

**PHYSIQUE**

**PSI/PSI\***



Sous la direction de **Stéphane Cardini**  
Élisabeth Ehrhard | Annie Guérillot | Thierry Guillot  
Bruno Morvan | Marie-Noëlle Sanz

**PHYSIQUE**

**PSI/PSI\***

**TOUT-EN-UN**

6<sup>e</sup> édition

**DUNOD**

*l'intelligence*

Couverture : création Hokus Pokus, adaptation Studio Dunod

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2022

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-084119-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

## Les auteurs



**Stéphane Cardini**

Ancien élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), agrégé de sciences physiques, Professeur de Chaire supérieure. Depuis plus de 20 ans, il enseigne en seconde année de CPGE à Saint-Cyr et participe à des jurys de concours, tant à l'écrit qu'à l'oral. Il a dirigé les Tout-en-un de MPSI-MP2I, PCSI et PTSI. Il est président honoraire de la Société des agrégés de l'Université.



**Élisabeth Ehrhard**

Ancienne élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), agrégée de sciences physiques, Professeur de Chaire supérieure. Elle enseigne au lycée Saint-Louis à Paris, en classe de PSI. Elle a participé aux jurys de plusieurs concours, aussi bien à l'écrit qu'à l'oral.



**Annie Guérillot**

Ancienne élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), agrégée de sciences physiques, Professeur de Chaire supérieure. Elle enseigne en seconde année de CPGE depuis 30 ans et depuis 10 ans en PSI\* au lycée Janson de Sailly. Elle participe à des jurys de concours, tant à l'écrit qu'à l'oral.



**Thierry Guillot**

Ancien élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), Professeur de Chaire supérieure de physique. Après un doctorat en électromagnétisme à Paris VI, puis deux années de recherche à l'ONERA, il a choisi d'enseigner en CPGE au lycée Victor Hugo de Besançon, en PCSI puis PSI. Il a été membre de jury du CAPES, de l'agrégation, des TIPE. En tant que président académique de l'Union des professeurs de physique et chimie (UdPPC), il a eu la responsabilité de l'organisation du congrès du centenaire de l'association, qui s'est tenu à Besançon.



**Bruno Morvan**

Ancien élève de l'ENS (Paris-Saclay, ex-Cachan), agrégé de sciences physiques, option physique appliquée, Professeur de Chaire supérieure. Il est professeur de physique et d'informatique au lycée Henri Wallon de Valenciennes depuis 1990, actuellement en classe de PSI. Membre du concours Centrale-Supelec depuis 1996, il intervient en informatique et en physique, tant à l'écrit qu'à l'oral.

# Préface

« Quand les mouettes ont pied, il est temps de virer ! »

En mer, l'officier de marine s'appuie sur tout ce qui peut lui être utile pour naviguer en eaux saines. Au premier chef, il se fie à l'observation de ce qui l'entoure : l'état de la mer, la force et la direction du vent, la nébulosité du ciel, la hauteur des astres, la faune et la flore marines – mouettes comprises ! Si l'observation est le fondement des plus anciens travaux d'ordre scientifique, elle ne suffit évidemment pas à la conduite d'une opération navale. En effet, la mer, milieu naturellement hostile, permet la libre circulation de nombreuses menaces d'origine humaine qui imposent aux marins d'employer des moyens techniques nécessaires à la survie de l'équipage et à l'accomplissement de la mission. Pour les utiliser efficacement, il faut en comprendre le fonctionnement et faire preuve d'agilité intellectuelle.

Le pilote de Rafale Marine, après avoir décollé du porte-avions par nuit noire, use de sa capacité de division d'attention pour, en même temps, conduire son avion de chasse en sécurité à plus de 1000 km/h au-dessus d'un territoire hostile, gérer sa consommation de carburant avant le ravitaillement en vol, commander son équipier qui vole en patrouille serrée à quelques mètres de son aile, et préparer le largage de sa bombe à guidée laser selon une balistique ajustée qui permettra à son camarade commando marine, pris à partie au sol, de se dégager du feu de l'ennemi.

Ce membre des forces spéciales est arrivé sur le lieu de la libération d'otage après avoir construit la cinématique de son insertion sous voile nocturne, en prenant en compte la finesse de son parachute, les calculs statistiques des vents qu'il va traverser et la vitesse de l'avion qui le largue à 8000 m de hauteur, sous oxygène. Pendant le vol, avant de sauter, il a subi une dénitrogénéation qui lui permet d'éviter les pathologies résultant de la toxicité des gaz de l'atmosphère aux pressions partielles que ses tissus vont subir.

Le sous-marinier, qui navigue à l'immersion périscopique pour apporter du renseignement côtier à l'ensemble des forces impliquées dans l'opération, met à profit ses connaissances en matière de propagation des ondes acoustiques. Elles lui assurent la discrétion dont il a besoin pour échapper à la frégate anti-sous-marine lancée à sa poursuite : en faisant le meilleur emploi de la bathycélérimétrie qu'il a mesurée dans la couche d'eau, il est indétectable. Il se tient prêt à tirer, s'il le faut, un missile de croisière qui sortira des tubes lance-torpilles avant d'aller frapper un objectif au sol à plusieurs centaines de kilomètres, après avoir suivi une trajectoire de suivi de terrain, programmée peu de temps avant le tir.

