

Nature et méthodes	Capacités exigibles
Mesurer un champ magnétique.	Mettre en œuvre une sonde à effet Hall.
Ondes Mesure d'une célérité.	Mesurer la célérité d'une onde par diverses méthodes : études d'ondes progressives en propagation libre, études d'ondes stationnaires.

Partie 3. – Formation disciplinaire

Premier semestre

A. – Mouvement et interactions

Le thème mouvement et interactions s'appuie à la fois sur une utilisation raisonnée des lois de Newton et des notions énergétiques associées. Les situations étudiées restent simples : mouvements rectilignes ou, dans le cas d'un champ de force uniforme, mouvements plans. Les mouvements circulaires sont uniquement abordés par une approche énergétique. Le calcul de la force à partir de l'énergie potentielle est présenté dans le seul cas d'un mouvement rectiligne.

Les systèmes de coordonnées cartésiennes et cylindriques sont présentés comme des paramètres de repérage d'un point. Les vecteurs vitesse et accélération sont seulement étudiés en coordonnées cartésiennes.

Les oscillations harmoniques unidimensionnelles libres, amorties ou non, sont abordées selon le double point de vue des équations horaires du mouvement et de l'énergie mécanique. Cette partie mobilise les acquis développés en mathématiques dans le domaine des équations différentielles linéaires du second ordre à coefficients constants.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Caractérisation du mouvement d'un point matériel	
Espace et temps classiques. Système de coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques et sphériques. Bases locales.	Dessiner les surfaces sur lesquelles l'une des coordonnées est uniforme dans les différents systèmes de coordonnées. Dans le cas des coordonnées polaires et cylindriques exprimer les vecteurs de base locaux en fonction des vecteurs de base des coordonnées cartésiennes.
Notion de référentiel. Caractère relatif du mouvement. Description du mouvement d'un point matériel. Vecteurs position, vitesse et accélération.	Utiliser les expressions des composantes des vecteurs position, vitesse et accélération dans le seul cas des coordonnées cartésiennes.
Mouvement à vecteur accélération constant.	Exprimer les vecteurs position et vitesse en fonction du temps. Établir l'expression de la trajectoire en coordonnées cartésiennes.
Mouvement circulaire. Vitesse angulaire.	Relier la valeur de la vitesse du point à celle de la vitesse angulaire.
2. Lois de Newton	
Notion de force.	Déterminer les caractéristiques d'une force d'expression donnée. Établir un bilan des forces et en rendre compte sur un schéma.
Référentiel galiléen. Principe d'inertie.	Décrire le mouvement relatif de deux référentiels galiléens. Citer quelques exemples des référentiels d'étude usuels pouvant être considérés comme galiléens.
Principe des actions réciproques.	Exploiter le principe des actions réciproques.
Principe fondamental de la dynamique pour un point matériel.	Énoncer et exploiter le principe fondamental de la dynamique : – dans le cas d'un mouvement unidirectionnel d'un point matériel ; – dans le cas d'un mouvement plan d'un point matériel soumis à une force constante.
Mouvement de chute libre sans frottement dans le champ de pesanteur uniforme.	Mettre en équation le mouvement de chute libre sans frottement d'un point matériel.
Mouvement vertical dans le champ de pesanteur uniforme en présence de frottement fluide.	Établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la vitesse dans le cas d'une force de frottement proportionnelle à la vitesse. Déterminer la vitesse limite. Identifier et interpréter le temps caractéristique d'évolution. Déterminer, si elle existe, la vitesse limite dans un cas où la force de frottement n'est pas proportionnelle à celle de la vitesse. Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de frottements fluides.
3. Énergie mécanique	
Travail et puissance d'une force.	Calculer le travail d'une force constante lors d'un déplacement. Reconnaître des situations où le travail d'une force est nul, strictement positif ou strictement négatif.
Énergie cinétique, théorème de l'énergie cinétique.	Utiliser le théorème de l'énergie cinétique pour déterminer des paramètres du mouvement d'un point matériel.
Interactions conservatives.	Déterminer le travail d'une force conservative à partir de la variation d'énergie potentielle associée.

Energie potentielle.	Établir l'expression de la force associée à une énergie potentielle de forme connue dans le cas d'un mouvement rectiligne. Citer les expressions de l'énergie potentielle de pesanteur uniforme et de l'énergie potentielle élastique associée à un ressort.
Energie mécanique. Conservation de l'énergie mécanique.	Identifier les cas de conservation de l'énergie mécanique. Dans une situation à un degré de liberté, exploiter l'expression analytique de l'énergie potentielle ou une représentation graphique de celle-ci pour déterminer des caractéristiques du mouvement d'un point matériel, son énergie mécanique étant connue.
Théorème de la puissance mécanique.	Énoncer et exploiter le théorème de la puissance mécanique en présence de forces non conservatives.
4. Equilibre et stabilité d'un point matériel	
Equilibre d'un point matériel. Stabilité.	Démontrer et exploiter la condition d'équilibre d'un point matériel dans un référentiel galiléen. Analyser qualitativement la stabilité d'une position d'équilibre en considérant un petit déplacement au voisinage de celle-ci.
Equilibre dans un champ de force conservatif.	A partir d'un graphe ou d'une expression analytique de l'énergie potentielle déterminer les éventuelles positions d'équilibre d'un point matériel et leur stabilité dans un mouvement à un degré de liberté.
5. Oscillations libres au voisinage d'une position d'équilibre stable	
Oscillations non amorties au voisinage d'une position d'équilibre.	Expliquer qualitativement l'existence d'oscillations autour d'une position d'équilibre stable dans le cas d'une particule soumise à une force conservative dans un mouvement à un degré de liberté. Déterminer des caractéristiques du mouvement connaissant l'énergie mécanique du système.
Oscillateur harmonique non amorti. Energie potentielle. Equation d'évolution ; solutions générales. Période et pulsation propres des oscillations.	Établir et exploiter l'équation d'évolution d'un oscillateur harmonique non amorti à un degré de liberté. Résoudre cette équation connaissant les conditions initiales du mouvement. Exprimer l'énergie mécanique d'un oscillateur en fonction de l'amplitude des oscillations.
Interprétation énergétique des oscillations harmoniques non amorties.	Représenter les variations en fonction du temps des énergies potentielle, cinétique et mécanique d'un oscillateur harmonique non amorti.
Oscillateur harmonique amorti. Régimes d'évolution libre (apériodique, critique et pseudopériodique). Facteur de qualité.	Établir l'équation différentielle du mouvement d'un système masse-ressort en présence d'une force de frottement dont la valeur est proportionnelle à celle de la vitesse. Écrire l'équation différentielle en faisant apparaître la pulsation propre et le facteur de qualité. Résoudre et interpréter les solutions de cette équation différentielle. Identifier le régime d'évolution à partir de représentations graphiques des variations de la position ou de la vitesse au cours du temps.
Temps caractéristiques d'évolution.	Dans le cas d'un régime pseudopériodique, identifier un temps caractéristique d'amortissement et un temps caractéristique d'oscillation. Relier qualitativement le facteur de qualité au nombre d'oscillations visibles. Étudier expérimentalement les différents régimes d'oscillation d'un oscillateur harmonique mécanique amorti. Déterminer les paramètres caractéristiques de cet oscillateur : pulsation propre et facteur de qualité.

