

Électromagnétisme

Fondements et applications

Avec 300 exercices et problèmes résolus

José-Philippe PÉREZ
Robert CARLES
Robert FLECKINGER

Professeurs à l'université Paul-Sabatier de Toulouse

Avec la collaboration de
Christophe Lagoute
Professeur au lycée Bellevue de Toulouse

4^e édition

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^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements



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, 2002, 2009, nouvelle présentation 2019

11, rue Paul Bert 92240 Malakoff

© Masson 1990, 1996, 1997

ISBN 978-2-10-080665-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e 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.

Table des matières

Avant-propos	x
Les grands noms de l'électromagnétisme	xii
Constantes physiques, notations et symboles	xvii
Description de l'ouvrage	xxii
L'électromagnétisme en vingt questions	xxviii
1. Charges électriques. Distributions de charges	
I. — Électrisation. Charge électrique	1
II. — Distributions de charges	5
<i>Exercices et problèmes</i>	10
2. Loi de Coulomb. Champ électrostatique. Théorème de Gauss	
I. — Loi de Coulomb	13
II. — Champ électrostatique	15
III. — Théorème de Gauss	19
<i>Exercices et problèmes</i>	25
3. Énergie potentielle. Potentiel électrostatique	
I. — Interaction d'une charge avec un système de charges	29
II. — Potentiel créé par un ensemble de charges	32
III. — Énergie électrostatique d'un système de charges	38
IV. — Énergie d'une distribution continue de charge	41
<i>Exercices et problèmes</i>	45
4. Symétrie des distributions de charges et symétrie des champs	
I. — Premières considérations sur les symétries	49
II. — Invariances des sources	53
III. — Exemples d'utilisation des symétries	56
IV. — Symétries et principe de Curie	62
<i>Exercices et problèmes</i>	68

5. Dipôles électrostatiques

I. — Dipôle électrostatique	70
II. — Dipôle dans un champ électrostatique	73
III. — Approximation dipolaire	76
IV. — Moments dipolaires des atomes et des molécules	80
<i>Exercices et problèmes</i>	83

6. Milieux conducteurs. Loi d'Ohm

I. — Électrocinétique	86
II. — Caractère conservatif de la charge	91
III. — Conducteur en régime stationnaire	93
IV. — Loi d'Ohm	96
<i>Exercices et problèmes</i>	104

7. Conductivité électrique

I. — Différents types de courants électriques	107
II. — Théorie élémentaire de la conductivité	109
III. — Structure de bandes et conductivité des solides	116
<i>Exercices et problèmes</i>	122

8. Conducteurs en équilibre électrostatique

I. — Champ produit par un conducteur en équilibre	125
II. — Distributions d'équilibre d'un conducteur	130
III. — Équilibre d'un système de deux conducteurs	134
IV. — Équilibre des conducteurs	139
V. — Applications	141
<i>Exercices et problèmes</i>	143

9. Effet Joule. Générateurs et récepteurs électriques

I. — Puissance électrique	147
II. — Effet Joule	149
III. — Bilan d'énergie d'un convertisseur	150
IV. — Force électromotrice et courant électromoteur	153
V. — Loi d'Ohm généralisée	154
VI. — Exemples de générateurs et de récepteurs	160
<i>Exercices et problèmes</i>	164

10. Condensateurs en électrostatique. Aspect énergétique

I. — Condensateur. Charge et capacité	168
II. — Capacité de condensateurs de forme simple	169
III. — Condensateurs réels	172
IV. — Groupements de condensateurs	173
V. — Énergie d'un condensateur	175
VI. — Actions sur les armatures d'un condensateur	177
<i>Exercices et problèmes</i>	180

11. Champ électromagnétique. Propriétés

I. — Champ électromagnétique	185
II. — Loi de Biot et Savart	188
III. — Propriétés du champ magnétique	192
IV. — Potentiel vecteur	198
V. — Équations de passage du champ magnétique	200
VI. — Solénoïde	201
VII. — Équations du champ électromagnétique stationnaire	204
<i>Exercices et problèmes</i>	206

12. Symétries des distributions de courants et symétries des champs

I. — Premières considérations sur les symétries	209
II. — Invariances des sources	213
III. — Exemples d'utilisation des symétries	215
IV. — Dipôle magnétique	220
V. — Symétries d'un système magnétostatique	225
<i>Exercices et problèmes</i>	227

13. Électrodynamique des régimes stationnaires

I. — Conducteur au repos dans un champ (\mathbf{E}, \mathbf{B}) stationnaire	231
II. — Loi d'Ohm dans un conducteur en mouvement	235
III. — Actions sur un conducteur. Force de Laplace	238
IV. — Travail électromoteur et travail des forces de Laplace	242
V. — Actions sur un dipôle magnétique rigide	249
<i>Exercices et problèmes</i>	251

14. Induction électromagnétique

I. — Approche expérimentale	256
II. — Lois de l'induction	258
III. — Relation de Maxwell-Faraday	259
IV. — Circuit mobile dans un champ magnétique	263
V. — Circuit de constitution variable	267
<i>Exercices et problèmes</i>	270

15. Inductances propres et mutuelles des circuits électriques

I. — Inductance mutuelle de deux circuits	274
II. — Inductance propre d'un circuit	277
III. — Auto-induction	279
IV. — Inductance d'un ensemble de deux circuits couplés	280
V. — Transformateurs	282
<i>Exercices et problèmes</i>	284

16. Équations de Maxwell. Approximation des régimes quasi stationnaires

I. — Équation de Maxwell-Ampère	287
II. — Équations de Maxwell dans le vide	289
III. — Potentiel électromagnétique	291
IV. — Régimes quasi stationnaires	293
V. — Milieu conducteur dans l'ARQS	295
VI. — Effets de capacité	296
<i>Exercices et problèmes</i>	298

17. Électrodynamique des régimes quasi stationnaires

I. — Effets d'induction dans un conducteur	301
II. — Effet de capacité	306
III. — Électrodynamique des circuits dans l'ARQS	309
<i>Exercices et problèmes</i>	316

18. Énergie électromagnétique. Énergie magnétique d'un système de courants

I. — Énergie électromagnétique dans le vide	320
II. — Stockage d'énergie électromagnétique dans l'ARQS	323
III. — Création d'énergie électromagnétique dans l'ARQS	327
IV. — Bilan dans des circuits fixes	330
V. — Conversion électromécanique	333
<i>Exercices et problèmes</i>	341

19. Ondes électromagnétiques dans le vide

I. — Équations de propagation du champ et du potentiel	347
II. — Ondes planes et ondes sphériques	350
III. — Ondes planes monochromatiques	354
IV. — Polarisation d'une onde plane monochromatique	356
V. — Énergie associée à une onde électromagnétique	361
VI. — Superposition d'ondes	366
<i>Exercices et problèmes</i>	370

20. Champ électromagnétique rayonné par un dipôle oscillant

I. — Potentiel produit par un dipôle oscillant	373
II. — Champ produit par un dipôle oscillant	375
III. — Rayonnement à grande distance	377
IV. — Rayonnement dipolaire d'un électron atomique	380
V. — Rayonnement d'une antenne rectiligne	384
VI. — Dipôle magnétique oscillant	386
<i>Exercices et problèmes</i>	389

