

Des magnétomètres scalaires dans l'espace pour cartographier le champ magnétique terrestre

Des magnétomètres hélium développés au CEA-Léti vont bientôt prendre le relais dans l'espace des magnétomètres à résonance magnétique nucléaire pour dresser une carte toujours plus précise du champ magnétique terrestre.



Sonde du magnétomètre hélium développé pour le projet Swarm. Cet élément sensible est situé en bout de mât pour l'éloigner au maximum des perturbations magnétiques générées par le satellite. La mission Swarm, dont le développement et la construction des trois satellites ont été confiés à **EADS Astrium**, fournira de précieuses informations, essentielles à la modélisation du champ magnétique terrestre. Depuis la découverte de la boussole, les marins se sont orientés grâce au champ magnétique terrestre (Mémo D, Le champ terrestre, faible mais vital, p. 99). Toutefois, la cartographie détaillée de ce dernier et l'étude de son évolution temporelle ne sont que relativement récentes. Pendant longtemps, la couverture magnétique de la surface de la Terre est restée extrêmement hétérogène, assurée pour l'essentiel par des observatoires magnétiques nationaux concentrés sur les masses continentales de l'hémisphère Nord, avec des densités de stations et des précisions de mesure dissemblables. Plusieurs missions dédiées dans des zones mal couvertes, comme les régions polaires, avaient permis d'améliorer, au moins partiellement, la connaissance du champ moyen sur les continents, alors que parallèlement des campagnes de mesures systématiques sur les océans étaient organisées pour compléter cette distribution géographique très fragmentaire. La dernière grande opération concertée au niveau mondial, visant à améliorer cette situation en combinant des mesures au sol, en mer, et des campagnes de mesures aériennes extensives, avait eu lieu au début des années 1970. La situation a toutefois radicalement changé avec l'avènement récent des satellites. Ainsi, les données collectées par le satellite américain Magsat (Magnetic Field Satellite) lancé par la NASA ont permis de dresser, au début des années 1980, la première carte précise du champ magnétique à la surface du globe. L'observation du champ magnétique terrestre depuis l'espace est dès lors devenue l'une des priorités de la communauté scientifique française qui participe activement au volet magnétique du programme international "Decade of Geopotential Research".

Des capteurs RMN optimisés pour répondre aux exigences du spatial

Depuis le milieu des années 1990, le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (CEA-Léti) développe à cet usage, en collaboration étroite avec le **Centre national d'études spatiales (Cnes)**, des versions spatialisées de ses **magnétomètres** scalaires ⁽¹⁾ haute **résolution**, initialement mis au point pour des applications de détection d'anomalies magnétiques, et destinés à devenir les instruments de référence de

ces missions de cartographie spatiale. En effet, bien que le **champ magnétique** soit par nature une grandeur vectorielle ⁽²⁾, les magnétomètres vectoriels capables d'en mesurer les composantes ne délivrent pas des mesures absolues. Ils doivent de ce fait être régulièrement étalonnés pour pouvoir fournir leurs données avec la précision attendue, et c'est justement le rôle dévolu aux capteurs scalaires.

Ces magnétomètres exploitent la propriété qu'ont certains atomes, lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, de voir leurs niveaux d'énergie se scinder en plusieurs sous-niveaux dont l'écart est directement fonction de l'intensité du champ magnétique ambiant (effet Zeeman). Une mesure de cette énergie par des méthodes classiques de résonance magnétique permet alors la détermination avec une grande précision de l'intensité du champ. En règle générale, les performances de tels instruments, en particulier leur résolution, dépendent néanmoins de l'orientation relative du capteur par rapport au champ à mesurer. Sans précaution particulière, il existe alors des orientations du capteur pour lesquelles la mesure ne peut pas être effectuée. Pour pouvoir exploiter un tel magnétomètre pour des applications embarquées, où par définition cette orientation relative est susceptible de changer et n'est en général pas connue, il convient alors de définir des architectures qui permettent de s'affranchir de ces zones d'ombre.