B. – Energie – conversion et transferts

Le thème énergie, conversion et transferts propose une approche macroscopique des principes de la thermodynamique et de leurs exploitations dans les machines thermiques. Les grandeurs thermodynamiques fondamentales : énergie interne, enthalpie et entropie sont présentées. L'accent est mis sur la **réalisation de bilans** des grandeurs énergétiques connaissant les transferts mis en jeu, sous forme de travail ou de transfert thermique. Ces bilans s'appliquent à des systèmes dont la définition méticuleuse fait partie des compétences à développer chez les étudiants. Dans tous les cas, ce sont les conséquences pratiques de ces bilans qui sont étudiées : rendement ou coefficient de performance d'une machine thermique évaluée au regard du théorème de Carnot, puissance thermique reçue dans un échangeur, quantité de combustible consommé...

La technicité mathématique est réduite à son minimum ; l'expression de l'entropie d'un système est donnée et admise. Les systèmes réels sont modélisés par des gaz parfaits idéaux ou des phases condensées incompressibles et indilatables, seuls modèles exigibles des étudiants. Les bilans de matière réalisés pour des transformations chimiques ou nucléaires sont effectués à partir d'équations de réactions fournies et ajustées.

L'enthalpie est introduite pour simplifier l'analyse des transformations monobares, au cours desquelles le système est en contact avec un réservoir de pression, avec lequel il est en équilibre mécanique au début et à la fin de la transformation.

L'étude des machines cycliques dithermes s'appuyant sur des systèmes idéalisés constitue le socle indispensable à l'apprentissage des concepts de base de la thermodynamique industrielle. Les machines thermiques mettant en jeu un fluide en écoulement sont abordées à l'aide du premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert présentant une entrée et une sortie. Les exemples étudiés sont l'occasion d'analyser les éléments constitutifs de ce type de machines : détenteur, compresseur, turbine, condenseur, évaporateur, chambre de combustion, etc.

Les exercices s'articulent autour de transformations idéalisées ou bien décrites par des tableaux de données ou des graphiques. L'outil numérique peut être mobilisé en l'absence d'expressions analytiques disponibles ; des

logiciels de simulation peuvent aussi être utilisés pour affiner les modèles ou étudier les effets des différents paramètres.

Notions et contenus	Capacités exigibles
6. Structure de la matière et transformations physiques, chimiques ou nucléaires	
Noyau atomique, isotopes.	Déterminer la composition d'un noyau A_ZX Reconnaître deux noyaux isotopes d'un même élément.
Entité chimique.	Utiliser le terme adapté parmi molécule, atome, anion et cation pour nommer une entité chimique à partir d'une formule chimique.
Quantité de matière. Masse molaire d'une entité.	Déterminer la quantité de matière d'une entité dans une masse donnée, et inversement, sa masse molaire étant fournie.
Système thermodynamique, état d'équilibre thermodynamique et paramètres d'état. Paramètres extensifs et intensifs. Grandeurs molaires et massiques.	Identifier un jeu de paramètres d'état permettant de caractériser un système à l'état d'équilibre thermodynamique. Distinguer un système ouvert d'un système fermé. Connaissant la masse molaire, calculer une grandeur molaire à partir d'une grandeur massique et vice-versa.
Équation d'état. Modèle du gaz parfait. Modèle de la phase condensée, incompressible et indilatable.	Définir et caractériser les différents états de la matière. Exploiter l'équation d'état du gaz parfait. Déterminer la masse volumique d'un gaz parfait en fonction de la température, de la pression et de sa masse molaire. Déterminer le volume molaire d'un système en phase condensée à partir de sa masse volumique et de sa masse molaire.
Transformation physique, transformation chimique et transformation nucléaire.	Identifier une transformation physique, une transformation chimique ou une transformation nucléaire à partir d'un bilan fourni. Caractériser les transformations isothermes, isobares, monobares et isochores.
Transformation chimique. Modélisation macroscopique d'une transformation par une équation de réaction chimique.	Exploiter une équation de réaction chimique ajustée fournie pour réaliser un bilan de matière. Identifier le ou les réactifs limitants d'un système réactionnel.
7. Bilan d'énergie d'une transformation	
Travail et transfert thermique reçu par un système. Système isolé mécaniquement. Système isolé thermiquement. Travail des forces de pression.	Calculer le travail des forces de pression reçu par un système au cours de transformations mécaniquement réversibles de nature monobare ou de nature isochore. Dans le cas d'un gaz parfait, déterminer le travail reçu au cours d'une transformation isotherme réversible. Interpréter géométriquement la valeur et le signe du travail des forces de pression dans un diagramme de Watt (P, V), dans le cas de transformations isobares, isochores et isothermes.
Transfert thermique. Puissance thermique. Paroi adiabatique.	Décrire qualitativement les modes de transfert thermique par conduction, convection et rayonnement. Déterminer le signe du transfert thermique connaissant les températures du système et de son environnement. Interpréter le cas où le système et son environnement sont à la même température.
Premier principe de la thermodynamique. Energie interne U d'un système.	Expliquer en quoi le premier principe de la thermodynamique est un principe de conservation. Expliciter le premier principe de la thermodynamique pour un système fermé en tenant compte de l'énergie cinétique macroscopique et de l'énergie potentielle d'interaction avec l'extérieur. Exploiter l'extensivité de l'énergie interne.
Capacité thermique à volume constant dans le cas d'un gaz parfait ou d'une phase condensée considérée indilatable et incompressible.	Déterminer la variation d'énergie interne d'un système assimilé à un gaz parfait ou à une phase condensée incompressible et indilatable en fonction de la variation de température pour une capacité thermique à volume constant indépendante de la température.
8. Bilan enthalpique	
Enthalpie H d'un système monophasé. Capacité thermique à pression constante dans le cas du gaz parfait et d'une phase condensée considérée incompressible et indilatable.	Exprimer l'enthalpie d'un système. Déterminer la variation d'enthalpie d'un système assimilé à un gaz parfait ou à une phase condensée incompressible et indilatable en fonction de la variation de température pour une capacité thermique à pression constante indépendante de la température. Exprimer le premier principe sous la forme d'un bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare. Exploiter l'extensivité de l'enthalpie. Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une capacité thermique.
Changement d'état d'un corps pur. Diagramme (P, T) d'un corps pur.	Utiliser le vocabulaire des changements d'états. Exploiter un diagramme d'état (P, T) fourni.
Diagramme de Clapeyron (P, v) d'un système diphasé liquide-vapeur.	Exploiter les isothermes d'Andrews. Reconnaître et interpréter les courbes de rosée et d'ébullition. Identifier le point critique.

