

J.-J. Bonnet

Physique générale

Charges • courants • atomes • solides

Cours

Dunod Université

TABLE DES MATIÈRES

Notations	XII
Constantes physiques fondamentales	XII
Avant-propos	XV
CHAPITRE 1 : Trois questions pour commencer	1
1. Qu'est-ce qu'un électron ?	1
2. Qu'est-ce qu'un atome ?	4
3. Qu'est-ce qu'un métal ?	8
CHAPITRE 2 : Un peu de mathématique pour comprendre la physique	11
1. Fonction d'une variable - dérivée - différentielle - intégrale	11
1.1. Graphes et fonctions mathématiques	11
1.2. Intérêt physique et définition de la dérivée d'une fonction par rapport à sa variable	12
1.3. Dérivée - différentielle - intégrale	13
2. Le vecteur seul	13
2.1. Définition générale simple	13
2.2. Un exemple type d'utilisation simple du vecteur : repérage d'un point	14
2.3. Des vecteurs un peu <i>spéciaux</i> : les pseudo-vecteurs	15
2.4. Vecteur surface et pseudo-vecteur surface	15
2.4.1. Vecteur surface d'une surface fermée	15
2.4.2. Vecteur surface d'une surface non fermée limitée par une courbe	16
3. Vecteur - vecteur de base - composantes - coordonnées	18
3.1. Vecteur de base	18
3.2. Système de coordonnées cartésiennes dans l'espace	19
3.3. Coordonnées sphériques dans l'espace	21
3.3.1. Définition	21
3.3.2. Coordonnées cartésiennes locales	21
3.4. Coordonnées cylindriques dans l'espace	22
3.4.1. Définition	22
3.4.2. Coordonnées cartésiennes locales	23

4. Produit scalaire de deux vecteurs	24
5. Produit vectoriel de deux vecteurs	25
6. Fonctions de plusieurs variables	26
6.1. Fonction de deux variables : représentation géométrique	26
6.2. Fonction de deux variables : différentielle exacte	27
6.3. Différentielle exacte d'une fonction de trois variables	27
7. Champ de vecteurs	28
7.1. Définition	28
7.2. Lignes de forces d'un champ de vecteurs	28

CHAPITRE 3 : Les opérateurs gradient et divergence 30

1. Le gradient	30
1.1. Gradient d'énergie et escalier	30
1.2. Vecteur gradient d'énergie et courbes de niveau	32
1.3. Définition générale intrinsèque du gradient	34
1.4. Le vecteur gradient en coordonnées cartésiennes	35
1.5. Le vecteur gradient en coordonnées sphériques	36
1.5.1. Cas général	36
1.5.2. Cas particuliers importants :	37
1.5.2.1. Champ de scalaire $f(r) = r$	37
1.5.2.2. Champ de scalaire $f(r) = 1/r$	38
2. La divergence	38
2.1. Divergence et jardinage	38
2.2. Divergence d'un vecteur et flux de ce vecteur à travers une surface	39
2.3. Définition intrinsèque de l'opération divergence	42
2.3.1. Dans quel <i>paysage</i> doit-on se placer pour définir la divergence d'un vecteur A ?	42
2.3.2. Définition	43
2.4. Le théorème de Green-Ostrogradsky	44
2.5. La divergence en coordonnées cartésiennes	45
2.6. La divergence en coordonnées sphériques dans l'espace	47
2.7. La divergence en coordonnées cylindriques dans l'espace	48
2.8. Un peu de nomenclature pour conclure ce chapitre	49

CHAPITRE 4 : Propriétés des charges ponctuelles immobiles 51

1. La force électrique : loi de Coulomb	51
1.1. Loi de Coulomb	51
1.2. Réaction de la charge qui <i>subit</i>	52
1.3. Exemple : force de Coulomb entre un électron et un proton	52
1.4. Force de Coulomb entre plus de deux charges : principe de superposition	54
1.5. Loi de Coulomb dans un matériau	56