Ayant très tôt identifié ce point comme déterminant, le Léti a, dès l'origine de ses travaux en magnétométrie, concentré ses efforts sur la réalisation de capteurs dits isotropes, c'est-à-dire dont les caractéristiques sont indépendantes de leur attitude. Ces recherches ont permis la réalisation de magnétomètres de très grande précision, ce qui a constitué

- (1) Les magnétomètres scalaires sont sensibles uniquement
- à l'intensité du champ magnétique.
- (2) Une grandeur vectorielle est caractérisée à la fois par
- son intensité mais aussi par sa direction.



Vue d'artiste du satellite allemand CHAMP embarquant en bout de mât le capteur RMN du Léti (en gros plan à droite). La mission CHAMP est conduite par le GeoForschungsZentrum (GFZ).

un avantage déterminant pour leur utilisation dans le cadre des missions spatiales de cartographie magnétique. Ainsi, des capteurs à résonance magnétique nucléaire (RMN), spécialement optimisés pour répondre aux exigences spécifiques des programmes d'observation de la Terre à partir de mesures orbitales, ont été embarqués à bord des satellites de cartographie du champ magnétique terrestre Oersted et CHAMP (CHAllenging Minisatellite Payload) lancés respectivement en 1999 et 2000. Ces instruments, chargés de fournir une mesure absolue de l'intensité du champ magnétique et d'étalonner les magnétomètres vectoriels complétant l'instrumentation magnétique embarquée, ont très largement contribué au succès de ces missions sur les résultats desquelles reposent les derniers modèles du champ terrestre (figure 1).



Figure 1. Carte de l'intensité du champ magnétique terrestre à la surface du globe dérivée du modèle établi grâce aux données du satellite danois Oersted.

PGP



Boîtier électronique du magnétomètre hélium de Swarm, situé dans le corps du satellite et permettant de faire fonctionner la sonde.

CEA/G. Galove

À la fin des années 1990, cette technologie de capteur RMN a fait l'objet d'un transfert industriel, largement facilité par les résultats obtenus lors des nombreux travaux de qualification menés à bien au cours de la préparation de ces missions spatiales.

Un magnétomètre de nouvelle génération

Parallèlement, le Léti a entrepris le développement d'une nouvelle génération de magnétomètres scalaires très haute résolution utilisant l'hélium 4. Outre des performances métrologiques améliorées, comme la résolution à bas champ - qui représentait un véritable défi pour les sondes RMN - augmentée de plus d'un ordre de grandeur ou encore la bande passante de mesure multipliée par mille, ce nouveau type de capteur présente par rapport à ses prédécesseurs des avantages déterminants en termes de susceptibilité à l'environnement (compatibilité électromagnétique et tenue aux gradients magnétiques principalement). Ce point se révèle particulièrement précieux lors des phases d'intégration et de tests au sol des satellites, car il permet de vérifier pendant toute la durée de ces essais l'intégrité du magnétomètre. Ce nouvel instrument, qui intègre de nombreuses briques technologiques innovantes (laser, actionneur piézoélectrique, circuit intégré de traitement numérique développé spécifiquement pour cette application) et dont la qualification spatiale est en cours sous l'égide du Cnes, sera embarqué à l'horizon 2010 à bord des trois satellites de la mission Swarm. Décidée dans le cadre du programme "Observation de la Terre" de l'Agence spatiale européenne (Esa), cette mission vise à établir une cartographie du champ magnétique terrestre avec une résolution inégalée grâce au déploiement d'une constellation de trois satellites volant sur des orbites voisines. L'intérêt d'une constellation

(3) Lithosphère: partie superficielle et rigide de la matière constituant les astres telluriques. Pour la Terre, elle est constituée de la croûte et de la partie superficielle du manteau supérieur.
(4) Ionosphère: région de particules chargées dans la haute atmosphère s'étendant pour la Terre de 40 km à 460 km ou plus.

est de pouvoir, en jouant sur les altitudes et sur les heures locales, mieux séparer les contributions des différentes sources de ce champ (champ interne, champ lithosphérique⁽³⁾, courants induits dans la Terre et les masses d'eau océanique en mouvement, courants ionosphériques⁽⁴⁾ et **magnétosphériques**) et répondre à des questions essentielles sur la dynamique interne de la planète, notamment sur le fonctionnement encore mal compris de la **dynamo** terrestre.