21. Polarisation des milieux matériels : aspect macroscopique en régime stationnaire	
I. — Polarisation des milieux matériels	392
II. — Vecteur polarisation volumique	393
III. — Équation de Maxwell-Gauss dans un milieu matériel	396
IV. — Potentiel et champ créés par un milieu polarisé	398
V. — Milieux diélectriques linéaires	402
<i>Exercices et problèmes</i>	407
22. Aimantation des milieux matériels : aspect macroscopique en régime stationnaire	
I. — Aimantation des milieux matériels	410
II. — Vecteur aimantation volumique	411
III. — Équation de Maxwell-Ampère dans un milieu matériel	414
IV. — Potentiel et champ créés par un milieu aimanté	416
V. — Milieux magnétiques linéaires	420
<i>Exercices et problèmes</i>	425
23. Équations de Maxwell et énergie dans les milieux matériels : cas général	
I. — Polarisation et aimantation dans le cas général	428
II. — Équations de Maxwell dans un milieu matériel	433
III. — Forces électromagnétiques sur un milieu matériel	435
IV. — Énergie électromagnétique dans un milieu matériel	440
V. — Bilan d'énergie dans un milieu linéaire parfait	442
VI. — Bilan d'énergie dans un matériau dissipatif	445
VII. — Bilans d'énergies dans une machine	448
<i>Exercices et problèmes</i>	451
24. Étude microscopique de la polarisation en régime stationnaire	
I. — Mécanismes microscopiques de polarisation	454
II. — Champ local et champ macroscopique	462
III. — Polarisation des fluides	463
IV. — Polarisation des solides	466
<i>Exercices et problèmes</i>	470
25. Étude microscopique du paramagnétisme et du diamagnétisme	
I. — Origines microscopiques du magnétisme	473
II. — Interaction d'un moment magnétique avec un champ	476
III. — Paramagnétisme	479
IV. — Diamagnétisme	483
<i>Exercices et problèmes</i>	485
26. Ferromagnétisme	
I. — Aspect macroscopique	488
II. — Interprétation microscopique	494
III. — Domaines de Weiss et aimantation macroscopique	497

IV . — Interprétation quantique	499
V . — Circuits magnétiques	502
VI . — Effets gyromagnétiques	509
<i>Exercices et problèmes</i>	511
27. Supraconductivité	
I . — Conductivité parfaite et supraconductivité	515
II . — Propriétés magnétiques des supraconducteurs	518
III . — Courant supraconducteur d'intensité non nulle	523
IV . — Théorie élémentaire de la supraconductivité	526
V . — Matériaux supraconducteurs et applications	530
<i>Exercices et problèmes</i>	532
28. Dispersion. Absorption	
I . — Équations de Maxwell dans un milieu matériel	536
II . — Modèle de Drude-Lorentz	537
III . — Polarisation des milieux en régime sinusoïdal	542
IV . — Propagation d'une onde dans un milieu LHI	547
V . — Dispersion dans un milieu transparent	549
VI . — Bilan d'énergie électromagnétique. Absorption	554
<i>Exercices et problèmes</i>	558
29. Réflexion et réfraction des ondes électromagnétiques	
I . — Propagation dans un milieu matériel limité	561
II . — Réflexion sur un conducteur en incidence normale	567
III . — Réflexion et transmission entre deux diélectriques	574
<i>Exercices et problèmes</i>	583
30. Propagation guidée	
I . — Ondes TEM dans un câble coaxial	585
II . — Analyse dans le cadre de l'ARQS	587
III . — Guide d'ondes	594
<i>Exercices et problèmes</i>	605
Annexe 1. Dérivées et différentielles	609
I . — Dérivées	609
II . — Différentielles	611
III . — Systèmes de coordonnées	613
Annexe 2. Flux et circulation d'un vecteur	616
I . — Flux d'un champ de vecteur	616
II . — Circulation d'un champ de vecteur	621
III . — Opérateurs différentiels du second ordre	623
IV . — Relations d'analyse vectorielle	625

Annexe 3. Simulation en électromagnétisme	628
I. — Électrostatique d'une distribution de charges	628
II. — Champ électrique par temps d'orage	635
III. — Champ magnétique terrestre	641
Réponses aux vingt questions	648
Solutions des exercices et problèmes	650
Bibliographie	728
Index	730

Initialement, Maxwell concevait l'espace comme rempli de sortes d'engrenages, et Faraday y voyait des lignes de force ; mais les équations de Maxwell par elles-mêmes sont indépendantes de tout énoncé verbal qui en tente une description physique. La vraie description physique n'est que celle donnant le sens expérimental des quantités physiques figurant dans les équations.

R. Feynman, Conférence Nobel, 1965

« La nature de la physique », Ed. Seuil, 1980

Avant-propos

Ce cours, intitulé *Électromagnétisme, fondements et applications*, correspond globalement à l'enseignement d'électromagnétisme donné dans le premier cycle universitaire, en licence et dans les classes préparatoires aux Grandes Écoles.

Comme en *Mécanique* et en *Optique*, il nous a paru intéressant de le découper en leçons quasi autonomes et progressives. C'est ainsi que le traitement relativiste de l'électromagnétisme a été exclu de l'ouvrage et placé dans un autre cadre, celui d'un exposé de la relativité restreinte (cf. *Relativité*).

On peut distinguer trois grandes parties.

Dans la première, on trouve les thèmes classiquement étudiés au niveau de la première année du DEUG A :

- (1) l'électrostatique ;
- (2) la conductivité ;
- (3) l'électrocinétique ;
- (4) l'électrodynamique des régimes stationnaires.

Dans la deuxième, les thèmes sont ceux couramment enseignés en deuxième année du DEUG A :

- (5) l'induction électromagnétique ;
- (6) les équations de Maxwell ;
- (7) l'approximation des régimes quasi stationnaires ;
- (8) l'émission et la propagation des ondes électromagnétiques dans le vide.

La troisième partie, relative aux milieux matériels autres que les conducteurs, est plus délicate, mais plus physique. Elle est souvent laissée de côté en premier cycle universitaire et développée en licence de physique ; elle figure explicitement dans les programmes avancés des classes préparatoires *PC*. Les thèmes abordés sont les suivants :

- (9) l'étude macroscopique de la polarisation et de l'aimantation en régime stationnaire et en régime variable ;
- (10) les milieux diélectriques et magnétiques en régime stationnaire ;
- (11) l'énergie électromagnétique en présence de milieux diélectriques et magnétiques ;

- (12) le ferromagnétisme ;
- (13) la supraconductivité ;
- (14) la propagation des ondes électromagnétiques dans des milieux matériels illimités ;
- (15) le guidage des ondes électromagnétiques.

Cette troisième partie rend incontestablement les objectifs de l'ouvrage ambitieux. Cependant, elle nous a semblé indispensable pour éviter que l'électromagnétisme, amputé de toute l'électricité des circuits et des propriétés des matériaux, n'apparaisse en 2002 comme une discipline académique achevée.

Nous avons tenté de rendre compatible le respect des programmes des DEUG A et des classes préparatoires avec la nécessaire actualisation de l'électromagnétisme. Mises à part l'organisation en leçons quasi autonomes (le renvoi à des formules éloignées est pratiquement inexistant), l'illustration par de nombreux exemples numériques et la volonté de ne proposer qu'un seul ouvrage, cet effort a notamment porté sur les points suivants :

- (1) l'analyse de l'influence des symétries dans les lois physiques et dans les distributions de charge et de courant ;
- (2) le choix délibéré de privilégier le concept d'énergie pour les définitions du potentiel électrostatique et de la force électromotrice d'un convertisseur ;
- (3) l'étude de la conductivité dans les matériaux conducteurs et semi-conducteurs ;
- (4) la présentation de l'induction électromagnétique ;
- (5) l'interprétation énergétique du théorème de Poynting, en termes de bilan de l'énergie électromagnétique, grandeur extensive non conservative puisque le terme de création est généralement non nul ; l'énergie magnétique des courants est alors confortablement introduite ;
- (6) l'aspect macroscopique de la polarisation et de l'aimantation des milieux matériels, d'abord en régime stationnaire puis en régime quelconque ;
- (7) l'écriture des bilans d'énergies dans les milieux matériels, notamment dans les machines électromécaniques ;
- (8) l'exposé didactique de la supraconductivité : théorie macroscopique et aperçu de la théorie microscopique.

L'ouvrage s'adresse principalement aux étudiants : il doit donc être clair, efficace, peu coûteux, et ne pas être un formulaire « sans physique » ou un recueil d'exercices calculatoires « sans intérêt ».

Les exercices proposés à la fin des chapitres décrivent des situations physiques concrètes. Leurs solutions suffisamment détaillées, données à la fin de l'ouvrage ou sur le site web <http://webast.ast.obs-mip.fr/people/perez/index.html>, permettront à l'étudiant, et plus largement à l'autodidacte, de tester sa propre compréhension du cours, de prolonger sa réflexion et de développer son autonomie.

Nous pensons ainsi avoir rassemblé, dans *un seul* livre, les éléments indispensables à une acquisition d'un savoir et d'un savoir-faire en électromagnétisme.