2. Le champ électrique	57
2.1. Cas d'une charge ponctuelle	58
2.2. Mise en évidence expérimentale du champ électrique	60
2.3. Relation entre le champ $\vec{E}$ et la force de Coulomb $\vec{F}$ sur une charge q	60
3. La variation d'énergie potentielle d'une charge ponctuelle	61
4. La variation de potentiel entre deux points de l'espace où règne un champ	63
5. Résumé des événements du chapitre	64
 CHAPITRE 5 : Représentation des potentiels et des énergies potentielles des charges ponctuelles	 66
1. Origine du potentiel et de l'énergie potentielle	66
1.1. Potentiel nul à très grande distance de la charge : choix de l'origine	66
1.2. Représentation du potentiel	67
1.3. Énergie potentielle d'une charge ponctuelle $+q'$ placée dans le champ d'une autre charge $-q$	68
2. Lignes de champ ou de force et surfaces équipotentielles	70
2.1. Lignes de champ et lignes de force	70
2.2. Surfaces équipotentielles	72
3. Relation entre lignes de force et les surfaces équipotentielles	72
4. Potentiel électrostatique d'un ensemble de charges fixes	74
4.1. Cas de deux charges négatives fixes $-q_1$ et $-q_2$	74
4.2. Autres cas possibles	75
5. Potentiel électrostatique d'un ensemble de charges ponctuelles dans un plan	77
 CHAPITRE 6 : Conducteur - métal et équilibre électrostatique	 78
1. Le métal, un réservoir d'électrons	78
1.1. Rappel : potentiel et énergie potentielle électrostatique de l'électron dans le métal	78
1.2. Grandeur microscopique et macroscopique : définition de l'équilibre électrostatique d'un conducteur	79
1.3. L'électron dans le conducteur : aspect quantique	80
1.3.1. La fonction d'onde de l'électron	80
1.3.2. L'électron dans une bande d'énergie	81
1.4. Le métal : réservoir d'électrons. Calcul de la barrière de potentiel à la surface	81
2. Distribution des charges, du champ et du potentiel dans le cas d'un conducteur à l'équilibre électrostatique	83
2.1. Distribution des charges	83

2.2. Champ électrique et conducteur chargé à l'équilibre électrostatique : aspect qualitatif	85
2.2.1. Champ électrique en un point infiniment près de la surface où il y a des charges	85
2.2.2. Le champ électrique est-il défini sur la surface où il y a une densité surfacique ?	85
2.2.3. Le champ à l'intérieur du conducteur chargé à l'équilibre	86
2.2.4. Et le potentiel ?	86
3. Champ électrique et potentiel en un point où se trouvent des charges	87
4. Relations locales de l'électrostatique	89
4.1. Relation entre la densité volumique de charges ρ ($C \cdot m^{-3}$) en ce point et le champ électrique $\vec{E}$ ($volt \cdot m^{-1}$) en ce point	89
4.2. Relation entre le champ électrique $\vec{E}$ ($volt \cdot m^{-1}$) en un point et le potentiel V (volt) en ce point	89
4.3. Relation directe entre la densité volumique de charge ρ ($C \cdot m^{-3}$) et le potentiel V (volt) en un point	89
5. Relations <i>intégrales</i> de l'électrostatique	90
5.1. Le théorème de Gauss	90
5.2. Comment utiliser le théorème de Gauss ?	91
5.3. Relation <i>intégrale</i> champ potentiel	95
6. Un exemple important : le champ et le potentiel électrostatique produit par une couche chargée plane et indéfinie	96
6.1. Description de la couche chargée	96
6.2. Remarques de symétrie concernant la direction et le sens du champ électrique $\vec{E}$	97
6.3. Utilisation de l'équation de Maxwell-Gauss pour l'expression de $\vec{E}$	97
6.4. Utilisation du théorème de Gauss pour calculer l'expression du champ électrique $\vec{E}$	99
6.5. Calcul de la variation du potentiel suivant $O\vec{x}$	102
6.5.1. Dans la couche chargée	102
6.5.2. A l'extérieur de la couche chargée	103
6.6. Synthèse des résultats concernant le champ et le potentiel électrostatique produit par une couche chargée positive indéfinie	105
CHAPITRE 7 : Capacité - influence - condensateur	107
1. Capacité d'un conducteur isolé chargé placé dans le vide	107
2.1. Définition	107
1.2. Unité de capacité	107
1.3. Exemple de la sphère	108
2. Influence électrique totale et condensateur	108
2.1. Le phénomène d'influence totale entre deux conducteurs chargés	108
2.2. Quelques remarques générales sur le phénomène d'influence électrostatique	109
2.2.1. Origine des charges <i>créées</i> par influence	109

