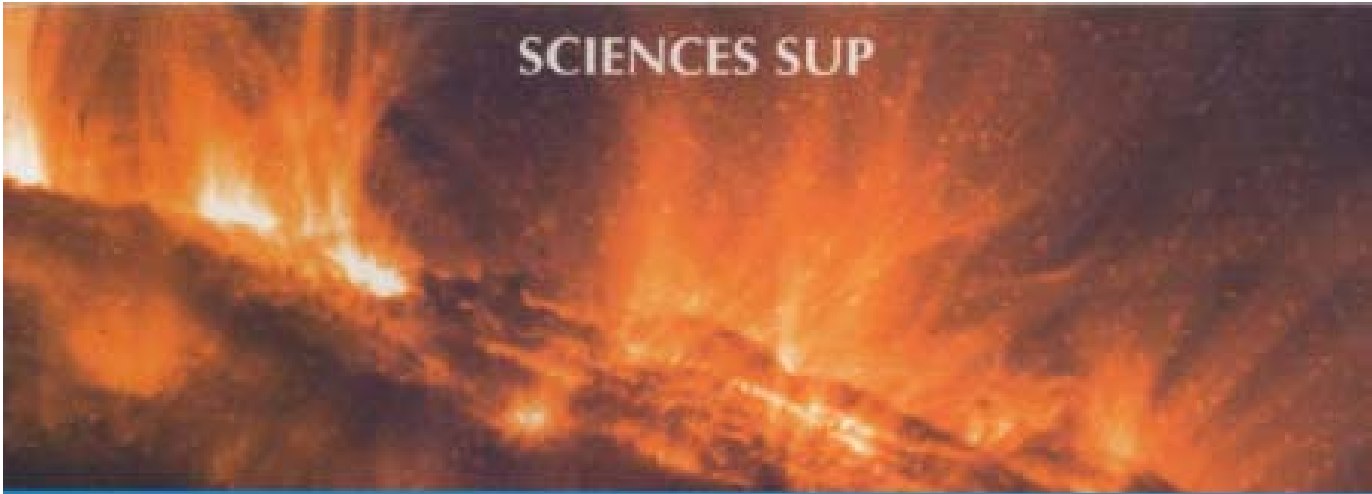




SCIENCES SUP

Cours et exercices corrigés

IUT • 1^{er} Cycle • Licence

LES PHÉNOMÈNES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

*Paul Lorrain
Dale R. Corson
François Lorrain*

DUNOD

Table des matières

Les astérisques indiquent les parties qui peuvent être omises sans perdre la cohérence d'ensemble.

POUR COMMENCER	XI
AVANT-PROPOS	XIII
POUR L'ENSEIGNANT	XV
LISTE DE SYMBOLES	XVII
CHAPITRE 1 • OPÉRATEURS VECTORIELS	
1.1 Algèbre vectorielle	2
1.2 Le gradient $\text{grad } f$	3
1.3 Le flux	5
1.4 La divergence $\text{div } \mathbf{B}$	5
1.5 Le théorème de la divergence	7
1.6 L'intégrale curviligne $\int_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$. Champs conservatifs	8
1.7 Le rotationnel $\text{rot } \mathbf{B}$	8
1.8 Le théorème de Stokes	11
1.9 L'opérateur laplacien Δ	12
1.10 Scalaires et vecteurs en coordonnées sphériques	12
1.11 Résumé	16
EXERCICES	18
CHAPITRE 2 • LA REPRÉSENTATION COMPLEXE	
2.1 Les nombres complexes	22
2.2 La représentation complexe	24
2.3 Usage de la représentation complexe	26
2.4 Produit de variables en représentation complexe	27
2.5 Quotient de variables en représentation complexe	29
2.6 Vecteurs tournants	29
2.7 Notations	30
2.8 Résumé	30
EXERCICES	31
CHAPITRE 3 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : LOI DE COULOMB ET THÉORÈME DE GAUSS	
3.1 Le champ électrique $\mathbf{E}$	34
3.2 La loi de Coulomb	35