Cette quatrième édition ne diffère pas notablement de la première ; elle s'est cependant enrichie par un contenu plus progressif, mieux illustré par des exemples concrets et accompagnés d'exercices avec ordre de grandeurs réalistes.

Certaines parties délicates ont été reformulées afin de mieux séparer ce qui relève d'un enseignement classique et ce qui est en marge des programmes (énergie électromagnétique en présence de milieux matériels). D'autres ont été développées en raison de leurs applications pratiques.

Ce livre doit beaucoup aux étudiants du premier cycle universitaire, de la licence et de l'agrégation, ainsi qu'à tous nos collègues des universités et des classes préparatoires. Nous les remercions pour leurs remarques et commentaires constructifs.

Les grands noms de l'électromagnétisme

André Marie Ampère

Physicien français, né à Lyon en 1775 et mort à Marseille en 1836. À la fois mathématicien, mécanicien, chimiste, il enseigne également la philosophie à la faculté des lettres de Paris. Ses principales découvertes concernent l'électricité : loi des actions électrodynamiques, hypothèse des courants dans la matière ; on lui doit les termes de courant et tension pour désigner ces grandeurs électriques. Il devient membre de l'Académie des Sciences en 1814, puis professeur au Collège de France en 1824.

François Arago

Astronome et physicien français, né à Estagel en 1786 et mort à Paris en 1853. En électricité, il met en évidence l'aimantation induite dans le fer par le champ créé par un courant. En astronomie, il découvre l'existence de la chromosphère solaire. Enfin, en politique, comme Ministre de la Marine et de la Guerre, il fait abolir l'esclavage dans les colonies françaises.

John Bardeen

Physicien américain, né à Madison en 1908 et mort à Boston en 1991. Il contribue de façon décisive à l'essor de deux grands domaines du milieu du XX^e siècle : les semi-conducteurs et la supraconductivité, ce qui lui valut deux prix Nobel de physique, le premier, en 1956, pour la mise au point du transistor à germanium, avec W.H. Brattain et W. Shockley, et le second, en 1972, qu'il partage avec L.N. Cooper et J.R. Schrieffer pour la théorie B.C.S de la supraconductivité.

Peter Barlow

Mathématicien et physicien anglais, né à Norwich en 1776 et mort à Woolwich en 1862. Il invente en 1828 le premier modèle d'un convertisseur électromécanique, la *roue de Barlow* appelée aussi le *cylindre de Faraday*.

Jean-Baptiste Biot

Physicien français, né à Paris en 1774 et mort à Paris en 1862. Ses contributions scientifiques sont nombreuses et concernent plusieurs domaines de la physique, notamment l'optique et l'astronomie. En électromagnétisme, il est connu essentiellement pour la détermination, en collaboration avec Savart, du champ magnétique créé par un courant. Il est nommé professeur au Collège de France en 1800.

Charles Augustin de Coulomb

Physicien français, né à Angoulême en 1736 et mort à Paris en 1806. À 36 ans, il abandonne l'armée où il exerçait des fonctions d'ingénieur pour se consacrer à la recherche scientifique. Ses deux contributions majeures sont la formulation des lois sur le frottement mécanique entre deux solides et la loi de Coulomb, en $1/r^2$, entre deux charges électriques ponctuelles. Cette dernière loi, qu'il a établie expé-

rimentalement, est l'un des modèles d'interaction les mieux vérifiés expérimentalement. Il montre aussi que les charges d'un conducteur en équilibre se répartissent en surface. Il devient membre de l'Académie des Sciences en 1781.

John Frederic Daniell

Physicien et chimiste anglais, né à Londres en 1790 et mort à Londres 1845. Il invente en 1836 la pile à deux liquides.

Petrus Josephus Wilhelmus Debye

Physicien américain d'origine néerlandaise, né à Maastricht en 1884 et mort à Ithaca (Cornell, USA) en 1966. Ses principales contributions sont la théorie des capacités thermiques des solides, précisément l'effondrement de ces grandeurs avec la température, et la mesure de la distance entre les atomes dans les molécules à l'aide de leur moment dipolaire. Il reçoit en 1936 le prix Nobel de chimie pour ces derniers travaux.

René Descartes

Philosophe, mathématicien et physicien français, né à La Haye-Descartes (Touraine) en 1596 et mort à Stockholm en 1650. Il publie en 1637 un essai, *Dioptrique*, dans lequel figure la loi de la réfraction.

Paul Drude

Physicien allemand, né à Brunswick en 1863 et mort à Berlin en 1906. Il est à l'origine du premier modèle explicatif de la conductivité des métaux et de leur éclat : la conduction électrique est assurée par des porteurs de charge soumis au champ électrique mais aussi à une force phénoménologique de frottement proportionnelle à la vitesse de dérive.

Michael Faraday

Physicien et chimiste anglais, né à Southwark en 1791 et mort à Hampton Court en 1876. Garçon de courses chez un bibliothécaire, il devient autodidacte en lisant de nombreux ouvrages scientifiques, notamment de chimie. Employé dans un laboratoire de chimie comme apprenti, il se révèle rapidement expérimentateur de génie. Il devient alors directeur du laboratoire et professeur de chimie. Ses contributions remarquables furent d'abord l'énoncé des lois de l'électrochimie et la découverte du benzène en 1824. En 1831, il énonce la célèbre loi de l'induction puis la nature discontinue de la charge électrique et sa propriété d'être conservative.

Léon Foucault

Physicien français, né à Paris en 1819 et mort à Paris en 1868. Autodidacte et inventeur de talent, il apporte des contributions importantes dans de multiples domaines, notamment en optique pour corriger les miroirs de leurs aberrations géométriques et pour mesurer avec précision la vitesse de la lumière. Il est surtout connu pour ses contributions en mécanique : il met en évidence, de façon spectaculaire, l'influence de la rotation de la Terre sur le comportement d'un pendule simple (pendule de Foucault) et invente le gyroscope. En électromagnétisme, il introduit les courants induits dans la matière, appelés depuis *courants de Foucault*. Il devient membre de l'Académie des Sciences en 1865.

Augustin Fresnel

Opticien français, né à Broglie (Eure) en 1788 et mort à Ville d'Avray (région parisienne) en 1827. Il reprend les expériences d'Young, les étend et propose, avec le physicien français François Arago, l'interprétation ondulatoire de la lumière. Il étudie également la diffraction à distance finie ainsi que la propagation de la lumière dans les milieux cristallins. Il présente un mémoire complet sur ce dernier sujet à l'Académie des Sciences en 1823.

Carl Friedrich Gauss

Mathématicien, astronome et physicien allemand, né à Brunswick en 1777 et mort à Göttingen en 1855. Mathématicien de génie, Gauss est connu en physique pour avoir apporté, à partir de 1829, d'importantes contributions en optique, notamment l'approximation linéaire des instruments, et en électromagnétisme (théorème de Gauss, magnétisme terrestre).

Edwin Herbert Hall

Physicien américain, né à Gorham (Maine) en 1855 et mort à Cambridge (Massachusetts) en 1938. Spécialiste de la conduction thermique et électrique des matériaux, il découvre en 1880 l'effet qui porte son nom depuis. Cet effet, d'utilisation répandue dans les appareils de mesure actuels (sonde de Hall, etc.), s'est renouvelé grâce à la découverte, un siècle plus tard, par von Klitzing, de l'effet Hall quantique.

Joseph Henry

Physicien américain, né à Albany en 1797 et mort à Washington en 1878. Spécialiste d'électromagnétisme, il découvre en 1832 l'auto-induction. On a donné son nom à l'unité internationale d'inductance.

Heinrich Hertz

Physicien allemand, né à Hamburg en 1857 et mort à Bonn en 1894. Il démontre en 1877 l'existence des ondes électromagnétiques prévues par Maxwell, et fonde le domaine des télécommunications.

James Prescott Joule

Physicien anglais, né à Salford près de Manchester en 1818 et mort à Sale en 1889. Expérimentateur de génie, il fait connaître les idées de von Mayer en étudiant les conversions énergétiques thermoélectriques et thermomécaniques. Il formule en 1831 les lois de dissipation du travail électrique en chaleur dans un conducteur parcouru par un courant. Il détermine ensuite l'équivalent mécanique de la calorie. Il découvre aussi les deux lois, dites de Joule et Gay-Lussac et de Joule et Thomson (Lord Kelvin) suivies par un gaz parfait. Son nom a été donné à l'unité de travail dans le système international.