Théorème des moments.	Exploiter le théorème des moments pour déterminer la composition d'un système diphasé.
Enthalpie de changement d'état d'un corps pur.	Déterminer le transfert thermique reçu par un corps pur lors d'un changement d'état à pression constante. Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure d'une enthalpie de fusion.
Réactions de combustion. Combustible. Comburant. Pouvoirs calorifiques inférieur et supérieur d'un combustible.	Déterminer le transfert thermique reçu par un système réactionnel lors d'une combustion complète réalisée à température et pression constantes, à partir du pouvoir calorifique adapté et des paramètres du système. Déterminer la masse de CO ₂ produite lors du dégagement d'une énergie donnée par combustion complète d'un hydrocarbure, les données nécessaires étant fournies.
9. Deuxième principe de la thermodynamique	
Fonction d'état entropie, caractère extensif.	Déterminer une variation d'entropie pour une transformation, les entropies des systèmes en présence (gaz parfait ou phase condensée) étant fournies. Exploiter l'extensivité de l'entropie.
Thermostat.	Identifier des situations où un système peut être modélisé par un thermostat.
Entropie échangée avec un ou plusieurs thermostats.	Relier l'entropie échangée par un système avec un thermostat au transfert thermique reçu par le système et à la température du thermostat.
Deuxième principe de la thermodynamique. Transformations réversibles et irréversibles. Entropie créée.	Énoncer le deuxième principe de la thermodynamique. Justifier que le deuxième principe de la thermodynamique est un principe d'évolution. Identifier des causes d'irréversibilité dans une transformation. Exploiter le fait qu'une transformation adiabatique et réversible est isentropique.
Lois de Laplace.	L'entropie molaire d'un gaz parfait étant fournie, établir une loi de Laplace exprimée en fonction des variables (P, V), (P, T) ou (T, V) et faisant apparaître le rapport γ des capacités thermiques à pression et volume constants. Exploiter les lois de Laplace dans le cas des transformations isentropiques de gaz parfaits.
10. Machines cycliques dithermes en système fermé	
Représentation schématique des machines cycliques dithermes. Cas des moteurs, pompes à chaleur et machines frigorifiques.	Prévoir les signes des transferts d'énergie en fonction de l'application recherchée. Exprimer le rendement d'un moteur. Exprimer le coefficient de performance (CoP) (ou efficacité) d'une machine frigorifique et celui d'une pompe à chaleur (PAC).
Inégalité de Clausius pour les machines cycliques dithermes. Théorème de Carnot.	Déterminer le rendement ou le coefficient de performance (CoP) maximum des machines cycliques dithermes. Exploiter le théorème de Carnot pour juger de la performance d'une machine thermique.
Diagramme de Watt (P, V) et diagramme entropique (T, S).	Donner une interprétation énergétique de l'aire des cycles et de leur sens de parcours dans les diagrammes (P, V) et (T, S) pour un cycle réversible. Tracer l'allure d'un cycle de Carnot d'un gaz parfait dans un diagramme de Watt et un diagramme entropique. Capacité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, tracer le cycle d'un moteur dans un diagramme de Watt ou dans un diagramme entropique. Déterminer le travail fourni et le rendement.
Modélisation d'un moteur réel à pistons : exemples du moteur à combustion interne et du moteur diesel.	Associer les temps mécaniques (4 temps ou 2 temps) d'un moteur à piston aux différentes transformations du cycle moteur.
Puissance d'un moteur, consommation d'énergie.	Déterminer la puissance d'un moteur et la puissance thermique nécessaire à son fonctionnement connaissant les caractéristiques d'un cycle. Déterminer la consommation d'énergie nécessaire pour qu'un moteur fournisse un travail donné.
11. Machines thermiques en système ouvert	
Premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert en régime stationnaire. Travail indiqué massique.	Citer le premier principe de la thermodynamique en système ouvert en régime stationnaire, par unité de masse et/ou par unité de temps, en tenant compte des variations massiques d'enthalpie, d'énergie potentielle et d'énergie cinétique. Appliquer le premier principe de la thermodynamique en système ouvert en régime stationnaire à une machine thermique avec écoulement de fluide en précisant le système ouvert considéré. Expliquer le rôle d'un compresseur, d'une pompe, d'un condenseur, d'un évaporateur et d'un détendeur. Associer ces organes à des transformations du cycle thermodynamique mis en œuvre dans une machine. Démontrer le caractère isenthalpique de la transformation subie par un fluide dans un détendeur adiabatique.
Système diphasé liquide-vapeur.	Représenter un cycle de transformations dans un diagramme entropique (T, s) et enthalpique (P, h) (entropies et enthalpies par unité de masse). Exploiter les diagrammes (T, s) et/ou (P, h) pour déterminer les échanges énergétiques se produisant lors d'un cycle.