L'instrument proposé dans le cadre de ce projet aura, en outre, la particularité d'expérimenter un nouveau concept offrant la possibilité de réaliser avec la même sonde les mesures absolue et vectorielle du champ magnétique. Cela constitue une innovation technologique importante dans le domaine de la magnétométrie spatiale, dans la mesure où une telle solution permettrait de réduire la charge instrumentale embarquée et, par conséquent, de simplifier la conception du satellite.

La participation du CEA à cette mission renforce également les liens déjà solidement établis aussi bien avec le Cnes qu'avec les laboratoires français (**Institut de physique du globe de Paris**) et européens (**GeoForschungsZentrum** allemand, **Danish Space Research Center** danois) chargés de l'exploitation scientifique des données.

Ces développements verront leur aboutissement début 2010 lorsque la constellation Swarm sera déployée en orbite. Les magnétomètres hélium prendront ainsi symboliquement le relais de la technologie RMN embarquée lors des précédentes missions. Ils assureront une continuité dans l'espace de plus de dix ans d'observations magnétiques de très haute résolution et rendront possible le suivi de l'évolution à moyen terme de l'intensité du champ magnétique sur toute la surface de la Terre.

> > Jean-Michel Léger Institut Léti Direction de la recherche technologique CEA Centre de Grenoble

MÉMO D

Le champ terrestre, faible mais vital

a Terre possède son propre champ magnétique, se comportant comme un énorme aimant. Son étude relève du géomagnétisme. Ce champ peut, en première approximation, être assimilé à celui d'un dipôle centré dont l'axe ne coïncide d'ailleurs pas avec celui de la rotation de la Terre puisqu'ils forment actuellement un angle de 11,5°, valeur qui évolue au cours du temps en fonction des mouvements du noyau de la planète (figure).



L'angle formé entre la direction du pôle nord *magnétique* et celle du pôle nord *géographique*, ou déclinaison magnétique, varie d'un point de la surface du Globe à l'autre. L'angle formé par le vecteur du champ magnétique et la surface terrestre est l'inclinaison magnétique.

Au dipôle centré sont associées des lignes de champ magnétique qui relient le pôle Sud au pôle Nord. Les deux points où les **lignes de champ** convergent et sont verticales à la surface du globe correspondent aux **pôles magnétiques**, respectivement situés aujourd'hui au Canada et en Terre Adélie. Le pôle Nord magnétique (qui correspond au pôle Sud de l'aimant que constitue la planète) est celui sur lequel s'aligne l'aiquille des boussoles.

Le champ magnétique terrestre est un champ relativement faible, de l'ordre de 0,5 gauss, soit 5 · 10⁻⁵ tesla (valeur à Paris, par exemple). Il est créé par l'effet dynamo engendré par les mouvements du noyau de la planète. Le pôle Nord magnétique se déplace d'une centaine de kilomètres par an. Même si l'intensité du dipôle n'est pas très forte, les lignes du champ dipolaire forment un écran vis-à-vis de toute particule chargée et mettent les Terriens à l'abri des rayonnements cosmiques. Comme d'autres planètes du système solaire (Mercure, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune), la Terre possède ainsi une magnétosphère qui protège sa surface du vent solaire mais ce dernier déforme les lignes de son champ magnétique.

Le champ magnétique terrestre est loin d'être uniforme. Il présente des **anomalies magnétiques**, déviations de la force du champ constatées par rapport au modèle global, qui peuvent être importantes à l'échelle de toute une région. C'est le cas de l'anomalie de l'Atlantique Sud, qui n'est pas sans conséquence sur la dose de rayons cosmiques reçue par les équipages et les passagers des avions et des vaisseaux spatiaux qui la traversent.

D'autres composantes plus faibles du champ magnétique terrestre, dites *non dipolaires*, se superposent au dipôle principal et ont des constantes de temps beaucoup plus courtes que celles du dipôle; elles n'ont pas d'effet significatif au-delà de la surface terrestre.

