétostatique

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

#### 5.5 Dipôle magnétique

Programme	Commentaire
Dipôle magnétique : définition et modélisation, moment dipolaire.	On prend comme modèle la spire circulaire ; on définit son moment magnétique $M$ . On évalue des ordres de grandeur du moment magnétique dans les domaines macroscopique et microscopique.
Approximation dipolaire : champ magnétique créé à grande distance.	On explicite les conditions de l'approximation dipolaire. On admet l'expression du champ magnétique à la fois en coordonnées sphériques et sous forme intrinsèque et on souligne l'analogie avec celle du champ électrostatique créé par un dipôle électrostatique. On présente et on exploite les propriétés de symétrie du modèle étudié.
Lignes de champ.	On signale que les lignes de champ du dipôle électrostatique et du dipôle magnétique sont différentes. En conclusion de cette partie, on

	compare les propriétés des champs électrostatiques et magnétostatique, en particulier leur topographie et leurs symétries respectives.
Action d'un champ magnétostatique extérieur sur un dipôle magnétique rigide.	On montre que l'action subie par le dipôle rigide se réduit à un couple de forces. On montre sur un exemple que la résultante n'est pas nulle en général lorsque le champ extérieur n'est pas uniforme, mais aucune expression générale de cette résultante n'est au programme. On met en évidence la tendance des dipôles à s'aligner sur le champ et à se déplacer vers les zones de champ fort.
Énergie potentielle d'interaction d'un dipôle magnétique dans un champ magnétique extérieur uniforme.	

### Approche expérimentale MPSI

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

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

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

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

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

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

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

## 6 TP-cours

Les contenus des TP-cours constituent un ensemble de connaissances et de compétences exigibles.

Le principe d'un TP-cours est assez différent de celui d'un TP habituel. Son objectif est de permettre aux élèves de construire, de manière active, des savoirs ou des savoir-faire théoriques ou expérimentaux selon un plan préétabli par l'enseignant. En effet, les élèves manipulent et proposent des exploitations. Le professeur se charge alors de réaliser les conclusions. En ce sens, un TP-cours est guidé par le professeur comme pour un cours magistral habituel. Les instructions doivent être fournies aux élèves progressivement au cours du déroulement de la séance. Il est donc déconseillé de fournir aux élèves un mode opératoire similaire à celui des séances des travaux pratiques.

Un TP-cours exige de l'enseignant une certaine vigilance pour assurer une bonne gestion du temps et une synchronisation suffisante du travail des binômes.

On peut résumer les étapes du travail lors d'un TP-cours comme suit :

– Étape 1 : l'enseignant fixe un objectif, comme par exemple étudier un phénomène, modéliser une situation physique, ou découvrir une loi ;



- Étape 2 : l'enseignant fournit les instructions nécessaires pour guider le travail expérimental et respecter les consignes de sécurité ;
  - Étape 3 : réalisation des mesures ou observations par les élèves et expression des premières exploitations ;
  - Étape 4 : discussion des résultats dans leur ensemble et formulation des premières conclusions ;
  - Étape 5 : réalisation d'éventuelles mesures supplémentaires ou d'observations pour compléter le travail ;
  - Étape 6 : cette étape ressemble beaucoup aux activités ordinaires du professeur dans un cours magistral : explications, démonstrations, exemples d'applications, exercices simples et conclusions.
- Ce processus peut être répété jusqu'à atteindre l'ensemble des objectifs de la séance.  
En cas de contrainte de temps, les montages peuvent être préparés à l'avance.

**Le contenu de cette rubrique est exigible aux concours.**

### 6.1 Mesures et incertitudes

Les activités expérimentales permettent l'acquisition de compétences spécifiques, ainsi que d'un réel savoir et savoir-faire dans le domaine des mesures, des incertitudes et des techniques associées : réalisation, analyse du protocole, choix des instruments de mesure, mesures, évaluation de la précision, validation et analyse critique des résultats obtenus.

Les étudiants doivent avoir conscience de la variabilité des résultats obtenus lors d'un processus de mesure, en connaître les origines, et comprendre et s'approprier ainsi les objectifs visés par l'évaluation des incertitudes. Ils détermineront ensuite ce qu'il faudrait faire pour améliorer la précision d'un résultat

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

En fin, il est essentiel que les notions sur les mesures et incertitudes diffusent dans chacun des thèmes du programme, théorique et expérimental, tout au long des deux années préparatoires et qu'elles soient régulièrement évaluées.

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

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

Chiffres significatifs.	confiance. On habitue les élèves à présenter les résultats en respectant le nombre de chiffres significatifs.
Acceptabilité du résultat et analyse du mesurage (ou processus de mesure).	On commente qualitativement le résultat d'une mesure en le comparant, par exemple, à une valeur de référence. On analyse les sources d'erreurs et on propose des améliorations du processus de mesure.

