

Ecole Supérieure d'Électricité

électro- magnétisme

G. Fournet

Préface de A. Blanc-Lapierre



MASSON

0441
F2

8063515

École Supérieure d'Électricité

ÉLECTROMAGNÉTISME

à partir des équations locales

par

G. FOURNET

Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)
et à l'Ecole Supérieure de Physique et Chimie

Préface de A. BLANC-LAPIERRE



E8063515



MASSON

Paris New York Barcelone Milan

1979

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 » (alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

© MASSON, Paris, 1979.

ISBN : 2-225 47058-8

Imprimé en Hongrie

MASSON S.A.
MASSON PUBLISHING U.S.A. Inc.
TORAY-MASSON S.A.
MASSON ITALIA EDITORI S.p.A.

120 Bd Saint-Germain, 75 280 Paris Cedex 06
14 East 60th Street, New York, N.Y. 10022
Balma 151, Barcelona 8
Via Giovanni Pascoli 55, 20 133 Milano

PRÉFACE

L'ouvrage du Professeur Gérard Fournet « L'ÉLECTROMAGNÉTISME A PARTIR DES ÉQUATIONS LOCALES » est le second volume à paraître dans la collection — patronnée par l'Ecole Supérieure d'Electricité — d'ouvrages rédigés par des enseignants ou des chercheurs de cette Ecole et consacrés aux développements et aux applications de l'Electricité dans le sens le plus large du terme, c'est-à-dire en englobant l'Electronique, l'Informatique, l'Automatique.... Le premier ouvrage paru dans cette collection a été le résultat d'un travail collectif sur les Antennes, publié sous la direction d'Elie Roubine, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et à l'Ecole Supérieure d'Electricité, avec la collaboration de MM. J. Ch. Bolomey, S. Drabowitch et C. Ancona.

Gérard Fournet enseigne l'Electromagnétisme à l'Ecole Supérieure d'Electricité depuis 1961. Il est Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et à l'Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de la Ville de Paris. Il est également responsable de l'option « Electronique des Matériaux » au sein du Diplôme d'Etudes Approfondies « Sciences des Matériaux » organisé en commun par les Universités de Paris VI, Paris VII, Paris XI et Paris XIII, par l'Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de la ville de Paris et par l'Ecole Supérieure d'Electricité. De plus, G. Fournet est Directeur Scientifique du Laboratoire de Génie Electrique de Paris où ses travaux de recherche, qui vont de l'aspect le plus fondamental jusqu'aux applications, portent essentiellement sur l'Electrotechnique, les supraconducteurs et les semiconducteurs.

En écrivant cet ouvrage sur un sujet qu'il a, lui-même, fait progresser, l'auteur met à la disposition du lecteur sa grande expérience dans les domaines de l'enseignement, de la recherche et des applications.

L'exposé de l'électromagnétisme est fait à partir des équations locales générales (équations de Maxwell et une relation énergétique concernant le vecteur de Poynting). Cette façon de faire donne à l'ensemble une grande consistance logique et, à ma connaissance, c'est le premier exposé systématique complètement construit sur ces bases. On sent, d'autre part, toujours présents un grand souci de rigueur et le désir de bien dégager le sens physique des grandeurs introduites et des calculs effectués sur elles.

Enfin, on notera un effort important de l'auteur pour rendre l'ouvrage accessible à l'ensemble de lecteurs le plus large possible. Ceci est, en particulier, très sensible dans l'attitude adoptée vis-à-vis des notations tensorielles : de ce point de vue, ce livre peut tout aussi bien satisfaire le lecteur soucieux de comprendre à fond les phénomènes et ayant toujours à l'esprit l'aspect tensoriel des grandeurs si important pour la présentation relativiste de l'électromagnétisme, le

lecteur désirant simplement retenir les aspects intrinsèques des grandeurs physiques liés à la distinction entre vecteurs polaires et vecteurs axiaux et, enfin, celui qui cherche une expression ou l'explication simple d'un phénomène électromagnétique.

Je suis convaincu que cet ouvrage rendra de grands services à de nombreux lecteurs et je tiens à remercier G. Fournet pour l'effort important qu'il s'est imposé en rédigeant ce livre qui prolongera efficacement l'excellent enseignement qu'il dispense depuis une quinzaine d'années aux élèves de l'Ecole Supérieure d'Electricité.