Willem Hendrik Keesom

Physicien néerlandais, né dans l'île de Texel en 1876 et mort à Leyde en 1956. Il fut le premier physicien qui solidifia l'hélium, découvrit ses deux phases et les propriétés exceptionnelles de l'hélium II (superfluidité et conduction thermique exceptionnellement élevée). Il succéda à K. Onnes à la direction du laboratoire de Leyde (cf. *Thermodynamique*).

Gustav Robert Kirchhoff

Physicien allemand, né à Kœnisberg en 1824 et mort à Berlin en 1887. Il est l'auteur de la théorie du corps noir et l'inventeur du spectroscope, ce qui lui permet de découvrir le césium et le rubidium. Il est surtout connu pour ses travaux en électricité, sur les lois des courants dérivés, lesquelles portent depuis son nom, ainsi que pour l'établissement de l'équation des télégraphistes.

Paul Langevin

Physicien français, né à Paris en 1872 et mort à Paris en 1946. D'origine modeste, il est admis d'abord à l'École de Physique et Chimie, puis à l'École Normale Supérieure. Ses domaines d'intérêt sont variés et ses contributions théoriques ou expérimentales multiples. Sa contribution théorique majeure en électromagnétisme est l'interprétation de la polarisation des diélectriques et de l'aimantation des corps paramagnétiques. Il devient professeur au Collège de France en 1902 et membre de l'Académie des Sciences en 1934. En outre, il a joué un rôle essentiel dans l'intégration de la physique moderne dans

l'enseignement ; après la libération, il propose une réforme audacieuse de l'enseignement, appelée plan Langevin-Wallon.

Pierre Simon Marquis de Laplace

Astronome, mathématicien et physicien français, né à Beaumont en Auge en 1749 et mort à Paris en 1827. Bien que professeur de mathématiques et homme politique, ses travaux en physique sont nombreux. Il signe diverses contributions sur la capillarité, la propagation du son dans l'air, l'évolution adiabatique des gaz ; en électromagnétisme, citons l'équation de Laplace de l'électrostatique, la force de Laplace exercée par un champ magnétique sur un courant et le travail des forces électromagnétiques. Cependant, c'est sa publication sur la mécanique céleste, *Exposition du système du monde*, qui est la plus remarquable. On y trouve développée notamment sa conception d'un déterminisme rigoureux à la base d'une physique totalement prédictive. Il devient membre de l'Académie des Sciences en 1783. Il fut ministre de l'Intérieur de Bonaparte puis vice-président du Sénat sous Napoléon ; enfin, il devint marquis sous Louis XVIII.

Heindrik Anton Lorentz

Physicien néerlandais, né à Arnhem en 1853 et mort à Haarlem en 1928. Il devient titulaire de la chaire de physique théorique à l'université de Leyde en 1878. Il est considéré comme l'un des fondateurs de la théorie électronique de la matière : ses contributions importantes concernent en effet l'électromagnétisme des milieux matériels et notamment l'influence d'un champ magnétique sur le rayonnement lumineux émis par les atomes, ce qui lui valut le prix Nobel en 1902, prix qu'il partagea avec son élève P. Zeeman. Il est surtout connu pour les formules de transformation de la relativité restreinte qu'il propose, indépendamment du physicien irlandais G. Fitzgerald, pour tenter d'interpréter, dans le cadre newtonien, le résultat de l'expérience de Michelson et Morley.

James Clerk Maxwell

Physicien écossais, né à Edimburgh en 1831 et mort à Cambridge en 1879. Il publie en 1857 un article sur la constitution probable des anneaux de Saturne, ce qui le fait connaître de la communauté scientifique et l'incite à s'intéresser aux systèmes constitués d'un grand nombre de particules. Il établit alors les principaux résultats de la théorie cinétique des gaz. C'est ensuite comme professeur d'université au King's College de Londres qu'il travaille sur l'électromagnétisme, chez lui (!) assisté par son épouse. Admirateur de Faraday, il parachève la synthèse de l'électromagnétisme en 1876 et en déduit une théorie de la lumière qui sera vérifiée expérimentalement par Hertz en 1887. Il est ensuite nommé à Cambridge pour diriger la construction du célèbre Cavendish Laboratory.

Louis Néel

Physicien français, né à Lyon en 1904 et mort à Paris en 2000. Spécialiste de magnétisme, il découvre l'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme, ce qui lui vaut le prix Nobel de physique en 1970.

Georg Simon Ohm

Physicien allemand, né à Erlangen en 1789 et mort à Munich en 1854. Il découvre en 1827 la loi sur les circuits linéaires entre tension et courant, alors qu'il est professeur au collège de guerre de Berlin. En 1849, il devient professeur de physique à l'université de Munich. On a donné son nom à l'unité internationale de résistance.

Hans Christian Oersted

Physicien et chimiste danois, né à Rudkøbing en 1777 et mort à Copenhague en 1851. Travaillant dans une pharmacie pour subvenir à ses besoins, Oersted s'intéresse non seulement à la chimie mais aussi à la philosophie, l'astronomie et la physique. En 1820, alors qu'il est enseignant à l'université de Co-

penhague, il découvre qu'une boussole orientée dans la direction d'un conducteur parcouru par un fort courant est déviée de 90° . Il suscite ainsi les recherches intenses dans ce domaine qui aboutiront à la synthèse de l'électromagnétisme par Maxwell.

John Henry Poynting

Physicien anglais, né à Monton près de Manchester en 1852 et mort à Birmingham en 1914. Il est surtout connu pour le théorème qui porte son nom sur l'énergie électromagnétique et la pression de rayonnement. Il a été le premier à mesurer la densité moyenne de la Terre.

Félix Savart

Physicien français, né à Mézières en 1791 et mort à Paris en 1841. Après avoir été médecin, il s'intéresse à l'acoustique et publie dans ce domaine une contribution remarquable. Il est surtout connu pour la formule qu'il propose avec Biot, en 1820, donnant le champ magnétique créé par un courant. Il devient membre de l'Académie des Sciences en 1827, puis professeur au Collège de France.

John Strutt ou Lord Rayleigh

Physicien anglais, né à Lanford Grove en 1842 et mort à Witham (Essex) en 1919. Fils d'aristocrate, il s'intéressa à un grand nombre de sujets en physique en travaillant de façon originale, chez lui, en dehors de tout environnement universitaire. Il fit d'importantes contributions sur la propagation du son, l'hydrodynamique, la théorie ondulatoire de la lumière, la vision des couleurs, la diffusion de la lumière (interprétation du bleu du ciel), le rayonnement du corps noir, etc. Il succéda à Maxwell, en 1879, pour diriger le Cavendish Laboratory à Cambridge. Il obtint en 1904 le prix Nobel de physique pour la découverte de l'argon. Avec J. Maxwell et W. Thomson (Lord Kelvin), il est considéré comme l'un des trois plus grands physiciens britanniques du XIX^e siècle.

Nikola Tesla

Ingénieur électricien serbo-croate puis américain, né à Smiljan en 1856 et mort à New York en 1943. Ses contributions en électrotechnique sont très nombreuses : on lui doit l'invention des courants polyphasés, la réalisation du premier moteur asynchrone à champ tournant et celle des générateurs industriels d'ondes hertziennes. L'unité SI de champ magnétique porte son nom.

Joseph John Thomson

Physicien anglais, né à Manchester en 1856 et mort à Cambridge en 1940. Élève et successeur de Maxwell au Cavendish Laboratory de Cambridge, il détermine, en 1894, le rapport e/m_e pour l'électron puis la valeur de la charge élémentaire e . À l'aide du spectrographe de masse qu'il invente, il étudie la structure de la matière à l'échelle atomique et imagine le premier modèle de l'atome d'hydrogène (modèle de Thomson). Toutes ces contributions lui valent le prix Nobel en 1906.

Alessandro Volta

Physicien italien, né à Côme en 1745 et mort à Côme en 1827. Il est connu pour avoir introduit la pomme de terre en Italie et pour ses recherches en électricité qui le conduisent à inventer la pile électrique. Il fut fait comte par Bonaparte en 1801. L'unité SI de tension électrique dérive de son nom.