Enfin, l'officier de surface, embarqué sur la frégate de défense aérienne qui protège le porte-avions des menaces missiles, a les yeux rivés sur les écrans de ses radars actifs, prêt à lancer des leurres électromagnétiques et infrarouges et tirer une arme anti-aérienne qui vole à plus de Mach 3 pour détruire un missile ennemi. Il n'aura que quelques secondes pour le détecter et réagir avant qu'il ne soit trop tard.

La quasi-totalité des officiers de Marine de carrière sont ingénieurs de l'École navale. Ils l'ont intégrée après avoir passé de nombreuses heures sur les bancs de leur école préparatoire civile ou militaire, à noircir des feuilles de brouillon couvertes d'intégrales triples échevelées, de surprenantes matrices nilpotentes, ou de torseurs cinématiques tordus, sans trop comprendre leur utilité sur le moment. Pourtant, comme on l'a compris, le marin fait appel quotidiennement aux connaissances scientifiques qu'il a acquises au cours de la prépa et de l'École navale. Et cela sera toujours vrai dans un monde où le progrès technique est de plus en plus rapide.

Il en a besoin en opération pour mettre en œuvre les équipements de pointe qui sont mis à sa disposition, mais aussi plus tard en coopération avec les industriels de défense et les ingénieurs de l'armement, lorsqu'il participe à la définition, au suivi de la conception et aux essais des navires, avions et armements qui remplaceront ceux qu'il a lui-même employés.

Mais ce n'est pas tout. D'une façon plus générale, le développement de la capacité de raisonnement logique assuré par les études scientifiques des écoles préparatoires est le fondement sur lequel les cadres militaires, comme civils, s'appuient tout au long de leur carrière, pour apporter les réponses aux multiples problèmes qu'ils rencontrent, dans les domaines aussi bien techniques qu'humains, d'organisation ou de stratégie.

Au cours d'une simple navigation ou d'une opération de combat, il est toujours des situations complexes qui semblent inextricables. Le commandant militaire doit savoir apporter la réponse à un problème qu'aucun autre ne voudrait avoir à résoudre, puisqu'il engage la vie des hommes et des femmes placés sous sa responsabilité, voire le sort d'une nation tout entière, lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre les instruments de la dissuasion nucléaire française.

Cet ouvrage, tant plébiscité par les classes de seconde année de CPGE depuis plusieurs années, fournit une remarquable matière aux étudiants qui se préparent à affronter des coups de tabac, en mer ou en entreprise. En particulier, son chapitre « résolution de problèmes » offre des cas concrets suscitant l'imagination, la curiosité, la capacité de modéliser et de faire appel à ses ressources propres sans qu'aucune indication n'oriente le candidat. Dans le brouillard de la guerre, c'est précisément la responsabilité du chef : trouver la voie, avec détermination et inventivité.

Bon courage à vous !

Amiral Pierre VANDIER  
Chef d'état-major de la Marine

# Préface des 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> éditions

C'est un plaisir et un grand honneur pour moi que de préfacier cet ouvrage remarquable de clarté, présentant de façon simple, progressive et rigoureuse, les savoirs fondamentaux qui accompagneront les futurs ingénieurs tout au long de leur carrière professionnelle.

Dans un rapport de 2014 (« Examens de l'OCDE des politiques d'innovation : France »), l'OCDE souligne que l'enjeu de dynamiser l'innovation en France est plus que jamais important ; il note aussi parmi les forces du système français sa capacité à former « des ingénieurs de grande qualité, polyvalents et innovants pour l'industrie ». Or c'est bien par le biais d'une démarche pédagogique telle que celle de ce livre que se pérennise cette force !

Les savoirs et les technologies évoluent aujourd'hui à un rythme particulièrement soutenu, ce que j'illustrerai par le fait qu'environ 1,5 million d'articles scientifiques sont publiés chaque année dans le monde.

Ces savoirs et technologies sont de plus en plus complexes :

- un processeur compte de l'ordre de 2 milliards de transistors ;
- un calculateur haute performance, nécessaire pour la conception des avions et des voitures, pour la génomique, pour la simulation des évolutions du climat... compte plusieurs centaines de milliers de ces processeurs.

Paradoxalement, la technologie est de moins en moins « apparente », les interfaces d'utilisation se doivent en effet d'être parfaitement intuitives, ce qui d'ailleurs augmente la complexité des solutions techniques à mettre en place. Tout ceci concourt à renforcer l'importance pour l'ingénieur de maîtriser les bases de culture générale scientifiques et techniques, condition *sine qua non* du maintien dans la durée de sa pertinence technique et de sa capacité d'innovation.

Il s'agira aussi pour l'ingénieur de rester en permanence curieux et ouvert aux évolutions. Ce livre l'y prépare par les exemples donnés, à la fois simples et judicieux, et les mises en perspective, qui, dans une démarche indispensable de mon point de vue, permettent à l'étudiant de comprendre la portée des concepts mis en équations.

