

Annexe II

PHYSIQUE

I - OBJECTIFS DE FORMATION

L'enseignement de la physique dans les classes de TSI s'inscrit dans la continuité de l'esprit des programmes du cycle terminal menant au baccalauréat technologique. Il a vocation, dans ces matières, à apporter les connaissances fondamentales indispensables à la formation générale du futur ingénieur, enseignant ou chercheur.

Dans un monde en évolution rapide, où une somme énorme de connaissances est disponible, l'enseignement dispensé par le professeur doit éveiller la curiosité face au monde réel, promouvoir le sens de l'observation qui est à l'origine de la plupart des grandes découvertes, et développer chez l'étudiant le goût de l'expérience et du concret.

La formation dispensée au cours des deux années de préparation doit, par 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.

L'objectif essentiel est que l'étudiant devienne 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 une grande école.

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 la 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 sans encyclopédisme l'impact pratique.

La modélisation, la mise en équations, la résolution mathématique (souvent algorithmique à ce stade) sont essentielles, mais ne doivent en aucun cas devenir prioritaires par rapport à la compréhension physique du phénomène étudié. Les exercices et les problèmes nécessitant le recours à une technicité mathématique excessive sont à éviter.

II - PROGRAMME

Préambule

Le programme, dans son approche théorique, est soigneusement articulé et abondamment commenté. Cela ne préjuge en rien de l'ordre de présentation, pour lequel le professeur a toute latitude.

Le programme de physique, en première et en seconde année, s'articule en mécanique, en électromagnétisme, en optique et en thermodynamique autour de connaissances fondamentales. Les applications aux systèmes industriels ont été privilégiées, notamment en thermodynamique et en électromagnétisme, qui occupent sur ce point une place particulière.

L'expérimentation occupe une place importante dans les activités des étudiants; certaines parties du programme sont traitées en travaux pratiques. La liste des thèmes et méthodes des travaux pratiques au programme figure in fine.

L'utilisation de l'ordinateur en travaux pratiques ou lors d'expériences de cours, pour l'acquisition et le traitement de données expérimentales, de façon à tester des modèles de divers niveaux d'élaboration, renforce le lien entre la théorie et les travaux expérimentaux.

Dans des situations qui se prêtent mal à une expérimentation personnelle, l'ordinateur pourra être utilisé pour présenter des résultats expérimentaux ou des simulations; ces dernières ne pourront cependant jamais se substituer à l'expérience.

Plus généralement, on pourra utiliser l'ordinateur à chaque fois que celui-ci peut apporter un gain de temps ou une amélioration de la compréhension. Selon les circonstances, il pourra être fait appel aux divers services offerts par l'appareil, notamment par des logiciels traitant de problèmes scientifiques, des logiciels de calcul formel et de présentation graphique, ainsi que des logiciels généraux (traitement de texte, tableur, base de données).

Le programme a été rédigé et abondamment commenté dans le but d'éviter toute dérive inflationniste.

Seconde **année TSI**

1- MÉCANIQUE

Le programme de mécanique de seconde année généralise aux systèmes matériels les théorèmes généraux de mécanique newtonienne du point matériel, établis en classe de première année; on fera remarquer que le champ d'application de ces théorèmes ne se limite pas au seul cadre de la mécanique du solide, dont l'étude sera menée en liaison avec l'enseignement dispensé en génie mécanique.

La mécanique des fluides est hors programme.

La mécanique du solide ne peut intervenir dans un problème qu'en tant que partie non prépondérante.

PROGRAMME

COMMENTAIRES

1.1 Mécanique des systèmes matériels

- Centre de masse. Quantité de mouvement totale - ou résultante cinétique - , moment cinétique et énergie cinétique pour un système discret ou continu de points matériels. Référentiel barycentrique, théorèmes de König.

- Actions extérieures et intérieures. Principe des actions mutuelles.

- Théorème de la résultante cinétique et du mouvement du centre de masse; conditions et implications de la conservation de la quantité de mouvement pour un système clos.

- Théorème du moment cinétique en un point fixe, et en projection sur un axe fixe ; théorème du moment cinétique dans le référentiel barycentrique. Conditions et implications de la conservation du moment cinétique.

- Puissance et travail d'un ensemble d'actions; énergie potentielle. Théorème de l'énergie cinétique. Energie mécanique ; conditions et implications de sa conservation.

