

mini manuel

d'Électromagnétisme

Cours + Exercices

3^e édition

Michel Henry

Maître de conférences à l'ESPE des Pays de Loire
Agrégé de physique

Abdelhadi Kassiba

Professeur à l'université du Mans

DUNOD

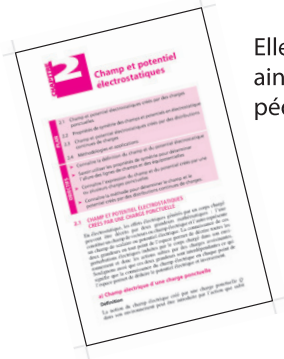
© Dunod, Paris, 2009, 2013, 2020
ISBN 978-2-10-080830-4

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

Comment utiliser le Mini-Manuel ?

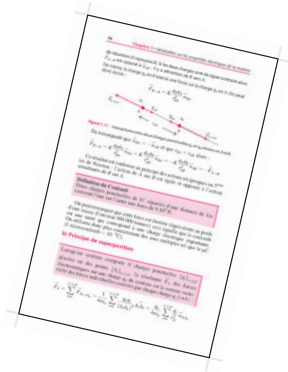
La page d'entrée de chapitre



Elle donne le plan du cours, ainsi qu'un rappel des objectifs pédagogiques du chapitre.

Le cours

Le cours, concis et structuré, expose les notions importantes du programme.



Les rubriques



Une erreur à éviter



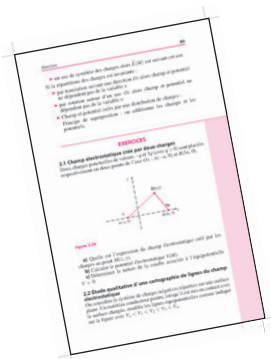
Un peu de méthode



Un exemple pour comprendre



Les points clés à retenir



Les exercices, QCM ou QROC

Ils sont proposés en fin de chapitre, avec leur solution, pour se tester tout au long de l'année.

COMPARAISON ENTRE LES CHAMPS ÉLECTROSTATIQUE ET MAGNÉTOSTATIQUE.

Électrostatique	Magnétostatique
Les sources de champs	
Charges fixes Charge $q(P)$ ou densité de charge ρ Un scalaire	Charges mobiles : Densité de courant $\vec{j}$ ou élément de courant $Id\vec{l}(P)$ Un vecteur
Les champs	
Loi de coulomb $\vec{E}(M) = (1/4\pi\epsilon_o) \int \left(\rho(P)dV\vec{PM}/PM^3 \right)$ $\vec{E}$: vecteur vrai (vecteur polaire)	Loi de Biot et Savart $\vec{B}(M) = (\mu_o/4\pi) \int \left(Id\vec{l}(P) \wedge \vec{PM}/PM^3 \right)$ $\vec{B}$: pseudo-vecteur (vecteur axial)
π_S plan de symétrie pour les sources (plan miroir)	
π_S plan de symétrie pour $\vec{E}$ (plan miroir)	π_S plan d'anti-symétrie pour $\vec{B}$ (plan anti-miroir)
π_{AS} plan d'anti-symétrie pour les sources (plan anti-miroir)	
π_{AS} plan d'anti-symétrie pour $\vec{E}$ (plan anti-miroir)	π_{AS} plan de symétrie pour $\vec{B}$ (plan miroir)
Circulation sur un contour fermé	
Circulation conservative $\oint \vec{E}.d\vec{l} = \oint -dV = 0$ $\vec{E}$ dérive d'un potentiel scalaire V	Circulation non conservative $\oint \vec{B}.d\vec{l} = \mu_o \sum I_{enlacé}$ <i>Théorème d'Ampère</i>
Flux à travers une surface fermée	
Flux non conservatif $\oint \vec{E}.d\vec{S} = Q_{int}/\epsilon_o$ <i>Théorème de Gauss</i>	Flux conservatif $\oint \vec{B}.d\vec{S} = 0$

