



# MAGNÉTIQUE

5 novembre 2019 – 29 novembre 2020  
**Enseignants de cycle 4 et de lycée**



Département Éducation et Formation  
[educ-formation@universcience.fr](mailto:educ-formation@universcience.fr)

2019

# Sommaire

## I L'exposition *Magnétique*

|       |   |    |
|-------|---|----|
| I.1   | Situation et plans                                    | 3  |
| I.2   | Contexte et objectifs de l'exposition                 | 4  |
| I.3   | Contenu   |    |
| I.3.1 | Îlot 1 - Magnétisme, où le trouver ?                  | 5  |
| I.3.2 | Îlot 2 - Magnétisme, comment l'expliquer ?            | 17 |
| I.3.3 | Îlot 3 - Magnétisme, pour quoi faire ?                | 22 |
| I.3.4 | Îlot 4 - Magnétisme, quels rôles dans un ordinateur ? | 33 |
| I.3.5 | Îlot 5 - Magnétisme, quelles recherches ?             | 43 |
| I.3.6 | Les bornes multimédia                                 | 52 |

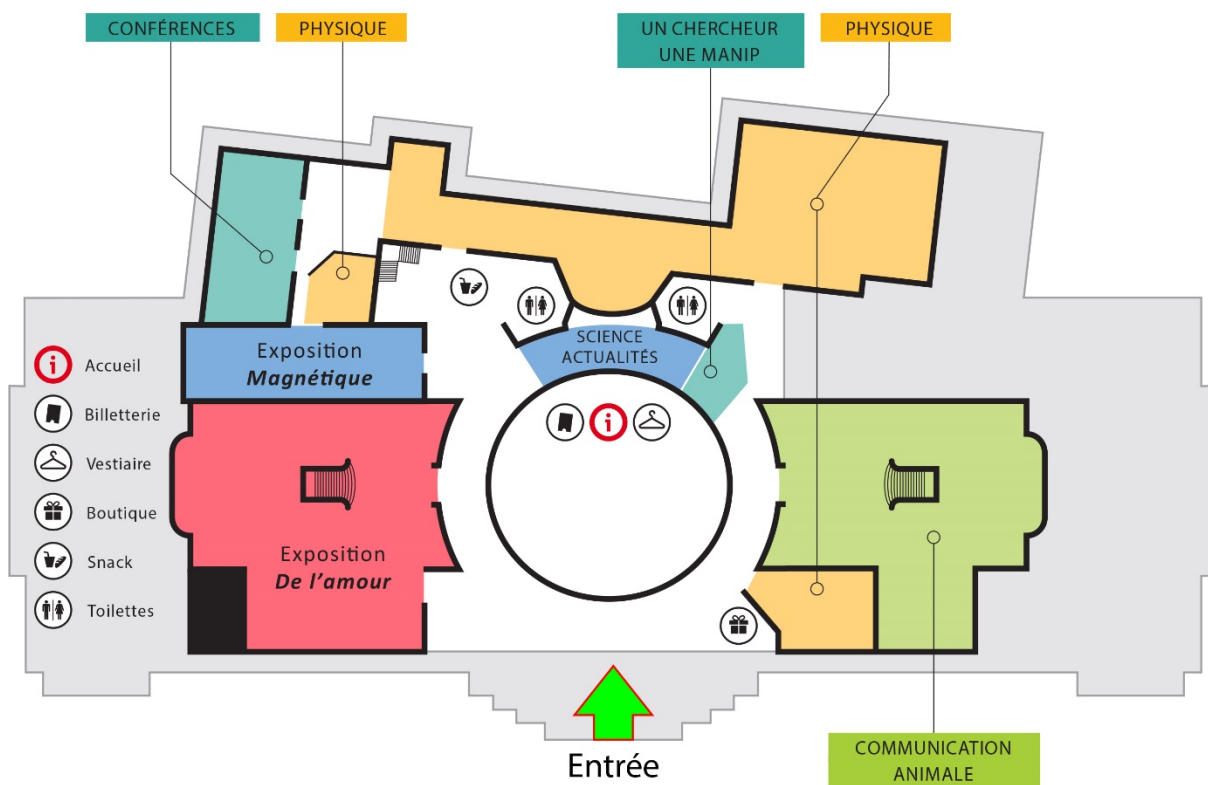
## II Ressources

|      |  |    |
|------|--|----|
| II.1 | Médiations                                     | 53 |
| II.2 | 1 chercheur-e 1 manip                          | 54 |
| II.3 | Un livret pour le jeune public                 | 54 |
| II.4 | Conférences                                    | 54 |
| II.5 | Liens avec les programmes scolaires de cycle 4 | 55 |
| II.6 | Bibliographie                                  | 57 |