1.2 Mécanique du solide

- Solide en rotation autour d'un axe fixe dans le référentiel d'étude :
 . théorème du moment cinétique projeté sur l'axe de rotation,
 . théorème de l'énergie cinétique,
 . équation horaire du mouvement.

2- ÉLECTROCINÉTIQUE

Cette partie sera étudiée expérimentalement. L'amplificateur opérationnel, présenté aux étudiants lors de leurs études secondaires, n'est pas au programme en tant que tel. Il pourra cependant être utilisé dans les montages de travaux pratiques ; dans les exercices et problèmes mettant éventuellement en jeu l'amplificateur opérationnel, celui-ci sera considéré comme idéal et il sera précisé si son fonctionnement est linéaire ou saturé.

L'étude de la rétroaction est en dehors du programme de physique.

2.1 Traitement d'un signal périodique par un système linéaire

- Composition en fréquence d'un signal périodique. Valeur moyenne; fondamental, harmoniques.

- Traitement par un filtre de premier ou de deuxième ordre ; utilisation de la fonction de transfert.

- Caractère dérivateur ou intégrateur dans un domaine limité de fréquences.

Sont hors programme:

- Les systèmes ouverts
- Les notions de particule fictive et de masse réduite.
- L'étude des chocs.

On utilisera indifféremment les termes "actions" ou "efforts". On montrera le lien entre ces notions et celle de force, introduite en première année lors de l'étude de la mécanique du point matériel.

On insistera sur le fait que le théorème de la résultante cinétique ne concerne que le mouvement du centre de masse du système et on soulignera le lien avec la relation fondamentale de la dynamique abordée en première année.

Au choix de l'enseignant, les "théorèmes généraux" ci-contre seront déduits des lois de Newton enseignées en première année, ou d'une postulation torsielle des lois de la mécanique.

On mentionnera le cas des actions intérieures: leur puissance est indépendante du référentiel; elle est en général non nulle bien que leur résultante et leur moment soient nuls (on pourra donner l'exemple de l'énergie de cohésion d'un cristal ionique et celui de l'énergie gravitationnelle d'une étoile).

On dégagera le lien entre ce thème et le premier principe de la thermodynamique.

On étudiera le cas particulier des actions appliquées à un solide.

On montrera que, lorsque le but visé est la seule étude du mouvement, l'utilisation d'une méthode scalaire est souvent mieux adaptée.

La détermination des actions d'axe est hors programme.

Les expressions des moments d'inertie seront fournies.

Aucune connaissance sur les lois du frottement solide ne sera exigée.

On s'attachera à montrer en travaux pratiques et à l'aide de logiciels dans quelle mesure ces différents qualificatifs sont appropriés.

On illustrera quantitativement ces différents comportements.

PROGRAMME

COMMENTAIRES

2.2 Limites du modèle linéaire; oscillations permanentes

- Oscillations quasi-sinusoidales.

- Oscillations de relaxation.

Étude expérimentale de quelques exemples d'oscillateurs électroniques utilisant l'amplificateur opérationnel: on illustrera le rôle des non-linéarités par des manipulations et simulations sur l'oscillateur entrete nu. mais tout développement mathématique général est exclu.

3- ÉLECTROMAGNÉTISME

L'ensemble de l'électrostatique et de la magnétostatique n'est pas centré sur les calculs, mais sur les propriétés des champs. L'intérêt des propriétés de symétrie et d'invariance des champs polaires et axiaux sera souligné; l'accent sera mis sur la comparaison des propriétés respectives du champ électrostatique et du champ magnétostatique.

Les applications industrielles des forces magnétiques et du phénomène d'induction électromagnétique seront soulignées.

3.1 Electrostatique

- Formulation locale des lois de l'électrostatique. Equation de Poisson.

On établira les liens avec les propriétés vues en première année.

3.2 Magnétostatique

- Distributions et densités de courants.

On se limitera à des distributions de courants simples.

- Le champ magnétique \vec{B} sa topographie.

On se bornera à présenter des cartes de champ en tant que résultats expérimentaux, ou obtenus à l'aide d'un logiciel, et à commenter l'allure de celles-ci.

- Loi de Biot et Savart pour un circuit filiforme.
Théorème de superposition.

La loi de Biot et Savart sera admise sans démonstration.

