

Coupler capteurs magnétiques et accéléromètres pour capturer les mouvements

En associant des micro-capteurs magnétiques et des micro-accéléromètres, les chercheurs peuvent désormais proposer au corps médical et même au grand public de véritables centrales d'attitude embarquées sur le corps, équivalents des centrales inertielles des véhicules les plus sophistiqués.

La boussole fut inventée par les Chinois au premier siècle de notre ère. Généralement constituée d'une aiguille aimantée tournant librement dans un plan horizontal, la boussole s'oriente automatiquement selon les lignes de champ magnétique de la Terre. La boussole peut ainsi être considérée comme le premier capteur magnétique dont l'usage a été un instrument d'aide à la navigation maritime, donc en fait à l'analyse de mouvements dans un plan horizontal, en utilisant un repère de référence gratuit et présent partout, le champ magnétique terrestre (Mémo D, *Le champ terrestre, faible mais vital*, p. 99). Grâce à l'évolution de la microélectronique et des microsystèmes, il est désormais possible de réaliser des micro-capteurs magnétiques. Différents principes de mesure sont appliqués : effet Hall, microfluxgate (voir *Le microfluxgate, ou comment concilier précision et économie dans un magnétomètre*, p. 111), magnétorésistance géante. Dans tous les cas, les dimensions millimétriques atteintes permettent d'intégrer ces capteurs dans des objets comme des montres.

Le second champ terrestre est le champ de gravité généré par la force d'attraction de la Terre. Depuis longtemps, ce champ est utilisé par les maçons pour garantir la verticalité des murs avec le célèbre "fil à plomb". De la même façon, avec un pendule il est possible d'évaluer les mouvements par rapport à la verticale. La méthode moderne pour mesurer la force de gravité est l'emploi d'un accéléromètre qui, dans une configuration statique, ne mesure que cette force. Comme pour les capteurs magnétiques, les micro-accéléromètres sont fabriqués dans des technologies de production collective issues de la microélectronique (les microélectroniciens parlent souvent de MEMS : *Micro-Electro-Mechanical Systems* pour désigner les micro-capteurs mécaniques). L'usage le plus répandu de micro-accéléromètres est la détection d'impact dans l'airbag automobile.

L'association des capteurs de mesure de champ magnétique et des accéléromètres conduit à un dispo-



CEA

sitif sensible à la fois aux mouvements de rotation dans le plan horizontal et aux mouvements d'inclinaison par rapport à la verticale. Il est alors possible, par un calcul mathématique de type fusion de données, de calculer des angles de rotation dans un repère tridimensionnel, à savoir les angles de lacet, roulis et tangage (figure 1).

Dispositif Star Watch conçu par le LÉTI. Cette micro-centrale d'attitude, ici conditionnée sous la forme d'une montre, contient notamment des micro-magnétomètres et un module radiofréquence lui permettant de communiquer ses données à un boîtier central.



Figure 1. Principe de l'évaluation des angles de rotation dans un repère tridimensionnel, à partir d'informations de type mesures de verticalité et de rotation par rapport au nord magnétique.

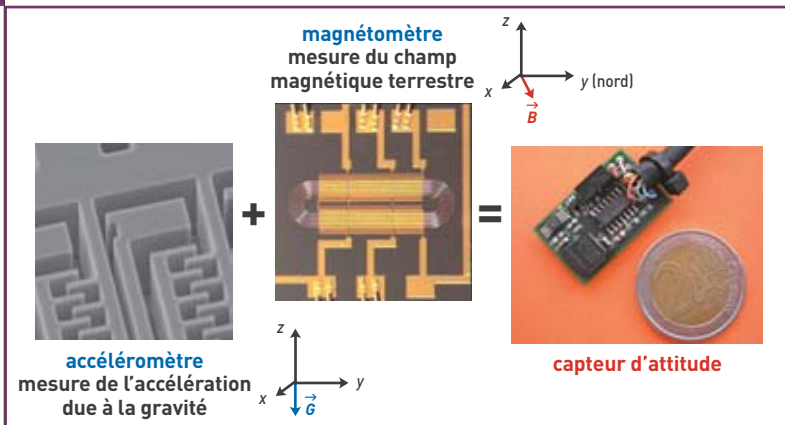


Figure 2. Principe de la réalisation d'une centrale d'attitude à partir de capteurs de type accéléromètre tri-axes et de magnétomètres tri-axes.