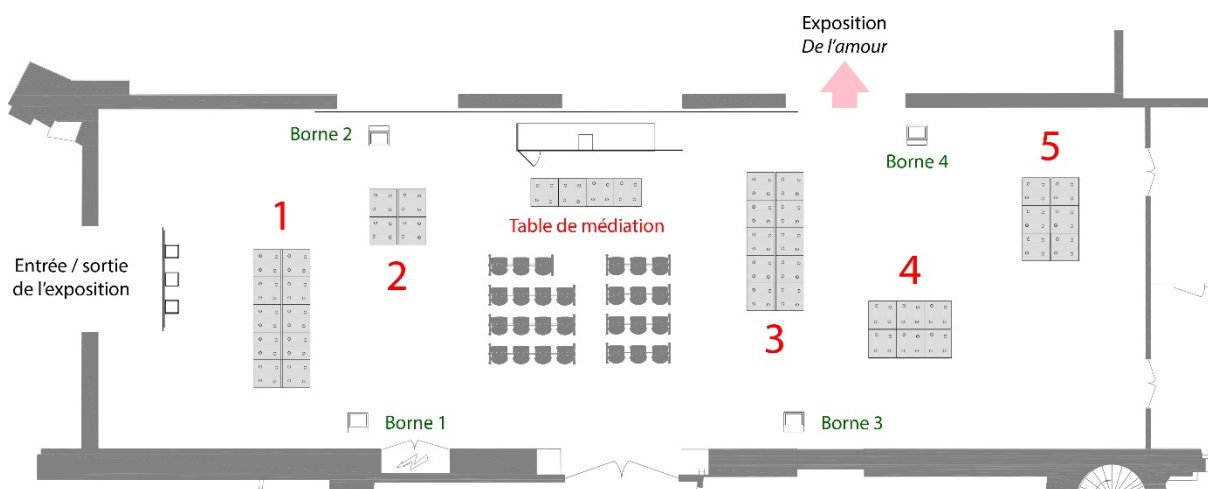
## III Informations pratiques 60

# I L'exposition Magnétique

## I.1 Situation et plans



Plan schématique du rez-de-chaussée du Palais de la découverte.



Plan schématique de l'exposition.

Prenant place au rez-de-chaussée du Palais de la découverte, l'exposition temporaire *Magnétique* occupe une surface de 300 m<sup>2</sup>. Il s'agit de l'une des deux dernières expositions qui seront présentées au Palais de la découverte avant sa fermeture pour rénovation, prévue pour une durée de quatre ans.

## 1.2 Contexte et objectifs de l'exposition

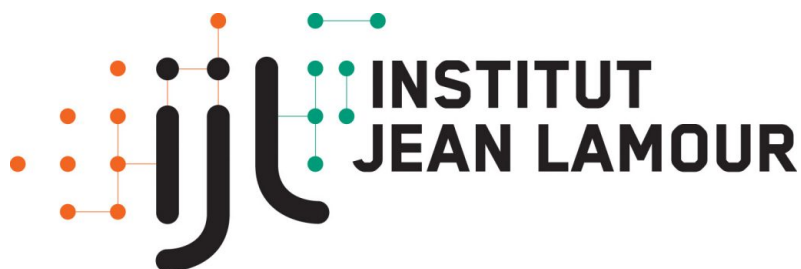
Le magnétisme est à l'origine de nombreuses applications modernes : moteurs, cartes bancaires, éoliennes, trains à lévitation... Malgré l'évolution de la recherche scientifique, les phénomènes magnétiques continuent d'intriguer et de susciter de nombreuses questions.

L'exposition *Magnétique* propose une approche ludique du magnétisme, partant des applications de notre quotidien pour aborder des thématiques plus complexes notamment dans la recherche de pointe et dans le domaine des nanomatériaux.

Une soixantaine d'expériences interactives réparties en cinq îlots thématiques permettent de répondre de façon pratique aux grandes questions liées au magnétisme :

- **1 Où le trouver ?** Une thématique abordée avec des aimants pour comprendre les notions d'attraction et de répulsion, les matériaux magnétiques, le ferrofluide ou encore le tri magnétique.
- **2 Comment l'expliquer ?** On traite ici du magnétisme de l'atome, du ferromagnétisme et du magnétisme dans la matière.
- **3 Pour quoi faire ?** Une question analysée via plusieurs mécanismes, dont les moteurs de Lorentz, la dynamo de vélo, la plaque à induction...
- **4 Quels rôles dans un ordinateur ?** Une plongée dans les médias magnétiques, le codage binaire ou encore l'enregistrement magnétique numérique.
- **5 Quelles recherches ?** On découvre ici le tube de DAUM, la lithographie pour micro-et nanofabrication, les capteurs magnétiques et bien d'autres.

*Magnétique* est une exposition originale conçue par l'institut Jean Lamour (laboratoire de recherche en science des matériaux), unité mixte de recherche du CNRS et de l'Université de Lorraine.





