



L'électromagnétisme

DES IMPLICATIONS MAJEURES

L'électromagnétisme constitue la branche de la physique qui étudie les phénomènes régis par les forces électriques et magnétiques. À notre échelle, cela concerne tout ce qui n'est pas expliqué par la gravitation, hormis les réactions nucléaires. La cohésion des atomes, l'agrégation des molécules, des phénomènes naturels (foudre, aimant), ou bien

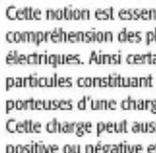


des applications diverses de notre quotidien (production de courant, télécommunications, micro) sont expliqués par l'électromagnétisme. Jusqu'au début du ^{xix} siècle, la théorie électromagnétique est scindée en deux branches distinctes : l'électrostatique et la magnéto-électrique. L'électrostatique traite des interactions entre corps chargés électriquement alors que la magnéto-électrique s'occupe des interactions entre corps aimantés. Hans Christian Ørsted, professeur de physique à Copenhague, découvre en 1820 les liens étroits qui existent entre les phénomènes électriques et magnétiques, ce qui marque l'avènement de l'électromagnétisme. En 1873, c'est au tour du physicien écossais James Clerk Maxwell de s'illustrer et de regrouper tous les phénomènes électromagnétiques au sein d'une théorie mathématique. Les fameuses équations de Maxwell ouvriront notamment la voie au vaste domaine des télécommunications hertziennes.

ÉLECTROSTATIQUE ET ÉLECTRICITÉ

LA FORCE ÉLECTRIQUE

Au milieu du ^{xviii} siècle, **Benjamin Franklin** observe ce qu'il nomme électricité positive et électricité négative, et en déduit ainsi la notion de charges électriques.



Cette notion est essentielle dans la compréhension des phénomènes électriques. Ainsi certaines des particules constituant la matière sont portées d'une charge électrique. Cette charge peut aussi bien être positive ou négative et permet

d'expliquer le comportement de ces particules. Chaque charge exerce sur chaque autre une force dite électrostatique. Cette force est régie par la loi de Coulomb, du nom du physicien français qui l'a établie en 1780. Cette loi stipule que la force électrostatique est dirigée selon la droite qui relie les deux charges. Elle est proportionnelle aux deux charges et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Elle stipule également que deux charges opposées (l'une positive et l'autre négative) s'attirent alors que deux charges de même nature se repoussent. Les charges neutres ou nulles sont quant à elles insensibles à la force électrique dont l'unité de mesure est le coulomb noté C.

D'autre part, la loi de Coulomb montre que plus la charge d'un objet est élevée, plus la force électrique créée autour de lui sur d'autres objets chargés est importante. Pour récapituler, plus un objet est chargé, plus il repoussera un objet de charge de même signe, plus il attirera un objet de charge opposée. Par ailleurs, les effets des différentes charges s'additionnent. Pour calculer la force électrique exercée par un système de charges, il suffit donc de calculer la force exercée par chacune des charges puis d'ajouter ces forces. C'est ce qu'on appelle le principe de superposition.

CHARGE ÉLÉMENTAIRE ET NEUTRALITÉ DE LA MATIÈRE

La matière est constituée de molécules, qui elles mêmes, sont



constituées d'atomes. Ceux-ci sont formés d'un noyau, autour duquel tournent des électrons ; dans le noyau, on considère deux sortes de particules : les protons et les neutrons. Le proton est chargé positivement et sa charge que l'on note e est appelée la charge élémentaire. Le neutron, d'une masse identique à celle du proton, est, comme son nom l'indique, neutre électriquement. Enfin, les électrons ont une charge électrique négative qui est exactement l'opposée de celle du proton, soit -e. L'attraction électrostatique entre le noyau chargé positivement et les électrons chargés négativement assure la cohésion de l'atome. La force électrique au niveau atomique permet également de comprendre pourquoi la matière est globalement neutre, c'est-à-dire