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

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

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

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

convexe ou concave d'un miroir sphérique ou de son caractère plan. Formation d'image, mise en œuvre d'un objet réel ou virtuel, à distance finie ou infinie.	
---	--

#### 6.4 Étude de quelques instruments optiques de laboratoire et leur utilisation

Programme	Commentaire
L'œil, la loupe.	On modélise l'œil comme l'association d'une lentille de vergence variable et d'un capteur fixe. On dégage le rôle de l'œil : processus d'accommodation, distance minimale de vision distincte, limite de résolution angulaire et vision de détails, champ visuel, profondeur de champ. Aucune question ne peut porter sur le fonctionnement de l'œil.
L'appareil photographique.	On compare des images produites par un appareil photographique numérique et on discute l'influence de la focale, de la durée d'exposition, du diaphragme sur la formation de l'image et le rôle du capteur sur la qualité de cette image.
Collimateur : description, réglage, utilisation.	Le collimateur est modélisé par une lentille mince convergente.
Lunette simple, lunette autocollimatrice : description, réglage, utilisation.	L'ensemble objectif et oculaire est modélisé par deux lentilles minces formant un système afocal. On insiste sur le fait que l'étendue transversal d'un objet ou d'une image à l'infini est caractérisée par un angle. On indique la nécessité de faire appel à des systèmes plus complexes afin de corriger la lunette des aberrations géométriques et chromatiques, mais toute connaissance à ce sujet est hors programme.
Viseur, viseur à frontale fixe : description et utilisation (pointés longitudinaux et transversaux).	Mise en œuvre d'une mesure de longueur par déplacement du viseur entre deux positions. On sensibilise les élèves aux causes d'erreurs dans les réglages : latitude de mise au point, parallaxe.

#### 6.5 Spectrogoniomètre à prisme

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

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

Programme	Commentaire
Présentation des appareils usuels : oscilloscope	On présente les caractéristiques essentielles de

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

### 6.7 Amplificateur opérationnel en régime linéaire

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

	<p>L'approche temporelle est traitée à partir de l'équation différentielle.</p> <p>On met en évidence le caractère intégrateur du montage et la condition sur la période du signal à intégrer.</p> <p>Hormis leur existence, aucune connaissance au sujet des défauts de l'amplificateur opérationnel n'est exigible.</p>
--	---

### 6.8 Amplificateur opérationnel en régime non linéaire

Programme	Commentaire
	L'amplificateur opérationnel est supposé idéal.
Comparateur à hystérésis : montage, caractéristique de transfert, bistabilité.	<p>On compare le montage à l'amplificateur non inverseur et on souligne la condition d'application de la relation <math>v_+ = v_-</math> pour les circuits à amplificateur opérationnel.</p> <p>L'instabilité est interprétée à partir de la solution de l'équation différentielle satisfaite par la tension de sortie, en considérant le caractère passe-bas de l'amplificateur opérationnel.</p> <p>On fait dégager le critère de stabilité en relation avec les coefficients de l'équation différentielle.</p> <p>On fait constater la limitation en fréquence due à la valeur finie de la vitesse de balayage.</p> <p>Pour une entrée sinusoïdale, on fait le lien entre la non linéarité du système et la génération d'harmoniques en sortie.</p>
Application : multivibrateur astable	On réalise un montage qui permet de générer des signaux rectangulaire et triangulaire.

## 7 Travaux pratiques

Les thèmes des travaux pratiques, dont le programme fixe le nombre et les thèmes, ne sont pas exigibles. Leurs contenus et leur progression sont entièrement fixés par l'enseignant.

### Compte-rendu

Il est impératif d'exiger de l'élève la rédaction d'un compte-rendu pendant une séance de travaux pratiques. Cette aptitude constitue un des objectifs de la formation scientifique. Les activités expérimentales sont aussi l'occasion de travailler l'expression orale lors d'un point de situation ou d'une synthèse finale par exemple. Le but est de bien préparer les élèves de CPGE à la présentation des travaux et projets qu'ils auront à conduire et à exposer au cours de leur formation en école d'ingénieur et, plus généralement, dans le cadre de leur métier de chercheur ou d'ingénieur.

La structure d'un compte-rendu de travaux pratiques comprend : un titre, une introduction, une partie théorique, une partie de mise en œuvre, les résultats, leur interprétation et une conclusion.

D'autre part, les différentes activités pratiques doivent être couronnées par l'évaluation des capacités et compétences expérimentales.

Si l'intérêt du compte-rendu est évident, en revanche il faut veiller à ce qu'il ne prenne pas une importance considérable, en temps, par rapport au travail expérimental proprement dit.

TP N°	Titre du TP
1	Présentation et utilisation d'une station d'acquisition et de traitement automatique des données. Acquisition et analyse spectrale d'un signal acoustique, électrique, électromagnétique ou sa synthèse.
2	Étude de la chute libre. Expériences sur banc à coussin d'air. Mise en œuvre d'un capteur de vitesse, un accéléromètre et d'une méthode de stroboscopie.
3	Expériences sur table à coussin d'air. Utilisation d'un dynamomètre, d'un capteur de force.

4	Régimes transitoires RC, RL et RLC.
5	Régime sinusoïdal forcé et résonances du circuit RLC.
6	Diagrammes de Bode d'un circuit de premier ordre et d'un circuit de second ordre.
7	Mesures de résistances et d'impédances.
8	Montages simples à amplificateur opérationnel en régime linéaire.
9	Multivibrateur Astable à amplificateur opérationnel.
10	Tracé de la caractéristique statique d'un capteur. Mise en œuvre d'un capteur dans un dispositif expérimental.
11	Focométrie des lentilles minces et des miroirs sphériques.
12	Changement d'état d'un corps pur. Mise en œuvre d'un capteur de pression, en distinguant son caractère différentiel ou absolu. Mise en œuvre d'un capteur de température : thermomètre, thermistance, ou capteur infrarouge.
13	Mesures calorimétriques. Mise en œuvre d'un capteur de température.