

Manuel

de

Électro- cinétique

Tamer Bécherrawy

➔ L1/L2

**Cours
+ EXOS**

DUNOD

mini Manuel

de

Électrocinétique

Cours + Exos

Tamer Bécherrawy

Maître de conférences
à l'université de Nancy
et formateur à l'IUFM de Lorraine

DUNOD



Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© Dunod, Paris, 2008
ISBN 978-2-10-053939-0

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.

Table des matières

1	Notions de base	1
1.1	Charges électriques	1
1.2	Champ électrique	5
1.3	Énergie et potentiel électrostatiques	6
1.4	Conducteurs en équilibre et condensateurs	11
1.5	Champ d'induction et flux magnétique	12
1.6	Loi d'induction et inductance	13
	<i>Points-clés</i>	16
	<i>Questions de réflexion</i>	16
	<i>Exercices corrigés</i>	17
	<i>Solutions des exercices</i>	20
2	Conductance et résistance	25
2.1	Intensité et densité de courant	25
2.2	Modèle phénoménologique de conduction, loi d'Ohm	28
2.3	Conduction et temps de collision	32
2.4	Effet Joule	33
2.5	Variation de la résistivité avec la température, la supraconductivité	34
2.6	Conducteurs non ohmiques	37
2.7	Utilisations des résistances	38
	<i>Points-clés</i>	41
	<i>Questions de réflexion</i>	42
	<i>Exercices corrigés</i>	44
	<i>Solutions des exercices</i>	45

3	Courant alternatif	49
3.1	Courant sinusoïdal	49
3.2	Représentation trigonométrique et représentation de Fresnel	51
3.3	Représentation complexe	53
3.4	Effet Joule et valeurs efficaces	59
3.5	Circuit oscillant LC	60
3.6	Circuit oscillant LCR	63
	<i>Points-clés</i>	70
	<i>Questions de réflexion</i>	72
	<i>Exercices corrigés</i>	74
	<i>Solutions des exercices</i>	76
4	Dipôles	87
4.1	Définitions et représentations	87
4.2	Règles de Kirchhoff	90
4.3	Impédance	92
4.4	Association des dipôles	95
4.5	Puissance électrique dans les dipôles	99
4.6	Générateurs comme source de tension	103
4.7	Générateurs comme source de courant	107
4.8	Association des générateurs	108
4.9	Récepteurs	111
4.10	Dipôles non linéaires	114
	<i>Points-clés</i>	117
	<i>Questions de réflexion</i>	117
	<i>Exercices corrigés</i>	118
	<i>Solutions des exercices</i>	121
5	Analyse des circuits	131
5.1	Définitions	131
5.2	Circuit RLC forcé	133
5.3	Résonance dans le circuit RLC	135
5.4	Bilan d'énergie en régime permanent	138
5.5	Application des règles de Kirchhoff	140
5.6	Analyse utilisant la superposition	143

5.7	Théorèmes de Thévenin et de Norton	145
5.8	Courants de mailles et réciprocité	148
5.9	Dualité	150
	<i>Points-clés</i>	152
	<i>Questions de réflexion</i>	153
	<i>Exercices corrigés</i>	154
	<i>Solutions des exercices</i>	156
6	Régimes transitoires	167
6.1	Régimes permanents et régimes transitoires	167
6.2	Circuit RC	170
6.3	Circuit RL	173
6.4	Circuits RLC	175
	<i>Points-clés</i>	177
	<i>Questions de réflexion</i>	178
	<i>Exercices corrigés</i>	179
	<i>Solutions des exercices</i>	181
7	Filtres	187
7.1	Définitions	187
7.2	Fonction de transfert et bande passante	189
7.3	Quadripôles en T	193
7.4	Réponse d'un filtre à un signal	197
7.5	Systèmes non linéaires	199
7.6	Annexe : Intégration complexe	200
	<i>Points-clés</i>	202
	<i>Questions de réflexion</i>	203
	<i>Exercices corrigés</i>	204
	<i>Solutions des exercices</i>	206
	Indications pour les questions de réflexion	217
	Annexes	225
	Index	229

Comment utiliser le Mini-Manuel ?