J'y ajouterai un conseil pour les étudiants, futurs ingénieurs, qui liront ce livre : « prévoyez dès maintenant de préparer une thèse de doctorat : d'une part le doctorat est le standard mondial pour les acteurs innovants de la technologie, et d'autre part la démarche de la recherche, en construisant de nouveaux savoirs, complète tout naturellement les savoirs consolidés que vous pourrez acquérir durant votre future formation d'ingénieur ».

Jean-Philippe BOURGOIN

Agrégé de Sciences physiques

Ancien Directeur de la stratégie et des programmes du CEA

Conseiller auprès de la Ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation



# Avant-propos

La 6<sup>e</sup> nouvelle édition du *Tout-en-un* reprend les fondamentaux qui ont assuré, édition après édition, le succès de l'ouvrage, tout en évoluant pour rester le plus proche des attentes des jurys de concours.

Les préparateurs y trouveront :

- un **COURS COMPLET** qui respecte les programmes officiels ;
- une **MÉTHODOLOGIE SYSTÉMATIQUE**, qui souligne les méthodes classiques, indispensables pour comprendre comment appréhender un problème de physique, puis le résoudre au mieux ;
- le **PROGRAMME OFFICIEL** et le **SOMMAIRE DES EXERCICES** ;
- de **TRÈS NOMBREUX EXERCICES DE NIVEAUX VARIÉS**, en fin de chapitres, certains issus de problèmes de concours, souvent extrêmement récents, et de sujets d'oraux très actuels. La longue expérience au sein de jurys de concours des auteurs a permis de confronter les différentes pratiques et de sélectionner les exercices et problèmes les plus formateurs, adaptés à tous les étudiants, dont le niveau de difficulté est signalé :
  - ★ exercices de cours, dont la maîtrise est indispensable, repérés par un triangle noir ▶ dans le sommaire (les autres exercices le sont par un triangle blanc ▷). Ils sont proposés afin d'aider les étudiants à apprendre le cours ;
  - ★★ exercices simples et formateurs, de niveau E3A-CCINP ;
  - ★★★ exercices de niveau ambitieux, pour préparer les concours de Centrale-Supélec, des Mines, de l'École navale ;
  - ★★★★ exercices de niveau très élevé, pour se préparer aux concours les plus exigeants, X-ENS par exemple.

Mais cette répartition par niveau n'est pas absolue ! Certains thèmes peuvent sembler plus abordables que d'autres, plus compréhensibles ; la personne qui cherchera les exercices pourra s'étonner que certains ★★ pourraient lui sembler plus ardues que des ★★★ ; c'est normal, nous ne sommes pas égaux face à un même sujet.

De plus, préparer un concours particulier n'empêche en rien de s'exercer à un niveau plus élevé, ou alors plus facile pour s'assurer de la bonne maîtrise des fondamentaux.

Les auteurs proposent un **TRÈS (TROP ?) GRAND NOMBRE D'EXERCICES** afin que les étudiants les plus rapides puissent trouver à s'exercer efficacement. Néanmoins, un étudiant de niveau normal n'aura **PAS LE TEMPS PENDANT SON ANNÉE DE TOUS LES TRAITER**, ce qui n'est évidemment pas rédhibitoire avec une belle intégration.

L'ouvrage souhaite rester au plus près des questions actuelles des concours. Le lecteur trouvera ainsi en dernière partie des **RÉSOLUTIONS DE PROBLÈMES**, afin de travailler ce type de question non guidée. Un large choix en est proposé.

Pour finir, puisse ce livre être un compagnon qui aidera chaque lecteur à s'épanouir dans son travail et à apprécier cette introduction au noble travail d'ingénieur !



## « Mode d'emploi » d'un chapitre

Une introduction présente le sujet traité et le plan suivi.

# Diffusion thermique

# 10

Les phénomènes de conduction thermique décrivent les échanges d'énergie qu'on appelle, dans le langage commun, la chaleur. On en propose dans ce chapitre une mise en équation, pour aboutir à des applications concrètes comme la thermique des bâtiments.

Les définitions importantes sont placées dans un encadré gris, les remarques et les exemples comportent un filet vertical sur la gauche.

- $\delta g$  représente une **quantité infinitésimale** ;
- $df$  représente une **variation infinitésimale**.

### Remarque

Ce bilan d'énergie massique est la forme du premier principe de la thermodynamique la plus adaptée à l'étude des machines thermiques en fonctionnement stationnaire ; c'est la raison pour laquelle on le qualifie de « **premier principe industriel** ».

### Exemple

L'espace étant repéré par le système de coordonnées cartésiennes  $(O, \vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$ , on considère par exemple de champ  $\vec{E}(M)$  défini par  $\vec{E}(x) = E_0 \vec{u}_x$ , en utilisant l'équation de Maxwell-Gauss :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{dE_0}{dx} = 0 = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \Rightarrow \rho = 0.$$

À la suite du cours, dans chaque chapitre, sont placées différentes questions de méthodologie entièrement traitées.