3.3	Le principe de superposition	36
3.4	Le potentiel électrique V et le rotationnel de E	41
3.5	Le champ électrique à l'intérieur et à l'extérieur de corps macroscopiques	46
3.6	Le théorème de Gauss	47
3.7	Résumé	57
	EXERCICES	58
CHAPITRE 4 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : ÉQUATIONS DE POISSON ET DE LAPLACE.		
CIRCUITS ÉLECTRIQUES. CONDUCTION		
4.1	Les équations de Poisson et de Laplace	67
4.2	Conservation de la charge électrique	72
4.3	La loi d'Ohm	73
4.4	* Circuits électriques. Lois de Kirchhoff	76
4.5	La conduction	78
4.6	Conducteurs isolés dans des champs statiques	82
4.7	Résumé	83
	EXERCICES	84
CHAPITRE 5 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : LES MULTIPÔLES ÉLECTRIQUES		
5.1	Le dipôle électrique	89
5.2	* Le quadrupôle électrique linéaire	92
5.3	* Les multipôles électriques	94
5.4	* Le champ électrique à l'extérieur d'une distribution de charge, développée en multipôles	95
5.5	* Résumé	102
	EXERCICES	103
CHAPITRE 6 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : ÉNERGIE, CAPACITÉ ET FORCES		
6.1	Énergie potentielle en termes de charges q et potentiel V	107
6.2	Énergie potentielle en termes de champ électrique E	110
6.3	La capacité d'un conducteur isolé	113
6.4	La capacité entre deux conducteurs	114
6.5	* La constante de temps	116
6.6	* Le courant alternatif dans un condensateur	117
6.7	Forces électriques sur un conducteur	119
6.8	Le calcul des forces électriques par la méthode du travail virtuel	121
6.9	Résumé	122
	EXERCICES	123
CHAPITRE 7 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : MATÉRIAUX DIÉLECTRIQUES, CHARGES LIÉES		
ET INDUCTION ÉLECTRIQUE D		
7.1	Les trois processus fondamentaux de polarisation	130
7.2	La polarisation électrique P	130
7.3	Charges libres et liées	130
7.4	Le champ électrique d'un diélectrique polarisé	133
7.5	Le théorème de Gauss dans les diélectriques	134
7.6	Les équations de Poisson et de Laplace pour V dans les diélectriques	135
7.7	L'induction électrique D . La divergence de D	135

7.8	La susceptibilité diélectrique χ_e	137
7.9	La permittivité relative ϵ_r	137
7.10	La densité de courant de déplacement $\partial \mathbf{D} / \partial t$	142
7.11	Résumé	143
	EXERCICES	145
CHAPITRE 8 • CHAMPS ÉLECTRIQUES : DIÉLECTRIQUES RÉELS, CONDITIONS DE CONTINUITÉ À UNE INTERFACE. ÉNERGIE EMMAGASINÉE		
8.1	* Les diélectriques réels	149
8.2	Les conditions aux limites à une interface	154
8.3	L'énergie potentielle d'une distribution de charge en présence de diélectriques	157
8.4	Les forces électriques en présence de diélectriques	160
8.5	Résumé	160
	EXERCICES	161
CHAPITRE 9 • * CHAMPS ÉLECTRIQUES : LES IMAGES. L'ÉQUATION DE LAPLACE EN COORDONNÉES CARTÉSIENNES		
9.1	* Les images	167
9.2	* La résolution de l'équation de Laplace en coordonnées cartésiennes	172
9.3	* Résolution de l'équation de Laplace avec un tableur	177
9.4	* Résumé	182
	EXERCICES	182
CHAPITRE 10 • * CHAMPS ÉLECTRIQUES : L'ÉQUATION DE LAPLACE EN COORDONNÉES SPHÉRIQUES. L'ÉQUATION DE POISSON POUR E		
10.1	* Résolution de l'équation de Laplace en coordonnées sphériques. L'équation de Legendre	187
10.2	* L'équation de Poisson pour E dans des champs électrostatiques	194
10.3	* Résumé	196
	EXERCICES	197
CHAPITRE 11 • * RELATIVITÉ : LA TRANSFORMATION DE LORENTZ		
11.1	* Référentiels et observateurs	200
11.2	* La transformation galiléenne	201
11.3	* Le principe de relativité	201
11.4	* La transformation de Lorentz	202
11.5	* Transformation d'une longueur. La contraction de Lorentz	205
11.6	* Transformation d'un intervalle de temps. Dilatation du temps	206
11.7	* Transformation d'une vitesse	209
11.8	* L'invariance de la charge électrique	210
11.9	* Résumé	210
	* EXERCICES	212
CHAPITRE 12 • * RELATIVITÉ : MASSE, IMPULSION, FORCE ET ÉNERGIE		
12.1	* La masse relativiste	217
12.2	* L'impulsion relativiste	218
12.3	* La force relativiste	219
12.4	* L'énergie relativiste $\mathcal{E} = mc^2$	219