Une association réussie

À partir de ce principe physique simple, le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (CEA-Léti) a développé une micro-centrale d'attitude (figure 2) qui permet de mesurer des mouvements de rotation dans un repère tridimensionnel. Les applications sont multiples aussi bien dans le domaine "grand public", comme l'interface 3D avec un ordinateur ou la mesure de mouvements pour le sport, que dans celui de la santé.

Améliorer les interfaces homme-machine

L'interface la plus utilisée avec un ordinateur est la souris optique. Relativement facile d'emploi, ce dispositif n'est cependant adapté qu'à un déplacement dans le plan, celui des bureaux "informatique" et "physique". Le recours à une centrale d'attitude permet d'enrichir notablement les possibilités de déplacements, ce qui est particulièrement intéressant pour des applications liées à un mouvement dans l'espace. Prenons l'exemple d'une base de données 3D comme celle que fournit l'IGN sur le territoire français. Il est possible d'interfacer de manière simple la centrale d'attitude avec un moteur logiciel de navigation. Au final, l'opérateur obtient une façon très intuitive de se déplacer sur la France comme s'il pilotait un avion. Dans le cas des jeux vidéo, les concepteurs de la console Wii ont déjà franchi le pas, qui consiste à uti-

liser des MEMS inertiels (accéléromètres en l'occurrence) pour prendre en compte les mouvements du joueur. Le succès de cette évolution ouvre la porte à d'autres améliorations et il y a fort à parier que la prochaine étape sera basée sur l'emploi de magnétomètres pour enrichir la prise en compte du geste. En effet, ces derniers pourront compléter efficacement les données issues des MEMS inertiels en fournissant une orientation absolue par rapport au champ magnétique terrestre, tout en restant insensibles à la dynamique du mouvement.

Un dernier exemple d'interface pouvant tirer parti de magnétomètres est donné, de façon plus générique, par les dispositifs électroniques portés par la personne (téléphone portable, organisateur PDA, GPS...). Les architectures électroniques, les mémoires et les écrans donnent les moyens aujourd'hui de stocker, d'échanger et d'afficher des données de plus en plus nombreuses et variées. Par ailleurs, la tendance sera probablement d'utiliser certains de ces objets comme de véritables commandes d'interaction avec notre environnement. Pour rendre possibles ces évolutions, les interfaces homme-machine devront progresser pour savoir prendre en compte cette nouvelle complexité. À ce titre, les capteurs inertiels et d'orientation sont appelés à jouer un rôle important. Ils permettront par exemple de naviguer plus facilement dans une arborescence de documents, de bénéficier d'une véritable télécommande avec l'environnement physique, comme télécharger des informations sur un spectacle en pointant une affiche, d'aider un piéton à naviguer dans une ville et dans des bâtiments...

Capter les mouvements

Dans le domaine de la capture de mouvements, il est également possible de tirer parti des centrales d'attitude. Certes, des procédés existent déjà pour reproduire des gestes humains mais ce sont des dispositifs optiques très coûteux et nécessitant une infrastructure dédiée. En pratique, ils sont employés en studio de production pour des applications visant des films d'animation et des jeux vidéo. Une façon beaucoup plus simple de procéder devrait voir le jour d'ici peu. Elle consiste à utiliser des centrales inertiels⁽¹⁾ embarquées, c'est-à-dire fixées sur le corps. En fusionnant les



Interface avec une base de données 3D de l'IGN. La navigation est fonction de l'orientation donnée à la manette dans l'espace.

signaux recueillis *via* un **modèle** biomécanique, il est possible de reproduire le mouvement d'un sportif sans devoir recourir à des équipements lourds. De même, la multiplication des points de mesures dynamiques permettra d'analyser et de quantifier les paramètres de certains gestes, jusque-là inaccessibles, tels que les angles de rotation, les accélérations de certaines parties du corps... Le Léti travaille actuellement sur des sports comme le ski, l'aviron ou l'athlétisme. Pour ce faire, une micro-centrale d'attitude sans fils, appelée *Star Watch*, a été conçue pour équiper facilement des athlètes. De la taille d'une montre, elle envoie ses mesures sur une unité centrale située à plusieurs mètres. Jusqu'à 16 *Star Watch* peuvent dialoguer en parallèle avec l'unité centrale. Un tel dispositif est évidemment très peu intrusif et surtout complètement autonome. Il offre d'autres perspectives d'applications, en particulier dans le domaine médical.