### MÉTHODOLOGIE

Comment reconnaître une carte de champ électrostatique  $\vec{E}$  ?

▷ Les lignes de champ ne sont pas fermées, elles sortent des charges positives et rentrent dans les charges négatives.

**Le programme officiel pour chaque thématique et le sommaire des exercices sont proposés à la fin de chaque cours.**

<b>PROGRAMME OFFICIEL ET SOMMAIRE DES EXERCICES</b>	
NOTIONS ET CONTENUS	CAPACITÉS EXIGIBLES
Équations de Maxwell-Gauss et de Maxwell-Faraday. ► <b>22.C1</b> <b>22.C3</b> <b>22.C8</b> <b>22.C9</b> ▷ <b>22.1</b> <b>22.3</b> <b>22.4</b> <b>22.5</b>	Citer les équations de Maxwell-Gauss et Maxwell-Faraday en régime variable et en régime stationnaire.
Équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Thomson. ► <b>22.C2</b> <b>22.C4</b> <b>22.C10</b> ▷ <b>22.1</b> <b>22.2</b>	Énoncer les équations de Maxwell-Ampère et Maxwell-Thomson en régime variable et en régime stationnaire

**Des exercices dont la difficulté est traduite par des étoiles allant de 1 à 4 sont proposés en fin de chapitre. On distinguera :**

- les exercices de cours, qui reprennent les capacités exigibles du programme, classés d'une étoile, repérés par un triangle noir dans le sommaire et dont le numéro est précédé d'un C ;

EXERCICES ★ (LE COURS)
<b>19.C1</b> Équation locale de conservation de la charge La citer puis la démontrer.

- d'autres exercices allant de 2 à 4 étoiles, repérés par un triangle blanc dans le sommaire.

<b>10.6</b> Équation de la diffusion thermique
On considère un cylindre de longueur $L$ , latéralement calorifugé. L'extrémité en $x = 0$ est portée à la température $T_0$ , tandis que celle en $x = L$ est portée à $T_1 > T_0$ . Établir l'équation de la diffusion thermique dans le cylindre, sans se placer en régime indépendant du temps.

**Tous les exercices sont entièrement corrigés.**

CORRIGÉS
<b>23.C1</b> ARQS ssi $a \ll \lambda = \frac{c}{f} = 40$ cm, soit $a < 4$ cm (circuit intégré).
<b>23.C2</b> ARQS si $L \ll c\tau$ , soit $f \ll \frac{c}{L} = 3$ MHz, sous $f \ll 30$ kHz.
<b>23.C3</b> L'équation de Maxwell-Ampère se simplifie en $\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$ , cf 2.1, p. 633.

# Table des matières

<b>Présentation des auteurs</b>	<b>5</b>
<b>Préface</b>	<b>7</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>11</b>
<b>Mode d'emploi</b>	<b>13</b>
<b>I Électronique</b>	<b>27</b>
<b>1 Stabilité des systèmes linéaires</b>	<b>29</b>
1 Systèmes linéaires, continus et invariants . . . . .	29
2 Description d'un système électronique . . . . .	30
3 Stabilité . . . . .	33
Methodologie . . . . .	37
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	37
Exercices . . . . .	38
Corrigés . . . . .	39
<b>2 Amplificateur linéaire intégré</b>	<b>41</b>
1 Amplificateur linéaire intégré . . . . .	41
2 Étude d'un montage à rétroaction négative : l'amplificateur non inverseur . . .	45
3 Étude d'un montage à rétroaction positive : le comparateur à hystérésis . . . .	50
4 ALI idéal : limite du gain infini (régime linéaire) . . . . .	51
Methodologie . . . . .	59
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	63
Exercices . . . . .	64

TABLE DES MATIÈRES

Corrigés . . . . .	73
<b>3 Oscillateurs quasi sinusoïdaux</b>	<b>89</b>
1 Présentation d'un oscillateur quasi sinusoïdal . . . . .	89
2 Conditions théoriques d'auto-oscillation . . . . .	91
3 Condition de démarrage des oscillations . . . . .	92
Méthodologie . . . . .	97
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	98
Exercices . . . . .	99
Corrigés . . . . .	103
<b>4 Oscillateurs à relaxation</b>	<b>111</b>
1 Amplificateur opérationnel de gain infini en régime saturé . . . . .	111
2 Comparateurs à hystérésis . . . . .	113
3 Générateur de signaux . . . . .	116
Méthodologie . . . . .	119
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	121
Exercices . . . . .	122
Corrigés . . . . .	126
<b>5 Électronique numérique</b>	<b>135</b>
1 Échantillonnage . . . . .	135
2 Spectre d'un signal échantillonné . . . . .	136
3 Analyse spectrale expérimentale . . . . .	139
4 Filtrage numérique . . . . .	141
Méthodologie . . . . .	145
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	146
Exercices . . . . .	147
Corrigés . . . . .	151
<b>6 Modulation – Démodulation</b>	<b>153</b>
1 Modulation . . . . .	153
2 Modulation d'amplitude . . . . .	154
3 Démodulation . . . . .	157
Méthodologie . . . . .	159
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	160
Exercices . . . . .	161
Corrigés . . . . .	165