Table des matières

	Comment utiliser le Mini-Manuel ?	V
	Comparaison entre les champs électrostatique et magnétostatique	VI
1	Généralités sur les propriétés électriques de la matière	1
	1.1 Charges électriques	1
	Les deux types de charges électriques	1
	Charges électriques élémentaires	3
	Neutralité électrique d'un corps	4
	1.2 Propriétés électriques de la matière	4
	Électrisation d'un corps	4
	Matériaux conducteurs et isolants	7
	Conservation de la charge électrique	7
	1.3 Densité de charge électrique	8
	Distributions continues de charges avec une densité volumique ρ	8
	Distributions continues de charges avec une densité surfacique σ	10
	Distributions continues de charges avec une densité linéique λ	11
	1.4 Loi de Coulomb	12
	Loi de Coulomb	12
	Principe de superposition	14
	Points-clés	16
	Exercices	16
	Solutions	19
2	Champ et potentiel électrostatiques	25
	2.1 Champ et potentiel électrostatiques créés par une charge ponctuelle	25
	Champ électrique d'une charge ponctuelle	25

Potentiel électrostatique créé par une charge ponctuelle	28
Relations entre champ et potentiel électrostatiques	30
Surfaces équipotentielles	34
Généralisation pour un ensemble de charges ponctuelles : principe de superposition	35
2.2 Propriétés de symétrie	42
Principe de Curie	42
Définition des opérations de symétrie	42
2.3 Champ et potentiel électrostatiques créés par une distribution continue de charges	51
Champ et potentiel créés par un fil chargé	51
Champ et potentiel créés par un disque chargé	58
Cas d'un plan infini chargé en surface	63
Champ et potentiel créés par une distribution volumique de charges	65
Points-clés	67
Exercices	68
Solutions	72
3 Théorème de Gauss	81
3.1 Flux du champ électrostatique créé par une charge ponctuelle	81
Flux d'un champ de vecteur $\vec{A}$	81
Flux du champ électrostatique créé par une charge ponctuelle	85
3.2 Théorème de Gauss	90
Flux du champ électrostatique créé par une distribution de charges	90
Théorème de Gauss	93
Intérêt et utilisation du théorème de Gauss	94
3.3 Applications du théorème de Gauss	95
Champ et potentiel électrostatiques créés par une sphère chargée	95
Champ et potentiel électrostatiques créés par un cylindre chargé	101
Champ et potentiel électrostatiques créés par un fil infini chargé	109

Champ et potentiel électrostatiques créés par un plan infini chargé	111
Champ et potentiel électrostatiques créés par deux plans parallèles portant des charges opposées	116
Points-clés	119
Exercices	120
Solutions	123
4 Conducteurs en équilibre : Condensateurs	129
4.1 Conducteurs en équilibre électrostatique	129
Définition	129
Conséquences	129
Influence électrostatique entre conducteurs	131
Théorème des éléments correspondants	132
Influence électrostatique totale	133
4.2 Condensateurs	136
Définition	136
Capacité d'un condensateur	136
Unité de capacité	139
4.3 Calcul de capacités de condensateurs	140
Méthode de calcul	140
Le condensateur plan	140
Association de condensateurs	141
Points-clés	144
Exercices	144
Solutions	147
5 Le champ magnétique	153
5.1 Les sources de champ magnétique	153
Les aimants : sources de champ magnétique	153
La boussole et les pôles (magnétiques) d'un aimant	153
Action magnétique entre deux aimants	154
Le courant électrique : source de champ magnétique	156
Origine du champ magnétique créé par la matière	156
5.2 Les forces magnétiques	157
La force de Laplace	157
La force de Lorentz	160

	Lien entre Force de Laplace et Force de Lorentz	160
5.3	Le vecteur champ magnétique	164
	Direction et sens du vecteur champ magnétique	164
	Mesure du champ magnétique	164
	Unité et ordre de grandeurs	169
	Points-clés	170
	Exercices	170
	Solutions	172
6	Champ magnétique créé par des courants	177
6.1	Loi de Biot et Savart	177
	Champ magnétique créé par un conducteur filiforme parcouru par un courant	177
	Généralisation de la loi de Biot et Savart	179
6.2	Propriétés de symétrie du champ magnétique	180
6.3	Champ magnétique créé par un courant circulant dans un fil rectiligne	183
	Position du problème	183
	Champ élémentaire créé par un élément de courant Idl situé au point P	185
	Expression du champ magnétique pour un fil fini	187
	Cas du fil infini	187
6.4	Cas de la spire circulaire et des bobines parcourues par un courant	188
	Champ magnétique créé par une spire circulaire	188
	Champ magnétique créé par une bobine plate	195
	Champ magnétique créé par une bobine longue ou solénoïde	198
	Points-clés	203
	Exercices	204
	Solutions	206
7	Théorème d'Ampère	
	Propriétés du champ magnétique	213
7.1	Théorème d'Ampère	213
	Circulation sur un contour fermé du champ magnétique créé par un fil infini parcouru par un courant	213