A. BLANC-LAPIERRE

Membre de l'Académie des Sciences

Professeur à l'Université de Paris Sud

*Directeur Général de l'Ecole Supérieure
d'Electricité*

AVANT-PROPOS

Il existe déjà un grand nombre de livres d'Electromagnétisme et un nouvel ouvrage dans ce domaine ne peut présenter un réel intérêt que s'il apporte quelque chose de nouveau à un public bien défini. Nous pensons à ce sujet que notre ouvrage qui, d'une part, est destiné aux élèves soit de deuxième cycle des Universités, soit des Ecoles d'ingénieurs et qui, d'autre part, peut servir de base aux non-spécialistes, se signale par les points suivants :

a) L'exposé est entrepris en admettant au départ la validité d'équations locales macroscopiques générales (équations de Maxwell, définition des échanges d'énergie effectués sous forme électromagnétique par le flux du vecteur de Poynting) ; il suffit alors d'ajouter les lois particulières propres à la matière étudiée (exemple non limitatif de ces lois : $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, $\vec{B} = \vec{B}(\vec{H})$, $\vec{J} = \gamma \vec{E}$) pour pouvoir établir toutes les expressions électromagnétiques régissant cette matière. L'introduction de la relation énergétique liée au vecteur de Poynting permet d'effectuer, pour la première fois à notre connaissance, un exposé complet de l'Electromagnétisme à partir de lois purement locales. Le grand avantage de ce choix est que la validité de chaque raisonnement et le domaine d'application de chaque expression sont parfaitement déterminés puisqu'on connaît toutes les hypothèses qu'il a fallu effectuer au sujet du comportement de la matière pour les établir.

Ajoutons encore que, étant donné le développement de l'Electricité en premier cycle ou dans les classes de préparation aux grandes écoles, nous croyons qu'il est nécessaire d'adopter notre plan d'exposition ou un plan voisin pour maintenir et développer l'intérêt des élèves pour l'Electromagnétisme au niveau du deuxième cycle ou des écoles d'ingénieurs.

b) Nous avons consacré quelques développements aux notions de variance tensorielle dont on connaît l'importance en physique : l'utilisation des tenseurs est indispensable pour comprendre l'électromagnétisme relativiste (c'est-à-dire l'électromagnétisme). En considérant que les règles tensorielles n'autorisent que quelques types de relations différentielles entre les grandeurs physiques, nous avons même pu « presque démontrer » a priori les équations de Maxwell et en tout cas montrer que ces équations étaient les premières (c'est-à-dire les plus simples) à considérer pour tenter de décrire les phénomènes électromagnétiques. Par ailleurs, on sait depuis longtemps que des considérations ten-

sorielles démontrent définitivement (!) que $\vec{B}$ et $\vec{H}$ par exemple ne peuvent être confondus.

En étant réaliste, nous avons rédigé notre livre de façon qu'il puisse être lu simultanément par trois catégories de lecteurs : le lecteur ayant fait l'effort d'acquérir quelques notions sur les tenseurs et pouvant ainsi atteindre une compréhension synthétique des phénomènes électromagnétiques, le lecteur ne désirant prendre en compte que la distinction entre les vecteurs polaires et les « vecteurs axiaux », ce qui permet encore de bien saisir une partie de la réalité physique, le lecteur négligeant toutes ces précautions et soucieux avant tout de prévoir le fonctionnement d'un dispositif.

c) Il existe deux présentations possibles de l'Electromagnétisme de la matière. Dans la première, on considère d'abord les grandeurs électriques microscopiques (« champs à petite échelle ») définies en principe à une échelle subatomique : dans ce cas la « matière » paraît être constituée de particules situées dans le vide, ce qui entraîne des simplifications, mais il reste ensuite à calculer des moyennes pour obtenir les grandeurs macroscopiques observables. L'autre présentation consiste à considérer directement les grandeurs macroscopiques. Nous avons adopté ce dernier point de vue dans les cinq premières parties de l'ouvrage en réservant toutefois sa dernière partie au « microélectromagnétisme ». Si, de façon générale, le rapprochement des deux points de vue entraîne toujours de fructueuses comparaisons, il faut absolument pouvoir passer d'une présentation à l'autre pour comprendre l'état supraconducteur de la matière pour lequel la distinction entre, d'une part, les grandeurs macroscopiques $\vec{B}$ et $\vec{H}$ et, d'autre part, le champ magnétique « à petite échelle » $\vec{h}$ est essentielle. Nous avons ainsi pu terminer notre livre par une introduction à la physique des supraconducteurs.

d) Nous avons pris beaucoup de soin pour essayer de présenter des raisonnements rigoureux ; nous avons été ainsi conduits à revoir toutes les démonstrations traditionnelles et par conséquent toutes les erreurs ou fautes qui restent dans notre livre sont personnelles et non dues à nos prédécesseurs. Par ailleurs nous avons toujours cherché à obtenir des expressions dont la signification soit intrinsèque, c'est-à-dire indépendante de toute convention de signe ou de système.

e) Dans un domaine aussi traditionnel que l'Electromagnétisme, il semble difficile d'obtenir des résultats fondamentalement nouveaux. Notons cependant que le plan adopté nous a obligé à élaborer de nouvelles démonstrations. Par ailleurs la définition des flux d'induction magnétique au travers d'un circuit réel, c'est-à-dire non filiforme, est très simple quand on part, comme dans cet ouvrage, de considérations énergétiques alors que ce peut être un exercice périlleux et en tout cas difficile par d'autres méthodes. Sur d'autres points nous pensons avoir approfondi ou étendu les résultats classiques : la quasi démonstration des équations de Maxwell, l'examen de la question de l'existence ou de la non existence des phénomènes superficiels (densités superficielles de charge,

de courant), les groupements de condensateurs (où les résultats habituels sont faux en principe mais numériquement quasi exacts), l'expression de l'inductance propre d'un tore à section circulaire (où nous avons retrouvé par des méthodes un peu plus élaborées identiquement l'expression classique obtenue par des considérations très approchées) etc...