## I.3 Contenu

### I.3.1 Îlot 1 - Magnétisme, où le trouver ?

**La première partie de l'exposition familiarise le public avec le magnétisme et ses propriétés élémentaires, identifie les diverses origines possibles (aimants, courants, Terre) et permet de visualiser le champ magnétique produit par chacune d'elles.**

Au début de leur visite, les élèves sont invités à observer des phénomènes d'attraction plus ou moins forts entre deux aimants, puis à tester l'intensité des forces de répulsion entre eux. Ils découvrent certaines propriétés fondamentales des aimants, l'existence systématique d'un pôle nord et d'un pôle sud, et le principe de la boussole. Ils visualisent le champ magnétique produit par un aimant, d'abord en deux dimensions, puis dans l'espace, grâce à de la poudre de fer et des ferrofluides. Ils peuvent ensuite tester la réaction de matériaux divers en présence d'un aimant fort et découvrent le champ magnétique produit par un courant électrique, notamment à travers une de ses applications, le tri magnétique des déchets. Ils peuvent s'amuser ici à faire « danser » un ferrofluide au son de leur voix : en chantant dans un micro, le ferrofluide se déforme en rythme. Cet îlot se poursuit par l'exploration du magnétisme terrestre.

# Éléments d'exposition de l'îlot 1

Table 1 : attraction entre aimants

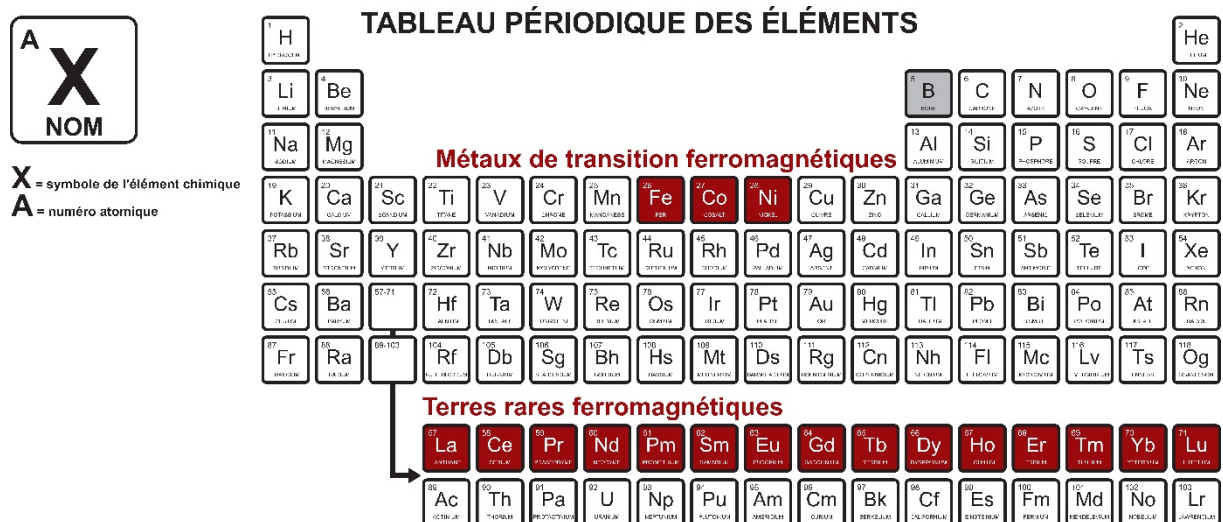
La première table est consacrée à l'observation de phénomènes d'attraction plus ou moins forts entre deux aimants. Elle invite à une réflexion sur la nature des aimants, leur composition, à l'origine des diverses intensités de la force d'attraction observée.

 Tableau périodique des éléments

Vos élèves sont invités en premier lieu à découvrir un tableau périodique des éléments, qui regroupe l'ensemble des éléments chimiques ordonnés par numéro atomique et organisés en fonction de leur configuration électronique.

On leur demande de retrouver les éléments qui composent les aimants comme, par exemple, le fer (Fe), le nickel (Ni), le cobalt (Co), le néodyme (Nd), le bore (B) et le samarium (Sm).

**TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS**



**Métaux de transition ferromagnétiques**

**Terres rares ferromagnétiques**

**A** X **NOM**

X = symbole de l'élément chimique  
A = numéro atomique

 Attraction entre deux aimants

Dans cette manipulation les élèves doivent tirer sur des poignées pour séparer les aimants présents dans deux cylindres. Ils se rendent compte qu'il existe une différence de force d'attraction : les aimants constitués de ferrite, une céramique d'oxyde de fer, exhibent une force d'attraction faible ; les aimants constitués d'un alliage néodyme-fer-bore (NdFeB), appelés aimants au néodyme, montrent une force d'attraction forte. La force d'attraction dépend ainsi des matériaux composant les aimants.



## Synthèse et compléments

Deux aimants s'attirent... ou se repoussent :

- à distance ;
- y compris à travers un matériau comme le bois, le plastique ou l'aluminium ;
- à condition qu'ils ne soient pas trop éloignés l'un de l'autre.