Constantes physiques, notations et symboles

Les symboles utilisés sont généralement ceux recommandés par l'AFNOR

$e = 1,602\,176\,462\,(63) \times 10^{-19} \text{ C}$	charge élémentaire (charge du proton)
$-e$	charge de l'électron
$eV = 1,602\,176\,462\,(63) \times 10^{-19} \text{ J}$	électron-volt
$\varepsilon_0 = 8,854\,187\,817 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$	permittivité du vide
$q_e^2 = e^2/(4\pi\varepsilon_0)$	$q_e^2 = 230,707\,705\,6 \times 10^{-30} \text{ SI}$
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$	perméabilité du vide
$c = 2,997\,924\,58 \times 10^8 \approx 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	vitesse de la lumière dans le vide (valeur exacte)
$m_e = 0,910\,938\,188(72) \times 10^{-30} \text{ kg}$, ($m_e c^2 = 0,510\,998 \text{ MeV} \approx 0,511 \text{ MeV}$)	masse de l'électron
$m_p = 1,672\,621\,58(13) \times 10^{-27} \text{ kg}$, ($m_p c^2 = 938,272 \text{ MeV}$)	masse du proton
$h = 6,626\,068\,76(52) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	constante de Planck
$\hbar = 1,054\,571\,596(82) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	constante de Planck divisée par 2π
$r_e = q_e^2/(m_e c^2) = 2,817\,934\,23 \times 10^{-15} \text{ m}$	rayon classique de l'électron ($r_e \approx 2,8 \text{ F}$)
$G = 6,673(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	constante newtonienne de gravitation
$R = 8,314\,472(15) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	constante molaire des gaz parfaits
$N_A = 6,022\,141\,99(47) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	nombre d'Avogadro
$k_B = R/N_A = 1,380\,650\,3(24) \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$	constante de Boltzmann
$F = N_A e = 96\,485,341\,5(39) \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$	constante de Faraday
$\mu_B = e\hbar/(2m_e) = 927,400\,899(37) \times 10^{-26} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	magnéton de Bohr
$\mu_N = e\hbar/(2m_p) = 5,050\,783\,17(20) \times 10^{-27} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$	magnéton nucléaire
$\Phi_0 = h/(2e) = 2,067\,833\,636(81) \times 10^{-15} \text{ Wb}$	quantum de flux magnétique
$R_K = h/e^2 = 25\,812,807\,572(95) \Omega$	constante de von Klitzing.
$\alpha = q_e^2/(\hbar c) = 7,297\,352\,533(27) \times 10^{-3}$ $\approx 1/137,036$	constante de structure fine.

\mathcal{R}	référentiel (repère d'espace et de temps)
$\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$	base orthonormée de \mathcal{R}
x, y, z	coordonnées cartésiennes
ρ, φ, z ou r, φ, z	coordonnées cylindriques
r, θ, φ	coordonnées sphériques
$M(\mathbf{r})$	point courant où l'on calcule l'effet produit
$P(\mathbf{r}')$	point courant où est située la source
$d\mathcal{V}$	élément de volume
dS	élément surface matérielle
dl	élément de courbe matérielle C
dS	élément de surface mathématique \mathcal{S}
$d\mathbf{r}$	élément vectoriel sur une courbe mathématique \mathcal{C}
$\mathbf{u} = d\mathbf{l}/dt$	vitesse de déplacement le long d'un circuit
$\mathbf{V} = d\boldsymbol{\lambda}/dt$	vitesse de déplacement d'un élément de circuit
$\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$	vitesse d'un point courant ($\mathbf{v} = \mathbf{u} + \mathbf{V}$)
$\mathbf{n}_{ex}, \mathbf{n}$	vecteur unitaire normal dirigé vers l'extérieur
Ω	angle solide
\ln	logarithme népérien
\exp	exponentielle
\approx	sensiblement égal à
\sim	de l'ordre de
\bar{f}	valeur moyenne (dans le temps) de f
$\text{sgn}(f)$	signe de f
\underline{f}	valeur complexe de f
$ \underline{f} $	module de \underline{f}
\underline{f}^*	complexe conjugué de \underline{f}
$\text{Re}\{\underline{f}\}, \text{Im}\{\underline{f}\}$	parties réelle, imaginaire de \underline{f}
$F = \ \mathbf{F}\ , F_0 = \ \underline{\mathbf{F}}\ = \sqrt{\underline{\mathbf{F}} \cdot \underline{\mathbf{F}}^*}$	normes d'un vecteur, d'un vecteur complexe
ρ, σ, λ	charges volumique, surfacique, linéique ou densités de
q, Q	charges ponctuelle, totale (d'une distribution)
\mathbf{J}, \mathbf{J}_s	vecteurs courants volumique, surfacique ou densités de
I	intensité d'un courant stationnaire
\mathbf{E}	champ électrique
\mathbf{B}	champ magnétique, densité de flux magnétique
(\mathbf{E}, \mathbf{B})	champ électromagnétique
V	potentiel scalaire

A	potentiel vecteur
(V, \mathbf{A})	potentiel électromagnétique
$V_A - V_B$	différence de potentiel (d.d.p) entre A et B
Φ	flux du champ magnétique
$i(t)$	intensité d'un courant variable
$U, u(t)$	tension stationnaire, tension variable
E, e	force électromotrice stationnaire et variable (f.e.m)
I_{em}, i_{em}	courant électromoteur stationnaire et variable (c.e.m)
R, G	résistance, conductance
C, C_{ij}	capacité, coefficient d'influence
L, M	inductance propre, inductance mutuelle
p	moment d'un dipôle électrique
m	moment d'un dipôle magnétique
P	polarisation électrique volumique
M	aimantation volumique
\mathbf{J}_m	courant volumique de maille
\mathcal{P}	moment dipolaire électrique macroscopique
\mathcal{M}	moment dipolaire magnétique macroscopique
$(\mathbf{E}_a, \mathbf{B}_a)$	champ électromagnétique appliqué
$(\mathbf{E}_m, \mathbf{B}_m)$	champ électromagnétique créé par un milieu
$(\mathbf{E}_{in,ex}, \mathbf{B}_{in,ex})$	valeurs du champ électromagnétique à l'extérieur,
γ	conductivité d'un milieu matériel
$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \mu = \mu_0 \mu_r,$	permittivité et perméabilité d'un milieu matériel
ε_r, μ_r	permittivité et perméabilité relatives d'un milieu matériel
α	polarisabilité d'un milieu $\mathbf{p} = \alpha \varepsilon_0 \mathbf{E}$
χ_e	susceptibilité diélectrique $\mathbf{P} = \chi_e \varepsilon_0 \mathbf{E}$
χ_m, χ_m^*	susceptibilités magnétiques : $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{B} / \mu_0, \mathbf{M} = \chi_m^* \mathbf{H}$
D	excitation électrique ou déplacement ou induction électrique
H	excitation magnétique
$\Psi(\mathbf{r}, t) = \Psi_m \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \exp(-i\omega t),$	Expression complexe d'une onde plane monochromatique
$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' + i\varepsilon'', \underline{\chi} = \chi' + i\chi''$	constante diélectrique, susceptibilité diélectrique complexes
$n, \underline{n} = n + i\kappa$	indice, indice complexe
$\underline{k} = k' + ik''$	nombre d'onde complexe

$\underline{\gamma} = \gamma' + i\gamma''$	conductivité complexe
T, ω, ν (ou f)	période, pulsation (ou fréquence angulaire), fréquence
λ_0, \mathbf{k}_0	longueur, vecteur d'onde dans le vide
λ, \mathbf{k}	longueur, vecteur d'onde dans un milieu
σ_0	nombre d'onde (spectroscopique) dans le vide
v_φ, v_g	vitesses de phase, de groupe
$\mathbf{F}_e, \mathbf{F}_m, \mathbf{F}_L \dots$	forces électrique, magnétique, de Laplace...
Γ	moment d'une force
$\delta W, W$	travail élémentaire, travail total d'une force
$\mathcal{P} = \delta W / dt$	puissance
$\mathcal{E}_k, \mathcal{E}_p, \mathcal{E}_{me}$	énergies cinétique, potentielle, mécanique
$\mathcal{E}_e, \mathcal{E}_m, \mathcal{E}_{em}$	énergies électrique, magnétique, électromagnétique
w_e, w_m, w	énergies électrique, magnétique, électromagnétique volumiques
\mathbf{R} ou \mathbf{J}_{em}	vecteur de Poynting
p_e, p_m, p_{rad}	pressions électrostatique, magnétostatique, de radiation
μ	coefficient d'atténuation linéique en intensité.