<b>II</b>	<b>Thermodynamique</b>	<b>169</b>
<b>7</b>	<b>Écriture infinitésimale des principes de la thermodynamique</b>	<b>171</b>
1	Calcul infinitésimal : notation $d$ et $\delta$ . . . . .	171
2	Intégration . . . . .	173
3	Écriture des principes de la thermodynamique sous forme infinitésimale . . .	173
	Méthodologie . . . . .	176
	Programme officiel . . . . .	177
<b>8</b>	<b>Bilans d'énergie et d'entropie en présence d'écoulement</b>	<b>179</b>
1	Systèmes fermés en écoulement . . . . .	179
2	Bilans thermodynamiques d'énergie et d'entropie . . . . .	180
3	Diagramme des frigoristes . . . . .	184
	Méthodologie . . . . .	188
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	190
	Exercices . . . . .	191
	Corrigés . . . . .	199
<b>9</b>	<b>Diffusion de particules</b>	<b>209</b>
1	Mouvement de particules . . . . .	209
2	Vecteur densité de courant de particules de diffusion . . . . .	210
3	Loi de Fick . . . . .	211
4	Équations de continuité et de diffusion . . . . .	213
5	Remarques générales . . . . .	220
6	Vecteur densité de courant de particules de convection . . . . .	221
7	Du microscopique au mésoscopique . . . . .	222
	Méthodologie . . . . .	224
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	225
	Exercices . . . . .	226
	Corrigés . . . . .	232
<b>10</b>	<b>Diffusion thermique</b>	<b>239</b>
1	Mise en évidence expérimentale . . . . .	239
2	Flux d'énergie . . . . .	240
3	Équilibre thermodynamique local . . . . .	241
4	Équation de la diffusion thermique . . . . .	242
5	Conditions aux limites . . . . .	249
6	Régime stationnaire (sans terme source) . . . . .	252
	Méthodologie . . . . .	260

TABLE DES MATIÈRES

Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	261
Exercices . . . . .	263
Corrigés . . . . .	277
<b>III Mécanique des fluides</b>	<b>297</b>
<b>11 Statique des fluides</b>	<b>299</b>
1 Introduction . . . . .	299
2 Forces dans un fluide au repos . . . . .	301
3 Relation fondamentale de la statique des fluides . . . . .	305
4 Évolution de la pression au sein d'un fluide incompressible dans un champ de pesanteur uniforme . . . . .	306
5 Évolution de la pression au sein d'un gaz parfait isotherme dans un champ de pesanteur uniforme . . . . .	307
6 Poussée d'Archimède . . . . .	308
Méthodologie . . . . .	310
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	312
Exercices . . . . .	313
Corrigés . . . . .	317
<b>12 Débits et lois de conservation</b>	<b>325</b>
1 Vitesse microscopique et vitesse mésoscopique . . . . .	325
2 Descriptions lagrangienne (complément) et eulérienne . . . . .	325
3 Dérivée particulaire du vecteur vitesse . . . . .	328
4 Vecteur densité de courant de masse . . . . .	331
5 Débit massique . . . . .	332
6 Conservation de la masse . . . . .	333
7 Débit volumique . . . . .	335
8 Écoulements particuliers . . . . .	336
Méthodologie . . . . .	341
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	342
Exercices . . . . .	343
Corrigés . . . . .	345
<b>13 Écoulements parfaits : théorème de Bernoulli</b>	<b>347</b>
1 Modèle de l'écoulement parfait . . . . .	347
2 Lien entre énergie interne massique et enthalpie massique . . . . .	347

3	Relation de Bernoulli pour les écoulements parfaits stationnaires homogènes et incompressibles . . . . .	347
4	Applications de la relation de Bernoulli . . . . .	349
5	Bilan macroscopique d'énergie mécanique en écoulement stationnaire . . . . .	354
	Méthodologie . . . . .	356
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	358
	Exercices . . . . .	359
	Corrigés . . . . .	364
<b>14</b>	<b>Écoulements parfaits : bilans</b>	<b>371</b>
1	Bilans de quantité de mouvement . . . . .	371
2	Bilans de moment cinétique . . . . .	375
	Méthodologie . . . . .	377
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	378
	Exercices . . . . .	379
	Corrigés . . . . .	385
<b>15</b>	<b>Actions de contact sur un fluide en écoulement</b>	<b>399</b>
1	Forces de surface normales et tangentielles . . . . .	399
2	Force normale de pression . . . . .	399
3	Force tangentielle de viscosité . . . . .	400
4	Profils de vitesses d'écoulements parallèles . . . . .	402
	Méthodologie . . . . .	405
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	405
	Exercices . . . . .	406
	Corrigés . . . . .	409
<b>16</b>	<b>Écoulements homogènes et incompressibles dans une conduite cylindrique</b>	<b>415</b>
1	Vitesse débitante . . . . .	415
2	Écoulements laminaires et turbulents . . . . .	416
3	Nombre de Reynolds . . . . .	420
4	Chute de pression dans une conduite horizontale à faible nombre de Reynolds	423
5	Chute de pression dans une conduite horizontale pour un nombre de Reynolds quelconque . . . . .	426
	Méthodologie . . . . .	431
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	433
	Exercices . . . . .	434
	Corrigés . . . . .	442