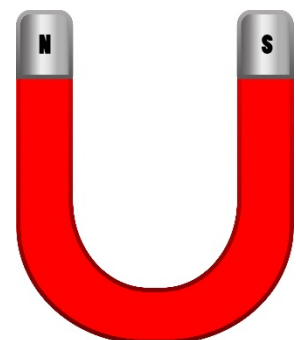
Les aimants ont des propriétés magnétiques permanentes et sont dits ferromagnétiques durs. Ils contiennent presque toujours des atomes de fer, de cobalt, de nickel ou appartenant au groupe des terres rares. Rappelons que ces dernières regroupent des métaux aux propriétés voisines : le scandium ( $Z = 21$ ), l'yttrium ( $Z = 39$ ) et les quinze lanthanides – du lanthane ( $Z = 57$ ) au lutécium ( $Z = 71$ ).

Les principaux aimants sont :

- la magnétite, une espèce minérale composée d'oxyde de fer avec des traces d'impuretés (magnésium, zinc, manganèse, nickel, chrome, titane, vanadium et aluminium), magnétique à l'état naturel ;
- les ferrites, des aimants peu puissants, en céramique d'oxyde de fer, utilisés sur les tableaux d'affichage ;
- les AlNiCo, des aimants peu puissants, facilement désaimantables, issus d'un alliage aluminium-nickel-cobalt. Ces aimants, parfois en U, sont ceux des écoles ;
- les samarium-cobalt (SmCo), des aimants forts, apparus dans les années 1960, issus d'un alliage samarium-cobalt, utilisés dans les haut-parleurs ;
- les néodyme-fer-bore (NdFeB), les aimants les plus puissants, découverts en 1982, issus d'un alliage néodyme-fer-bore, très utilisés dans l'industrie.

### **Table 2 : répulsion entre aimants**

La table 2 est la suite logique de la table 1 : elle propose de **tester les phénomènes de répulsion plus ou moins forts entre les mêmes couples d'aimants qu'à la table 1**. Elle invite aussi à observer l'effet de l'insertion de différents matériaux, tels que bois, plastique ou aluminium, entre deux aimants. L'expérience montre que **ces matériaux ne modifient pas les forces d'attraction et de répulsion entre aimants**.



## Répulsion entre deux aimants

On demande ici aux élèves d'appuyer sur une poignée pour rapprocher des aimants dans chacun des cylindres présentés. Ils devraient ressentir que les aimants en ferrite se repoussent moins fortement que les aimants au néodyme.

On leur demande ensuite d'insérer un morceau de bois, de plastique ou d'aluminium entre les aimants et de recommencer l'expérience. Ils ne devraient pas ressentir de différence de répulsion : la force de répulsion entre les aimants – les forces de répulsion et d'attraction entre deux aimants sont de même intensité mais de sens opposé – n'est pas modifiée par l'insertion de ces matériaux.

### Synthèse et compléments

Les aimants permanents les plus puissants, les aimants au néodyme et au samarium, sont largement utilisés dans les disques durs des ordinateurs, les moteurs électriques des voitures, les générateurs des éoliennes ou en imagerie par résonance magnétique. La force exceptionnelle de cette nouvelle génération d'aimants est due à la présence de terres rares, le néodyme ou le samarium, dans l'alliage qui les compose.

La demande en terres rares explose littéralement, mais leur extraction est difficile, polluante et n'a lieu quasi exclusivement qu'en Chine. De nombreux pays cherchent à ne plus être dépendants de cette source presque unique pour approvisionner leurs technologies de pointe.

De nombreux projets de recherche, européens en particulier, visent à développer des alternatives aux aimants forts permanents à base de terres rares. De premiers résultats intéressants ont été obtenus avec des nanoparticules à base de fer, cobalt et carbone, présentant des propriétés magnétiques rivalisant avec celles des aimants au néodyme.

### **Table 3 : pôle nord / pôle sud**

L'objectif de la table 3 est **d'appréhender certaines propriétés fondamentales des aimants**. Les expériences à mener montrent que **deux aimants, ou un aimant et une aiguille aimantée, s'alignent toujours l'un par rapport à l'autre, et qu'un pôle magnétique seul n'existe pas**. Même s'il est cassé en deux, **un objet aimanté comporte toujours deux pôles opposés, un nord et un sud**.

## Boussole

Les élèves approchent un aimant fixé à un câble d'un aimant situé dans une boîte et constatent que les deux aimants s'orientent parallèlement l'un à l'autre, de telle sorte que le pôle nord de l'un fait face au pôle sud de l'autre. Ils reproduisent la même expérience en approchant cette fois l'aimant accroché au câble de la boussole. Celle-ci s'oriente selon l'aimant... car son aiguille est aussi un petit aimant.

Un aimant comporte toujours deux pôles : un pôle nord et un pôle sud. Deux pôles identiques se repoussent (nord et nord ou sud et sud), deux pôles différents s'attirent (nord et sud). Par convention, le pôle nord est représenté en rouge, l'autre couleur (noire ici) correspond au pôle sud.



## ✚ Pôle nord / pôle sud

Un aimant a été cassé en deux. Vos élèves vont vérifier, grâce à la boussole, que les deux moitiés de l'aimant cassé possèdent chacune un pôle nord et un pôle sud.