Trois grandes applications médicales

Dans le domaine de la santé, l'analyse des mouvements d'un sujet est un paramètre très important dans l'établissement d'un diagnostic. Cette analyse est généralement réalisée visuellement par le médecin qui observe le patient accomplir une tâche. Il y a un intérêt grandissant à quantifier ces analyses de mouvements, de façon à pouvoir effectuer une analyse plus précise mais aussi plus reproductible au cours du temps. La micro-centrale d'attitude est alors un excellent candidat pour la quantification des mouvements humains. Plusieurs projets sont en cours au Léti, en gériatrie, neurologie et rééducation.

Chez les personnes âgées, le mouvement et l'activité sont de très bons critères pour évaluer l'état général de la personne et son évolution éventuelle au cours du temps. Dans la pratique clinique, le patient effectue des tests normalisés qui sont notés, comme le test de *Up&Go*. Le patient débute le test assis sur un fauteuil, il se lève, marche cinq mètres en avant, fait un demi-tour, revient vers le fauteuil, en fait le tour et se rassoit. Sur ce test, différents critères qualitatifs sont notés par le médecin, comme la qualité d'un lever de chaise, la vitesse d'exécution du test, la qualité de la marche. En plaçant une micro-centrale d'attitude de type *Star Watch* sur le thorax de la personne, il est possible d'enregistrer ses mouvements pendant le test, puis de calculer des critères quantitatifs décrivant la qualité de réalisation du test. Cette mesure devient ainsi plus précise, plus reproductible et indépendante de l'interprétation du médecin.

En neurologie, l'analyse des mouvements anormaux est un élément important dans l'établissement d'un diagnostic. Par exemple, dans le domaine de l'épilepsie, il est possible d'enregistrer les crises pendant des phases de diagnostic, en plaçant des capteurs de mouvements sur un sujet, typiquement sur les bras et le torse. Les informations ainsi recueillies permettent de comparer les crises entre elles et d'affiner le diagnostic par une analyse pointue des manifesta-



Diagnostic clinique d'analyse d'activité pour une personne âgée. Les mouvements sont enregistrés avec une micro-centrale d'attitude placée sur le thorax.

CEA

tions motrices. Un tel système est en cours d'expérimentation au CHU-Grenoble.

Enfin, la rééducation fonctionnelle est un candidat naturel pour l'analyse de mouvements. La première application en cours de développement est le bilan articulaire chez le kinésithérapeute, par exemple pour évaluer des amplitudes d'une articulation avant et après une série de séances de rééducation. Toutefois, il est aussi possible de développer des applicatifs avec retour visuel à l'utilisateur, ou *feed-back*, pour lui montrer les mouvements réalisés ou lui proposer des mouvements sous la forme d'objectifs à atteindre.

Un avenir prometteur pour les capteurs magnétiques

Cet article a volontairement insisté sur les applications où le capteur magnétique peut être vu comme un complément précieux des capteurs inertiels, tels que les accéléromètres. Il a été montré que cette association est très riche en termes d'applications. De la médecine aux interfaces homme-machine, en passant par l'analyse du geste sportif, il existe de nombreux domaines où une telle centrale d'attitude peut offrir une instrumentation réellement innovante pour capturer les mouvements humains. Enfin, il faut souligner que ces capteurs sont aujourd'hui très bon marché. Ce sont donc bien des applications grand public qui sont visées ici. Pour toutes ces raisons, les chercheurs pensent que l'analyse et la capture de mouvements occuperont une place essentielle dans les années à venir et que les micro-capteurs magnétiques seront incontournables dans la plupart des applications. En allant plus loin, il faut se demander si ce n'est pas un véritable domaine scientifique qui s'ouvre. Ainsi, au même titre que le traitement d'images ou le traitement du son, la capture de mouvements pourrait conduire à des développements technologiques spécifiques de capteurs ainsi qu'à une nouvelle discipline du traitement du signal. Dans cette hypothèse, ce sont donc des travaux de recherche et de développement encore conséquents qui attendent les scientifiques.