TABLE DES MATIÈRES

<b>17</b>	<b>Écoulement externe homogène et incompressible autour d'un obstacle</b>	<b>451</b>
1	Couche limite en écoulement externe . . . . .	451
2	Force de traînée subie par une sphère . . . . .	453
3	Force de traînée subie par des objets de formes diverses . . . . .	457
4	Traînée et portance d'une aile d'avion à haut nombre de Reynolds . . . . .	458
	Méthodologie . . . . .	466
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	467
	Exercices . . . . .	468
	Corrigés . . . . .	479
<b>IV</b>	<b>Électromagnétisme</b>	<b>493</b>
<b>18</b>	<b>Électromagnétisme en régime statique : le champ électrique</b>	<b>495</b>
1	Charges électriques . . . . .	495
2	Force électrique, définition du champ électrique . . . . .	499
3	Théorème de Gauss . . . . .	502
4	Équations locales de l'électrostatique . . . . .	504
5	Symétries du champ électrique . . . . .	509
6	Invariances de la distribution de charges par des transformations géométriques	513
7	Propriétés topographiques du champ électrique et du potentiel . . . . .	514
8	Calculs de champs électriques ou de gravitation créés par des distributions de symétrie élevée . . . . .	518
9	Exploitation du théorème de superposition . . . . .	523
	Méthodologie . . . . .	524
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	526
	Exercices . . . . .	527
	Corrigés . . . . .	533
<b>19</b>	<b>Courant électrique – Conducteur métallique</b>	<b>549</b>
1	Courant électrique . . . . .	549
2	Équation de conservation de la charge . . . . .	550
3	Courant dans un métal : modèle de Drüde . . . . .	553
	Méthodologie . . . . .	558
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	559
	Exercices . . . . .	560
	Corrigés . . . . .	562
<b>20</b>	<b>Condensateurs</b>	<b>565</b>

1	Propriétés d'un conducteur en équilibre statique . . . . .	565
2	Phénomène d'influence électrique . . . . .	565
3	Champ électrique créé dans un condensateur . . . . .	566
4	Capacité du condensateur plan, énergie électrique . . . . .	568
	Méthodologie . . . . .	569
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	570
	Exercices . . . . .	571
	Corrigés . . . . .	573
<b>21</b>	<b>Champ magnétique en régime stationnaire</b>	<b>575</b>
1	Définition du champ magnétique . . . . .	575
2	Distribution de courants . . . . .	576
3	Le champ magnétique est à flux conservatif . . . . .	577
4	Théorème d'Ampère . . . . .	578
5	Équations de Maxwell de la magnétostatique . . . . .	579
6	Propriétés de symétrie du champ magnétostatique . . . . .	580
7	Calculs de champs magnétostatiques à l'aide du théorème d'Ampère . . . . .	580
8	Force de Laplace exercée sur des conducteurs parcourus par des courants . . . . .	590
	Méthodologie . . . . .	591
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	593
	Exercices . . . . .	594
	Corrigés . . . . .	599
<b>22</b>	<b>Équations de Maxwell</b>	<b>609</b>
1	Les équations de Maxwell en régime variable . . . . .	609
2	Propriétés de symétrie . . . . .	613
3	Définition et continuité des champs . . . . .	614
4	Énergie cédée aux porteurs de charge . . . . .	616
5	Densité d'énergie électromagnétique et énergie transportée . . . . .	617
	Méthodologie . . . . .	620
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	621
	Exercices . . . . .	622
	Corrigés . . . . .	625
<b>23</b>	<b>Approximation des régimes quasi stationnaires</b>	<b>631</b>
1	Échelles spatiale et temporelle . . . . .	631
2	Hypothèses de l'ARQS magnétique . . . . .	633

TABLE DES MATIÈRES

3	Induction électromagnétique dans un conducteur massif . . . . .	635
4	Induction électromagnétique dans un circuit électrique filiforme . . . . .	638
5	Énergie magnétique . . . . .	639
	Méthodologie . . . . .	641
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	642
	Exercices . . . . .	643
	Corrigés . . . . .	647
<b>V</b>	<b>Conversion de puissance</b>	<b>657</b>
<b>24</b>	<b>Puissance électrique en régime sinusoïdal</b>	<b>659</b>
1	Définitions générales . . . . .	659
2	Puissance reçue par un dipôle . . . . .	660
3	Régime sinusoïdal . . . . .	662
	Méthodologie . . . . .	666
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	669
	Exercices . . . . .	670
	Corrigés . . . . .	673
<b>25</b>	<b>Milieux ferromagnétiques et transformateur</b>	<b>681</b>
1	Moment magnétique d'un aimant permanent . . . . .	681
2	Équations de Maxwell dans un milieu magnétique, dans l'ARQS . . . . .	685
3	Milieu ferromagnétique . . . . .	688
4	Circuit magnétique . . . . .	692
5	Transformateur . . . . .	699
	Méthodologie . . . . .	706
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	707
	Exercices . . . . .	710
	Corrigés . . . . .	720
<b>26</b>	<b>Introduction à la conversion électro-magnéto-mécanique</b>	<b>733</b>
1	Description d'un contacteur électromagnétique . . . . .	733
2	Force électromagnétique . . . . .	734
3	Application au contacteur . . . . .	734
4	Complément : établissement de la formule de la force . . . . .	736
	Méthodologie . . . . .	737
	Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	738

