

Table des matières

Chapitre 1. Électrostatique	17
1/ Résumé de cours.....	17
1.1 Interactions coulombiennes	17
1.1.1 <i>Charges électriques</i>	17
1.1.2 <i>Loi de Coulomb</i>	17
1.1.3 <i>Force électrostatique résultante entre plusieurs charges</i>	19
1.2 Champ et potentiel électrostatiques	19
1.2.1 <i>Cas d'une charge ponctuelle</i>	19
1.2.2 <i>Cas d'une distribution de charges</i>	20
1.3 Énergie potentielle électrostatique	22
1.3.1 <i>Cas d'une charge ponctuelle</i>	22
1.3.2 <i>Cas d'une distribution de charges</i>	22
1.4 Énergie électrostatique	23
1.4.1 <i>Expression</i>	23
1.4.2 <i>Densité d'énergie électrostatique</i>	24
1.5 Circulation du vecteur champ électrostatique.....	24
1.5.1 <i>Lignes de champ et surfaces équipotentielles</i>	24
1.5.2 <i>Flux du champ électrostatique</i>	25
1.5.3 <i>Circulation et différence de potentielle</i>	25
1.6 Théorème de Gauss	27
1.6.1 <i>Formes intégrale et locale du théorème de Gauss</i>	27
1.6.2 <i>Équations de Poisson et de Laplace</i>	27
1.7 Dipôle et quadripôle électrostatiques.....	28
1.7.1 <i>Moment dipolaire électrostatique</i>	28
1.7.2 <i>Champ et potentiel d'un dipôle électrostatique</i>	29
1.7.3 <i>Potentiel électrique d'une répartition de charges ponctuelles</i>	29
1.7.4 <i>Distributions unipolaire, dipolaire et quadripolaire</i>	30
1.8 Conducteurs en équilibre électrostatique.....	32
1.8.1 <i>Théorème de Coulomb et pression électrostatique</i>	32
1.8.2 <i>Influence de deux conducteurs chargés, théorème de Faraday</i>	33
1.8.3 <i>Coefficients de capacité et d'influence de plusieurs conducteurs chargés en équilibre</i>	34
1.9 Condensateurs	35
1.9.1 <i>Capacité d'un condensateur</i>	35
1.9.2 <i>Énergie emmagasinée par un condensateur</i>	36

1.9.3 Association de condensateurs	36
1.10 Théorèmes de transformation intégrale	37
1.10.1 Théorème de Stokes (théorème du rotationnel)	37
1.10.2 Théorème de Green-Ostrogradsky (théorème de la divergence).....	37
2/ Exercices	37
A/ Connaissances essentielles du cours	37
A.1/ QCM (Questions à choix multiples).....	37
A.2/ Vrai ou faux	38
A.3/ QRD. (Questions à Réponses Démonstrées)	40
3.1. Équation différentielle vérifiée par une surface équipotentielle	40
3.2. Expression de la propriété locale du champ électrostatique	40
3.3. Proportionnalité entre flux magnétique et angle solide	40
3.4. Flux électrostatique dû à une charge placée en dehors d'une surface fermée	40
3.5. Flux électrostatique dû à une charge placée à l'intérieur d'une surface fermée	40
3.6. Champ électrostatique créé par un plan infini chargé, théorème de Gauss	40
3.7. Discontinuité de la composante normale du champ électrostatique	40
3.8. Continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrostatique	41
3.9. Champ électrostatique créé par un fil rectiligne infini uniformément chargé	41
3.10. Champ électrostatique créé par une sphère uniformément chargée	41
3.11. Champ électrostatique créé par coquille sphérique chargée.....	41
3.12. Énergie potentielle d'un système de charges ponctuelles	41
3.13. Capacité d'un condensateur plan	42
3.14. Force électrostatique agissant sur une armature plane	42
3.15. Pression électrostatique	42
3.16. Capacité d'une sphère conductrice isolée chargée	42
3.17. Coefficients de capacité et d'influence de sphères conductrices	42
3.18. Capacité d'un condensateur contenant une lame de diélectrique	43
3.19. Charge portée par des sphères conductrices chargées par contact	43
3.20. Champ créé par une distribution linéaire de deux charges ponctuelles	43
3.21. Champ créé par une distribution linéaire de trois charges ponctuelles	43
3.22. Travail fourni par un opérateur pour déplacer une charge	44
3.23. Système de charges ponctuelles liées	44
3.24. Charge totale portée par un fil conducteur rectiligne	44
3.25. Champ électrostatique créé par une distribution linéique de charges	44
3.26. Champ électrostatique créé par un fil conducteur rectiligne de charge q	44
3.27. Champ électrostatique créé par une portion de fil circulaire chargé	45
3.28. Champ électrostatique créé par un fil conducteur circulaire chargé.....	45
3.29. Différence de potentiel entre deux points d'états électriques différents	45