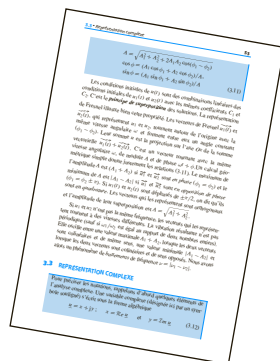
La page d'entrée de chapitre



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



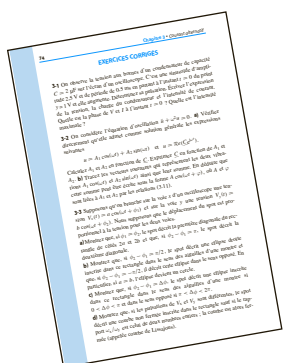
Un peu de méthode



Un exemple pour comprendre



Les points clés à retenir



Les exercices

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

Notions de base

PLAN

- 1.1 Charges électriques
- 1.2 Champ électrique
- 1.3 Énergie et potentiel électrostatiques
- 1.4 Conducteurs en équilibre et condensateurs
- 1.5 Champ d'induction et flux magnétique
- 1.6 Loi d'induction et self inductance

OBJECTIF

- Revoir les notions de base de l'électromagnétisme

1.1 CHARGES ÉLECTRIQUES

a) Notion de charge électrique

Comme la masse, la **charge électrique** est une grandeur caractéristique de la matière. À l'échelle macroscopique, les corps ne portent habituellement aucune charge totale ; nous disons qu'ils sont **neutres**. En frottant certains corps, ils deviennent chargés. L'expérience montre l'existence de deux types de charge : la charge **positive** et la charge **négative**. Des corps portant des charges de même signe se repoussent et des corps portant des charges de signes opposés s'attirent.

À l'échelle microscopique, les atomes sont formés par des protons positifs, des neutrons neutres et des électrons négatifs. L'électrification par frottement s'explique par le transfert d'électrons d'un corps à un autre. Les interactions des particules chargées sont responsables de la

liaison des électrons aux atomes et des atomes aux atomes pour former les molécules. Elles sont aussi fondamentalement à l'origine des propriétés de la matière macroscopique telles que la cohésion des solides et des liquides, les frottements, l'élasticité, la viscosité etc.

b) Force de Coulomb

En 1785, Coulomb a réussi à mesurer la force d'interaction de deux petites boules de charges q_1 et q_2 en utilisant une balance de torsion (Fig. 1.1a).

Il a établi que *cette force est dans la direction de la ligne qui les joint, proportionnelle à q_1 et q_2 et inversement proportionnelle au carré de la distance r_{12} qui les sépare*. Si la charge q_1 est en $\mathbf{r}_1$ et la charge q_2 est en $\mathbf{r}_2$ (Fig. 1.1b), la force d'action de q_1 sur q_2 s'écrit sous la forme vectorielle

$$\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = K_o q_1 q_2 \frac{\mathbf{e}_{12}}{r_{12}^2} \equiv \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_o} \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}^3}, \quad \mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1.1)$$

où $\mathbf{e}_{12}$ est le vecteur unitaire dans la direction $\mathbf{r}_{12}$. K_o est une constante positive. Son remplacement par $1/4\pi\epsilon_o$ est pour une raison de commodité (système *rationalisé* ou de *Heaviside*). Inversement la charge q_2 agit sur q_1 avec une force

$$\mathbf{F}_{2 \rightarrow 1} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_o} \frac{\mathbf{r}_{21}}{r_{12}^3} = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_o} \frac{\mathbf{r}_{12}}{r_{12}^3} = -\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} \quad (1.2)$$

où $\mathbf{r}_{21} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = -\mathbf{r}_{12}$.