C. – Electrocinétique – Régimes sinusoïdaux

Cette partie est l'occasion de revoir les lois élémentaires des circuits et de les généraliser au cas des régimes quasi stationnaires. Les régimes transitoires de circuits linéaires simples du premier et du deuxième ordre sont étudiés ; les relations de continuité des différentes grandeurs sont admises. L'étude des dipôles linéaires en régime sinusoïdal établi introduit la représentation complexe des signaux sinusoïdaux et la notion d'impédance complexe

d'un dipôle électrique. Les aspects énergétiques des régimes sinusoïdaux et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique sont soulignés.

Notions et contenu	Capacités exigibles
12. Circuits électriques dans l'approximation quasi stationnaire	
Approximation quasi stationnaire.	Le critère de validité de l'approche quasi stationnaire est énoncé sans démonstration.
Lois des nœuds, lois des mailles. Puissance électrique reçue ou fournie par un dipôle.	Utiliser les lois des nœuds et des mailles. Citer et utiliser les conventions récepteur et générateur. Citer des ordres de grandeur des intensités, des tensions et des puissances mises en jeu dans différents domaines d'applications.
Point de fonctionnement d'un circuit.	Exploiter les caractéristiques courant-tension des dipôles pour déterminer le point de fonctionnement d'un circuit en régime indépendant du temps.
Dipôles linéaires. Résistances, condensateurs, bobines. Associations de dipôles.	En régime dépendant du temps, énoncer la relation entre l'intensité du courant et la tension pour une résistance, un condensateur ou une bobine. Remplacer une association en série ou en parallèle de deux dipôles de même nature par un dipôle équivalent.
Modélisation d'une source d'énergie électrique réelle. Capacité électrique d'une pile.	Modéliser une source d'énergie électrique comme l'association d'une source de tension idéale et d'une résistance. Relier l'intensité du courant électrique débité par la pile à la capacité électrique de la pile et à la durée d'utilisation. Déterminer l'énergie stockée par une pile, connaissant sa capacité électrique et sa tension.
13. Circuits linéaires en régime transitoire	
Charge et décharge d'un condensateur dans un circuit RC série. Temps caractéristique.	Établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'un condensateur dans le cas de sa charge par une source idéale de tension et dans le cas de sa décharge. Déterminer l'ordre de grandeur de la durée du régime transitoire dans un circuit RC série. Réaliser l'acquisition d'un régime transitoire pour un circuit RC série et analyser ses caractéristiques. Confronter les résultats expérimentaux aux résultats d'un modèle.
Energie stockée par un condensateur.	Démontrer l'expression de l'énergie stockée par un condensateur en fonction de sa charge ou de la tension entre ses bornes. Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant de mesurer l'énergie emmagasinée par un condensateur.
Etablissement et rupture du courant dans un circuit RL série. Temps caractéristique.	Établir et résoudre l'équation différentielle vérifiée par la tension aux bornes d'une bobine dans le cas de l'établissement et de la rupture du courant. Déterminer l'ordre de grandeur de la durée du régime transitoire dans un circuit RL série. Mesurer la valeur de l'inductance propre d'une bobine.
Energie stockée par une bobine.	Démontrer l'expression de l'énergie stockée dans une bobine d'inductance connue. Mettre en œuvre un dispositif expérimental permettant de mesurer l'énergie emmagasinée par une bobine.
Circuit RLC série en régime dépendant du temps. Analogie mécanique.	Établir et résoudre l'équation d'évolution de la tension aux bornes du condensateur lors de sa charge ou de sa décharge, dans les différents régimes possibles. Écrire l'équation différentielle en faisant apparaître la pulsation propre et le facteur de qualité. Décrire et exploiter les analogies avec l'oscillateur harmonique mécanique amorti. Identifier les paramètres et grandeurs analogues.
14. Circuits linéaires en régime sinusoïdal établi	
Signal sinusoïdal. Pulsation et fréquence. Amplitude, phase. Représentation complexe d'un signal sinusoïdal	Passer de la représentation complexe d'un signal au signal réel et réciproquement (convention $e^{j\omega t}$).
Impédances complexes, association de deux impédances. Impédance d'une résistance, d'un condensateur, d'une bobine.	Établir l'expression de l'impédance d'une résistance, d'un condensateur, d'une bobine. Remplacer une association série ou parallèle de deux impédances par une impédance équivalente.
Puissance moyenne reçue par un dipôle linéaire en régime sinusoïdal établi. Tension efficace. Intensité efficace. Facteur de puissance.	Établir et exploiter l'expression de la puissance moyenne reçue par un dipôle en fonction de la tension efficace, de l'intensité efficace et du facteur de puissance. Relier le facteur de puissance à l'impédance complexe.
Transport d'énergie électrique.	Justifier l'emploi de lignes à haute tension pour le transport d'énergie électrique. Analyser l'influence du facteur de puissance d'une installation sur les pertes d'énergie par effet Joule dans les lignes de transport.
Circuit RLC série en régime sinusoïdal établi. Résonance de courant. Facteur de qualité.	Établir l'expression de l'amplitude de la tension aux bornes de la résistance, de la bobine ou du condensateur en fonction de la fréquence en utilisant la notion d'impédance complexe. Tracer la courbe donnant l'amplitude de la tension aux bornes de la résistance en fonction de la fréquence. Relier l'amplitude et la largeur (à $1/\sqrt{2}$) du pic de résonance en courant au facteur de qualité et à la pulsation propre du circuit. Mettre en évidence le phénomène de résonance de courant dans un circuit RLC série et estimer la valeur du facteur de qualité.