12.5 * Transformation d'une force	222
12.6 * Le photon	223
12.7 * Résumé	223
EXERCICES	225
CHAPITRE 13 • * RELATIVITÉ : LES CHAMPS E ET B D'UNE CHARGE ÉLECTRIQUE EN MOUVEMENT	
13.1 * La force sur q	229
13.2 * Champs électrique et magnétique	232
13.3 * La force sur Q	238
13.4 * Transformation de Q , E , B , A et V	239
13.5 * Résumé	242
EXERCICES	243
CHAPITRE 14 • CHAMPS MAGNÉTIQUES : L'INDUCTION MAGNÉTIQUE B ET LE POTENTIEL VECTEUR A	
14.1 * Les monopôles magnétiques	245
14.2 L'induction magnétique B . La loi de Biot et Savart	246
14.3 La divergence de B	254
14.4 Le potentiel vecteur A	255
14.5 Résumé	261
EXERCICES	262
CHAPITRE 15 • CHAMPS MAGNÉTIQUES : LE POTENTIEL VECTEUR A. LE THÉORÈME DE LA CIRCULATION D'AMPÈRE	
15.1 L'intégrale curviligne de $A \cdot d\mathbf{l}$ sur une courbe fermée	267
15.2 Le laplacien de A	270
15.3 La divergence de A	270
15.4 Le rotationnel de B . Le théorème de la circulation d'Ampère	271
15.5 Résumé	275
EXERCICES	275
CHAPITRE 16 • * CHAMPS MAGNÉTIQUES : MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES	
16.1 * Les différents types de matériaux magnétiques	279
16.2 * Les courants équivalents. La loi de Biot et Savart revisitée. La divergence de B	281
16.3 * Le champ magnétique H . Le rotationnel de H . Le théorème de la circulation d'Ampère revu et corrigé	283
16.4 * La susceptibilité magnétique χ_m et la perméabilité relative μ_r	285
16.5 * Les conditions aux limites pour B et H	286
16.6 * B en fonction de H dans les matériaux ferromagnétiques	288
16.7 * Le barreau aimanté	290
16.8 * Résumé	292
EXERCICES	293
CHAPITRE 17 • CHAMPS MAGNÉTIQUES : FORCES MAGNÉTIQUES SUR DES CHARGES ET DES COURANTS	
17.1 La force de Lorentz	299
17.2 La force magnétique sur un fil parcouru par un courant	307