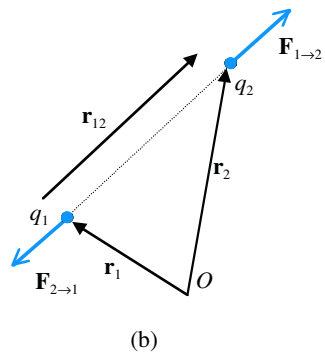
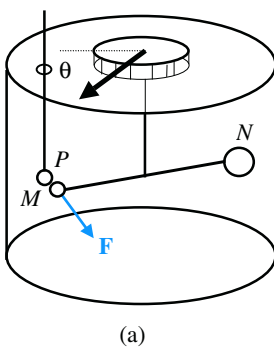


Figure 1-1 Force de Coulomb : **a)** Dans l'expérience de Coulomb, une charge q_1 est portée par une boule P fixe et une charge q_2 est portée par une boule M fixée à l'extrémité d'une tige suspendue à un fil de torsion. L'interaction de ces charges est déterminée en mesurant l'angle de torsion du fil. **b)** Forces d'interaction de deux charges q_1 et q_2 (de même signe dans le cas de la figure).

La loi de Coulomb ressemble à la loi d'attraction universelle de Newton $\mathbf{F}_{1 \rightarrow 2} = -Gm_1m_2\mathbf{r}_{12}/r_{12}^3$. Précisons que ces lois sont valables pour des corps ponctuels ; c'est-à-dire de dimensions négligeables comparées à la distance qui les sépare.

c) Quantification de la charge électrique

Les expériences (de Millikan, par exemple) montrent qu'à l'échelle microscopique, la charge électrique des particules ne prend pas des valeurs continues mais seulement des multiples entiers ($0, \pm e, \pm 2e, \pm 3e$ etc.) d'une **charge élémentaire**

$$e = 1,602\,177\,33 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (1.3)$$

Nous disons que la *charge électrique est quantifiée*.



Certaines particules élémentaires (comme le proton) ont une charge $+e$, d'autres (comme l'électron) ont une charge $-e$ tandis que d'autres (comme le neutron) sont neutres. À l'échelle macroscopique, la charge élémentaire est extrêmement petite et, à une très bonne approximation, les charges étendues peuvent être considérées comme une distribution continue de charge.

D'autre part, quand nous parlons de charges ponctuelles, il s'agit soit d'une particule élémentaire, soit d'un objet macroscopique de taille beaucoup plus petite que les distances du système. Dans les solides, les phénomènes électriques sont essentiellement produits par le déplacement des électrons de charge $-e$ et de masse

$$m_e = 9,109\,382\,6 \times 10^{-31} \text{ kg.} \quad (1.4)$$

Un corps solide devient chargé en gagnant ou en perdant des électrons. Les atomes deviennent alors des ions immobiles. Dans les liquides, les molécules se divisent en deux ions de charges opposées et qui sont plus ou moins mobiles.

d) Conservation de la charge électrique

L'expérience montre que l'électron et le proton sont stables. Il n'est pas possible de les détruire et leur charge ne varie pas au cours du temps. La charge électrique des particules ne dépend pas de leur vitesse, même si elle est proche de la vitesse de la lumière c , ou des conditions physiques telles que la température, la pression etc.



L'expérience montre aussi que, dans toute transformation physique, chimique ou biologique, la charge totale d'un système est conservée, s'il n'y a aucun transfert de charge à travers sa surface extérieure. Des interactions peuvent avoir lieu dans le système, entraînant l'échange interne de particules chargées sans que la charge totale du système change.