L'étendue de l'ouvrage a été limité afin de correspondre à environ 50-60 heures de cours appuyées sur 40 heures de travaux dirigés. Nous avons choisi d'exposer les phénomènes de base en nous limitant à ce qui peut être enseigné sans faire appel à la mécanique quantique. Pour les différentes applications nous nous sommes bornés à montrer comment les relations générales les gouvernent sans entrer dans des détails technologiques ou dans la description de méthodes de calculs.

Pour consulter facilement notre livre le lecteur doit savoir que dans chacune des six grandes parties :

- chaque chapitre est repéré par une lettre majuscule (Ex. C)
- chaque section d'un chapitre, par un chiffre romain (Ex. IV)
- chaque paragraphe (§) d'une section par une lettre minuscule (Ex. a).

Les différentes expressions sont numérotées de (l) à (n) pour chaque chapitre ; la citation d'une expression étant indiquée par son rang (r) pour une expression du même chapitre et par [(r) p. 98] pour une expression d'un autre chapitre et se trouvant page 98. Dans l'ensemble de l'ouvrage les figures sont numérotées de l à 155 et les tableau de I à XVII.

Il m'est agréable de terminer en remerciant toutes les personnes qui m'ont aidé ou permis de rédiger ce livre ; M. A. BLANC—LAPIERRE qui a bien voulu rédiger la préface, M. A. GUINIER qui m'a initié à l'enseignement de l'Electromagnétisme dans le cadre de l'ancien Certificat d'Electricité Générale, M. P. OLMER qui m'a confié l'enseignement correspondant à l'Ecole Supérieure d'Electricité. Je dois beaucoup aux discussion que j'ai eues soit avec des chercheurs du L.G.E.P. (MM. BAIXERAS, BARTHELEMY, CHABRERIE, DUPART,...) soit avec les diverses personnes qui depuis 16 ans ont été chargées des travaux dirigés sur mon cours à l'E.S.E. et je veux citer plus spécialement MM. BERGER, BOLOMEY, COAT et LECUILLER. Je remercie enfin pour la part qu'ils ont prise soit à la conception, soit à la réalisation des figures Mme BIZI, MM. BODIN, CARISTAN ainsi que Mme LE BAUZEC qui a eu le mérite de toujours réussir à interpréter mes manuscrits.

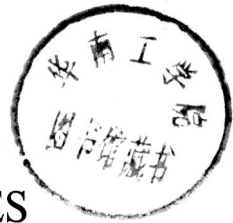


TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	V
AVANT-PROPOS	XV
PREMIÈRE PARTIE. — <i>Lois générales</i>	1
A. — <i>Présentation générale</i>	1
I. — Lois locales et lois globales	1
II. — Densités microscopiques et macroscopiques	1
B. — <i>Enoncé des lois locales macroscopiques</i>	2
I. — Equations de Maxwell macroscopiques	2
II. — Relations liées à l'état de la matière	5
III. — Relation énergétique	6
C. — <i>Vecteurs polaires et vecteurs axiaux</i>	7
I. — Définitions	7
II. — Produit vectoriel $\vec{c}$ de deux vecteurs polaires $\vec{a}$ et $\vec{b}$	8
III. — Nature tensorielle de $\vec{c}$	11
D. — <i>Tenseurs</i>	12
I. — Introduction	12
II. — Système d'axes rectilignes en géométrie affine	14
Définition et ordre d'un tenseur (14). Covariance et contravariance (15). Multiplication contractée (16). Capacités et densités scalaires (17). Capacités et densités tensorielles (18).	
III. — Système d'axes curvilignes en géométrie affine	18
Nouvelle définition d'un tenseur (18). Les dérivées des composantes d'un tenseur ne forment pas un tenseur (19). Combinaisons de dérivées formant un tenseur (20).	
IV. — Système d'axes curvilignes quelconques en géométrie métrique	23
Définition des g_{ik} formant le tenseur métrique fondamental (23). Propriétés et rôles des g_{ik} (24).	
V. — Système d'axes curvilignes orthogonaux en géométrie métrique	27
VI. — L'aspect tensoriel des grandeurs électriques (espace à trois dimensions)	29
VII. — Peut-on démontrer les équations de Maxwell?	31
VIII. — L'aspect tensoriel relativiste des grandeurs électriques	35
IX. — Conclusions	39
E. — <i>Produit de vecteurs</i>	40
I. — Produit scalaire	41
Produit scalaire de deux vecteurs polaires (41). Produit scalaire de deux vecteurs axiaux (41). Produit scalaire d'un vecteur polaire par un vecteur axial (41).	