Alphabet grec

alpha	A	α	eta	H	η	nu	N	ν	tau	T	τ
beta	B	β	theta	Θ	θ	xi	Ξ	ξ	upsilon	Y	υ
gamma	Γ	γ	iota	I	ι	omicron	O	o	phi	Φ	ϕ
delta	Δ	δ	kappa	K	κ	pi	Π	π	chi	X	χ
epsilon	E	ϵ	lambda	Λ	λ	rho	P	ρ	psi	Ψ	ψ
zeta	Z	ζ	mu	M	μ	sigma	Σ	σ	omega	Ω	ω

Description de l'ouvrage

L'ouvrage comporte trois grandes parties qui correspondent aux différentes étapes de l'enseignement de l'électromagnétisme dans les universités ou dans les classes préparatoires aux Grandes Écoles scientifiques. Le déroulement du cours est le suivant :

i) Partie I, Première année universitaire : l'électrostatique, les courants stationnaires et la magnéto-statique

Leçons 1 à 13 : Charges électriques, champ électrostatique, potentiel, les symétries des charges et des champs, les dipôles électrostatiques, la loi d'Ohm dans les milieux conducteurs, les aspects microscopiques de la conductivité électrique, les conducteurs électriques, l'effet Joule, les générateurs et les récepteurs électriques, les condensateurs, les propriétés du champ électromagnétique, les symétries des courants et des champs, enfin l'électrodynamique des régimes stationnaires.

ii) Partie II, Deuxième année universitaire : les régimes variables

Leçons 14 à 20 : L'induction électromagnétique, les inductances propres et mutuelles des circuits, les équations de Maxwell, l'approximation des régimes quasi stationnaires, l'énergie électromagnétique, les ondes électromagnétiques dans le vide et le dipôle oscillant.

iii) Partie III, Licence : les milieux matériels

Leçons 21 à 30 : La polarisation des milieux diélectriques, l'aimantation des milieux magnétiques, les équations de Maxwell dans les milieux matériels, les aspects microscopiques de la polarisation et de l'aimantation, le ferromagnétisme, la supraconductivité, la dispersion, l'absorption, la réflexion et la réfraction des ondes électromagnétiques et la propagation guidée.

Les leçons 1, 2, 3, 6, 9, 11, 14, 16, 21 et 22, ont un rôle central car elles contiennent les éléments indispensables (définitions, lois et principes) à l'étude des leçons qui suivent. Il faut donc les étudier avant d'aborder les suivantes. Même si ces dernières sont présentées dans un certain ordre, il est possible de les étudier dans un ordre différent qui tienne compte des préoccupations et des intérêts du lecteur ; en effet, les leçons sont quasi autonomes et le renvoi à des formules éloignées pratiquement inexistant.

Par exemple, si l'on souhaite étudier la leçon 17 sur les régimes quasi stationnaires, il est conseillé de lire avant les leçons 1, 2, 3, 6, 9, 11, 14 et 16.

Méthode de travail

Lecture des leçons

Dans une phase d'initiation, une leçon doit être lue une première fois, en insistant, d'une part, sur l'introduction, laquelle situe la leçon dans le cours, et d'autre part sur la conclusion qui énumère l'ensemble des résultats essentiels.

Dans une deuxième phase, l'étudiant doit refaire avec soin tous les calculs intermédiaires.

Enfin, une dernière lecture devrait permettre d'appréhender complètement la leçon, notamment les résultats essentiels, les exemples significatifs et les ordres de grandeur.

Exercices et problèmes

Une fois la lecture de la leçon effectuée, l'étudiant doit passer à la phase d'application en faisant des exercices simples et courts, directement liés au contenu de la leçon ; il doit essayer de résoudre ces exercices avec le seul support que constitue le cours. En cas de difficultés, un coup d'œil rapide sur la solution, proposée en fin d'ouvrage, devrait l'aider. Éviter la simple lecture de la solution proposée et la mémorisation de la démonstration : mieux vaut revenir sur la leçon pour résoudre l'exercice. En cas de difficulté majeure, lire la solution et tenter de la refaire sans aucune aide un ou deux jours plus tard.

Une fois ces exercices rédigés, tenter de résoudre des problèmes d'examens et concours généralement plus longs.

Pour des raisons à la fois pédagogiques et économiques, la correction de ces problèmes, un sur deux environ, a été transférée sur le site internet <http://webast.ast.obs-mip.fr/people/perez/index.html>.

Révision

Pour réviser, une ultime lecture devrait conforter l'apprentissage. Ne pas hésiter à souligner au crayon les parties essentielles et à porter en marge des remarques personnelles suggérées par la lecture d'autres livres ou de documents annexes, tels que des revues à grand public (La Recherche, Science et Vie, Ciel et Espace, etc.).

Comment résoudre un problème d'électromagnétisme

On résout correctement un problème d'électromagnétisme si l'on s'astreint à répondre *successivement à plusieurs questions*, même lorsque le texte n'invite pas à y répondre explicitement.

Quel est le système étudié ?

Il faut définir le système dont on veut faire l'analyse, c'est-à-dire le délimiter en précisant sa frontière commune avec l'extérieur. La réponse à cette question n'est pas immédiate. Par exemple, dans un milieu matériel, il importe de préciser si l'on s'intéresse au seul matériau contenu dans le volume considéré ou au contraire à l'ensemble du matériau et du champ électromagnétique dans ce même volume.

Le système est-il électriquement isolé ?

S'il est électriquement isolé, sa charge est constante, mais il peut échanger de l'énergie avec l'extérieur, sous forme de travail mécanique par exemple.

Quelles sont les équations structurelles de l'électromagnétisme ?

Ce sont les équations de Maxwell-Faraday indépendantes des charges et des courants. Elles s'écrivent *localement* :

$$\mathbf{rot} \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathbf{0} \quad \text{et} \quad \mathbf{div} \mathbf{B} = 0$$

ou globalement :

$$e = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \text{et} \quad \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

En régime stationnaire, la première équation (dite de Maxwell-Faraday) se réduit à :

$$\text{rot } \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad \text{ou} \quad \mathbf{E} = -\text{grad } V \quad \text{ou} \quad \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

Quelles sont les équations reliant le champ sources en régime stationnaire ?

Ce sont les équations de Maxwell-Gauss et de Maxwell-Ampère qui s'écrivent *localement* :

$$\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \text{et} \quad \text{rot} \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \right) = \mathbf{J}$$

ou globalement :

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} dS = \frac{Q_{in}}{\varepsilon_0} \quad \text{et} \quad \oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$$

Comment calcule-t-on les champs et les potentiels ?

On calcule les champs, à partir des sources, en utilisant les équations de Maxwell-Gauss et Maxwell-Ampère sous leurs formes globales ou locales.

On choisit la forme globale lorsqu'il existe des invariances ou des éléments de symétrie, ce qui est souvent le cas dans les modèles proposés. On en déduit alors les potentiels en intégrant. Lorsque les calculs de champ s'avèrent plus laborieux, en raison du faible degré de symétrie, une méthode efficace consiste à commencer par calculer le potentiel électrique, qui est un scalaire, puis à en déduire le champ électrique par intégration. La détermination du potentiel vecteur est plus laborieuse mais elle peut être facilitée par les analogies formelles entre V et \mathbf{A} .

On en déduit la force qui s'exerce sur une particule chargée à l'aide de la formule de Lorentz :

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Les sources sont-elles décomposables en éléments simples ?

Les équations de Maxwell étant linéaires, il est parfois judicieux d'utiliser le principe de superposition linéaire qui permet d'évaluer la grandeur totale à partir de grandeurs élémentaires. Cependant, cette linéarité ne concerne pas les grandeurs énergétiques qui dépendent quadratiquement des champs. Précisément, les interférences proviennent de la superposition linéaire des champs électromagnétiques et de la non-superposition des énergies transportées par ces champs.