2.2.2. Exemple d'application de l'influence électrostatique	110
2.3. Définition d'un condensateur	112
2.4. Calcul de la capacité du condensateur plan	114
2.4.1. Méthode générale	114
2.4.2. Calcul	115
2.5. Groupements de condensateurs	117
2.5.1. Groupements en parallèle	117
2.5.2. Groupements en série	118
3. Condensateur et diélectrique	119
3.1. Définition et propriétés d'un matériau isolant ou diélectrique	119
3.2. Condensateur avec diélectrique entre ses armatures	121
4. Énergie électrostatique	122
4.1. Décharge d'un condensateur	122
4.2. Énergie électrostatique d'un condensateur isolé	122
4.3. Énergie électrostatique d'un condensateur chargé	123
4.4. Comment <i>stocker</i> le maximum d'énergie électrostatique : la <i>condensation</i> de l'électricité	124
4.4.1. Sphère unique chargée	124
4.4.2. Deux sphères en influence totale	125
4.5. Mais où est donc localisée l'énergie électrostatique ?	126
5. Attention ! Un condensateur peut <i>claquer</i> !	127
6. Condensateurs et circuits intégrés : la technologie métal - oxyde - semi-conducteur (M.O.S.)	128
CHAPITRE 8 : Transport du courant électrique - loi d'Ohm	130
1. Le courant électrique dans un conducteur : généralités	130
2. Vitesse d'entraînement des charges, densité de charges mobiles, vecteur densité de courant	132
2.1. Vitesse d'entraînement des charges : $\vec{v}$	132
2.2. Densité de charges mobiles	132
2.3. Vecteur densité de courant	133
3. Mobilité des électrons dans un conducteur	134
3.1. Et si les électrons étaient libres ?	134
3.2. Mais les électrons subissent des chocs !	134
4. Loi d'Ohm	135
4.1. Forme locale et générale de la loi d'Ohm	135
4.2. Cas particulier : calcul de la résistance d'une portion de conducteur homogène, cylindrique, parcouru par un courant constant	135
5. Associations de résistances	137
5.1. Montage en série	137