II. — Flux d'un vecteur	42
Flux d'un vecteur polaire (42). Flux d'un vecteur axial (43). Les deux types de surface (44).	
III. — Produit vectoriel	44
Produit vectoriel de deux vecteurs polaires (44). Produit vectoriel d'un vecteur polaire et d'un vecteur axial (44). Produit vectoriel de deux vecteurs axiaux (46).	
IV. — Nature vectorielle d'un rotationnel	46
Rotationnel d'un vecteur polaire (46). Rotationnel d'un vecteur axial (46).	
F. — <i>Théorèmes généraux</i>	47
I. — Théorème de Gauss	47
II. — La notion de flux d'induction magnétique au travers d'un contour	47
III. — La circulation du champ électrique	48
IV. — La circulation du champ magnétique	49
V. — Grandeurs intervenant dans les théorèmes généraux	49
G. — <i>Relations de passage d'un milieu à un autre</i>	49
I. — Déplacement électrique	50
II. — Induction magnétique	51
III. — Champ électrique	51
IV. — Champ magnétique	52
V. — Grandeurs intervenant dans les relations générales de passage	53
H. — <i>Thermodynamique, énergies, forces</i>	55
I. — Les principes et leurs conséquences	55
II. — L'énergie et les potentiels thermodynamiques	57
III. — Forces	58
DEUXIÈME PARTIE. — <i>Electrostatique</i>	61
A. — <i>Généralités</i>	61
I. — Définition du domaine	61
II. — Relations générales	61
III. — Notion de potentiel électrique	62
IV. — Énergies	64
Énergie libre (64). Énergie électrique de Gibbs (65).	
V. — Programme de travail	65
B. — <i>Electrostatique du vide</i>	66
I. — Equations de Laplace et Poisson	66
II. — Unicité de la solution	66
III. — Déplacement, champ et potentiel électriques	68
Cas d'une charge isolée (68). Ensemble de charges (71). Répartition continue d'une densité de charge (72). Quelques exemples (73).	
IV. — Énergie libre $\mathcal{F}_e$	76
Expression de $\mathcal{F}_e$ (76). Cas d'une particule isolée (77). Cas d'une particule ponctuelle isolée (78). Ensemble de particules électriquement rigides (78). Ensemble de charges ponctuelles (79). Relation avec $\mathcal{G}_e$ (80). Conclusion (80).	
V. — Forces	81
Cas d'un ensemble de charges ponctuelles (81). Loi de Coulomb (82). Densité de force (82). Tensions de Maxwell (82).	
VI. — Dipôles	85
VII. — Multipôles	86
Présentation générale (86). Rôle de la charge totale (87). Moment dipolaire et son rôle (87). Moment quadrupolaire et son rôle (89). Représentation du moment quadrupolaire (90). Moment quadrupolaire d'un atome (92).	
C. — <i>Conducteurs en équilibre dans le vide</i>	93
I. — Cadre de l'exposé et définitions	93