### Synthèse et compléments

Un aimant oriente parallèlement à lui-même un autre aimant ou une aiguille aimantée libre de tourner. Les forces d'attraction entre deux aimants s'exercent aux extrémités de ces aimants : les pôles. Un aimant comporte toujours deux pôles différents, nommés pôle nord et pôle sud. Les pôles semblables se repoussent, les pôles différents s'attirent.

Le pôle nord d'une boussole est celui qui pointe vers le pôle géographique situé dans l'hémisphère Nord de la Terre. Le pôle nord des aimants est représenté par convention en rouge et le pôle sud en une autre couleur, en noir dans l'exposition.

Certaines théories physiques prédisent l'existence de monopoles magnétiques. À ce jour, aucune de ces particules hypothétiques n'a encore été détectée.



### **Table 4 : magnétisme en deux dimensions**

Cette table présente une expérience permettant de **visualiser le champ produit par un aimant**. Le réseau de boussoles placé au-dessus d'un aimant droit dessine **les lignes du champ magnétique, lignes en forme de boucles toujours fermées** tout autour de cet aimant.

## ✚ Lignes de champ magnétique

Les élèves sont invités à faire tourner lentement l'aimant placé sous un réseau de petites boussoles à l'aide d'un plateau. Ils constatent que les aiguilles semblent dessiner une figure... Elles révèlent en fait les lignes de champ magnétique qui sortent par le pôle nord de l'aimant et rentrent par son pôle sud. Ces lignes permettent de visualiser le champ créé par l'aimant.

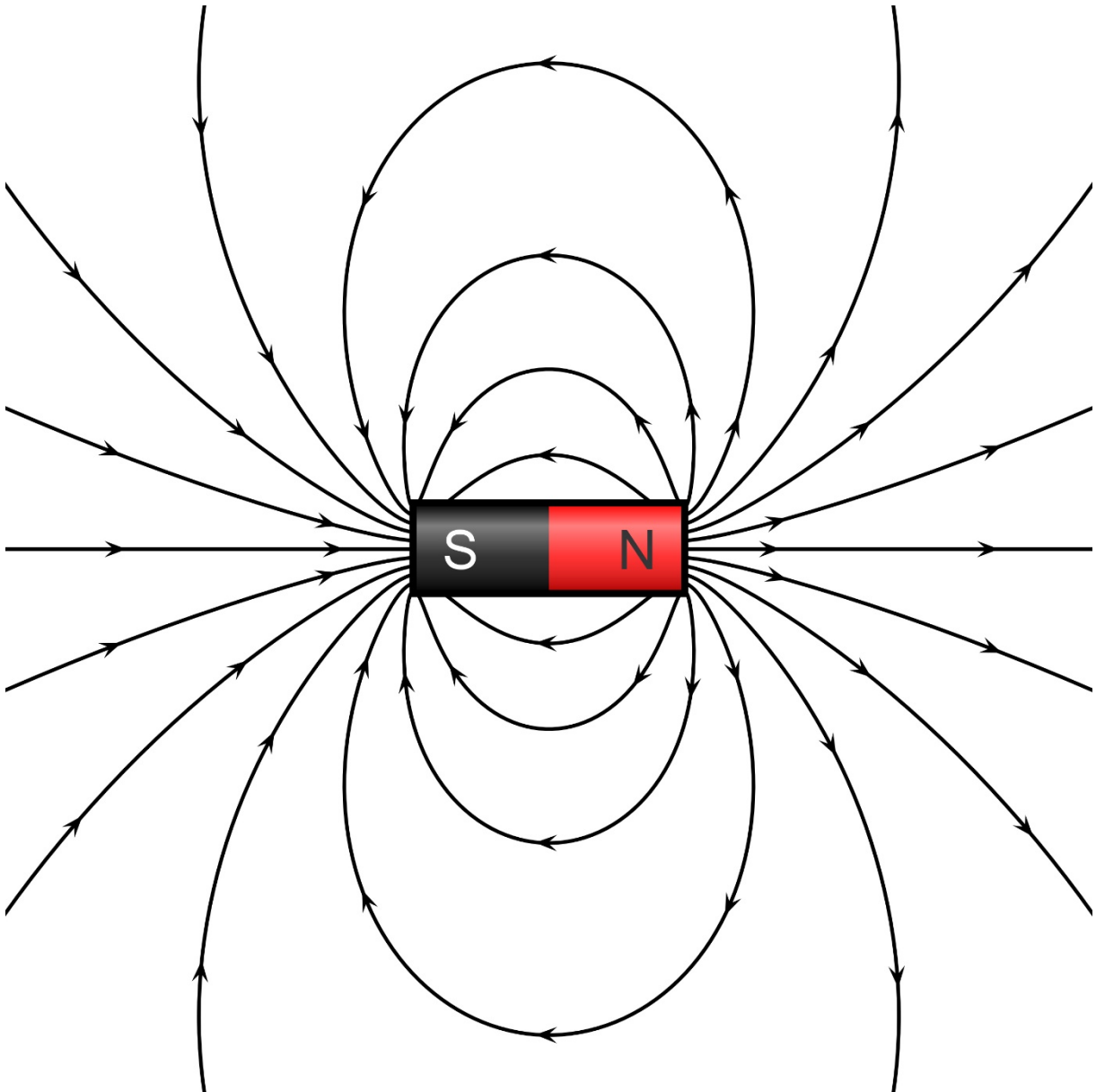
### Synthèse et compléments

Un aimant engendre un champ magnétique, responsable de l'attraction et de la répulsion entre deux aimants. Ce champ est invisible, mais quelques boussoles placées autour d'un aimant permettent de le mettre en évidence.