Table des matières	11
3.30. Champ électrostatique en un point de l'espace à trois dimensions	45
3.31. Potentiel électrostatique créé par un fil cylindrique infini chargé	46
3.32. Potentiel électrostatique créé par deux plaques infinies chargées	46
3.33. Énergies emmagasinées par des condensateurs connectés en équilibre	46
B/ Applications du cours	47
B.1/ Force électrostatique entre trois charges ponctuelles	47
B.2/ Champ et potentiel électrostatiques créés par deux charges ponctuelles	48
B.3/ Champ et potentiel créés par quatre charges ponctuelles	48
B.4/ Champ et potentiel d'un dipôle électrostatique	49
B.5/ Champ et potentiel d'un quadripôle électrostatique linéaire	50
B.6/ Couple de forces exercé sur un dipôle électrostatique	52
B.7/ Champ et potentiel créés par un fil rectiligne chargé infiniment long	52
B.8/ Champ et potentiel créés par un fil circulaire chargé	53
B.9/ Champ et potentiel créés par un disque chargé	53
B.10/ Champ et potentiel créés par un plan infini chargé	54
B.11/ Champ et potentiel créés par une sphère chargée	54
B.12/ Champ et potentiel créés par une sphère creuse chargée	56
B.13/ Champ et potentiel créés par deux cylindres coaxiaux chargés	57
B.14/ Coefficients de capacité et d'influence de deux sphères chargées	57
B.15/ Capacité d'un condensateur plan contenant une lame métallique	58
B.16/ Capacité d'un condensateur cylindrique	59
B.17/ Énergie électrostatique d'une sphère uniformément chargée	60
C/ Test de connaissances	61
C.1/ Étude d'un condensateur sphérique	61
C.2/ Interaction entre deux dipôles électrostatiques	62
C.3/ Étude d'une distribution non uniforme de charges réparties en volume	63
3/ Solutions des exercices	65
A/ Connaissances essentielles du cours	65
B/ Applications du cours	89
C/ Test de connaissances	132
Chapitre 2. Magnétostatique	145
1/ Résumé de cours	145
1.1. Champ et force magnétiques	145
1.1.1 Aimant, aiguille aimantée	145
1.1.2 Interaction aimant-aiguille aimantée : champ magnétique	146
1.1.3 Caractéristiques du champ magnétique	146
1.1.4 Spectre magnétique, champ magnétique uniforme	147

1.1.5	<i>Force magnétique : force de Lorentz, force de Laplace</i>	147
1.1.6	<i>Densité de courant et équation de continuité</i>	149
1.1.7	<i>Loi de Biot et Savart</i>	150
1.2.	Champs magnétiques créés par des courants	151
1.2.1	<i>Champ magnétique créé par un courant filiforme rectiligne</i>	151
1.2.2	<i>Champ magnétique créé par un courant filiforme circulaire</i>	152
1.2.3	<i>Champ magnétique créé par un solénoïde long</i>	153
1.2.4	<i>Principe de Curie</i>	154
1.3.	Propriétés locales du champ magnétique	154
1.3.1	<i>Divergence et flux du champ magnétique</i>	154
1.3.2	<i>Circulation du champ magnétique: théorème d'Ampère</i>	155
1.3.3	<i>Rotationnel du champ magnétique</i>	155
1.4.	Potentiel vecteur	156
1.4.1.	<i>Définition</i>	156
1.4.2.	<i>Jauge de Coulomb</i>	156
1.4.3.	<i>Circulation du potentiel vecteur</i>	157
1.4.4.	<i>Équation locale du potentiel vecteur</i>	157
1.4.5.	<i>Expression du potentiel vecteur à partir des courants</i>	158
1.4.6.	<i>Analogie potentiel vecteur-potentiel scalaire</i>	158
1.5.	Énergie électromagnétique	159
1.5.1.	<i>Énergie magnétique</i>	159
1.5.2.	<i>Densité d'énergie électromagnétique</i>	160
2/	Exercices	160
A/	Connaissances essentielles du cours	160
A.1/	QCM (Questions à Choix Multiples)	160
A.2/	Vrai ou faux	161
A.3/	QRD (Questions à Réponses Démonstrées)	162
3.1.	<i>Définition légale de l'ampère</i>	162
3.2.	<i>Flux du champ magnétique à travers une surface fermée</i>	162
3.3.	<i>Formulation locale du théorème d'Ampère</i>	162
3.4.	<i>Champ magnétique créé par un fil rectiligne infini, théorème d'Ampère</i>	162
3.5.	<i>Champ magnétique créé par un fil rectiligne de longueur finie</i>	163
3.6.	<i>Potentiel vecteur dû à un solénoïde de longueur infinie</i>	163
3.7.	<i>Circulation du potentiel vecteur le long d'un contour fermé</i>	163
3.8.	<i>Équation locale du potentiel vecteur</i>	163
3.9.	<i>Principe de Curie</i>	164
3.10.	<i>Force de Lorentz agissant sur une particule α</i>	164
3.11.	<i>Équations horaires dans un champ électromagnétique</i>	164
3.12.	<i>Séparation d'isotopes dans un déviateur magnétique</i>	165
3.13.	<i>Nombre de tour de particules chargées dans un cyclotron</i>	165