Au cours des temps géologiques, le champ magnétique de la Terre a subi de fortes fluctuations, vécu des périodes d'instabilité importantes dont aucune n'est véritablement périodique, et connu plusieurs inversions de ses pôles magnétiques. En témoignent les empilements de coulées de lave ou les séguences sédimentaires qui s'accumulent au fond des océans. Ces deux types de roches ont, en effet, la capacité de rester magnétisées dans la direction du champ magnétique existant lors de leur refroidissement à la température de Curie (point de Curie), un peu en dessous de 500 °C, et donc de garder la mémoire du champ magnétique régnant à la surface du Globe pendant ce refroidissement (ou pendant leur dépôt via les petits grains magnétiques qui les composent). C'est le phénomène de rémanence magnétique qui a permis le développement du paléomagnétisme. La direction du champ rémanent, qui peut être complètement différente de la direction du champ local actuel, est caractéristique du champ local lors de la formation de la roche. Les roches volcaniques, après avoir traversé l'écorce terrestre à une température supérieure au point de Curie des minéraux qui les composent, se refroidissent et s'aimantent sous l'effet du champ terrestre au passage de ce point dans le sens inverse. Moins sensibles au phénomène, les roches sédimentaires voient les particules magnétiques s'orienter dans la direction du champ terrestre lors de la sédimentation et conserver cette orientation. Les sédiments qui se déposent dans les fonds océaniques contiennent des minéraux magnétiques dont le plus facile à détecter est la célèbre magnétite. Cette aimantation est proportionnelle à l'intensité du champ et n'évolue pas à la température ordinaire. Mais d'autres facteurs influent sur l'aimantation rémanente : l'action continuelle du champ terrestre, les champs intenses ponctuels (dus par exemple à la foudre) et la cristallisation qui peut en modifier l'intensité ou la direction.

Renversements et excursions du champ

Le champ magnétique terrestre connaît deux types d'instabilités, les *renversements* et les excursions. Les renversements correspondent à des inversions des pôles Sud et Nord magnétiques, dont la plus récente a eu lieu il y a environ 790 000 ans. Ce type d'inversions a été mis en évidence pour la première fois en 1906 en France par Bernard Bruhnes, mais il a fallu attendre les années 1960 pour que les études se multiplient et établissent que ces phénomènes d'inversion sont vraiment une caractéristique globale du champ magnétique terrestre. Elles ont surtout montré qu'ils se produisaient de façon erratique et imprédictible, avec une alternance de polarité stable pendant de longues périodes (plusieurs centaines de milliers d'années) et de renversements rapides (quelques milliers d'années) et que le taux de renversement avait augmenté au cours de la dernière centaine de millions d'années, passant de un, au début de cette période, à quatre renversements par million d'années pendant les cinq derniers millions d'années, la période "normale" actuelle semblant donc "anormalement" longue. Les excursions géomagnétiques sont des instabilités de plus courte durée. Si, comme pour les inversions, la polarité s'inverse complètement, la polarité initiale se rétablit aussitôt. Les études menées au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/CEA-CNRSuniversité de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines) ont montré que la durée d'une excursion est de l'ordre de 1500 ans, apportant une première vérification de la théorie du géophysicien anglais David Gubbins selon laquelle les excursions ne se produisent que dans le noyau externe *fluide* de la Terre et non pas dans le noyau solide.

MÉMO A

Les différentes formes de magnétisme

e magnétisme trouve essentiellement son origine dans les propriétés des électrons telles qu'elles sont expliquées par la physique quantique. Leur état quantique de spin est responsable d'une première partie du magnétisme (magnétisme de spin). Une deuxième partie est imputable au mouvement orbital des électrons autour du noyau de l'atome (magnétisme orbital) et également au magnétisme du noyau lui-même (magnétisme nucléaire), notamment mis à profit dans les techniques d'imagerie médicale par résonance magnétique nucléaire. Le magnétisme est donc produit par des charges électriques en mouvement. La force agissant sur ces charges, dite force de Lorentz, traduit la présence d'un champ magnétique.

L'électron possède un moment magnétique élémentaire (le quantum magnétique étant le magnéton imaginé par Bohr) qui peut être associé à l'image de son mouvement de rotation du spin sur lui-même dans un sens ou dans l'autre, orienté vers le haut ou vers le bas. Le nombre quantique de spin (un des quatre nombres qui "quantifient" les propriétés de l'électron) est égal à 1/2 (+ 1/2 ou - 1/2). Une paire d'électrons ne peut occuper la même orbitale que si l'un et l'autre sont de moments magnétiques opposés.

