

Avant-propos

Il n'y a pas de place dans ce nouveau type de physique à la fois pour le champ et pour la matière, car le champ est la seule réalité.

Albert Einstein

La *charge électrique* est une notion abstraite, comparable à celle du concept de *masse*, introduite pour expliquer certains comportements en physique. Contrairement à la masse, la charge électrique peut prendre expérimentalement deux formes qu'on peut qualifier arbitrairement de *positive* et *négative*. Deux charges de même nature, positives ou négatives par exemple, se repoussent, alors que deux charges opposées s'attirent. Ce phénomène est appelé *interaction électrostatique*.

Pour l'histoire, la charge électrique a été découverte par les anciens Grecs. Ils ont constaté que le frottement, de certains objets sur de la fourrure, produisait un déséquilibre de charge électrique. Ces objets électrisés pouvaient, ensuite, attirer d'autres objets légers tels que des cheveux. En plus, si le frottement durait assez longtemps, ils pouvaient même obtenir une étincelle.

La charge électrique peut être mesurée expérimentalement. Dans la nature, les particules observées possèdent des charges qui sont des multiples entiers de la *charge élémentaire* qui est une *constante physique fondamentale*. La charge élémentaire est la charge électrique d'un proton ou, de façon équivalente, l'opposé de la charge électrique d'un électron. Elle est notée et s'exprime en *Coulombs* (C), ou en $A \times s$ dans le système international d'unités. La mesure de la charge électrique, considérée comme invisible, et sa *nature discrète* ont été trouvées pour la première fois en 1909, par Robert Andrews Millikan.

La charge élémentaire, notée e , vaut approximativement $e = 1,602176634 \times 10^{-19} C$. La valeur exacte de la charge élémentaire est actuellement définie par :

$e = \sqrt{\frac{2h\alpha}{\mu_0 c}}$, où h est la *constante de Planck*, avec $h = 6,626070040 \times 10^{-34} Js$; α est la *constante de structure fine*, avec $\alpha = 7,2973525664 \times 10^{-3}$; μ_0 est la *perméabilité magnétique du vide*, avec $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} Hm^{-1}$; et c est la vitesse de la lumière dans le vide, avec $c = 299792458$ m/s. Les quarks, dont l'existence est postulée dès les années 1960, sont certes censés posséder une charge électrique fractionnaire ($\pm \frac{1}{3}e$) ou ($\pm \frac{2}{3}e$), mais ils sont confinés à l'intérieur des hadrons, des particules dont la charge est égale à zéro, à la charge élémentaire ou à un multiple entier de cette charge. Les quarks n'ont encore jamais été détectés séparément, mais ils sont supposés avoir existé à l'état libre dans les tout premiers instants de l'Univers (ère des quarks). La charge est un invariant de la théorie de la relativité : n'importe quelle particule de charge q , quelle que soit sa vitesse, gardera toujours la même charge q .

On distingue deux branches :

– l'**électrostatique** est la branche de la physique qui étudie les phénomènes créés par des charges électriques statiques pour l'observateur. En physique, une particule électriquement chargée crée un champ vectoriel nommé *champ électrique*. En présence d'une particule chargée, les propriétés locales de l'espace sont donc modifiées ; ce que traduit justement la notion de champ. Si une autre charge se trouve dans ce champ, elle subira l'action de la force électrique (l'une des quatre forces de la nature) exercée à distance par la particule : le champ électrique est en quelque sorte le médiateur de cette action à distance. S'il y a un mouvement des charges électriques, généralement des électrons, au sein d'un matériau conducteur sous l'effet d'une différence de potentiel aux extrémités de celui-ci, on produit un *courant électrique*. La notion de courant électrique revient à Benjamin Franklin. En effet, il est le premier à avoir imaginé l'électricité comme étant un type de fluide invisible présent dans toute la matière. Il a posé comme principe que le frottement de surfaces isolantes faisait changer ce fluide d'endroit et qu'un écoulement de ce fluide constituait un courant électrique. Un matériau est constitué d'un grand nombre de charges électriques, mais ces charges se compensent entre elles, c'est-à-dire qu'il y a un même nombre d'électrons (négatifs) et de protons (positifs). Aux températures usuelles, la matière est électriquement neutre. Lorsqu'un effet d'électricité statique se produit, cela signifie qu'il y a eu un déplacement de charges, d'un matériau A vers un autre B : c'est le *phénomène d'électrisation*. Ce sont ces charges, en excès ou en manque, c'est-à-dire dites *non compensées*, qui sont responsables des effets électriques sur ce corps (c'est l'exemple de la baguette frottée). On a deux types de matériaux :

a) un matériau est dit *conducteur parfait* si, lorsqu'il devient électrisé, les charges non compensées peuvent se déplacer librement dans tout le matériau ;

b) si les charges non compensées ne peuvent se déplacer librement et restent localisées à l'endroit où elles ont été déposées, on dira que c'est un *isolant (ou diélectrique) parfait*.