17.3 La force magnétique entre deux circuits fermés	307
17.4 La force magnétique sur une distribution volumique de courant	310
17.5 La loi d'Ohm pour des conducteurs en mouvement	312
17.6 Charges électrostatiques de volume à l'intérieur de conducteurs en mouvement dans des champs magnétiques	322
17.7 Résumé	323
EXERCICES	324
CHAPITRE 18 • CHAMPS MAGNÉTIQUES : LA LOI DE L'INDUCTION DE FARADAY	
18.1 La loi de l'induction de Faraday pour les champs $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Force électromotrice induite	333
18.2 La loi d'induction de Faraday pour des $\mathbf{B}$ variables. Le rotationnel de $\mathbf{E}$	339
18.3 Le champ électrique $\mathbf{E}$ exprimé en termes des potentiels V et $\mathbf{A}$	341
18.4 Les champs $\mathbf{E}$, $-\text{grad } V$, $-\partial\mathbf{A}/\partial t$ et $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$	345
18.5 * Lien entre les deux formes de la loi de l'induction de Faraday	346
18.6 Cinq équations defs.	348
18.7 Résumé	348
EXERCICES	349
CHAPITRE 19 • * CHAMPS MAGNÉTIQUES : INDUCTANCES PROPRE ET MUTUELLE	
19.1 * L'inductance mutuelle M	357
19.2 * L'inductance propre L	360
19.3 * Constante de temps et impédance Z d'une bobine à inductance	362
19.4 * Résumé	363
EXERCICES	364
CHAPITRE 20 • CHAMPS MAGNÉTIQUES : ÉNERGIE MAGNÉTIQUE ET FORCES MAGNÉTIQUES MACROSCOPIQUES	
20.1 Emmagasinement d'énergie dans un circuit inductif	371
20.2 Densité d'énergie magnétique	374
20.3 Inductance propre d'une distribution volumique de courant	376
20.4 Force et couple entre deux circuits parcourus par du courant	377
20.5 Pression magnétique	382
20.6 Forces magnétiques sur des conducteurs en mouvement dans des champs magnétiques	384
20.7 Résumé	384
EXERCICES	385
CHAPITRE 21 • LES ÉQUATIONS DE MAXWELL	
21.1 L'équation pour le rotationnel de $\mathbf{B}$	391
21.2 Les équations de Maxwell sous forme locale	392
21.3 Les équations de Maxwell sous forme intégrale	393
21.4 La loi de conservation de la charge	396
21.5 Les équations de Maxwell sont redondantes !	396
21.6 La dualité	397
21.7 La condition de Lorentz	398
21.8 Résumé	399
EXERCICES	400

CHAPITRE 22 • ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES : DANS LE VIDE, LES ISOLANTS ET LES CONDUCTEURS

22.1 Le spectre électromagnétique	407
22.2 Les ondes	409
22.3 Les ondes électromagnétiques dans le vide	411
22.4 Le théorème de Poynting	415
22.5 Les ondes électromagnétiques dans les isolants	416
22.6 Les ondes électromagnétiques dans les conducteurs	418
22.7 Résumé	421
EXERCICES	423

CHAPITRE 23 • ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES : RÉFLEXION ET RÉFRACTION

23.1 Les lois de Descartes pour la réflexion et la réfraction	431
23.2 Les équations de Fresnel	433
23.3 Réflexion et réfraction à l'interface entre deux isolants	435
23.4 Réflexion et réfraction sur la surface d'un bon conducteur	444
23.5 Résumé	446
EXERCICES	447

CHAPITRE 24 • ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES : ONDES GUIDÉES

24.1 Les câbles à fils parallèles	451
24.2 Les câbles coaxiaux	452
24.3 Les lignes microruban	455
24.4 Les guides d'onde métalliques creux	457
24.5 Les guides d'onde optiques	461
24.6 Résumé	466
EXERCICES	467

CHAPITRE 25 • LE RAYONNEMENT D'UN DIPÔLE ÉLECTRIQUE. ANTENNES

25.1 Le rayonnement d'un dipôle électrique	470
25.2 Les antennes	482
25.3 Les antennes quart d'onde et demi-onde	484
25.4 Réseaux d'antennes	487
25.5 Résumé	492
EXERCICES	492

ANNEXE A • PRÉFIXES ET SYMBOLES DU SYSTÈME INTERNATIONAL D'UNITÉS (SI)

ANNEXE B • TABLE DE CONVERSION SI-CGS

ANNEXE C • HISTOIRE DES ÉQUATIONS DE « MAXWELL »

ANNEXE D • CHAMPS ET POTENTIELS RETARDÉS

ANNEXE E • DÉFINITIONS ET IDENTITÉS VECTORIELLES, CONSTANTES PHYSIQUES ET ÉQUATIONS DE MAXWELL

RÉPONSES	509
BIBLIOGRAPHIE	513
INDEX	517