e) Isolants et conducteurs

- Dans les corps solides, seuls les électrons peuvent se déplacer sous l'effet des forces électriques externes. Les matériaux peuvent être classés en *isolants et conducteurs*.
- Dans les isolants les électrons sont fortement liés aux atomes et les électrons ne peuvent se déplacer qu'à l'intérieur de l'atome et la molécule, produisant le phénomène de **polarisation**, qui est à l'origine des propriétés diélectriques des corps.
- Dans les conducteurs, les électrons de la couche externe de l'atome sont faiblement liés à l'atome. Ils peuvent se déplacer à travers le milieu. Un corps conducteur ne peut pas être électrisé par frottement ; car les électrons se repoussent et se répartissent sur la surface extérieure du corps.
- En réalité, la distinction entre conducteurs et isolants n'est pas nette ; certains matériaux sont meilleurs conducteurs que d'autres et des milieux (appelés *semi-conducteurs*) ont des propriétés intermédiaires entre celles des isolants et des conducteurs. Le nombre d'électrons libres (ou de conduction) est de l'ordre d'un électron par atome et leur vitesse de déplacement est de l'ordre d'une fraction de mm par seconde.

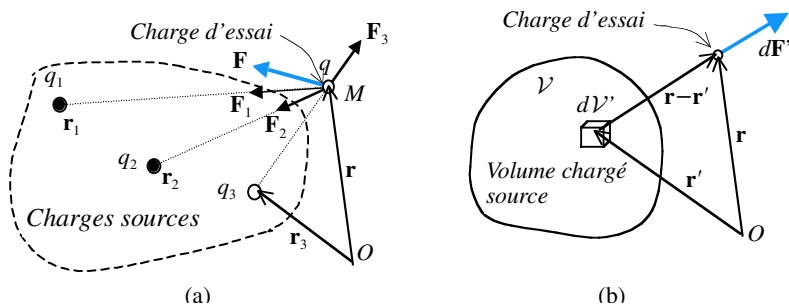


Figure 1-2 a) Champ électrique d'une distribution discrète de charges et b) champ d'une distribution volumique continue de charges.

1.2 CHAMP ÉLECTRIQUE

a) Principe de superposition

Nous admettons le **principe de superposition** des forces électriques, selon lequel l'action de plusieurs charges q_i , placées aux points $\mathbf{r}_i$, sur une charge q , placée en $\mathbf{r}$, est la somme vectorielle des forces qu'exercerait sur q chacune de ces charges, si elle agissait seule (Fig.1.2a) :

$$\mathbf{F} = q \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3} \quad (1.5)$$

Dans la suite, la charge q qui subit les forces est désignée comme une charge d'essai tandis que les charges q_i qui produisent la force sont désignées comme des *charges sources*.

Si les charges sources sont distribuées dans un volume $\mathcal{V}$ (Fig.1.2b), chaque élément infinitésimal $d\mathcal{V}'$, au voisinage du point $\mathbf{r}'$, contient une charge $dq' = q_v(\mathbf{r}')d\mathcal{V}'$ assimilable à une charge ponctuelle. $q_v(\mathbf{r}')$ est la densité volumique au voisinage de $\mathbf{r}'$. La sommation discrète dans l'expression (1.5) doit alors être remplacée par une intégrale :

$$\mathbf{F} = \iiint_{\mathcal{V}} d\mathbf{F}' = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \iiint_{\mathcal{V}} d\mathcal{V}' q_v(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (1.6)$$

Des considérations analogues peuvent être faites dans le cas d'une distribution de charge sur une surface ou sur une courbe.

b) Champ électrique d'une distribution de charges

La force électrique qui agit sur une particule d'essai est proportionnelle à sa charge q . La force qui agit sur l'unité de charge d'essai est appelée *champ électrique*. La force qui agit sur la charge d'essai q est donc

$$\boxed{\mathbf{F} = q\mathbf{E}} \quad (1.7)$$

Le champ d'une distribution de charges sources est

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^3} \text{ ou } \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iiint_{\mathcal{V}} d\mathcal{V}' q_v(\mathbf{r}') \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \quad (1.8)$$

En particulier, une charge q' placée en un point $\mathbf{r}'$ produit en tout point $\mathbf{r}$ un champ électrique qui est orienté dans la direction radiale $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$ et qui a le même module sur les sphères centrées à la position de q' . Il est sortant si q' est positive et entrant si q' est négative.