- Propriétés de symétrie et caractère axial du champ magnétique \vec{B} .
Comparaison avec les propriétés de symétrie du champ électrique.

On se limitera à la recherche des invariances par translation et par rotation, et à la recherche des plans de symétrie et d'antisymétrie de la distribution de courants.

- Circulation de \vec{B} , théorème d'Ampère. Formulation locale.

On montrera l'intérêt du théorème d'Ampère et on évitera toute dérivation calculatoire.

- Champs magnétiques d'une spire circulaire et d'un solénoïde circulaire; limite du long solénoïde.
Champ magnétique d'un fil rectiligne illimité.

Aucune technicité mathématique ne sera recherchée en tant que telle dans les calculs; ces derniers ne concerneront que des situations proches de celles décrites dans le cours, et d'intérêt pratique évident.

- Conservation du flux de \vec{B} . Formulation locale. Potentiel-vecteur \vec{A} . Equation de Poisson pour le potentiel-vecteur.

On admettra l'expression du potentiel-vecteur créé par un circuit filiforme.

Toute détermination de potentiel-vecteur est exclue. On fera apparaître que le potentiel-vecteur est un champ de vecteurs polaires, possédant les mêmes propriétés de symétrie que le champ électrique.

Le potentiel scalaire magnétique est hors programme.

3.3 Action d'un champ magnétique sur un courant

- Force de Lorentz; effet Hall.

L'énergie potentielle d'interaction est hors programme.

- Force de Laplace, travail des forces de Laplace.

On insistera sur la différence qui existe, dans le cas général, entre le flux balayé (ou coupé) et la variation de flux; on mentionnera leur égalité dans le cas d'un champ magnétique permanent.

On pourra, en travaux dirigés, étudier l'exemple du moteur à courant continu, et du moteur pas à pas.

- Dipôle magnétique: actions subies dans un champ magné-

Il s'agit ici d'une "petite" boucle de courant.

PROGRAMME

COMMENTAIRE

tique non uniforme, moment dipolaire magnétique.

Les expressions du potentiel-vecteur et du champ magnétique créés sont hors programme.

L'étude des milieux aimantés est hors programme.

3.4 Phénomènes d'induction électro-magnétique

On soulignera les applications industrielles des phénomènes d'induction électro-magnétique.

- Loi de Lenz-Faraday, force électromotrice d'induction pour un circuit filiforme, champ électromoteur.

On considèrera le cas du déplacement d'un circuit dans un champ magnétique stationnaire et le cas d'un circuit fixe dans un champ magnétique variable.

La notion de champ électromoteur n'est pas exigible.

Lors des travaux dirigés, on pourra étudier le principe de fonctionnement du convertisseur asynchrone.

- Induction propre, induction mutuelle.

Les coefficients d'auto-inductance seront calculés dans des cas de géométries simples ; le coefficient de mutuelle-inductance sera défini dans le cas de deux circuits filiformes.

- Énergie magnétique.

On se limitera au cas d'un ou deux circuits filiformes fixes ; on reliera cette énergie à la valeur des intensités. On introduira à propos du solénoïde infini la densité d'énergie $B^2 / 2 \mu_0$ et on admettra la validité générale de cette expression.

L'expression de l'énergie magnétostatique en fonction du potentiel-vecteur et de la densité de courant volumique est hors programme, de même que la détermination d'actions mécaniques d'origine magnétique par des bilans énergétiques.

3.5 Équations de Maxwell

On évoquera succinctement le problème de la nature du référentiel par rapport auquel les équations de Maxwell sont postulées. A l'occasion, par exemple, de l'établissement de la transformation galiléenne du champ électromagnétique, on signalera les contradictions auxquelles peut conduire l'emploi simultané de l'électromagnétisme de Maxwell et de la mécanique de Newton.

- Forme locale et forme intégrale des équations de Maxwell dans le vide. Formulation locale du principe de conservation de la charge.

Le formalisme quadridimensionnel et les transformations relativistes des champs sont hors programme.

Cas particulier des champs permanents.

L'excitation magnétique \vec{H} et excitation électrique \vec{D} sont hors programme.

Existence des potentiels vecteur \vec{A} et scalaire V .

- Relations entre les composantes du champ électromagnétique de part et d'autre d'une interface.

3.6 Énergie électromagnétique

- Densité volumique d'énergie électromagnétique.