Second semestre

D. – Etude des fluides au repos ou en écoulement

Cette partie présente quelques propriétés des fluides au repos ou en mouvement dans une approche essentiellement tournée vers la pratique et la réalisation de bilans.

La relation fondamentale de l'hydrostatique fournit l'occasion d'introduire l'opérateur gradient, mais sa démonstration n'est exigible que dans le cas d'une variation unidimensionnelle de la pression. Des applications sont présentées.

La description du mouvement d'un fluide s'appuie sur le champ des vitesses, dans une approche eulérienne. L'évaluation des débits massiques et volumiques permet d'introduire la notion de flux et d'établir l'équation locale de la conservation de la masse. L'opérateur divergence est défini par son expression en coordonnées cartésiennes.

L'écoulement parfait est défini comme étant exempt de toute dissipation énergétique et d'échange thermique interne et externe. La démonstration et le domaine d'application de la relation de Bernoulli sont connus des étudiants. La notion de perte de charge permet d'étudier des conséquences concrètes de la dissipation d'énergie dans les écoulements réels.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Description d'un fluide statique	
Echelle mésoscopique.	Citer des ordres de grandeurs des dimensions de l'échelle mésoscopique dans le cas des liquides et des gaz.
Champ de pression dans un fluide. Force de pression.	Citer des ordres de grandeur de valeurs de pression dans des situations usuelles. Calculer la force de pression s'exerçant sur une surface, la pression étant uniforme.
Forces volumiques associées à un champ de pression non uniforme. Opérateur gradient.	Démontrer l'expression de la résultante des forces de pression s'exerçant sur un volume élémentaire de fluide dans le cas d'une variation unidirectionnelle de la pression. Généraliser sans démonstration pour une situation quelconque en utilisant l'opérateur gradient. Exploiter l'expression générale admise de la force volumique associée aux forces de pression, l'expression de l'opérateur gradient étant fournie.
Relation de la statique des fluides.	Enoncer et établir la relation de la statique des fluides dans le cas d'un fluide soumis uniquement à la pesanteur, supposée uniforme.
Pression dans un fluide incompressible. Pression dans une atmosphère isotherme.	Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans le cas d'un fluide incompressible. Citer une application pratique. Exprimer l'évolution de la pression avec l'altitude dans le cas d'une atmosphère isotherme assimilée à un gaz parfait. Capacité numérique : mettre en œuvre la méthode d'Euler à l'aide d'un langage de programmation pour simuler l'évolution de la pression pour une atmosphère non isotherme dans le cadre du modèle du gaz parfait.
Poussée d'Archimède.	Expliquer l'origine de la poussée d'Archimède. Citer et exploiter l'expression de la poussée d'Archimède.
2. Description d'un fluide en écoulement	
Champ des vitesses. Écoulement stationnaire. Ligne de courant, tube de courant.	Décrire les propriétés thermodynamiques et mécaniques d'un fluide à l'aide des grandeurs locales pertinentes. Représenter les lignes de courant d'un champ de vitesses uniforme et stationnaire. Analyser des vidéos, des simulations ou des cartographies d'écoulement.
Bilans de masse et de volume. Débit volumique et débit massique.	Réaliser un bilan de masse ou de volume sur une portion de fluide, les débits étant connus. Montrer que dans un écoulement stationnaire, le débit massique se conserve le long d'un tube de courant ; exploiter cette propriété. Montrer que dans un écoulement de fluide incompressible, le débit volumique se conserve le long d'un tube de courant ; exploiter cette propriété.
Flux d'un champ de vecteurs. Vecteur densité de courant de masse.	Exprimer les débits volumique et massique pour un écoulement unidirectionnel uniforme. Calculer le débit volumique du fluide à travers une surface quelconque à l'aide du flux du vecteur vitesse, considéré comme uniforme. Calculer le débit massique du fluide à travers une surface quelconque à l'aide du flux du vecteur densité courant de masse, considéré comme uniforme.
Conservation du débit volumique dans un écoulement de fluide incompressible.	Exploiter qualitativement la topographie des lignes de courant pour prévoir les variations de la norme du vecteur vitesse le long des tubes de courant.
Equation locale de conservation de la masse dans un fluide en écoulement unidirectionnel. Opérateur divergence.	Démontrer l'équation locale de conservation de la masse dans un écoulement de fluide unidirectionnel. Généraliser au cas tridimensionnel. Exploiter l'expression fournie de l'opérateur divergence. Montrer que la divergence du champ des vitesses d'un fluide incompressible est nulle en tout point.
3. Aspect énergétique de l'écoulement d'un fluide en régime stationnaire	
Relation de Bernoulli.	Caractériser un écoulement parfait.

	Etablir et exploiter la relation de Bernoulli à partir du premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert pour un écoulement parfait, incompressible et stationnaire entre deux points situés sur une même ligne de courant.
Perte de charge singulière et régulière.	Modifier la relation de Bernoulli afin de tenir compte de la dissipation d'énergie mécanique lors de l'écoulement.
Transport de fluide dans une conduite.	Exploiter le premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert pour effectuer un bilan de puissance dans une conduite pouvant contenir une pompe ou une turbine.