5.2. Montage en parallèle	137
6. Loi de Joule	137
7. Isolant - conducteur - semi-conducteur	139
7.1. Résistivité des matériaux en $\text{ohm} \cdot \text{m}$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	139
7.2. Les semi-conducteurs	140
CHAPITRE 9 : Le modèle atomique de Bohr	142
1. Le mystère des spectres de raies au XIX ^e siècle	142
2. Description de l'atome d'hydrogène, résumé du modèle de Bohr	143
3. Calcul du rayon r de la trajectoire et de la vitesse v de l'électron	144
3.1. Première relation classique entre v et r	144
3.2. Première relation de quantification de Bohr	145
3.3. Calcul du rayon r et de la vitesse v de l'électron	145
4. Énergie de l'électron dans le modèle de Bohr	146
5. Une unité d'énergie bien adaptée à l'atome : l'électron-volt	150
5.1. Expérience	150
5.2. Définition de l'électron-volt	151
6. Spectre d'émission de l'atome d'hydrogène	152
6.1. La relation de Bohr-Einstein ou le concept de photon	152
6.2. Les séries de raies d'émission	153
CHAPITRE 10 : De l'atome isolé au solide	156
1. Remarques préliminaires	156
1.1. A propos du modèle de Bohr	156
1.2. Aspect classique du moment cinétique d'un électron par rapport à un point	156
1.3. Le moment magnétique d'un électron en mouvement circulaire	157
2. Les nombres quantiques des électrons d'atomes libres	158
2.1. Le nombre quantique principal n	158
2.2. Le nombre quantique orbital ℓ	159
2.3. Le nombre quantique magnétique m_ℓ	159
2.4. Le nombre quantique de spin m_s	160
3. Le principe d'exclusion de Pauli	160
4. Structure atomique et tableau périodique	161
4.1. Énergie de l'électron dans l'atome	161
4.2. Répartition des électrons sur la couche (n) et sous-couches (ℓ) pour les atomes à plus de deux électrons	162
4.3. Nombre maximal d'électrons suivant les différentes couches et sous-couches	162

4.4. Quelques définitions	163
4.5. Importance de la couche périphérique d'un atome	164
4.6. La classification périodique des éléments	166
5. Énergies d'ionisation et propriétés des éléments	168
6. Les bandes d'énergie dans les solides	169
6.1. L'exemple du silicium	169
6.2. Isolant, conducteur, semi-conducteur	171
 CHAPITRE 11 : Électrons et bandes d'énergie dans le solide	 174
1. Niveau de Fermi - Énergie thermique	174
2. Les matériaux semi-conducteurs	175
2.1. Les éléments semi-conducteurs	175
2.2. Les semi-conducteurs composés	175
3. Arrangement géométrique des atomes dans les semi-conducteurs	175
3.1. La liaison covalente ou monopolaire	175
3.2. Les semi-conducteurs de la colonne IV.A	176
3.3. Les semi-conducteurs composés III-V	177
4. Électronique des semi-conducteurs	178
4.1. Semi-conducteur intrinsèque et extrinsèque	178
4.2. Semi-conducteur de type <i>P</i> ou de type <i>N</i>	178
4.3. Conduction par électrons et trous	178
4.4. Électrons et trous dans le modèle des bandes	179
4.5. Concentration des porteurs dans un semi-conducteur	180
4.6. Évolution comparée de la conductivité d'un métal et d'un semi-conducteur avec la température	181
4.6.1. Cas du métal	181
4.6.2. Cas du semi-conducteur	182
5. Électronique des semi-conducteurs extrinsèques	182
5.1. Matériau <i>n</i>	182
5.2. Matériau <i>p</i>	183
5.3. Impuretés dans un semi-conducteur et le modèle atomique de Bohr	184
 CHAPITRE 12 : La jonction <i>P-N</i>	 188
1. Description d'une jonction <i>P-N</i>	188
2. Étude électrostatique de la jonction <i>P-N</i>	190
2.1. Étude du champ électrique dans la jonction	190
2.2. Étude de l'évolution du potentiel suivant <i>Ox</i>	192

2.3. Commentaires sur le potentiel de diffusion V_d	192
2.3.1. Ordre de grandeur de V_d	192
2.3.2. Nature électrostatique de V_d	195
2.3.3. Relation champ E_x - potentiel V_x	195
2.3.4. Potentiel V_x et énergie potentielle	195
3. Jonction P - N et bande d'énergie	196
3.1. Jonction de deux métaux	196
3.2. Alignement des niveaux de Fermi dans la jonction P - N	198
4. Fonctionnement de la jonction P - N	200
4.1. Polarisation en direct de la jonction P - N	200
4.2. Jonction P - N polarisée en inverse	201
4.3. La caractéristique tension-courant de la jonction	201
Index	205