Les lignes de champ sont orientées du pôle nord au pôle sud par l'extérieur de l'aimant. Elles ne se coupent jamais : elles dessinent des boucles fermées autour de lui. Par convention, le pôle nord est le pôle par lequel sortent les lignes de champ. Le pôle sud est celui par lequel elles entrent.

Chaque petite boussole permet de visualiser le champ magnétique local, modélisé par un vecteur  $\vec{B}$ . Ses caractéristiques sont :

- sa direction, qui est celle de l'aiguille ;
- son sens, celui allant du sud vers le nord de l'aiguille ;
- sa norme, exprimée en tesla (T), du nom du physicien serbe Nikola Tesla (1856 – 1943). On trouve parfois, dans la littérature, une autre unité : le gauss, qui vaut  $10^{-4}$  tesla.



## Table 5 : magnétisme en trois dimensions

La table 5 propose plusieurs expériences permettant de visualiser le **champ magnétique dans l'espace**. Le support utilisé est **la poudre de fer**. Certaines expériences présentées permettent d'observer la structure spatiale du champ créé par un aimant unique, d'autres la structure adoptée par les lignes des champs quand deux aimants sont en interaction.

### Sablier magnétique

Ici, les élèves doivent retourner deux sabliers contenant de la poudre de fer. Le sablier de gauche se comporte... comme on est en droit d'attendre. Dans celui de droite, la poudre de fer a un comportement très particulier. Elle révèle la présence du champ magnétique produit par l'aimant placé sous le sablier. En effet, les grains de fer s'aimantent – c'est-à-dire qu'ils deviennent eux-mêmes de petits aimants – et s'alignent sur le champ magnétique de l'aimant. La poudre permet de visualiser ainsi des lignes de champ magnétique.

### Cube magique

En appuyant sur un bouton, on agite un cube dans lequel se trouvent un aimant et de la poudre de fer. On remarque que la poudre de fer dessine des lignes qui pointent vers les pôles de l'aimant. Ce sont des lignes de champ magnétique. Elles vont du pôle nord au pôle sud de l'aimant.

### Attraction / répulsion

Dans une première expérience, deux aimants sont séparés par de la poudre de fer. Le pôle nord de l'un fait face au pôle sud de l'autre. Une seconde expérience reprend le même protocole, si ce n'est que le pôle nord du premier aimant fait maintenant face au pôle nord de l'autre. Les élèves doivent faire s'approcher puis s'éloigner les aimants l'un de l'autre. Ils constatent que, dans la première expérience, la poudre de fer forme une sorte de pont passant d'un pôle à l'autre alors que dans la seconde, la poudre de fer ne peut pas passer d'un pôle à l'autre.

## Synthèse et compléments

En présence d'un aimant extérieur, chaque grain de fer s'aimante et se comporte comme un tout petit aimant qui s'aligne sur les lignes du champ magnétique de l'aimant extérieur. Ces lignes partent toutes du pôle nord de cet aimant pour se fermer sur son pôle sud. Avec un aimant fort au néodyme, cet effet peut être important et même prendre le pas sur la gravitation.

Lors de l'attraction entre deux aimants, les lignes de champ passent du pôle nord de l'un au pôle sud de l'autre, et forment alors une sorte de pont passant d'un pôle à l'autre, matérialisé par la poudre de fer. Lors de la répulsion entre deux aimants, les lignes de champ ne peuvent pas passer d'un pôle à l'autre, elles forment des piques hérissées, matérialisées là également par la poudre de fer.

## Table 6 : ferrofluide

La table 6 est la suite logique de la table 5 : elle propose aussi de **visualiser le champ magnétique dans l'espace mais en utilisant un autre support, un ferrofluide, suspension huileuse noire contenant de très petites particules d'oxyde de fer**. Là aussi, diverses expériences sont présentées illustrant les lignes de champ produites soit par un aimant unique, soit par deux aimants en interaction.

### Jeu du hérisson

Deux expériences sont présentées. Dans l'expérience de droite, on approche puis on éloigne lentement un support mobile contenant un aimant fort d'un flacon contenant un ferrofluide. Dans l'expérience de gauche, on déplace lentement le flacon contenant un ferrofluide entre deux aimants. Dans les deux cas, les particules dans le fluide s'aimantent et suivent le champ magnétique de l'aimant. Cela déforme le ferrofluide en piques de hérisson.