E. – Transferts thermiques

Les trois modes de transferts thermiques sont abordés de façon phénoménologique. Toutes les situations étudiées sont stationnaires ou quasi stationnaires : la notion de résistance thermique peut être exploitée même si les températures des corps en présence évoluent avec le temps. L'équation de la diffusion thermique est hors programme.

Les analogies avec l'électricité sont développées et utilisées. L'effet de serre est présenté dans le modèle le plus simple ; son rôle dans l'évolution du climat terrestre est souligné.

Notions et contenus	Capacités exigibles
4. Transfert d'énergie thermique	
Puissance thermique. Vecteur densité de flux thermique.	Interpréter la puissance thermique comme un débit d'énergie. Relier la puissance thermique traversant une surface au flux du vecteur densité de flux thermique à travers celle-ci.
Loi de Fourier.	Relier l'existence d'un flux thermique à la non-uniformité de la température. Interpréter son sens. Citer des ordres de grandeur de conductivité thermique pour certains matériaux, notamment dans le domaine de l'habitat.
Température dans un conducteur thermique en régime stationnaire. Résistance thermique.	En régime stationnaire, déterminer le profil de température pour un transfert thermique unidirectionnel. Etablir l'expression de la résistance thermique dans le cas d'un conducteur thermique siège d'un transfert thermique unidirectionnel. Calculer la puissance thermique échangée entre deux systèmes de températures connues reliés par une résistance thermique.
Bilan d'énergie en régime quasi-stationnaire.	Déterminer la variation en fonction du temps de la température d'un système relié à un thermostat par une résistance thermique donnée.
Analogie électrique. Lois d'association des résistances thermiques.	Exploiter l'analogie électrique entre la conduction thermique et la conduction électrique pour déterminer les températures et flux thermiques au sein d'un système mettant en jeu plusieurs résistances thermiques.
Transfert thermique conducto-convectif pariétal. Loi de Newton.	Exploiter la loi de Newton fournie. Déterminer la résistance thermique associée au transfert conducto-convectif pariétal.
Transfert thermique par rayonnement. Corps noir. Approche descriptive du rayonnement du corps noir. Loi de Wien, loi de Stefan.	Exploiter les expressions fournies des lois de Wien et de Stefan. Réaliser un bilan d'énergie pour un corps noir en tenant compte des transferts thermiques reçus et émis par rayonnement.
Effet de serre. Albédo.	Analyser quantitativement l'effet de serre en s'appuyant sur un bilan énergétique dans le cadre d'un modèle à une couche. Expliquer qualitativement l'influence de l'effet de serre atmosphérique et de l'albédo sur le climat terrestre.

F. – Electromagnétisme : champs statiques et quasi statiques

Cette partie aborde l'électrostatique, la magnéto-statique et les phénomènes d'induction, décrits dans l'approximation quasi stationnaire. Les équations de Maxwell locales ne sont pas utilisées : les théorèmes de Gauss, d'Ampère, la loi de Faraday et la loi de conservation du flux du champ magnétique sont seulement abordés sous leur forme intégrale. L'exploitation des théorèmes de Stokes et de Green-Ostogradski est hors programme.

Les champs électrostatiques et magnéto-statiques sont explicitement déterminés dans des situations présentant une symétrie élevée. Au-delà des calculs de champs exigibles du programme, il est possible de poser des exercices portant sur d'autres situations hautement symétriques où les choix des éléments d'intégration s'imposent (surfaces d'application du théorème de Gauss, ou contours d'intégration du théorème d'Ampère). En dehors de ces situations, les expressions des champs sont admises. Les systèmes mettant en jeu des courants surfaciques sont hors programme.

La conduction électrique est présentée de façon phénoménologique ; le modèle de Drüde n'est pas exigible. L'équation locale de conservation de la charge est seulement démontrée dans une situation unidimensionnelle.

L'étude de l'induction repose sur la loi de Faraday qui se prête à une introduction expérimentale et qui peut constituer un exemple d'illustration de l'histoire des sciences. On n'omettra pas, à ce sujet, d'évoquer les différents points de vue que l'on peut avoir sur le même phénomène selon le référentiel où l'on se place.

Le couplage électromécanique est étudié dans le seul cas du dispositif des rails de Laplace.