Chaque atome peut être assimilé à un petit aimant porteur d'un moment magnétique élémentaire. Le spin du noyau (**neutron** et **proton** ont eux-mêmes un spin demi-entier) est demi-entier si le **nombre de masse** est impair; nul si le nombre de masse et la charge sont pairs, et entier si le nombre de masse est pair et la charge impaire.

De nombreux moments magnétiques peuvent, à une échelle plus importante, constituer des domaines magnétiques dans lesquels tous ces moments sont orientés dans la même direction. Ces régions de l'espace sont séparées entre elles par des parois. Rassemblés, ces domaines peuvent eux-mêmes constituer un aimant à l'échelle macroscopique (figure E1). De l'organisation de ces constituants élémentaires dépend la manifestation de différents types de magnétisme, associés tra-

ditionnellement à trois grandes familles de matériaux : *ferromagnétiques*, *paramagnétiques* et *diamagnétiques*. Tous les matériaux qui ne sont pas dia-

magnétiques sont par définition paramagnétiques, dans la mesure où leur susceptibilité magnétique est positive, mais cette susceptibilité est particulièrement élevée dans les ferromagnétiques, qui constituent donc en eux-mêmes une famille. 1. Les matériaux ferromagnétiques sont constitués de petits domaines à l'intérieur desquels les atomes, présentant une aimantation parallèle, tendent à s'aligner comme autant de **dipôles** élémentaires dans la direction d'un champ magnétique extérieur. Les moments magnétiques de chaque atome peuvent s'aligner spontanément dans ces domaines, même en l'absence de champ extérieur. En présence d'un tel champ, les parois se déplacent et tendent à renforcer le champ appliqué. Si celui-ci dépasse une certaine valeur, le principal domaine orienté dans la direction du champ tendra à occuper tout le volume du matériau. Si le champ diminue, les parois se déplacent, mais pas de façon symétrique, une partie du mouvement "aller" des parois étant irréversible : il subsiste donc une magnétisation rémanente, importante dans les aimants proprement dits ou la magnétite naturelle.

L'ensemble du processus constitue un cycle d'hystérésis, la relation du champ induit au champ extérieur dessinant une *boucle*



Figure E1.

Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposé et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



Figure E2.

L'induction B d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ H). Si la première aimantation dessine une courbe de type OSS en bleu sur la figure, elle manifeste à partir de s une saturation. L'induction n'est conservée qu'en partie si le champ tend vers zéro; cette induction rémanente ne peut être annulée que par une inversion du champ magnétique jusqu'à une valeur de champ "coercitif". Le cycle d'hystérésis traduit des pertes "par frottement" entre les domaines magnétiques. Ces pertes sont représentées par la surface que délimitent les courbes d'aimantation et de désaimantation.

ou *courbe d'hystérésis* dont la surface représente l'énergie perdue dans la partie irréversible de ce processus (figure E2). Pour annuler le champ induit, il faut appliquer un champ coercitif: les matériaux avec lesquels les aimants permanents artificiels sont réalisés présentent une valeur élevée de champ coercitif.

En général, le moment magnétique total des matériaux ferromagnétiques est nul, les différents domaines ayant des orientations différentes. Le ferromagnétisme disparaît si on dépasse une certaine température appelée **point de Curie**.

Le couplage collectif des spins entre centres métalliques du matériau ou d'un complexe de métaux de transition explique les propriétés magnétiques du matériau, les moments de tous les spins se trouvant tous orientés de manière identique.

Les matériaux dont les atomes sont éloignés les uns des autres dans leur structure **cristalline** favorisent un alignement de ces aimants élémentaires par couplage. Le fer, mais aussi le cobalt, le nickel et leurs **alliages**, en particulier les aciers, et certains de leurs composés appartiennent à cette catégorie caractérisée par une susceptibilité magnétique positive et très élevée, ainsi que,



Arrivée à la gare routière de Long Yang, à Shanghai (Chine), d'un train à sustentation magnétique du type Transrapid, d'origine allemande, mis en service en 2004 pour relier la ville à l'aéroport international de Pudong.

plus faiblement, certains métaux de la famille des terres rares, quelques alliages dont les mailles sont grandes et certaines combinaisons d'éléments n'appartenant pas euxmêmes à cette famille.