Le système présente-t-il des éléments de symétrie ?

Si le système présente des éléments de symétrie ou d'antisymétrie, il en résulte des propriétés géométriques des champs qui permettent de simplifier leur étude. Ainsi, le champ électrique en un point d'un plan de symétrie de la distribution de charge est contenu dans ce plan ; en revanche, en un point d'un plan d'antisymétrie, il est orthogonal à ce plan (cf. chapitre 4). C'est l'inverse pour le champ magnétique (cf. chapitre 12).

Le système est-il indépendant de certaines variables ?

Si le système n'est pas modifié sous des transformations associées à certaines variables de position (linéiques ou angulaires), les différentes grandeurs physiques ne dépendent pas non plus de ces variables.

Par exemple, si le système est invariant par translation suivant l'axe Oz , aucune grandeur ne dépend de la variable z . Il est alors avantageux de choisir pour sa description un système de coordonnées adapté à cette invariance (cf. chapitre 4 et 12). De façon plus générale, si les sources de champ ne dépendent pas d'une variable donnée, il est impératif de choisir le système de coordonnées (cartésiennes, cylindriques ou sphériques) qui réduit le nombre de variables indépendantes.

Comment calcule-t-on les forces sur les conducteurs ?

i) Sur un conducteur chargé en équilibre, les forces qui s'exercent sont rarement obtenues en intégrant la force élémentaire de Coulomb. Le calcul est laborieux et souvent inextricable. Il vaut mieux utiliser le concept d'énergie électrostatique et d'en déduire la force par dérivation. Il convient de veiller aux conditions expérimentales précises du problème ; le système est-il isolé ou maintenu à un potentiel constant ? Selon le cas, la relation formelle entre force et énergie potentielle change de signe :

$$F_x = -\frac{d\mathcal{E}_{e,Q}}{dx} \quad \text{ou} \quad F_x = \frac{d\mathcal{E}_{e,V}}{dx}$$

x étant la variable linéique ou angulaire. Dans ce dernier cas, F_x est un moment de force.

ii) Dans le cas de l'interaction entre deux distributions de courant, le calcul des forces est aussi laborieux. On applique rarement la loi des actions électrodynamiques d'Ampère. On utilise plutôt l'expression de la force de Laplace qui s'exerce sur un conducteur parcouru par un courant et plongé dans un champ magnétique :

$$\mathbf{F}_L = \int \mathbf{J} \times \mathbf{B} d\tau \quad \text{ou} \quad \mathbf{F}_L = I \int d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

si le circuit est filiforme. Comme en électrostatique, la méthode la plus efficace est celle s'appuyant sur l'énergie magnétique. La force s'obtient par dérivation. Il faut veiller aux conditions expérimentales du problème : l'intensité est-elle constante ou est-ce le flux qui l'est ? Suivant le cas, on aura :

$$F_x = -\left(\frac{\partial \mathcal{E}_{m,\Phi}}{\partial x}\right)_\Phi \quad \text{ou} \quad F_x = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{m,i}}{\partial x}\right)_i$$

x étant la variable linéique ou angulaire.

La loi d'Ohm s'applique-t-elle ? Comment ?

La loi d'Ohm n'est pas une loi fondamentale mais une loi constitutive des milieux conducteurs. Elle s'applique localement sous la forme d'une relation linéaire entre le vecteur courant volumique et le champ électrique dans un conducteur : $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$.

Globalement, cette relation s'écrit $U = RI$, avec $R = l/(\gamma S)$ si le conducteur est homogène et de section constante.

Est-on dans l'approximation des régimes quasi stationnaires ?

Dans ce cas, les lois de l'électromagnétisme sont celles de l'électrostatique et de la magnétostatique valables à chaque instant avec une modification majeure concernant le champ électrique. En effet, la

circulation de ce dernier le long d'un contour fermé n'est pas nulle mais égale à :

$$e(t) = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n} dS + \oint_C (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad \text{soit} \quad e(t) = - \frac{d\Phi}{dt}$$

pour un circuit de constitution constante.

Électromagnétisme des milieux matériels

Dans les milieux matériels, on doit distinguer les champs d'excitation \mathbf{D} et \mathbf{H} , reliés aux sources, des champs fondamentaux \mathbf{E} et \mathbf{B} qui agissent sur la matière. Ils sont décrits par deux groupes distincts d'équations de Maxwell. Le lien se fait par la description phénoménologique du milieu, le plus souvent linéaire. On a alors :

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad \text{et} \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

Bilans énergétiques

Les bilans énergétiques en électromagnétisme nécessitent une identification claire des énergies mises en jeu et des échanges énergétiques.

L'énergie électromagnétique n'est pas une grandeur conservative, car le terme de création est en général non nul. Elle se conserve en l'absence d'effet Joule et de travail des forces de Laplace.

Citons deux fautes fréquentes sur les bilans énergétiques. Dans le cas du déplacement de l'armature d'un condensateur à potentiel constant, l'échange énergétique avec le générateur de tension joue un rôle essentiel (cf. chapitre 10). L'interprétation locale du vecteur de Poynting, comme densité surfacique du flux d'énergie électromagnétique, peut conduire à des indéterminations voire à des paradoxes, si l'on n'a pas préalablement souligné que seul présente un sens physique le flux de ce vecteur à travers une surface fermée (chapitre 18).

Doit-on effectuer un calcul en notations réelles ou complexes ?

Rappelons que la notation complexe n'a de sens que si l'on s'intéresse à un régime sinusoïdal.

i) Dans les phénomènes *sans* propagation, comme c'est le cas dans l'étude des circuits électriques, on fait correspondre conventionnellement à $\cos(\omega t)$ la quantité $\exp(j\omega t)$, avec $j^2 = -1$.

ii) En revanche, dans les phénomènes *avec* propagation, comme c'est le cas dans l'étude des ondes électromagnétiques, on associe conventionnellement à $\cos(\omega t)$ la quantité $\exp(-i\omega t)$, avec $i^2 = -1$.

La notation complexe exige de la rigueur, car les erreurs liées aux confusions entre norme (arithmétique), composante (algébrique) et amplitude complexe d'une grandeur sont fréquentes. Ainsi, on écrira :

$$\mathbf{B} = B_\varphi \mathbf{e}_\varphi \quad \text{avec} \quad B = \|\mathbf{B}\| = |B_\varphi| \quad \text{et} \quad B_\varphi = \text{Re} \{ \underline{B}_\varphi \}$$

Pour revenir à l'expression réelle d'une grandeur (amplitude d'un courant, d'une tension ou d'une onde), il est préférable au préalable de mettre l'expression complexe sous la forme polaire $\rho \exp(i\theta)$.

Soulignons que, pour les grandeurs énergétiques, la notation complexe ne peut être conservée que pour expliciter des valeurs moyennes temporelles.

Comment résoudre les équations différentielles aux dérivées partielles ?

C'est un problème technique. S'il y a deux variables, on intègre l'une des équations précédentes par rapport à l'une des variables, la constante d'intégration étant une fonction de l'autre variable. Puis on injecte la solution obtenue dans l'autre équation (cf. annexe 1).

Quelle est l'interprétation des résultats obtenus et quel est leur ordre de grandeur ?

Cette *dernière* phase est capitale, car elle permet de vérifier les calculs et donc de revenir sur des erreurs de signes décisives : deux charges de signes opposés s'attirent et deux courants de mêmes signes s'attirent aussi. Dans les bilans énergétiques, dans lesquels on compte positivement ce qui est effectivement reçu, un travail négatif doit être interprété comme un travail fourni au milieu extérieur. Les ordres de grandeur sont essentiels : par exemple, il est difficile de charger un conducteur métallique avec une charge de quelques coulombs ; de même, le tesla est une unité grande de champ magnétique.