II. — Propriétés des conducteurs en équilibre (aspect macroscopique)	93
Intérieur d'un conducteur (93). Surface d'un conducteur (94).	
III. — Propriétés des conducteurs en équilibre (indications sur l'aspect microscopique)	95
Intérieur d'un conducteur (95). Surface d'un conducteur (95). Energies (96). Pression électrostatique (98).	
IV. — Influence électrique ($\varrho_v=0$)	98
Aspect qualitatif (99). Les coefficients d'influence C_{ij} ($\varrho_v=0$) (100). Les coefficients de potentiels a_{ij} (102).	
V. — Méthodes de calcul	102
Théorèmes d'unicité de la solution (103). Généralités sur les méthodes de calcul (104). Méthode de séparation des variable ($\varrho_v=0$) (104). Résolution mathématique de l'équation de Laplace (112). Méthode des images (113). Méthode des fonctions de Green (118). Méthode des fonctions analytiques ($\varrho_v=0$) (121). Méthode de relaxation ($\varrho_v=0$) (128). Cuve analogique ($\varrho_v=0$) (132).	
VI. — Condensateurs	133
Définition (133). Les différentes notions de capacité (135). Calcul de la capacité de différents condensateurs de première espèce (135). Calcul de la capacité d'un condensateur de deuxième espèce (137). Groupement de condensateurs en parallèle (139). Mise en série de deux condensateurs (140). Les « condensateurs d'espèce zéro » (141).	
VII. — Energie électrostatique ($\varrho_v=0$)	143
Expressions générales (143). Energie d'un condensateur (143).	
VIII. — Forces entre conducteurs	144
Expressions générales (144). Les charges sont maintenues constantes (145). Les potentiels sont maintenus constants (147).	
D. — Diélectriques et conducteurs	148
I. — Polarisation des diélectriques	148
Présentation générale (148). Un exemple de calcul de moment dipolaire (150). Le vecteur polarisation diélectrique $\vec{P}$ et les différents types de diélectriques (151). Les charges fictives de polarisation (152).	
II. — Champ et déplacement	154
Cas général (154). Cas des diélectriques idéaux isotropes (155). Cas général des diélectriques idéaux (155). Relations locales pour les différents milieux (156).	
III. — Condition de passage d'un milieu à un autre	157
Cas général (157). Conditions de passage entre diélectriques (157). Passage d'un conducteur en équilibre à un diélectrique quelconque (158). Passage d'un conducteur en équilibre à un diélectrique idéal isotrope (159). Résumé des conditions de passage entre différents milieux (160).	
IV. — Répartition des grandeurs électriques entre des conducteurs en équilibre et des diélectriques idéaux isotropes	160
Conditions générales (160). Condensateur plan infini avec un diélectrique idéal isotrope (160). Condensateur plan infini comprenant plusieurs lames de diélectriques idéaux isotropes (161). Morceau de diélectrique idéal isotrope immergé dans un autre diélectrique idéal isotrope. Facteur de dépolarisation (163).	
V. — Energie électrostatique	168
Cas général des phénomènes réversibles (168). Expressions intégrales de F_e (169). Variation des énergies en fonction de la température pour un diélectrique idéal isotrope (169). Energie électrique que l'on peut attribuer à un morceau de diélectrique (171).	
VI. — Forces dans les diélectriques	174
Densité de force électrostatique dans les fluides diélectriques idéaux isotropes (174). Pression électrostatique à la surface de séparation de deux fluides (179). Déplacement de fluide diélectrique (181). Tenseur	

de Maxwell dans un fluide diélectrique idéal (183). Contribution électrostatique aux contraintes élastiques dans un solide (185). Résultante des forces électrostatiques agissant sur un morceau de diélectrique solide (185).	
VII. — Machines électrostatiques	187
Machine électrostatique à influence (187). Machine de Félici (188).	
E. — <i>Le courant électrique</i>	189
I. — Densité de courant	189
Définition (189). Equation de continuité (190).	
II. — Loi d'Ohm en absence d'induction magnétique	190
Conducteur uniforme (190). Conducteur non uniforme (191). Cas où les variations spatiales du champ électrique sont « suffisamment grandes » (192). Influence de l'induction magnétique (193).	
III. — Distribution de courant et de potentiel dans un conducteur obéissant à la loi Ohm et traversé par un courant stationnaire	194
Conditions à l'intérieur d'un conducteur uniforme (194). Conditions de passage entre deux conducteurs uniformes (194). Conditions de passage d'un milieu conducteur à un milieu diélectrique idéal (195). Résolution complète d'un exemple (197).	
TROISIÈME PARTIE. — <i>Magnétostatique</i>	201
A. — <i>Généralités</i>	201
I. — Définition du domaine	201
II. — Relations générales et théorème d'Ampère	201
III. — Lignes de courant, tubes de courant, éléments de courant	203
IV. — La notion de potentiel vecteur	204
V. — Energie	205
Energie libre (205). Energie magnétique de Gibbs (207).	
B. — <i>Magnétostatique du vide</i>	208
I. — Le potentiel vecteur $\vec{A}$	208
Relations générales et définition de $\vec{A}_1$ et $\vec{A}_0$ (208). Etude de $\vec{A}_0$ (209). Etude des $\vec{A}_1$ (211). Forme générale possible de $\vec{A}$ (211). Potentiel vecteur relatif à un circuit réel (212).	
II. — L'induction magnétique $\vec{B}$	213
III. — Le champ (ou excitation) magnétique $\vec{H}$	214
IV. — Le potentiel magnétique $\mathcal{V}$	214
V. — Exemples de calcul de champ magnétique	219
Utilisation de la loi de Biot et Savart (219). Utilisation du potentiel magnétique (220). Utilisation du théorème d'Ampère (225).	
VI. — Les masses magnétiques	226
Potentiel magnétique dû à une boucle élémentaire de courant. Notion de moment magnétique (227). Notion de masses magnétiques (228). Présentation de la magnétostatique basée sur la notion de masse magnétique (229).	
VII. — Energies magnétiques	232
Energie libre magnétostatique $\mathcal{F}_m$ (232). Energie de Gibbs magnétique (233). Cas de l'utilisation des masses magnétiques (233).	
VIII. — Forces magnétiques	234
Force agissant sur un élément de courant (234). Force agissant sur une particule (237). Force élémentaire agissant sur un élément de courant et due à un autre élément de courant (237). Cas de l'utilisation des masses magnétiques (237). Tensions de Maxwell (238).	
C. — <i>Circuits électriques dans le vide</i>	240
I. — Cadre de l'exposé et définitions	240
II. — Flux d'induction au travers d'un circuit électrique	240
III. — Flux propre et flux extérieur	242