### Jeu du sapin de Noël

Les élèves doivent placer, à l'aide d'une manette, un aimant sous une vis en fer immergée dans un ferrofluide, puis retirer l'aimant. Lorsque l'aimant est placé contre la vis, cette dernière s'aimante. Les particules d'oxyde de fer en suspension dans le ferrofluide s'aimantent et sont attirées par la vis. Le fluide s'enroule alors autour de la vis et des piques apparaissent, donnant à l'ensemble une forme de sapin.



Un ferrofluide au-dessus d'un aimant au néodyme. Crédit : Steve Jurvetson / CC BY 2.0

## Synthèse et compléments

Le liquide noir est un ferrofluide, une suspension huileuse qui contient de très fines particules (nanoparticules) de divers oxydes magnétiques contenant du fer. Soumises à un champ magnétique, ces particules s'orientent le long des lignes de champ et forment de magnifiques figures en hérisson. La structuration des bosses en un réseau régulier de piques résulte d'un compromis entre les forces magnétiques, les forces de pesanteur (le poids) et la tension superficielle du liquide. La première synthèse de ferrofluide a été réalisée par Stephen Papell en 1963. Ce liquide formé de nanoparticules de divers oxydes de fer a la propriété de rester fluide, même quand toutes les particules s'agglutinent sous l'effet d'un champ magnétique. En réalité, les nanoparticules d'oxydes de fer sont immergées dans un fluide particulier permettant de toujours conserver une distribution homogène de ces nanoparticules : ce fluide est une suspension colloïdale.

Les ferrofluides sont très utilisés, en particulier dans les enceintes acoustiques de haute qualité, dans les joints de disque dur ou encore en médecine.

## Table 7 : autres matériaux

La table 7 invite à **tester les comportements de divers matériaux en présence d'un aimant fort**. L'expérience montre que certains ne sont pas sensibles au champ produit par un aimant (aluminium, bois, cuivre ...) alors que d'autres sont toujours attirés, quelle que soit la polarité de l'aimant (clous, trombones ou porte de réfrigérateur).

### Interaction avec divers matériaux

Un aimant, fixé sur un rail, est déplacé devant différents objets et matériaux. Certains objets (en plastique, en bois, en cuivre ou en aluminium) ne réagissent pas au passage de l'aimant alors que d'autres (boîte de conserve, trombones, clous et porte de réfrigérateur) sont toujours attirés, quelle que soit l'orientation de l'aimant. Les objets attirés par un aimant sont ferromagnétiques : ils se transforment temporairement en aimant en présence d'un champ magnétique.

### Synthèse et compléments

Comme nous l'avons vu, un aimant n'attire pas et ne repousse pas l'aluminium, le cuivre, l'argent, l'or, le laiton ou encore le bois, le verre, le plastique, le tissu, le papier... mais il attire toujours certains objets métalliques (clous, fer blanc, aiguilles, trombones, porte de réfrigérateur...). Ceux-là sont alors aimantés temporairement. Après le départ de l'aimant, ils perdent progressivement leur aimantation.

Ces matériaux aimantables, toujours attirés par un aimant, sont dits ferromagnétiques doux. C'est le cas du fer, de la plupart des aciers, de la fonte, du cobalt et du nickel.

À température ambiante, il est impossible de bloquer totalement un champ magnétique statique, mais il est possible d'en atténuer la puissance en déviant les lignes de champ magnétique : c'est le blindage magnétique. Les matériaux utilisés pour ce blindage sont des matériaux ferromagnétiques doux, en particulier des alliages à base de fer et nickel : ils s'aimantent sous l'action d'un champ magnétique extérieur et canalisent en eux-mêmes les lignes de champ magnétique.

## Table 8 : équivalence courant / aimant

La table 8 a pour objectif de montrer que les **courants électriques créent également un champ magnétique**. Les boussoles placées à l'intérieur d'une bobine parcourue par un courant ou la danse d'un ferrofluide placé au-dessus d'une bobine traversée par un courant permettent de le vérifier.

### Lignes de champ magnétique

Des boussoles sont placées à l'intérieur d'une bobine dans laquelle on peut faire circuler du courant à l'aide d'un bouton. On voit que les aiguilles des boussoles s'alignent lorsque le courant circule. Elles matérialisent les lignes de champ magnétique produites par la bobine traversée par un courant électrique. Ainsi, un courant électrique qui circule dans un matériau conducteur engendre toujours un champ magnétique.

## Danse des ferrofluides

Vos élèves doivent parler devant un micro, qui convertit le son en courant électrique. Après amplification, ce courant alimente une bobine placée sous un flacon contenant un ferrofluide. Celle-ci produit un champ magnétique variant au rythme des paroles. Ce champ magnétique est à l'origine de la réaction du ferrofluide, qui semble « danser ».

### Synthèse et compléments

Un courant électrique circulant dans une bobine engendre un champ magnétique à l'intérieur de la bobine, visualisable grâce aux lignes de champ matérialisées par les boussoles.