Exercices . . . . .	739
Corrigés . . . . .	744
<b>27 Machine synchrone</b>	<b>751</b>
1 Architecture . . . . .	751
2 Champs glissants . . . . .	753
3 Couple électromagnétique . . . . .	759
4 Schéma électrique équivalent . . . . .	763
5 Utilisations . . . . .	775
Méthodologie . . . . .	776
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	778
Exercices . . . . .	780
Corrigés . . . . .	792
<b>28 Machine à courant continu</b>	<b>807</b>
1 Organisation de la machine à courant continu . . . . .	807
2 Étude du circuit statorique . . . . .	808
3 Étude du circuit rotorique . . . . .	809
4 Couple électromagnétique . . . . .	812
5 Force contre-électromotrice . . . . .	813
6 Schéma électrique de la machine . . . . .	816
7 Complément : rendement de la machine à courant continu . . . . .	817
8 Moteur à courant continu en régime transitoire . . . . .	820
Méthodologie . . . . .	823
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	824
Exercices . . . . .	825
Corrigés . . . . .	830
<b>29 Conversion électronique de puissance</b>	<b>837</b>
1 Les différentes présentations de l'énergie électrique . . . . .	837
2 Généralités sur les convertisseurs électroniques statiques de puissance . . . . .	839
3 Source de tension ou de courant . . . . .	842
4 Règles d'association des sources et structure du convertisseur à deux interrupteurs . . . . .	845
5 Les interrupteurs électroniques . . . . .	846
6 Hacheur série ou hacheur dévolteur . . . . .	849
7 Onduleur . . . . .	856
Méthodologie . . . . .	861

TABLE DES MATIÈRES

Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	863
Exercices . . . . .	865
Corrigés . . . . .	874
<b>VI Physique des ondes</b>	<b>889</b>
<b>30 Équation de d'Alembert unidimensionnelle</b>	<b>891</b>
1 La corde vibrante . . . . .	891
2 Solutions progressives de l'équation de d'Alembert . . . . .	893
3 Solutions stationnaires de l'équation de d'Alembert . . . . .	898
4 Équivalence entre ondes progressives harmoniques et ondes stationnaires harmoniques . . . . .	905
Méthodologie . . . . .	906
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	907
Exercices . . . . .	908
Corrigés . . . . .	915
<b>31 Ondes dans un câble coaxial sans perte</b>	<b>923</b>
1 Présentation . . . . .	923
2 Mise en équation . . . . .	923
3 Impédance caractéristique . . . . .	925
4 Réflexion en amplitude sur une impédance terminale . . . . .	926
Méthodologie . . . . .	931
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	931
Exercices . . . . .	932
Corrigés . . . . .	937
<b>32 Ondes sonores dans les fluides</b>	<b>949</b>
1 Le son . . . . .	949
2 Approximation acoustique . . . . .	950
3 Équation de propagation . . . . .	952
4 Étude énergétique . . . . .	954
5 Ondes planes progressives harmoniques (OPPH) . . . . .	957
6 Ondes sphériques progressives harmoniques . . . . .	961
7 Réflexion et transmission sur une interface plane . . . . .	963
8 Mesure de vitesse par effet Doppler . . . . .	966
Méthodologie . . . . .	969
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	971

Exercices . . . . .	973
Corrigés . . . . .	982
<b>33 Ondes électromagnétiques dans le vide</b>	<b>995</b>
1 Domaines de fréquence et de longueurs d'ondes des ondes électromagnétiques	995
2 Équations de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide . . . . .	995
3 Onde électromagnétique progressive harmonique dans le vide . . . . .	997
4 Structure des ondes électromagnétiques planes progressives et harmoniques dans le vide . . . . .	998
5 Réflexion d'une OEPPH sur un plan conducteur parfait en incidence normale	1004
Méthodologie . . . . .	1011
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	1013
Exercices . . . . .	1014
Corrigés . . . . .	1021
<b>34 Onde thermique. Dispersion absorption</b>	<b>1035</b>
1 Exemple introductif : onde thermique en géométrie unidirectionnelle . . . . .	1035
2 Dispersion et absorption dans les milieux régis par une équation de propagation linéaire . . . . .	1039
3 Propagation d'un paquet d'onde dans un milieu dispersif non absorbant . . . . .	1042
Méthodologie . . . . .	1048
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	1049
Exercices . . . . .	1050
Corrigés . . . . .	1057
<b>35 Ondes électromagnétiques dans les milieux conducteurs</b>	<b>1067</b>
1 Propagation d'une onde plane harmonique dans un conducteur ohmique . . . . .	1067
2 Onde électromagnétique dans un plasma . . . . .	1073
Méthodologie . . . . .	1079
Programme officiel et sommaire des exercices . . . . .	1081
Exercices . . . . .	1082
Corrigés . . . . .	1090
<b>VII Résolutions de problèmes</b>	<b>1099</b>
<b>36 Résolutions de problèmes</b>	<b>1101</b>
Données numériques . . . . .	1102
Énoncés . . . . .	1106