IV. — Inductance mutuelle	243
Définition (243). Etude de M_{KJ} ($K \neq J$) (243). Calcul des inductances mutuelles de circuits « suffisamment fins » (244).	
V. — Inductance propre	248
Définition (248). Etude de l'inductance propre (248). Calcul des inductances propres (249).	
VI. — Les expressions des différents types de flux	255
VII. — Energie d'un ensemble de circuits	256
VIII. — Détermination des forces agissant sur les circuits	256
Travail de la force agissant sur un élément de circuit (256). Force agissant sur un élément de circuit (259). Travail des forces agissant sur l'ensemble d'un circuit (259). Force agissant sur l'ensemble d'un circuit (260).	
IX. — Forces agissant sur les particules d'un conducteur soumis à un champ magnétique	262
Définitions (262). Conducteur immobile par rapport au repère R. Effet Hall (262). Conducteur mobile par rapport au repère R (265). Conclusions (266).	
D. — Matières aimantées et conducteurs	267
I. — Aimantation de la matière	267
L'intensité d'aimantation $\vec{M}$ (267). Aspect tensoriel (268). Programme de travail (269).	
II. — Présentation de l'aimantation de la matière au moyen des courants fictifs ampériens	269
Les densités de courants fictifs $\vec{J}_a$ et $\vec{J}_{sa}$ (269). Induction magnétique (273). Champ (ou excitation) magnétique (274). Cas des substances magnétiques idéales isotropes (275). Cas général des substances magnétiques idéales (276). Relations locales pour les principaux milieux (277).	
III. — Passage d'un milieu à l'autre	277
Cas général (277). Substances aimantées idéales isotropes (278). Résumé des conditions de passage entre substances aimantées (278).	
IV. — Présentation de l'aimantation de la matière au moyen des masses magnétiques fictives	280
Les masses magnétiques fictives ρ_{ma} et σ_{ma} (280). Champ magnétique (281). Induction magnétique (282).	
V. — Relations entre les représentations du magnétisme et celles de l'électrostatique	283
Différence entre les deux représentations de la matière aimantée (283). Analogie entre la magnétostatique et l'électrostatique (285). Exemples d'application des deux représentations (286).	
VI. — Equilibre des substances aimantées idéales isotropes	289
Conditions générales (289). Morceau de substance aimantée idéale isotrope, sans courants, immergé dans une autre substance aimantée idéale isotrope — Facteur de dépolarisation (289).	
VII. — Energie magnétostatique	291
Cas général des phénomènes réversibles (291). Expressions intégrales de F_m (291). Energie magnétique que l'on peut attribuer à un morceau de substance aimantée (292).	
VIII. — Forces dans les substances magnétiques	295
Densité de force magnétostatique dans les fluides idéaux (295). Tenseur de Maxwell (295). Résultante des forces magnétostatiques agissant sur un morceau de matière aimantée solide (296).	
IX. — Substances ferromagnétiques	296
Propriétés générales (296). Détermination du point de fonctionnement (297). Pertes par hystérésis (298). Calcul des aimants permanents (299). Circuits magnétiques (302).	