Notions et contenus	Capacités exigibles
5. Electrostatique du vide	
Charge électrique, conservation de la charge.	Exploiter le principe de conservation de la charge électrique.
Loi de Coulomb, champ électrostatique. Lignes de champ.	Exprimer le champ électrostatique créé par une charge ponctuelle. Citer quelques ordres de grandeurs de champs électriques. Exploiter une carte de lignes de champ électrostatique fournie.
Distributions continues de charges volumique, surfacique, linéique. Principe de superposition.	Choisir une modélisation adaptée à la géométrie du problème étudié. Identifier des situations où la distribution de charge peut être modélisée par une distribution infinie. Evaluer la charge totale d'une distribution continue et uniforme dans des situations de géométrie simple.
Champ électrostatique créé par une distribution statique de charges. Relations entre les symétries et invariances des distributions de charges et celles du champ électrostatique.	Identifier les plans de symétrie et d'antisymétrie éventuels d'une distribution de charges. Identifier les invariances d'une distribution de charges. Exploiter ces symétries et invariances pour caractériser le champ électrostatique créé et prévoir la topographie des lignes de champ.
Circulation du champ électrostatique. Potentiel électrostatique.	Exprimer une différence de potentiel comme une circulation du champ électrostatique. Relier le champ électrostatique au potentiel électrostatique. Citer le potentiel créé par une charge ponctuelle. Déterminer un champ électrostatique à partir du potentiel et réciproquement, l'expression de l'opérateur gradient étant fournie.
Flux du champ électrostatique, théorème de Gauss.	Déterminer le flux du champ électrostatique dans des géométries simples. Énoncer le théorème de Gauss. Exploiter le théorème de Gauss pour calculer un champ électrostatique créé par une distribution présentant un haut degré de symétrie (distribution à symétrie sphérique, plan uniformément chargé). Capacité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, tracer quelques lignes de champ pour une distribution donnée.
Conservation du flux du champ électrostatique dans le vide et conséquences topographiques.	Exploiter qualitativement la topographie des lignes de champ électrostatiques dans le vide pour prévoir les variations de la norme du champ le long des tubes de champ.
Condensateur, capacité.	Citer des situations que l'on peut modéliser par un condensateur. Établir l'expression de la capacité d'un condensateur plan dans le vide en négligeant les effets de bords. Généraliser en présence d'un diélectrique entre les armatures. Déterminer la charge d'un condensateur connaissant la tension existant à ses bornes et réciproquement.
Densité volumique d'énergie électrostatique.	Exprimer la densité volumique d'énergie électrostatique dans un condensateur plan à l'aide du champ électrostatique.
6. Conduction électrique	
Courant électrique dans un conducteur. Intensité du courant électrique. Vecteur densité de courant volumique. Vecteur densité de courant volumique associé au déplacement homocinétique de porteurs de charge dans un conducteur.	Interpréter l'intensité du courant électrique comme un débit de charges. Relier les conventions d'orientation de l'intensité du courant électrique au sens du mouvement des porteurs de charges. Relier l'intensité du courant au flux du vecteur densité de courant volumique. Établir l'expression du vecteur densité volumique de courant en fonction de la vitesse et de la charge volumique des porteurs de charge.
Conservation de la charge électrique. Loi des nœuds. Equation locale de conservation de la charge électrique.	Établir la loi des nœuds en régime stationnaire. Établir l'équation locale de conservation de la charge en régime variable pour une situation unidimensionnelle. Énoncer sa généralisation à trois dimensions. Démontrer que le vecteur densité de courant est à flux conservatif en régime stationnaire.
Loi d'Ohm locale. Conductivité électrique. Loi d'Ohm, résistance électrique.	Établir la loi d'Ohm à partir de la loi d'Ohm locale dans une situation de conduction unidirectionnelle et exprimer la résistance électrique du conducteur considéré.
Effet Joule.	Interpréter l'effet Joule à partir d'un bilan énergétique effectué sur un conducteur ohmique en régime stationnaire.
7. Magnétostatique du vide	
Champ magnétique. Lignes de champ magnétique.	Exploiter la notion de ligne de champ magnétique. Exploiter une carte de lignes de champ magnétique fournie.
Force magnétique exercée sur une charge ponctuelle.	Exploiter l'expression de la force magnétique agissant sur une charge ponctuelle. Justifier 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.
Sources de champ magnétique.	Citer des ordres de grandeur de champs magnétiques : au voisinage d'aimants, dans une machine électrique, dans un appareil d'IRM, dans le cas du champ magnétique terrestre. Produire et mesurer des champs magnétiques.
Force de Laplace.	Exprimer la force subie par un conducteur filiforme rectiligne parcouru par un courant en présence d'un champ magnétique extérieur uniforme.

Moment magnétique. Dipôle magnétique.	Déterminer le vecteur moment magnétique et les pôles nord et sud associés à une boucle de courant plane. Tracer schématiquement l'allure des lignes de champs à grande distance d'un dipôle magnétique.
Aimants.	Modéliser un aimant par un dipôle magnétique. Identifier les pôles nord et sud d'un aimant.
Action subie par un moment magnétique dans un champ magnétique uniforme.	Exploiter l'expression fournie du couple subi par un moment magnétique placé dans un champ magnétique uniforme. Utiliser une boussole pour déterminer la direction d'un champ magnétique.
Flux du champ magnétique à travers une surface fermée. Conservation du flux du champ magnétique.	Utiliser le fait que le flux du champ magnétique à travers une surface fermée est nul pour démontrer que le flux de ce champ est conservé le long d'un tube de champ. Exploiter qualitativement les lignes de champ magnétique pour prévoir les variations de la norme du champ le long d'un tube de champ magnétique.
Champ magnétostatique créé par une distribution stationnaire de courant. Relations entre les symétries et invariances des distributions de courant et celles du champ magnétostatique.	Identifier les plans de symétrie et d'antisymétrie éventuels d'une distribution de courants et les relier aux plans d'antisymétrie et de symétrie du champ magnétostatique créé. Identifier les invariances d'une distribution de courants. Exploiter les symétries et invariances pour caractériser le champ magnétostatique créé et prévoir la topographie des lignes de champ. Tracer l'allure des cartes de champ magnétostatique pour un aimant droit, un fil rectiligne, une spire circulaire, une bobine longue.
Circulation du champ magnétostatique. Théorème d'Ampère.	Déterminer la circulation du champ magnétostatique dans des géométries simples. Énoncer le théorème d'Ampère. Exploiter le théorème d'Ampère pour calculer un champ magnétostatique créé par une distribution présentant un haut degré de symétrie (fil infini de rayon nul ou fini, solénoïde « infini »).
8. Lois de l'induction	
Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.	Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.
Loi de Faraday, force électromotrice induite dans une boucle conductrice. Variation du flux magnétique à travers une boucle de courant. Sens du courant induit.	Exploiter la loi de Faraday en précisant les conventions d'algèbre. Déterminer le sens et l'intensité du courant induit, connaissant la résistance de la boucle de courant dans différentes situations.
Loi de modération de Lenz.	Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.
9. Circuit fixe placé dans un champ magnétique qui dépend du temps	
Auto-induction.	Différencier le flux propre des flux extérieurs. Utiliser la loi de modération de Lenz.
Flux propre et inductance propre.	Évaluer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.
Densité volumique d'énergie.	Exprimer la densité volumique d'énergie magnétique dans un solénoïde infini.
Couplage magnétique entre deux circuits. Induction mutuelle entre deux bobines. Courants de Foucault.	Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe, de grande longueur en influence totale. Écrire les équations électriques dans un circuit mettant en jeu une inductance mutuelle. Citer des exemples d'applications des courants de Foucault. Expliquer le principe du chauffage inductif, le principe d'une détection ampèremétrique.
10. Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire. Couplages électromécaniques	
Phénomène d'induction dans un conducteur en translation rectiligne dans un champ magnétique stationnaire. Rails de Laplace.	Interpréter qualitativement les phénomènes observés dans le cas des rails de Laplace. Établir les équations électrique et mécanique dans un dispositif de type rails de Laplace. Établir et interpréter la relation entre la puissance de la force de Laplace et la puissance électrique. Effectuer un bilan énergétique. Expliquer le principe de l'obtention d'énergie électrique à partir du phénomène d'induction. Expliquer le principe du freinage magnétique lié à l'apparition de courants de Foucault.