Vecteur de Poynting et puissance myonnée.

Puissance volumique cédée à la matière.

L'expression de la densité volumique d'énergie électromagnétique sera postulée ; sa validité pourra être vérifiée sur les exemples du condensateur plan idéal et du solénoïde illimité.

L'identité de Poynting est hors programme.

- Cas particulier d'un milieu ohmique.

La forme locale de la loi d'Ohm sera présentée comme phénoménologique, sans justification microscopique.

3.7 Ondes électromagnétiques

- Équation de propagation du champ électromagnétique dans une région sans charge ni courant. Structure de l'onde plane ; onde plane progressive. Cas particulier de l'onde plane progressive monochromatique ; pulsation, vecteur d'onde, célérité (ou vi-

Les potentiels retardés sont hors programme.

La propagation des ondes électro-magnétiques dans tout milieu est hors programme.

Les notions de paquet d'ondes et de vitesse de groupe sont hors

PROGRAMME

COMMENTAIRES

tesse) de phase.

- Caractère vectoriel des ondes électro-magnétiques : états de polarisation d'une onde plane progressive monochromatique.

- Réflexion, en incidence normale, d'une onde plane progressive monochromatique sur un plan conducteur parfait ; ondes stationnaires.

4- OPTIQUE

On se limitera, lors de l'étude de l'optique physique, au domaine d'approximation où une description par des ondes scalaires est suffisante. Toute étude générale de la cohérence est exclue ainsi qu'une description exhaustive des dispositifs diviseurs d'onde.

4.1 Rappels et compléments d'optique géométrique

- Notion de chemin optique. Stigmatisme.

programme.

Les polariseurs et les lames à retard sont hors programme.

Les rayonnements dipolaires, les antennes et la propagation guidée sont hors programme.

4.2 Interférences non localisées de deux ondes cohérentes

- Différence de phase, différence de marche, ordre d'interférence et intensité lumineuse en un point du champ d'interférence de deux ondes monochromatiques cohérentes.

On admettra la constance du chemin optique entre un point objet et son image.

Le calcul n'est développé que dans le cas des miroirs de Fresnel. L'étude du concept de localisation des franges est hors programme.

4.3 Interférences localisées

- Interférences localisées de deux ondes cohérentes strictement limitées au dispositif diviseur d'amplitude que constitue l'interféromètre de Michelson ; anneaux à l'infini et franges rectilignes localisées au niveau des miroirs.

On expliquera que, contrairement aux dispositifs diviseurs d'onde, l'interféromètre de Michelson est un dispositif diviseur d'amplitude et que les franges sont localisées, ce qui est constaté expérimentalement avec une source étendue. On admettra que les émergents qui interfèrent sont issus d'un même incident ; toute recherche de lieu de localisation des franges est exclue. Toutes les variantes (Twyman-Green, Fizeau...) sont hors programme.

4.4 Étude d'un réseau constitué de fentes idéalement fines :

- Interférences à l'infini, maxima principaux d'intensité.

Application à la mesure de longueurs d'onde.

L'étude des réseaux plans sera essentiellement réalisée en travaux pratiques ; on se limitera strictement à la détermination des directions correspondant aux maxima principaux d'intensité.

Le calcul du pouvoir de résolution spectrale des réseaux est hors programme.

5- THERMODYNAMIQUE

En seconde année, l'application des deux principes de la thermodynamique aux changements d'état, et aux écoulements en régime permanent, conduit à l'analyse de quelques systèmes industriels.

Les grandeurs massiques seront notées en lettres minuscules (par exemple h pour l'enthalpie massique) et les grandeurs molaires seront notées en majuscules avec l'indice m (par exemple H_m pour l'enthalpie molaire).

Toute notion de thermodynamique statistique est hors programme.

5.1 Changement d'état d'un corps pur

- Chaleur latente, enthalpie et entropie de changement d'état.

La relation de Clapeyron est exclue, de même que la "chaleur interne" (variation d'énergie interne).

- Diagrammes température-pression d'équi-libre. Variance. Point triple; point critique.

On se limitera aux changements d'état solide-liquide-gaz.

- Diagramme de Clapeyron dans le cas liquide-vapeur. Palier de saturation; liquide saturant, vapeur saturante sèche.

- Enthalpie et entropie en un point du palier d'équilibre.