QUATRIÈME PARTIE — <i>Etats quasi stationnaires</i>	305
A. — <i>Définition</i>	305
B. — <i>Relations générales</i>	306
C. — <i>La loi de Faraday</i>	307
I. — <i>Enoncé</i>	307
II. — <i>Caractère relatif du champ $\vec{E}$</i>	308
III. — <i>Démonstration de la loi de Faraday</i>	309
CINQUIÈME PARTIE — <i>Les phénomènes variables en fonction du temps—Propagation</i>	314
A. — <i>Les équations de base</i>	314
I. — <i>Equations de Maxwell</i>	314
II. — <i>Equation régissant le champ électrique $\vec{E}$</i>	314
III. — <i>Equation régissant le champ magnétique $\vec{H}$</i>	315
IV. — <i>Les potentiels $\vec{A}$, V et les transformations de jauge</i>	316
V. — <i>Equation régissant le potentiel vecteur $\vec{A}$</i>	316
VI. — <i>Equation régissant le potentiel scalaire V</i>	317
VII. — <i>Echanges d'énergie</i>	317
VIII. — <i>Introduction de la notion d'une vitesse de propagation dans le vide</i>	318
IX. — <i>Simplification d'écriture des équations dans le cas du vide</i>	319
B. — <i>Détermination des potentiels dans le cas des substances idéales isotropes uniformes</i>	320
I. — <i>Phénomènes indépendants du temps</i>	320
II. — <i>Résultats valables pour les phénomènes dépendant du temps. Les potentiels retardés</i>	321
III. — <i>Justification des expressions des potentiels retardés.</i>	322
C. — <i>Electromagnétisme relativiste</i>	327
I. — <i>Présentation succincte de la relativité restreinte</i>	327
Postulats de la relativité restreinte (327). Transformation de Lorentz (328). Critique de la notion de simultanéité (329). Critique de la notion de longueur (329). Critique de la notion d'invariant (330). Formes tensorielles (330). Application aux grandeurs mécaniques (331).	
II. — <i>Application de la relativité à l'électromagnétisme du vide</i>	333
Présentation générale (333). Electromagnétisme relativiste du vide (333). Conséquence de la transformation de Lorentz (337).	
D. — <i>Phénomènes de propagation par onde plane</i>	341
I. — <i>Propagation par onde plane</i>	341
Définition (341). Onde plane sinusoïdale (342). Vitesse de phase, paquet d'ondes et vitesse de groupe (343).	
II. — <i>Propagation par onde plane électromagnétique dans un milieu uniforme idéal isotrope isolant</i>	344
Rappel des équations générales (345). Comportement du champ électrique (345). Comportement du champ magnétique (348). Aspect intrinsèque des phénomènes (349). Considérations énergétiques (351).	
III. — <i>Propagation par onde plane électromagnétique dans un milieu uniforme idéal isotrope et résistant.</i>	351
Equations générales (351). Comportement du champ électrique (352). Comportement du champ magnétique (353). Considérations énergétiques (354). Aspect intrinsèque (355). Cas où $\gamma/\omega\epsilon$ est grand devant l'unité (357). Cas où $\gamma/\omega\epsilon$ est petit devant l'unité (358).	
IV. — <i>Constitution du rayonnement lumineux</i>	359
E. — <i>Courants de Foucault et chauffage par induction</i>	359
I. — <i>Présentation physique des phénomènes</i>	359
II. — <i>Etude d'une plaque d'épaisseur infinie</i>	360
Définition du problème (360). Etude des composantes normales (361). Etude des composantes tangentielles (362). Puissance dissipée (363). Utilisation du vecteur de Poynting (364). Aspect physique des phénomènes (364).	

III. — Etude d'une plaque d'épaisseur constante finie	364
IV. — Etude d'un barreau cylindrique	370
Définition du problème (370). Etude des composantes radiales (371). Etude des composantes tangentielles (371). Puissance dissipée (372).	
F. — <i>Effet de peau</i>	374
I. — Description physique du phénomène	374
II. — Effet de peau au voisinage d'une surface plane d'un conducteur de grande épaisseur	375
III. — Effet de peau dans une plaque d'épaisseur constante finie	381
IV. — Effet de peau dans un fil à section circulaire	384
G. — <i>Transmission d'une onde électromagnétique d'un milieu à un autre</i>	387
I. — Définition du problème	388
II. — Aspect géométrique des ondes-réponse	389
Fréquence des ondes-réponse (390). Les ondes-réponse sont à phases multilinéaires (390). Relations entre les champs électrique et magné- tique (393). Aspect géométrique de l'onde réfléchie (395). Aspect géométrique de l'onde transmise dans un milieu isolant (395). Aspect géométrique de l'onde transmise dans un milieu conducteur (398). Résumé des résultats relatifs à l'aspect géométrique des différentes ondes (399).	
III. — Energétique des ondes-réponse	399
Résultats généraux (399). Transmission de l'énergie d'un milieu isolant à un autre milieu isolant (403). Transmission de l'énergie d'un milieu isolant à un milieu bon conducteur (406). Energie transmise d'un milieu isolant à un milieu bon conducteur (409). Densité superficielle de courant dans les bons conducteurs (410).	
IV. — Bons conducteurs et conducteurs parfaits	412
Définitions (412). Champ électrique (413). Champ magnétique (414). Echanges énergétiques (414). Méthode de résolution d'un problème (414).	
H. — <i>Propagation guidée</i>	415
I. — Introduction	415
II. — <i>Lame d'ondes</i>	415
Définition d'un premier problème (416). Solution du premier problème (416). Etude d'une « lame de vide » (418). Remarques générales (420).	
III. — <i>Guide d'ondes à section rectangulaire</i>	420
Introduction (420). Comportement du champ électrique (421). Com- portement du champ magnétique (422). Longueur d'onde apparente et vitesse de phase (423). Ondes électriquement transversales (TE) et ondes magnétiquement transversales (TM) (423). Puissance trans- mise (425).	
IV. — <i>Guide d'ondes à section circulaire</i>	425
Introduction (425). Onde magnétiquement transversale (426). Onde électriquement transversale (428). Résolution d'un problème donné (428).	
V. — <i>Guide d'ondes à section quelconque</i>	429
Introduction et définition du problème (429). Ondes magnétiquement transversales (429). Ondes électriquement transversales (431). Ondes électriquement et magnétiquement transversales (TEM) (432). Utili- sation d'un guide d'ondes à section quelconque (433).	
VI. — <i>Câble coaxial</i>	434
Définition et introduction du problème (434). Ondes magnétiquement transversales (434). Ondes électriquement transversales (435). Ondes électriquement et magnétiquement transversales (435).	