L'électromagnétisme en vingt questions

1. L'énergie potentielle d'une charge q dans un potentiel V est qV . *Pourquoi* un facteur $1/2$ s'introduit-il dans l'énergie d'un conducteur, de charge Q , porté à un potentiel V ?
2. *Pourquoi* le développement dipolaire du potentiel électrostatique d'un système de charge est-il plus utile que le développement dipolaire analogue du potentiel gravitationnel d'un système de masse ?
3. Soumis à un champ électrique uniforme \mathbf{E} , les électrons d'un métal devraient acquérir un mouvement accéléré. *Pourquoi* alors la loi d'Ohm s'interprète-t-elle par la proportionnalité entre le champ \mathbf{E} et la vitesse de dérive des électrons ?
4. La conduction électrique dans les fils de cuivre des installations électriques est assurée par des électrons dont la vitesse de dérive est de l'ordre de $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. *Pourquoi* la durée qui sépare la fermeture de l'interrupteur de l'effet d'éclairage par une lampe n'est-elle pas perceptible ?
5. *Pourquoi* la conductivité d'un métal diminue-t-elle avec la température, alors que celle d'un semi-conducteur augmente ?
6. *Pourquoi* la résistance d'un conducteur métallique ne peut-elle être interprétée par les collisions des électrons avec les ions du métal ?
7. *Pourquoi* la surface de la Terre est-elle chargée électriquement ?
8. *Pourquoi* se protège-t-on de la foudre en montagne en s'éloignant des arbres et en s'accroupissant ?
9. Le champ électrostatique au voisinage de la Terre est d'environ $130 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. *Pourquoi* ce champ est-il sans influence sur les êtres vivants sur la Terre ?
10. *Pourquoi* ne ressent-on pas d'effet électrique dans un avion frappé par la foudre ?
11. *Pourquoi* sent-on l'ozone dans l'atmosphère après un orage ?
12. Pour créer un champ magnétique intense, on fait implorer radialement un anneau cylindrique conducteur traversé par un flux magnétique. *Pourquoi* ?
13. La force magnétique de Lorentz ne travaille pas, alors que la force de Laplace liée aux interactions magnétiques, elle, travaille. *Pourquoi* ?
14. Un circuit ouvert ne peut pas être parcouru par un courant continu, alors que, dans un simple fil, de longueur finie, qui joue le rôle d'antenne, peut circuler un courant. *Pourquoi* ?
15. *Pourquoi* introduit-on un diélectrique entre les armatures d'un condensateur ?
16. *Pourquoi* utilise-t-on un noyau de fer feuilleté dans un transformateur ?
17. *Pourquoi* le ferromagnétisme ne peut-il pas être interprété par l'interaction entre les différents moments magnétiques contenus dans un matériau ?
18. *Pourquoi* la supraconductivité ne se réduit-elle pas à une superconductivité ?
19. *Pourquoi* la couleur du ciel est-elle bleue et celle du Soleil couchant rouge ?
20. Dans un guide d'onde, la vitesse de phase est supérieure à la vitesse c de propagation de la lumière dans le vide. *Pourquoi* ce résultat n'est-il pas en contradiction avec la théorie de la relativité restreinte ?

1

Charges électriques. Distributions de charges

Les phénomènes électriques ont été découverts très tôt dans l'histoire de l'humanité. Ils ont été d'abord objet de curiosité ou de crainte, puis d'expériences spectaculaires aux XVII^e et XVIII^e siècles. Leur analyse scientifique entre 1785 et 1875 a conduit à l'élaboration d'une théorie cohérente de l'électricité dont la validité subsiste encore aujourd'hui sans modification essentielle.

Dans ce chapitre, nous nous bornons à rappeler brièvement les expériences classiques d'électrisation. En revanche, nous insistons sur les propriétés fondamentales de la charge électrique ainsi que sur la modélisation des distributions réelles de charge.

I. — ÉLECTRISATION. CHARGE ÉLECTRIQUE

I.1. — Lois qualitatives

Frottons, avec un tissu de laine, un bâton d'ébonite, corps obtenu après traitement du caoutchouc par le soufre (vulcanisation). On constate qu'il attire des corps légers. Cette propriété, appelée la *tribo-électricité* (du grec *tribein* qui signifie frotter), est à l'origine de la découverte de l'électrisation. Il est ainsi possible d'électriser certains corps ; ce phénomène obéit à plusieurs lois qualitatives :

- i) Les corps électrisés exercent des actions mécaniques.
 - ii) L'électrisation peut être transférée d'un corps à un autre.
 - iii) Il existe deux électrisations, conventionnellement qualifiées de positive et de négative.
 - iv) Deux corps de même électrisation se repoussent, alors que deux corps d'électrisations différentes s'attirent.
- v) Tout corps non électrisé est attiré par un corps électrisé, quel que soit le type d'électrisation. Par exemple, si l'on approche une règle en plastique, préalablement frottée avec de la laine, d'un filet d'eau, ce dernier est attiré par la règle.

On distingue schématiquement deux types de matériaux :

- i) ceux pour lesquels le phénomène est local, que l'on nomme *isolants* ; c'est le cas de l'ébonite utilisée ci-dessus, du verre, des matières plastiques, de la laine, de l'air, etc.
- ii) ceux pour lesquels le phénomène est global, appelés *conducteurs* ; c'est le cas, par exemple, des métaux, des solutions acides ou alcalines, du corps humain. Comme l'électrisation concerne tout le volume des conducteurs, sa mise en évidence nécessite que l'on isole ces conducteurs.

Enfin, on peut former des séries de corps classés de telle sorte que si l'on frotte l'un d'entre eux avec le suivant il se charge positivement. Par exemple, à l'aide de la série :

verre	mica	laine	peau de chat	soie	bois	ébonite
-------	------	-------	--------------	------	------	---------

on déduit qu'une tige de verre, frottée avec de la laine ou une peau de chat, se charge positivement, alors qu'un bâton d'ébonite frotté de la même façon se charge lui négativement.

I. 2. — Charge électrique élémentaire

Les résultats expérimentaux sur l'électrisation ont été interprétés dès 1785 par le physicien français C.A. Coulomb. Cependant, une explication totalement satisfaisante n'a pu être donnée que plus tard, lors de la découverte des particules élémentaires chargées, notamment de l'électron par le physicien anglais J. J. Thomson en 1881.

Finalement, des expériences successives ont établi l'existence de corps minuscules dont l'électrisation est indépendante de l'état de mouvement, des forces subies, de l'environnement, etc. L'estimation actuelle de la dimension de ces corps est de l'ordre du fermi, ou femtomètre $1 \text{ F} = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$. Ces édifices élémentaires interviennent de façon déterminante dans la conception scientifique actuelle du monde physique.

Il est remarquable que les plus fines et les plus récentes expériences n'aient pas remis en cause l'existence de charges élémentaires, même si certaines particules chargées se sont révélées être, elles-mêmes, des systèmes complexes composés d'éléments encore plus fondamentaux.

I. 3. — Propriétés de la charge électrique

La charge électrique, qui caractérise l'état d'électrisation d'une charge élémentaire, est toujours liée à la matière : toutes les particules élémentaires chargées ont une masse *non* nulle. En outre, la charge électrique possède des propriétés remarquables que nous nous proposons d'analyser.

a) Charge positive et charge négative

La charge électrique peut exister sous deux formes, l'une qualifiée de *positive* l'autre de *négative*. Notons que le choix d'une charge négative pour l'électron est purement conventionnel.

b) Extensivité de la charge

La charge électrique d'un système est une grandeur *extensive*, c'est-à-dire qu'elle peut se mettre sous la forme de la somme algébrique des charges élémentaires qui la constituent. Elle ne suffit pas à caractériser complètement l'état d'électrisation du système ; il faut pour cela connaître en outre sa répartition spatiale.

c) Caractère conservatif de la charge électrique

Effectuons le bilan de la charge Q contenue dans un volume \mathcal{V} , entre deux instants t et $t + \Delta t$: la variation ΔQ de la charge Q se met sous la forme de la somme de deux termes, l'un Q^r est la charge reçue (algébriquement) par le système de volume \mathcal{V} , à travers la surface \mathcal{S} qui le limite, l'autre Q^c est la charge éventuellement créée ou produite dans \mathcal{V} :

$$\Delta Q = Q^r + Q^c$$

Cette écriture est conforme à la convention habituelle de la thermodynamique qui consiste à compter positivement ce qui est reçu par le système (cf. *Thermodynamique*).