pourquoi les charges positives et négatives sont en nombres identiques. Imaginons que les protons du noyau soient en plus grand nombre que les électrons qui tournent autour du noyau. La tendance des protons à attirer les électrons qui passeraient au voisinage de l'atome serait supérieure à la tendance des électrons tournant autour du noyau à repousser les électrons libres. L'équilibre est donc atteint quand l'effet attractif des protons du noyau est exactement compensé par l'effet répulsif des électrons. Autrement dit, lorsqu'il y a autant d'électrons que de protons dans l'atome. Pour cette raison, les atomes sont neutres électriquement. La matière étant constituée essentiellement d'atomes, elle est donc globalement neutre. Ceci explique pourquoi à notre échelle, les effets de la force électrique ne nous sont pas familiers.

UNE PETITE EXPÉRIENCE

Il est tout de même possible d'observer les effets de la force électrique avec une expérience très simple. On prend un sac plastique et on l'approche d'un mince filet d'eau coulant d'un robinet, alors il ne se passe rien. Si maintenant on frotte ce sac plastique contre un pull en laine par exemple, alors si on approche cette fois le sac du filet d'eau, on peut observer que celui-ci est légèrement dévié. Que se passe-t-il ?

Le fait de frotter le sac plastique lui fait perdre ou gagner des électrons. La surface du sac n'est donc plus neutre car il n'y a plus les mêmes nombres de protons et d'électrons ; le sac est chargé. Il va donc agir sur les particules chargées passant dans son voisinage, via la force électrique. C'est ce qui se passe avec les molécules d'eau. Bien qu'elles soient neutres, elles sont composées d'atomes, qui eux-mêmes sont constitués de charges. Celles-ci vont être soumises à la force électrique créée par le sac plastique chargé, ce qui explique la déviation du filet d'eau à proximité du sac.

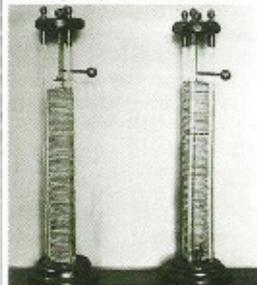
L'ÉLECTRICITÉ



C'est l'Allemand **Otto von Guericke** qui, au milieu du ^{xv} siècle, met en évidence la conduction

électrique avec la première machine électrostatique. Il s'agit d'un gros globe de soufre qu'on électrise en le frottant et qui permet d'observer la capacité de certains corps à

transmettre le « pouvoir électrique ». Durant le ^{xviii} siècle, les travaux de Charles du Fay ou bien de Benjamin Franklin permettent de préciser cette notion de conduction électrique. Le premier observe deux types d'électricité : une qu'il obtient en frottant du verre et l'autre en frottant un corps résineux. Le second le baptise électricité positive et électricité négative et identifie deux porteurs de charge. La loi établie par Coulomb en 1785 complète leur théorie et explicite clairement le mouvement des porteurs de charge. Cependant, l'électricité connaît alors des domaines d'applications limités puisque les machines électrostatiques nécessitent d'être chargées par friction et se déchargent en un temps très bref. La révolution a lieu au début du ^{xix} siècle avec les travaux du physicien italien Alessandro Volta. Celui-ci montre que deux métaux de nature différente mis en contact par l'intermédiaire d'un conducteur (tissu humide) produisent une décharge électrique. Volta élabore ainsi en 1800 la **première pile électrique**, qui tient son nom de



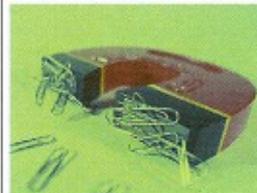
l'empilement des disques de cuivre et de zinc séparés de tissus imbibés d'acide. La capacité de cette pile à produire de l'électricité s'exprime en volt, noté V, en hommage au physicien italien. En 1820, André Marie Ampère complète les travaux de Volta en étudiant précisément la décharge continue produite par cette pile électrique. Il la baptise courant électrique et l'identifie comme un

débit de particules chargées par unité de temps. L'unité de mesure du courant électrique porte le nom d'Ampère et est noté A.