Dans les matériaux ferrimagnétiques, les domaines magnétiques constituent des ensembles pouvant être alignés dans des sens opposés (anti-parallèles), mais leur moment magnétique résultant diffère de zéro alors que le champ extérieur est nul (exemples de la magnétite, de l'ilménite ou des oxydes de fer). Le ferrimagnétisme s'observe dans des matériaux comportant deux types d'atomes se comportant comme des aimants de force différente et orientés en sens contraire. Si la somme des moments parallèles et anti-parallèles est nulle, il s'agit d'anti-ferromagnétisme (exemple du chrome ou de l'hématite). En effet, si les atomes sont plus rapprochés, la disposition la plus stable est celle d'aimants antiparallèles, chacun compensant en quelque sorte son voisin (figure E1).

2. Les matériaux paramagnétiques présentent un comportement de même nature que les ferromagnétiques, bien que beaucoup moins intense (leur susceptibilité magnétique est positive mais très faible, de l'ordre de 10-3). Chaque atome d'un tel matériau a un moment magnétique non-nul. Sous l'action d'un champ extérieur, les moments magnétiques s'orientent et augmentent ce champ, qui décroît cependant avec la température, l'agitation thermique désorientant les dipôles élémentaires. Les matériaux paramagnétiques perdent leur aimantation dès qu'ils ne sont plus soumis au champ magnétique. La plupart des métaux, y compris des alliages d'éléments ferromagnétiques, font partie de cette famille, ainsi que des minéraux comme la pegmatite.

3. Les matériaux diamagnétiques présen-

tent une susceptibilité magnétique négative et extrêmement faible (de l'ordre de 10⁻⁵). La magnétisation induite par un champ magnétique s'opère dans la direction opposée à ce dernier : ils ont donc tendance à s'éloigner le long de ses lignes de champ vers les zones de faible champ. Un diamagnétique parfait offrirait une résistance maximale au passage du champ magnétique et présenterait une perméabilité nulle. Les métaux comme l'argent, l'or, le cuivre, le mercure ou le plomb, le quartz, le graphite, les gaz rares ainsi qu'une grande majorité des composés organiques se rangent dans cette catégorie.

En fait, tous les corps présentent peu ou prou ce phénomène de diamagnétisme, imputable à la déformation des orbitales électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur, phénomène réversible avec la disparation du champ extérieur. Comme Michael Faraday l'a montré en son temps, toute substance est donc plus ou moins "magnétisable" pour autant qu'elle soit placée dans un champ magnétique suffisamment intense.

L'électromagnétisme

C'est le Danois Hans Christian Ørsted, professeur à l'Université de Copenhague qui, le premier, a fait autour de1820 le lien entre les deux domaines jusqu'alors complètement séparés de l'électricité et du magnétisme. Il a mis en évidence la déviation de l'aiguille d'une boussole à proximité d'un fil parcouru par un courant électrique, avant que Faraday n'énonce la loi qui porte son nom : le champ magnétique produit est d'autant plus fort que l'intensité du courant est importante. La discipline qui étudie les champs magnétiques statiques (ne dépendant pas du temps) est la magnétostatique. Le champ magnétique forme, avec le champ



Vue de détail des aimants pour le quidage et la propulsion du train.

électrique, les deux composantes de l'électromagnétisme. Des ondes peuvent se propager librement dans l'espace, et dans la plupart des matériaux, dans tous les domaines de longueur d'onde (ondes radio, micro-ondes, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma). Les champs électromagnétiques sont donc une combinaison de champs de force électriques et magnétiques naturelle (le champ magnétique terrestre) ou non (de basses fréquences comme les lignes et les câblages électriques, ou de plus haute fréquence comme les ondes radio (téléphone cellulaire compris) ou de télévision.

Mathématiquement, les lois de base de l'électromagnétisme sont résumées dans les quatre équations de Maxwell (ou de Maxwell-Lorentz) qui permettent de décrire l'ensemble des phénomènes électromagnétiques de manière cohérente, de l'électrostatique et la magnétostatique à la propagation des ondes. James Clerk Maxwell les a formulées en 1873. trentedeux ans avant qu'Albert Einstein ne place la théorie de l'électromagnétisme dans le cadre de la relativité restreinte, qui expliquait ses incompatibilités avec les lois de la physique classique.