En fait, un matériau réel est situé évidemment entre ces deux états extrêmes ;

– le **magnétisme** représente un ensemble de phénomènes physiques dans lesquels les objets exercent des forces attractives ou répulsives sur d'autres matériaux. Les courants électriques et les moments magnétiques des particules élémentaires fondamentales sont à l'origine du champ magnétique qui engendre ces forces. Le champ magnétique est donc une grandeur vectorielle, c'est-à-dire caractérisée par la donnée d'une intensité et d'une direction, définie en tout point de l'espace, et déterminée par la position et l'orientation d'aimants, d'électro-aimants et le déplacement de charges électriques. La présence de ce champ se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement (dite *force de Lorentz*), et divers effets affectant certains matériaux (paramagnétisme, diamagnétisme ou ferromagnétisme selon les cas). La grandeur qui détermine l'interaction entre un matériau et un champ magnétique est la susceptibilité magnétique.

En fait, l'électricité et le magnétisme sont intimement liés. En effet, Ørsted découvre, en 1820, une relation entre l'électricité et le magnétisme : *un fil parcouru par un courant électrique est capable de faire dévier l'aiguille aimantée d'une boussole*. Par la suite, Ampère, en approfondissant les travaux d'Ørsted, découvre et formule quelques lois sur les relations du magnétisme et de l'électrodynamique. En 1831, Faraday découvre que, si un courant électrique produit un champ magnétique, l'inverse est aussi vrai : on peut produire un courant électrique en mettant en mouvement un champ magnétique, selon la *loi de Lenz*.

L'électromagnétisme vient de naître... L'électromagnétisme est donc la branche de la physique qui étudie les interactions entre particules chargées électriquement, au repos ou en mouvement, en utilisant la notion de champ électromagnétique. Il est d'ailleurs possible de définir l'électromagnétisme comme l'étude du champ électromagnétique et de son interaction avec les particules chargées. Le champ magnétique forme, avec le champ électrique, les deux composantes du champ électromagnétique décrit par l'électromagnétisme. Les équations décrivant l'évolution du champ électromagnétique sont appelées *équations de Maxwell*. Des ondes de champs électrique et magnétique associées peuvent se propager librement dans l'espace, et dans la plupart des matériaux. Ces ondes sont appelées *ondes électromagnétiques*, et correspondent à toutes les manifestations de la lumière, dans tous les domaines de longueur d'onde (ondes radio, domaine micro-onde, infrarouge, domaine visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma). Maxwell écrivait à ce propos : « L'accord des résultats semble montrer que la lumière et le magnétisme sont deux phénomènes de même nature et que la lumière est une perturbation électromagnétique se propageant dans l'espace suivant les lois de l'électromagnétisme. » De ce point de vue, l'optique tout entière peut être vue comme une application de l'électromagnétisme. L'interaction électromagnétique est également une des quatre interactions fondamentales ; elle permet de comprendre (avec la mécanique quantique) l'existence, la cohésion et la stabilité des atomes ou des molécules.

Du point de vue de la physique fondamentale, le développement théorique de l'électromagnétisme classique est à la source de la théorie de la relativité restreinte au début du xx^e siècle. La nécessité de concilier théorie électromagnétique et mécanique quantique a conduit à construire l'électrodynamique quantique, qui interprète l'interaction électromagnétique comme un échange de particules appelées *photons*. En physique des particules, l'*interaction électromagnétique* et l'*interaction faible* sont unifiées dans le cadre de la *théorie électrofaible*.