MAGNÉTOSTATIQUE

LES AIMANTS

Tout le monde s'est déjà amusé avec des **aimants** et a pu remarquer



qu'ils s'attirent ou se repoussent selon le sens dans lequel on les dispose. Cela est dû au fait qu'un aimant constitue un dipôle, il possède un pôle nord et un pôle sud, comme la Terre. Deux pôles de même nature se repoussent alors que deux pôles opposés s'attirent. Ces effets sont provoqués par le champ magnétique, mesuré en tesla que l'on note T.

Le champ magnétique est défini uniquement par les effets qu'il provoque. Pour le caractériser en tout point de l'espace autour d'un aimant, on dispose un autre aimant, mobile celui-ci, et on regarde comment il s'oriente. Les différentes orientations prises par l'aimant mobile autour de l'aimant que l'on souhaite caractériser constituent les lignes de champ. On remarque que l'aimant mobile cherche toujours la zone magnétique la plus forte et s'oriente alors selon le pôle opposé correspondant.

Il existe deux types d'aimants : les permanents et les temporaires. Les aimants permanents constituent les « vrais » aimants, ceux évoqués précédemment. Mais on a tous remarqué que certains métaux (dont le fer) se comportent comme des aimants en présence d'aimants dits permanents. Ainsi, il est commode,

Un ^{xix} siècle chargé

1820

Ørsted observe qu'un courant électrique dévie l'aiguille d'une boussole : c'est la naissance de l'électromagnétisme.

1873

Maxwell établit les équations générales du champ électromagnétique : les équations de Maxwell.

1878

Invention du microphone par l'Américain Hughes.

1887

Production des premières ondes hertziennes par Heinrich Hertz.

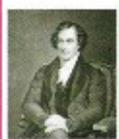
1895

Aleksandr Popov réalise la première transmission de signaux par onde hertziennes. C'est la naissance du télégraphe sans fil (TSF).

1897

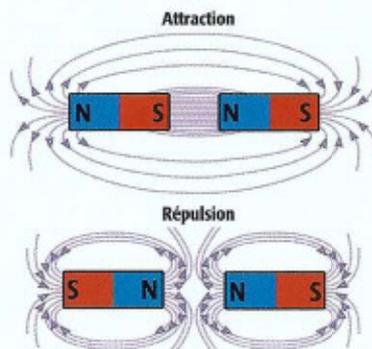
Joseph John Thomson met en évidence l'électron.

Découvert par Arago

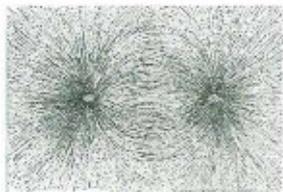


1820
Le fer est aimanté par un courant électrique

Champs magnétiques générés par deux aimants



pour définir les **lignes de champ** d'un aimant, de disposer de la limaille de fer



autour de celui-ci et d'observer leur orientation. En fait, les atomes de fer se comportent comme de petits aimants temporaires et ils sont sensibles au champ magnétique environnant. On dit alors que le fer est un matériau ferromagnétique, qu'il est possible d'aimanter.

CHAMP MAGNÉTIQUE CRÉÉ PAR UN COURANT

La magnétostatique constitue l'étude des phénomènes créés par un champ magnétique statique, c'est-à-dire qui n'évolue pas dans le temps. Ce type de champ peut être créé par un aimant mais pas uniquement. Ainsi, en 1820, le



physicien danois **Ørsted** découvre qu'une aiguille aimantée placée à proximité d'un fil est déviée lorsqu'un courant passe dans celui-ci.

C'est donc qu'un courant crée un champ magnétique. La même année, les physiciens français **Jean-Baptiste Biot** et **Félix Savart** mesurent ce champ et établissent une



loi portant leur nom. Elle permet de calculer le champ magnétique en tout point de

l'espace autour du fil en fonction du courant qui y circule. La loi stipule que le champ est proportionnel au courant et inversement proportionnel au carré de la distance (comme la loi de Coulomb). Ainsi, plus un courant est intense (plus le nombre d'électrons est important), plus le champ magnétique est fort. Les électroaimants sont une application directe de ce phénomène. On fait circuler un courant électrique dans un matériau conducteur (de l'aluminium par exemple), cela crée un champ magnétique beaucoup plus important

que ce que peut produire n'importe quel aimant. Les électroaimants sont notamment utilisés dans les moteurs électriques.

ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UN ÉLECTRON

Une expérience simple permet de montrer que les électrons sont sensibles au champ magnétique. Si l'on place un aimant juste devant l'écran



d'une télévision, on peut remarquer la déformation des images et la modification des couleurs. L'image de la télévision est créée par le balayage systématique de la surface de l'écran par le faisceau. La présence du champ magnétique modifie la trajectoire des électrons et donc la structure de l'image.

L'électron est en fait soumis à la force magnétique. Il s'agit de la force de **Lorentz**, du nom du physicien qui



réalisa de nombreux travaux sur les propriétés magnétiques des matériaux à la fin du XIX^e siècle. Cette force est proportionnelle à

la charge de l'électron, à la vitesse de celui-ci ainsi qu'au champ magnétique. Elle est dirigée selon un axe à la fois perpendiculaire à la trajectoire de l'électron et au champ magnétique environnant. Les travaux de Lorentz ont notamment montré que cette force ne s'appliquait pas uniquement aux électrons mais à toute particule chargée.

L'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

LE PHÉNOMÈNE D'INDUCTION

Si la loi de Biot et Savart constitue une première approche des effets magnétiques provoqués par un courant électrique, elle reste limitée à des phénomènes indépendants du temps.

Michael Faraday, en s'inspirant de l'expérience d'Ørsted, parvient à montrer que le mouvement d'un aimant à proximité d'un fil crée un courant au sein de celui-ci : on dit que c'est un courant induit. Faraday découvre ainsi



qu'un champ magnétique variable peut créer un courant électrique : c'est l'induction électromagnétique.

Les phénomènes électriques et magnétiques sont donc liés et interdépendants. Mais comment ce courant induit naît-il ?

Un matériau conducteur possède des électrons libres de se déplacer. S'il n'y a pas de courant, ceux-ci sont immobiles. La présence d'un champ magnétique variable va les mettre en mouvement à l'intérieur du fil conducteur, via la force de Lorentz : il y a donc création d'un courant induit. Le principe inverse qui consiste à créer un courant en faisant bouger un fil électrique au voisinage d'un aimant est identique, car du point de vue du fil, le champ magnétique est alors variable. C'est ce principe qui est utilisé pour produire de l'électricité. On fait tourner d'énormes bobines de fil placées dans des aimants et on récupère le courant induit. L'énergie utilisée pour mettre en mouvement ces bobines peut être hydraulique, éolienne ou bien nucléaire.

LE MICROPHONE



Une application directement issue du phénomène d'induction est le **microphone**. Celui-ci possède une membrane. Lorsqu'un son est émis, la membrane est alors mise en mouvement par les vibrations de l'air à son voisinage. Une bobine de fil solidaire de la membrane est enroulée autour d'un aimant. Donc lorsque la membrane vibre, le fil conducteur est mis en mouvement au sein du champ magnétique créé par l'aimant : il y a création d'un courant induit. Ce courant

est proportionnel au déplacement du fil, donc de la membrane. Par conséquent, le courant induit au sein du fil, retranscrit le son généré devant le microphone.

LES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

LES ÉQUATIONS DE MAXWELL

En 1873, le physicien écossais **James Clerk Maxwell**, dans son *Traité*



d'électricité et de Magnétisme, élabore de manière rigoureuse une théorie de l'électromagnétisme et montre clairement que les

phénomènes électriques et magnétiques sont couplés. Grâce au formalisme mathématique, il établit neuf équations fondamentales qui décrivent tous les phénomènes déjà évoqués, que ce soient les effets provoqués par des charges fixes ou en mouvement ou bien le phénomène d'induction. Les fameuses équations de Maxwell permettent également de constater que les phénomènes électromagnétiques ne sont pas instantanés mais se propagent à une vitesse finie. Cette vitesse devient désormais calculable alors qu'elle n'était auparavant pas mesurable car trop élevée. Maxwell montre que cette propagation a lieu sous forme d'ondes. On peut assimiler cette propagation d'onde à des **vagues** créées par le jet