TABLE DES MATIÈRES

Indications . . . . .	1113
Corrigés . . . . .	1115
<b>Index</b>	<b>1145</b>

**Première partie**

**Électronique**



# Stabilité des systèmes linéaires

## 1

Un système est décrit de manière équivalente par son équation différentielle ou sa fonction de transfert. Ce point, déjà abordé en première année, est ici affirmé. On cherche ensuite un critère de stabilité.

## 1 Systèmes linéaires, continus et invariants

### 1.1 Notion générale de système

Un système est un dispositif qui traite un ou plusieurs signaux d'entrée afin de réaliser la fonction voulue par son concepteur ; le système produit ainsi à son tour un ou plusieurs signaux de sortie. Par exemple, un téléphone portable est une suite de systèmes qui accomplissent successivement la transformation d'un signal sonore, la voix, en un signal électrique ; la conversion du signal électrique en un autre signal électrique constitué de niveaux logiques ; sa modulation puis finalement son émission, c'est-à-dire la transformation du signal électrique codé en un signal électromagnétique.

Un système associe finalement à un signal d'entrée  $e$  un signal de sortie  $s$ .

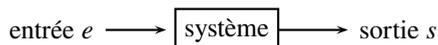


Figure 1.1 – Représentation symbolique d'un système monoentrée et monosortie.

La notion de système est très générale. Ce peut être une vanne, dont l'entrée est l'angle d'un robinet et la sortie un débit ; un moteur électrique, dont l'entrée est une tension de commande et la sortie une vitesse de rotation ; une puce électronique, dont l'entrée et la sortie sont deux tensions électriques. . .

#### Remarque

Un système n'est pas nécessairement monovariante, il peut fort bien manipuler plusieurs entrées et produire plusieurs sorties.

### 1.2 Systèmes continus

Il existe deux classes de systèmes : les systèmes continus et les systèmes numériques.

Dans un **système continu**, les signaux d'entrée et de sortie sont définis à chaque instant, on les note  $e(t)$  et  $s(t)$  et on les qualifie de continus ou d'analogiques. Dans le cas de signaux électriques, on peut les afficher sur un oscilloscope.

**Remarque**

Un signal continu est décrit par une fonction mathématique continue.

Un **système numérique** manipule et produit des signaux numériques, suites binaires de niveaux logiques 0 et 1. Ce sont typiquement des puces électroniques qu'on trouve dans tous les ordinateurs, téléphones, tablettes... Les signaux numériques sont transformés en signaux continus avec un convertisseur numérique-analogique, connu sous l'acronyme **CNA** ; l'opération inverse, qui convertit un signal continu en un signal numérique, est assurée par un convertisseur analogique-numérique, ou **CAN**.

### 1.3 Systèmes linéaires

Les systèmes étudiés sont des **systèmes linéaires** : la réponse à une combinaison linéaire d'entrées est la combinaison linéaire identique des sorties associées à chaque entrée. Par exemple, si une personne  $A$  parle dans un téléphone, le récepteur entend  $A$ . Il entend de même  $B$  si  $B$  parle dans le même téléphone. Et si  $A$  et  $B$  sont côte à côte et parlent tous les deux en même temps, alors le récepteur entend les voix de  $A$  et de  $B$ . Ceci se formalise ci-dessus.

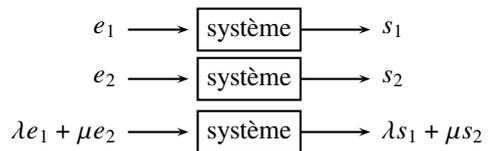


Figure 1.2 – Linéarité d'un système.

### 1.4 Systèmes invariants

Les systèmes étudiés sont des **systèmes invariants dans le temps** : leurs propriétés ne changent pas au cours du temps. Ce n'est vrai qu'approximativement, car tous les systèmes vieillissent et doivent être remplacés lorsque leurs propriétés se sont dégradées. Ils restent toutefois invariants pendant leur durée de vie.

Les systèmes linéaires et invariants dans le temps sont souvent indiqués par leur acronyme anglais **LTI systems**, pour *linear time-invariant systems*.

Les systèmes étudiés dans le cadre de ce cours sont linéaires, temporellement invariants et manipulent des signaux continus.

## 2 Description d'un système électronique

### 2.1 Représentation par équation différentielle

La loi entrée-sortie est sous la forme d'une équation différentielle. Par exemple pour le système électrique de la figure 1.3.