G. – Ondes

L'équation de d'Alembert unidimensionnelle est établie à partir d'une modélisation simplifiée d'un câble coaxial supposé sans pertes ; c'est sa seule démonstration exigible. Les ondes progressives sont étudiées de façon générale. Les ondes stationnaires et leurs caractéristiques sont présentées.

L'étude des ondes électromagnétiques fournit l'occasion de présenter les équations locales de Maxwell dans le vide, en présence de charges et de courants. Elles sont citées sans démonstration ; l'expression de la force de Lorentz est rappelée en tant que définition du champ électromagnétique. L'intérêt historique et conceptuel des équations de Maxwell est souligné. Les contraintes et couplages qu'elles imposent au champ électromagnétique sont analysées qualitativement. Les expressions intégrales associées ne sont pas exigibles dans le cas général.

Les ondes électromagnétiques progressives planes monochromatiques polarisées rectilignement sont étudiées en détail, y compris dans leur aspect énergétique.

Notions et contenus	Capacités exigibles
11. Propagation unidimensionnelle d'un signal	
Ondes de tension et de courant dans un câble coaxial. Equation de d'Alembert unidimensionnelle.	Etablir les équations de propagation vérifiées par l'intensité du courant et la tension dans un câble coaxial sans pertes modélisé comme un milieu continu caractérisé par une inductance linéique et une capacité linéique.
Ondes progressives solutions de l'équation de d'Alembert. Retard temporel, célérité. Forme générale des solutions de l'équation de d'Alembert.	Prévoir, dans le cas d'une onde progressive, l'évolution temporelle du signal à position fixée, et son évolution spatiale à un instant donné. Exprimer la célérité en fonction des caractéristiques d'un câble coaxial.
Vibrations transversales d'une corde tendue.	Exprimer la célérité en fonction des paramètres de la corde à partir de l'équation de propagation fournie.
Onde progressive sinusoïdale : phase, double périodicité spatiale et temporelle.	Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines mécaniques et électromagnétiques et citer des applications associées. Etablir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la célérité. Mesurer la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale.
Ondes stationnaires. Superposition de deux ondes progressives sinusoïdales de même amplitude se propageant dans des sens opposés. Structure de l'onde résultante : nœuds et ventres.	Déterminer les positions des nœuds et des ventres d'une onde stationnaire en fonction de sa longueur d'onde.
12. Propagation des ondes électromagnétiques dans le vide	
Force de Lorentz. Formes locales des équations de Maxwell dans le vide.	Simplifier les équations de Maxwell, fournies et admises, dans une zone de l'espace sans charges ni courants. Identifier les équations qui font apparaître un couplage entre les champs électrique et magnétique. Identifier et interpréter qualitativement les équations qui font apparaître un couplage entre les champs électrique ou magnétique et les distributions de charges ou de courant.
Equation de propagation des champs électrique et magnétique dans le vide. Cas des ondes planes.	Montrer que l'équation de propagation des champs électrique et magnétique, fournie, se ramène à une équation de d'Alembert unidimensionnelle dans le cas d'une onde plane. Exprimer la célérité des ondes électromagnétiques en fonction des constantes fondamentales.
Onde électromagnétique plane progressive monochromatique polarisée rectilignement. Vecteur d'onde, longueur d'onde. Spectre des ondes électromagnétiques.	Démontrer la relation de dispersion de l'onde. Exploiter l'expression du champ électrique d'une onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement pour identifier la direction de propagation et la direction de polarisation. Identifier en ordre de grandeur les intervalles en fréquence ou en longueur d'onde des domaines : ondes radio, infra-rouge, visible, ultra-violet, rayons X, rayons gamma.
Caractère transverse des champs. Relation entre le champ électrique, le champ magnétique et le vecteur d'onde d'une onde plane progressive monochromatique (relation de structure).	Démontrer le caractère transverse des champs électrique et magnétique dans le cas d'une onde plane. Etablir la relation de structure dans le cas d'une onde plane progressive monochromatique polarisée rectilignement. Exploiter la relation de structure pour déterminer le champ électrique connaissant le champ magnétique, ou réciproquement, pour une onde plane progressive monochromatique.
Densité volumique d'énergie électromagnétique et vecteur de Poynting. Equation locale de Poynting dans le vide. Puissance surfacique moyenne transportée par l'onde.	Exprimer la puissance rayonnée à travers une surface à l'aide du vecteur de Poynting. Associer la direction du vecteur de Poynting et la direction de propagation de l'onde. Citer quelques ordres de grandeurs de puissance surfacique moyennes transportées par une onde électromagnétique (laser hélium-néon, flux solaire). Etablir l'équation locale de Poynting unidimensionnelle pour une onde plane polarisée rectilignement dans une zone de l'espace sans charges ni courants. Admettre son expression la plus générale dans une zone de l'espace sans charges ni courants. Par analogie avec d'autres équations locales de conservation, faire le lien avec la conservation de l'énergie électromagnétique dans le vide.
Conversion d'énergie électromagnétique en énergie électrique.	Décrire l'effet photovoltaïque. A partir de la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque, déterminer les valeurs de la tension et du courant qui maximisent la puissance électrique fournie. Déterminer la valeur du rendement maximum, les données nécessaires étant fournies.