Pour les phases condensées, on prendra $dH \simeq dU \simeq CdT$ et $dS \simeq CdT/T$ en signalant l'approximation faite. L'étude des capacités calorifiques le long des courbes de changement d'état est hors programme.

5.2 Systèmes en écoulement permanent

- Utilisation d'un diagramme ou de valeurs expérimentales.

On se limitera à l'étude simple d'un compresseur ou d'une turbine; on montrera l'intérêt des écoulements permanents dans le cadre de systèmes industriels.

On mentionnera la distinction entre diagramme de Clapeyron et diagramme de Watt.

Aucune connaissance des diagrammes de Mollier n'est exigible. On établira la relation $\Delta(h+ec) = w_{\text{utile}} + q$, où w_{utile} (également noté w_i) est le travail massique indiqué.

Le travail massique de transvasement de valeur égale à: $w_{\text{trans } v} = \int v \cdot dP$ est exclu.

TRAVAUX PRATIQUES DE PHYSIQUE

Les étudiants des classes de TSI doivent pouvoir atteindre un bon niveau de connaissances et de savoir-faire dans le domaine expérimental, compte tenu du temps imparti aux travaux pratiques. Pour que ce but soit atteint, 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, de retour en arrière, d'échanges avec le professeur.

C'est pourquoi ce dernier choisira les sujets d'études 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 sera amené à réfléchir, à comprendre le phénomène par une série d'hypothèses, de vérifications expérimentales qui exigeront de lui initiative, savoir-faire et rigueur. La séance de travaux pratiques donnera lieu à une synthèse écrite comportant, sous forme succincte, l'indication et l'exploitation des résultats. À cet égard, on attachera de l'importance à leur présentation graphique.

Une trop grande exigence sur le savoir-faire théorique et expérimental ne pourrait que conduire à une inflation qui irait à l'encontre du but recherché. La liste figurant in fine définit les limites du programme. A dessein, elle ne fixe pas une liste de travaux pratiques à exécuter, mais elle indique les méthodes expérimentales ainsi que les appareils, accompagnés de leurs spécifications techniques, qui seront utilisés au cours des séances de travaux pratiques.

Les étudiants ne sont pas censés connaître des méthodes et des appareils autres que ceux figurant dans la liste donnée in fine. Pour ces derniers, la connaissance du principe ou du fonctionnement interne n'est pas exigible.

L'utilisation d'un ordinateur, soit pour l'acquisition et le traitement de données expérimentales, soit pour la comparaison des résultats de mesures aux données théoriques, évitera des calculs longs et répétitifs, et favorisera le tracé de courbes. On pourra ainsi multiplier les expériences en faisant varier les conditions d'expérimentation et en montrant, en particulier, l'influence des paramètres pertinents sur le phénomène étudié, et renforcer ainsi le lien entre la théorie et les travaux expérimentaux, par référence à des modèles de divers niveaux d'élaboration. Le recours à l'ordinateur permettra, en liaison avec la démarche expérimentale, de dégager l'intérêt et les limites d'une modélisation.

Par l'importance donnée à la formation expérimentale, on souhaite, en particulier, conforter dans l'esprit des étudiants la relation entre le cours et les travaux pratiques, et leur donner le goût des sciences expérimentales, même s'ils n'en découvrent, à ce stade, que quelques-unes des méthodes.

1- Thèmes et méthodes

Aux thèmes de la classe de première année, qui pourront être repris en vue de leur approfondissement, s'ajoutent les thèmes suivants:

- Composition en fréquence d'un signal périodique.
- Filtrés du premier et du deuxième ordre ; aspects fréquentiel et temporel.
- Opérateurs non linéaires en électronique: comparateurs.
- Oscillateurs électroniques quasisinusoidaux ou à relaxation.
- Mesure de champs magnétiques par effet Hall.
- Changement de phase.
- Expériences simples d'interférences non localisées à deux ondes.
- Spectroscopes à prisme et à réseau: mesures de longueurs d'onde.

2- Matériel et logiciels

À la liste établie pour la classe de première année, il convient d'ajouter la liste suivante:

- Analyseur numérique de spectres de Fourier en électrocinétique.
- Sonde de Hall.
- Laser: précautions d'emploi.
- Interféromètre de Michelson.
- Réseaux par transmission et par réflexion.
- Logiciel simple d'étude de filtres du premier et du second ordre.