➤ Régis Guillemaud et Sébastien Dauvé

Institut Léti

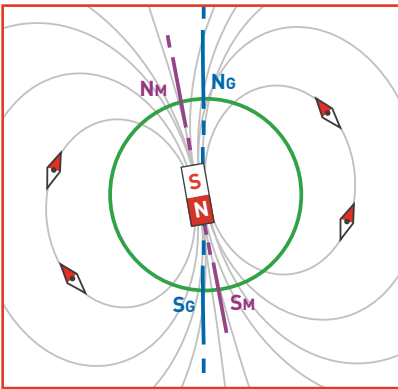
Direction de la recherche technologique

CEA Centre de Grenoble

(1) Centrale inertielle: dispositif de navigation comportant une plate-forme stabilisée gyroscopique donnant une référence et supportant des accéléromètres qui mesurent en temps réel, sur les trois axes (roulis, tangage, lacet) les accélérations du corps mobile qui en est équipé. Une première intégration des données fournit les composantes du vecteur-vitesse, une seconde la position dans l'espace et l'attitude.

Le champ terrestre, faible mais vital

La 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 $11,5^\circ$, 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'aiguille des boussoles.

Le champ magnétique terrestre est un champ relativement faible, de l'ordre de $0,5$ **gauss**, soit $5 \cdot 10^{-5}$ **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 séquences 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 conser-

ver 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 continue 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-CNRS-université 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*.

Les différentes formes de magnétisme

Le **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 traditionnellement à trois grandes familles de matériaux : *ferromagnétiques*, *paramagnétiques* et *diamagnétiques*.

Tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques 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*

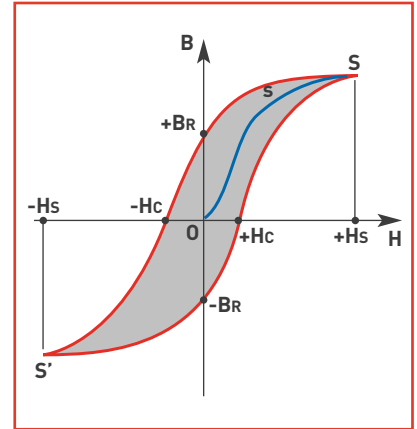


Figure E2. L'induction B d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ H). Si la première aimantation dessine une courbe de type OS sur la figure, elle manifeste à partir de s une saturation. L'induction n'est conservée qu'en partie si le champ tend 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 **crystalline** 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,

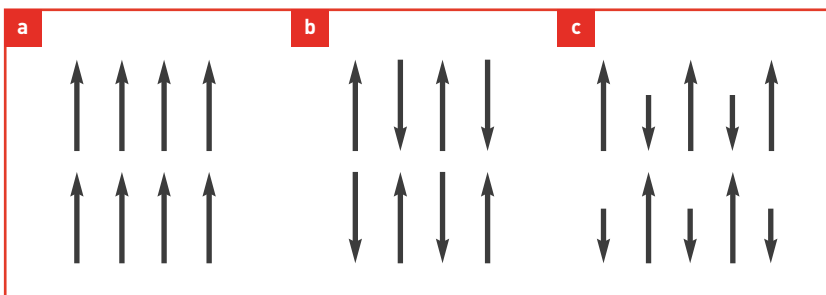


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposé et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



Stoiber Productions, München

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 eux-mêmes 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.

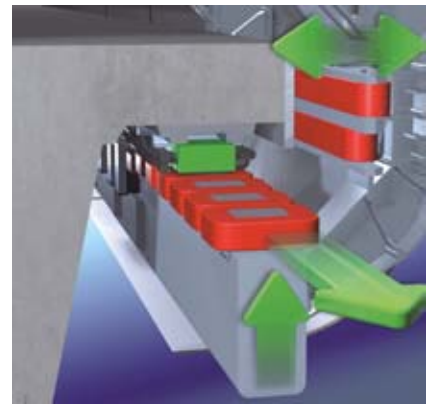
3. Les matériaux **diamagnétiques** présen-

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 disparition 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 de 1820 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 guidage 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 câbles 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, trente-deux 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.