Généralisation : théorème d'Ampère	215
Intérêt et utilisation du théorème d'Ampère	217
7.2 Exemples d'application du théorème d'Ampère	218
Cas du fil infini parcouru par un courant	218
Cas du solénoïde infini	220
7.3 Flux du champ magnétique	223
Flux magnétique	223
Flux magnétique à travers une surface fermée	224
Points-clés	225
Exercices	226
Solutions	230
Index	239

Généralités sur les propriétés électriques de la matière

PLAN

- 1.1 Charges électriques
- 1.2 Propriétés électriques de la matière
- 1.3 Densité de charge électrique
- 1.4 Loi de Coulomb

OBJECTIFS

- Connaître l'origine du phénomène d'électrisation
- Avoir les notions de base sur les conducteurs et les isolants
- Savoir manipuler les densités de charge et le calcul de charges
- Connaître et savoir appliquer la loi de Coulomb

1.1 CHARGES ÉLECTRIQUES

Les phénomènes d'électrisation de la matière se manifestent dans diverses situations de la vie quotidienne. Ainsi, le toucher d'une carcasse métallique d'une voiture ayant roulé par temps chaud et sec, provoque une désagréable sensation. Un effet similaire peut se produire au contact d'une armoire métallique placée dans une pièce sèche ou bien lorsqu'on retire un pull-over synthétique. Ces constats qualitatifs peuvent être réalisés à partir d'expériences simples. Par exemple, un bâton de verre frotté avec une étoffe de tissu peut attirer des objets légers tels que des morceaux de papiers. La même expérience peut être effectuée lorsqu'un bâton en matière plastique est frotté avec un chiffon de laine. Ces effets sont dus à la manifestation de charges électriques qui apparaissent par frottement ou par contact.

a) Les deux types de charges électriques

L'expérience schématisée *figure 1.1* qui consiste à frotter une règle en matière plastique avec un tissu montre que la règle peut alors attirer des petits morceaux de papier.

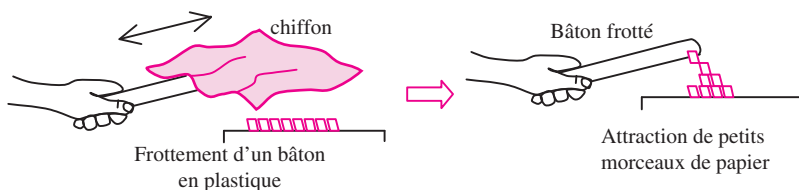


Figure 1.1 Illustration du phénomène d'électrisation. Le bâton est électrisé par frottement : il porte alors une charge électrique.

On dit que le bâton a été *électrisé* par frottement ou bien qu'il porte une *charge électrique* (ou encore qu'il est *chargé*).

Remarque :

Ce phénomène, connu depuis l'Antiquité, se manifeste en particulier sur « l'ambre » qui se traduit en grec par le mot « elektron ». Ce dernier est à l'origine des mots électrisation, électrique, etc.

Dans le cas du bâton de verre ou d'ébonite (résine organique contenant du soufre) électrisé par frottement, on constate que la charge électrique reste localisée à l'endroit frotté. Par contre il est impossible d'électriser une tige de métal tenue à la main car la charge électrique se répartit aussi sur le corps. L'électrisation devient possible si la tige de métal est maintenue à l'aide d'un manche en matière plastique. On constate alors que la charge apportée par frottement se répartit sur toute la tige métallique.

Il est possible d'électriser de petites boules d'aluminium suspendues à un fil de nylon par contact avec un bâton lui-même électrisé. En approchant deux boules électrisées avec le même bâton, on constate qu'elles se repoussent. Par contre dans le cas où l'une des boules est électrisée par le bâton de verre (frotté avec un drap) et l'autre avec le bâton d'ébonite (frotté avec un chiffon de laine) il y a attraction. Le physicien français Du Fay (1733) mettait ainsi en évidence l'existence de deux types de charges électriques.

Il existe deux types de charges électriques :

Deux corps portant le même type de charges électriques se repoussent.

Deux corps portant des charges électriques de types différents s'attirent.

Pour distinguer ces deux types de charges l'une sera notée charge positive, l'autre charge négative.