Notes aux lecteurs

La théorie des champs électromagnétiques est souvent très mal et très peu enseignée dans le cursus universitaire d'un physicien. La forte dépendance avec les mathématiques, notamment le calcul vectoriel, le calcul intégral, les fonctions complexes et les fonctions spéciales, etc., rend l'enseignement de cette matière plus difficile et peut obscurcir les phénomènes de sorte que les étudiants s'enfoncent dans les difficultés mathématiques et perdent de vue les applications ou inversement. Pour notre part, nous tâcherons dans cette modeste contribution d'exposer les idées essentielles de la théorie dans l'ordre le plus logique. Une grande importance est accordée aux développements mathématiques de la théorie. Le côté expérimental est très peu abordé ici. Nous n'insisterons pas non plus sur les unités des grandeurs. Ces trois volumes contiennent beaucoup d'exemples (les plus classiques). Nous avons essayé de détailler au maximum les calculs. L'exposé est essentiellement divisé (le long des trois volumes) en trois principaux volets : 1) les charges et/ou dipôles comme sources du champ électrostatique ; 2) les courants et/ou l'alimentation comme sources du champ magnétique ; 3) l'électrodynamique où le champ électrique et le champ magnétique sont d'égale importance. De nombreuses applications de la théorie électromagnétique sont abordées dans cet ouvrage. On cite à titre indicatif : résolution des équations de Laplace et Poisson dans les différents systèmes de coordonnées, milieux diélectriques, milieux magnétisés, guides d'ondes, lignes de transmission, rayonnement électromagnétique, rayonnement par des charges ponctuelles, diffraction de Kirchhoff, relativité restreinte, etc. Pour faciliter la tâche aux lecteurs, nous avons rassemblé aussi les outils mathématiques utilisés dans cet exposé en six annexes (téléchargeables à l'adresse : iste.co.uk/abdesselam/annexes.pdf) : analyse vectorielle, tenseurs, fonctions hypergéométriques/spéciales, etc. Les références sont présentées à la fin de chaque volume. Les formules sont données ici dans le système internationale d'unités. Nous avons essayé d'adopter la notation la plus utilisée dans la littérature. Les graphes et les représentations à 3D sont réalisés avec Maple.

Cet ouvrage en trois volumes est destiné aux étudiants physiciens, aux élèves ingénieurs ainsi qu'aux étudiants mathématiciens qui s'intéressent aux problèmes de la théorie électromagnétique. Il peut être également consulté par tous ceux qui s'intéressent à la physique en général ou par simple curiosité intellectuelle. Beaucoup de livres

existent sur le sujet, il nous a donc semblé raisonnable de répéter certains développements dits classiques et qui nous paraissent excellents, plutôt que chercher à tout prix l'originalité.

Dans le **volume 1**, on abordera les thèmes suivants :

- champ électrostatique dans le vide (théorème de Gauss, etc.) ;
- conducteur en équilibre ;
- électrocinétique ;
- champ magnétique dans le vide (force de Laplace, loi de Biot et Savart, théorème d'Ampère, etc.) ;
- moments électriques et magnétiques ;
- problèmes aux limites pour les potentiels statiques dans le vide.

Dans le **volume 2**, on traitera des points suivants :

- potentiels statiques avec source – équation de Poisson (méthode des images, fonctions de Green, etc.) ;
- phénomènes d'induction électromagnétique ;
- ondes électromagnétiques dans le vide ;
- énergies électromagnétiques ;
- polarisation, milieux polarisés (diélectriques) ;
- aimantation, milieux magnétisés ;
- champs électromagnétiques dans la matière.

Dans le **volume 3**, on analysera les concepts suivants :

- guides d'ondes ;
- lignes de transmission ;
- rayonnement électromagnétique ;
- rayonnement par des charges ponctuelles ;
- diffraction de Kirchhoff ;
- théorie de la relativité restreinte ;
- introduction à l'électrodynamique ;
- quelques résultats de l'analyse vectorielle (annexe 1) ;
- tenseurs (annexe 2) ;
- fonction de Dirac (annexe 3) ;
- fonctions orthogonales (annexe 4) ;
- fonctions gamma et bêta (annexe 5) ;
- fonctions spéciales (annexe 6).

Remerciements

Cet ouvrage n'aurait jamais vu le jour sans les encouragements de nombreuses personnes. Je suis redevable en particulier à mes étudiants, mes collègues et bien d'autres. Je remercie Frédérique de Fornel pour sa patience et ses conseils. En conclusion, je dédie ce livre à ma femme Nadia et mes enfants : Abir, Ahmed Nour, Mohammed Sami et Samah. Un grand merci à toutes et à tous.