3.14. <i>Moment de force magnétique</i>	165
3.15. <i>Moment magnétique d'un disque chargé en surface</i>	166
B/ Applications du cours	
B.1/ <i>Déduction de la force de Laplace à partir de la force de Lorentz</i>	166
B.2/ <i>Équilibre d'un conducteur métallique</i>	167
B.3/ <i>Étude de la continuité des composantes champ magnétique</i>	168
B.4/ <i>Vérification de l'invariance de jauge du champ magnétique</i>	168
B.5/ <i>Champ magnétique créé par un fil infini parcouru par un courant</i>	169
B.6/ <i>Potentiel vecteur créé par un fil infini parcouru par un courant</i>	170
B.7/ <i>Champ magnétique créé par une spire circulaire</i>	171
B.8/ <i>Champ magnétique créé par une spire elliptique</i>	172
B.9/ <i>Champ magnétique créé par un solénoïde infini</i>	173
B.10/ <i>Champ magnétique créé par un solénoïde fini</i>	174
B.11/ <i>Mesure du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde</i>	175
B.12/ <i>Uniformité du champ magnétique à l'intérieur d'un solénoïde long</i>	176
B.13/ <i>Effet Hall</i>	177
B.14/ <i>Champ magnétique créé à l'intérieur des bobines de Helmholtz</i>	179
B.15/ <i>Effet cyclotron</i>	180
B.16/ <i>Découverte des isotopes</i>	182
B.17/ <i>Champ magnétique tournant</i>	183
B.18/ <i>Oscillation d'une tige conducteur dans un champ magnétique</i>	185
C/ Test de connaissances	186
C.1/ <i>Spectrographie de masse : séparation des isotopes ^{235}U et ^{238}U</i>	186
C.2/ <i>Analogie dipôle magnétique – dipôle électrique</i>	187
3/ Solutions des exercices	190
A/ <i>Connaissances essentielles du cours</i>	190
B/ <i>Applications du cours</i>	205
C/ <i>Test de connaissances</i>	241
Chapitre 3. Induction électromagnétique	247
1/ <i>Résumé de cours</i>	247
1.1. <i>Phénomène d'induction électromagnétique</i>	247
1.1.1 <i>Mise en évidence expérimentale, définition</i>	247
1.1.2 <i>Flux du champ magnétique</i>	248
1.1.3 <i>Règle du flux maximale</i>	248
1.1.4 <i>Notion de force électromotrice induite, loi de Faraday</i>	249
1.1.5 <i>Notion de courant induit, loi de Lenz</i>	249
1.1.6 <i>Force électromotrice induite et champ électromoteur</i>	250
1.2. <i>Auto-induction</i>	251
1.2.1 <i>Mise en évidence expérimentale, définition</i>	251
1.2.2 <i>Notion de flux propre, inductance</i>	252