VII. — Lignes de transmission	436
Introduction et présentation (436). Etablissement des équations de base (438). Résolution des équations de base (439). Comparaison des solutions « genre ligne » et « genre circuit » (442). Relation entre le formalisme des guides d'ondes et celui des lignes de transmission (444).	
VIII. — Prise en compte de conducteurs réels	445
IX. — Cavités	445
I. — <i>Phénomènes d'émission</i>	446
I. — Présentation	446
II. — Dipôle oscillant	446
III. — Les potentiels V et $\vec{A}$	447
Principes généraux (447). Calcul du potentiel V (448). Calcul de $\vec{A}$ (449).	
IV. — Calculs des différents champs	449
Le champ électrique $\vec{E}$ (449). L'induction magnétique $\vec{B}$ (450).	
V. — Cas où les distances entre la source et le point d'observation sont faibles devant la longueur d'onde	451
VI. — Cas où les distances entre la source et le point d'observation sont grandes devant la longueur d'onde	451
VII. — Echanges d'énergie	453
VIII. — Antennes	454
SIXIÈME PARTIE — <i>Electromagnétisme microscopique</i>	455
A. — <i>Présentation et définition de l'échelle microscopique</i>	455
B. — <i>Les équations de Maxwell à l'échelle microscopique</i>	456
I. — Enoncé des lois microscopiques	456
II. — Calcul et propriétés des moyennes des grandeurs microscopiques	456
III. — Liens entre les grandeurs microscopiques et les grandeurs macroscopiques	457
IV. — Comparaison entre ces grandeurs	459
V. — Conditions de correspondance	460
VI. — Energies	461
VII. — Choix du système de représentation	462
C. — <i>Application aux supraconducteurs</i>	462
I. — Rappel des faits expérimentaux relatifs au plomb	462
Effet de la température (462). Influence du champ magnétique (463).	
II. — Un aperçu théorique	463
Longueur de London et effet Meissner (464). Longueur de cohérence (465). Les deux types de supraconducteurs (466). Etat mixte et vortex (468). Conclusions (470).	
BIBLIOGRAPHIE	471
INDEX	473

PREMIÈRE PARTIE

LOIS GÉNÉRALES

A. — PRÉSENTATION GÉNÉRALE

I. — LOIS LOCALES ET LOIS GLOBALES

Le but de l'électromagnétisme est de rechercher les lois qui régissent les phénomènes électriques au sens large du terme ; ces lois peuvent avoir, soit un *aspect global et intégral* : l'intensité du courant qui parcourt tel circuit est égal à ..., soit un *aspect local* : la densité de courant en un point M de tel milieu s'obtient à partir de la valeur du champ électrique en ce point au moyen de Les lois globales sont celles qui, d'une part, intéressent l'utilisateur d'un dispositif et qui, d'autre part, peuvent être directement établies par l'expérience, mais par contre seule la connaissance des lois locales permet de comprendre et de prévoir *dans tous les cas* le fonctionnement et les propriétés d'un ensemble. C'est pour cela que dans cet ouvrage nous avons choisi de baser l'exposé sur l'utilisation exclusive de lois locales.

II. — DENSITÉS MICROSCOPIQUES ET MACROSCOPIQUES

Les lois locales sont obligatoirement liées à des densités volumiques : par exemple les phénomènes électrostatiques sont régis par la densité volumique de charge électrique ρ . La définition de cette densité ρ exige beaucoup de soins. Sans prendre de précaution, la densité de charge $\rho(M)$ en un point M est « définie » par la limite de $\frac{dQ}{dv}$, dQ étant la quantité de charge électrique contenue dans le volume dv , quand la surface qui limite ce volume tend vers le point M . Cette « définition » est ambiguë et, lorsqu'elle est prise au sens strict mathématique, entraîne un grand nombre de complications souvent inutiles. Considérons, à titre d'exemple, un solide métallique ; dans les exposés élémentaires, on indique que dans ce type de conducteur ρ est nul ; il est facile de s'opposer à cette proposition quand on sait que le solide considéré peut être décrit comme un ensemble d'ions positifs entre lesquels se trouvent des électrons négatifs, les distances mutuelles entre les ions les plus proches étant de l'ordre de $3 \text{ \AA}$; quand le point M est à l'extérieur des ions positifs et si le volume dv est négligeable devant $(3 \text{ \AA})^3$, $\rho(M)$ est négatif ; sous la même condition pour dv , ρ est positif en d'autres points. Le paramètre essentiel dans la détermination de ρ est donc l'ordre de grandeur de dv :