d'une pierre dans un étang. La pierre est alors comparable à la source qui crée l'onde, c'est-à-dire une charge électrique en mouvement. Pour caractériser une onde électromagnétique, on définit alors quelques grandeurs fondamentales. Notamment la longueur d'onde qui, si l'on continue la comparaison précédente, est la distance entre les sommets de deux vagues successives, et par convention on l'appelle *lambda*. Autre valeur fondamentale, la vitesse de l'onde qui correspond à la vitesse d'une vague.

LA LUMIÈRE

L'implication la plus importante des équations de Maxwell est sans aucun doute l'assimilation de la lumière dont Auguste Fresnel avait montré le caractère ondulatoire en 1819. C'est le physicien allemand **Heinrich Hertz** qui

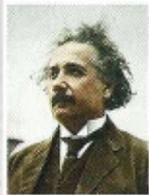


en 1887, produit des ondes électromagnétiques de grandes longueurs d'ondes (ce sont les ondes dites hertziennes), mesure leur vitesse et montre que toutes leurs propriétés sont identiques à celles de la lumière. Ainsi,

la théorie élaborée par Maxwell englobe à la fois l'électricité, le magnétisme ainsi que l'optique. Les travaux de Hertz montrent que le domaine des ondes électromagnétiques, en terme de longueur d'onde, est infini : c'est le spectre électromagnétique. On définit différentes gammes d'ondes en fonction de leur longueur d'onde. Dans l'ordre croissant des longueurs d'onde, on trouve d'abord les rayons gamma, les rayons X, les ultraviolets puis la lumière visible qui représente seulement une infime partie du spectre, les infrarouges et enfin les ondes radio notamment utilisées pour les télécommunications hertziennes.

L'ÉLECTROMAGNÉTISME ET LA PHYSIQUE MODERNE

Capable d'expliquer de nombreux phénomènes expérimentaux, la théorie de l'électromagnétisme bâtie par Maxwell s'accommode au XIX^e siècle d'une conception qui est remise en question par l'expérience des Américains Albert Michelson et Edward Morley. À cette époque, les physiciens pensent en effet que la lumière se propage, comme le son, en faisant vibrer un milieu particulier, l'éther. L'expérience de Morley et Michelson doit donc mesurer la vitesse de la lumière dans le sens ou bien à contre-sens du mouvement de l'éther (c'est-à-dire dans le sens du déplacement de la Terre ou dans le sens opposé), comme un nageur qui ralentit lorsqu'il nage contre le courant ou accélère lorsqu'il nage avec le courant. Or Morley et Michelson montrent que la vitesse de la lumière est identique dans les deux sens. Cette découverte révolutionne la physique puisqu'elle signifie que la vitesse de la lumière est indépendante du référentiel (système de référence dans lequel on effectue la mesure), contrairement à tout autre objet connu auparavant. Le fait que la vitesse de la lumière soit une valeur fixe, quelque soit la vitesse de l'observateur, remet en cause les notions d'espace et de temps et c'est ce qui inspire la Relativité Restreinte à **Albert Einstein** en 1905. Par ailleurs,



la théorie se révèle incapable d'expliquer la nature corpusculaire de la lumière. C'est la physique quantique, avec tout d'abord le

physicien allemand Max Planck, puis de nouveau Albert Einstein en 1905, qui explique que la lumière est à la fois une onde comme le prévoyait la théorie de Maxwell, mais qu'elle est également constituée de particules de masse nulle appelées photons ; c'est ce qu'on appelle la dualité onde-corpuscule. Et enfin, en 1929, l'allemand Werner Heisenberg et le suisse Wolfgang Pauli effectuent l'étude quantique de particules chargées dans un champ électromagnétique. Cette fusion entre les deux grands pans de la physique que sont la physique quantique et l'électromagnétisme, appelée l'électrodynamique quantique, prendra sa forme définitive grâce à Richard Feynman en 1949.

Principe de fonctionnement du microphone