1.2.3	<i>Force électromotrice d'auto-induction, loi de Lenz – Faraday</i>	253
1.2.4	<i>Inductance mutuelle, théorème de Neumann</i>	253
1.2.5	<i>Force électromotrice d'induction mutuelle</i>	253
1.2.6	<i>Tension aux bornes d'une bobine, énergie magnétique</i>	255
2/	Exercices	256
A/	Connaissances essentielles du cours	256
A.1/	QCM (Questions à Choix Multiples)	256
A.2/	Vrai ou faux	257
A.3/	QRD (Questions à Réponses Démonstrées)	258
3.1.	<i>Puissance dissipée par effet joule sur des rails de Laplace</i>	258
3.2.	<i>Force électromotrice induite dans une bobine en rotation</i>	259
3.3.	<i>Force électromotrice induite dans un disque en rotation</i>	259
3.4.	<i>Inductance d'un solénoïde infiniment long</i>	259
3.5.	<i>Inductance d'un câble coaxial</i>	260
3.6.	<i>Inductance d'un cadre rectangulaire</i>	260
3.7.	<i>Inductance mutuelle de deux spires circulaires concentriques</i>	261
3.8.	<i>Inductance mutuelle de deux bobines coaxiales</i>	261
3.9.	<i>Vitesse limite d'un cadre en chute dans un champ magnétique</i>	262
3.10.	<i>Inductance mutuelle de deux spires circulaires coaxiales</i>	262
3.11.	<i>Champ magnétique à l'intérieur d'une bobine toroïdale, théorème d'Ampère</i>	263
3.12.	<i>Inductance d'une bobine toroïdale</i>	264
3.13.	<i>Inductance mutuelle entre une bobine toroïdale et un fil infini</i>	264
3.14.	<i>Force électromotrice induite dans un circuit fixe, induction de Neumann</i>	264
3.15.	<i>Force électromotrice induite dans un circuit mobile, induction de Lorentz</i>	265
3.16.	<i>Énergie magnétique emmagasinée, inductance d'un câble coaxial</i>	266
B/	Applications du cours	266
B.1/	<i>Loi de Lenz</i>	266
B.2/	<i>Tige homogène en mouvement sur des rails parallèles</i>	267
B.3/	<i>Principe de l'alternateur</i>	268
B.4/	<i>Induction dans une bobine placée à l'intérieur d'un solénoïde</i>	268
B.5/	<i>Vérification de la loi de Lenz – Faraday</i>	269
B.6/	<i>Mouvement d'un cadre dans un champ magnétique uniforme</i>	270
B.7/	<i>Phénomène d'auto-induction</i>	271
B.8/	<i>Circuit fixe dans un champ magnétique variable : loi de Faraday</i>	272
B.9/	<i>Rails de Laplace</i>	273
B.10/	<i>Champ magnétique créé par les bobines de Helmholtz</i>	274
B.11/	<i>Roue de Barlow</i>	275
C/	Test de connaissances	276
	Test n°1	276
C.1/	<i>Mouvement d'une tige conducteur dans un champ magnétique</i>	276

C.2/ <i>Quantité d'électricité induite dans un solénoïde</i>	277
Test n°2/	278
C.1/ <i>Mouvement de rotation d'une bobine dans un champ magnétique</i>	278
C.2/ <i>Mouvement de rotation d'une spire dans un champ magnétique</i>	278
C.3/ <i>Mouvement de translation d'une tige dans un champ magnétique</i>	279
3/ Solutions des exercices	280
A/ <i>Connaissances essentielles du cours</i>	280
B/ <i>Applications du cours</i>	294
C/ <i>Test de connaissances</i>	307
Annexes	323
A.1/ <i>Formulaire de mathématique</i>	323
A.1.1. <i>Relation de transformation trigonométrique</i>	323
A.1.2. <i>Développements en série</i>	324
A.2/ <i>Vecteurs dans les systèmes de coordonnées</i>	325
A.2.1. <i>Systèmes de coordonnées cartésiennes</i>	325
A.2.2. <i>Systèmes de coordonnées cylindriques</i>	326
A.2.3. <i>Systèmes de coordonnées sphériques</i>	328
A.2.4. <i>Règles d'orientation dans l'espace</i>	330
A.2.5. <i>Angle solide</i>	331
A.2.6. <i>Produit scalaire de deux vecteurs</i>	333
A.2.7. <i>Produit vectoriel de deux vecteurs</i>	333
A.2.8. <i>Circulation d'un champ de vecteur</i>	334
A.2.9. <i>Flux d'un champ de vecteur</i>	335
A.3/ <i>Opérateurs vectoriels</i>	335
A.3.1. <i>Opérateur gradient</i>	335
A.3.2. <i>Opérateur divergence</i>	336
A.3.3. <i>Opérateur rotationnel</i>	337
A.3.4. <i>Opérateur Laplacien</i>	338
A.3.6. <i>Relations en algèbre vectorielle</i>	339
A.4/ <i>Théorèmes de transformations intégrales</i>	340
A.4.1. <i>Théorème de Stokes</i>	340
A.4.2. <i>Théorème de Green-Ostrogradsky</i>	340
A.5/ <i>Coin biographie</i>	341
A.6. <i>Chronologie des théorèmes et lois fondamentaux en électromagnétisme</i>	348
Bibliographie sommaire	351
Index	353