Une bobine, parcourue par un courant, se comporte comme un aimant. Elle engendre un champ magnétique de direction définie par le sens du courant qui la traverse. Ainsi, elle attire ou repousse un aimant placé à proximité selon le sens de ce courant. L'intensité du champ créé dépend de l'intensité du courant et du nombre de spires du bobinage. Inverser le sens du courant dans la bobine revient à intervertir les pôles de l'aimant équivalent à la bobine.



La main droite placée sur une bobine avec les doigts posés le long des spires permet de prévoir la position des pôles de l'aimant équivalent à la bobine : si le courant traverse la main de la paume vers le bout des doigts, alors le pouce tendu indique la direction et le sens du champ magnétique  $\vec{B}$  créé par la bobine.

### **Table 9 : tri magnétique**

La table 9 est la suite de la table 8 : elle montre **qu'une bobine parcourue par un courant se comporte comme un aimant**, la direction de ses pôles dépendant du sens du courant. Cette propriété est utilisée dans le tri magnétique des déchets.

## Attraction / répulsion

Il convient ici d'établir le courant dans une bobine placée entre deux aimants en tournant un bouton dans un sens, puis dans l'autre pour changer son sens.

Chaque aimant est soit attiré, soit repoussé par la bobine selon le sens du courant qui y circule. Le champ magnétique produit par une bobine parcourue par un courant est de même nature que celui produit par un aimant. Changer le sens du courant dans une bobine équivaut à retourner un aimant.



## Application au tri magnétique

Une bobine se trouve au-dessus de différents objets. On demande à vos élèves de tourner un bouton pour établir le courant dans la bobine dans un sens puis dans l'autre. Les objets composés de matériaux ferromagnétiques – comme les trombones – sont attirés par la bobine lorsqu'elle est parcourue par un courant, quel que soit son sens. C'est le principe du tri magnétique, utilisé industriellement pour séparer les déchets ferromagnétiques des autres déchets.

### Synthèse et compléments

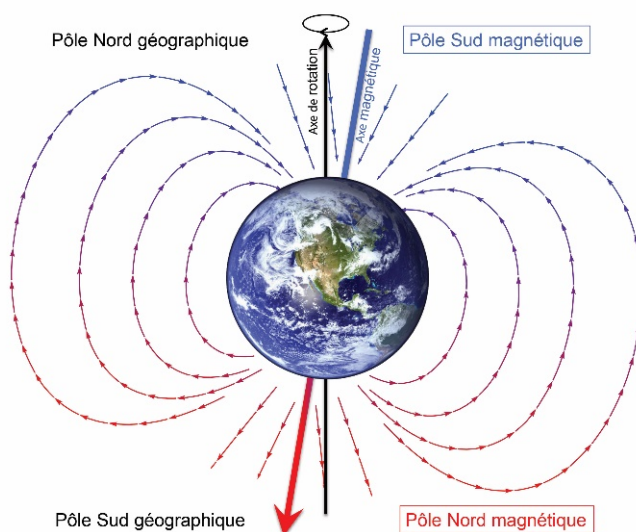
Une bobine parcourue par un courant se comporte comme un aimant : elle attire toujours les objets composés de matériaux ferromagnétiques doux et n'a aucun effet sur ceux n'en contenant pas. La force d'attraction de la bobine peut être renforcée en insérant un matériau ferromagnétique en son cœur. C'est ainsi qu'un électroaimant est créé !

Le tri magnétique utilisé industriellement dans le traitement des déchets a pour but de séparer les matériaux aimantés ou aimantables des autres déchets. Les électroaimants utilisés peuvent être très puissants et permettre de déplacer toutes sortes de ferrailles et même de gros blocs d'acier. L'avantage est qu'il suffit de couper le courant pour larguer le chargement !

Les systèmes de fermeture automatique des portes en cas d'incendie fonctionnent selon le même principe : la porte est équipée d'un disque de métal ferromagnétique doux et le support sur le mur d'un électroaimant. Dès la détection d'une fumée par un capteur, le courant circulant dans l'électroaimant se coupe, l'attraction entre la porte et le support cesse et la porte se ferme.

### **Table 10 : magnétisme terrestre**

La dernière table de l'îlot 1 a pour objectif **d'explorer le magnétisme terrestre**, d'en comprendre les manifestations et les origines. Deux mini-films présentés sur borne tactile complètent le propos en expliquant les origines du magnétisme terrestre et solaire, ainsi que leurs interactions à l'origine des aurores polaires.



L'axe géomagnétique fait un angle de  $11,5^\circ$  par rapport à l'axe de rotation de la Terre.

## Magnétisme terrestre

Les boussoles que l'on trouve sur le planisphère présenté s'alignent sur les lignes du champ magnétique terrestre. Elles pointent toutes vers le pôle magnétique situé dans l'hémisphère Nord de la Terre. Or, le pôle nord des boussoles est toujours attiré par un pôle sud. Cela signifie que le pôle Nord magnétique de la Terre est en réalité le pôle Sud magnétique !

La borne tactile voisine présente deux courts films : l'un traite du magnétisme terrestre et des aurores polaires, l'autre de l'influence du magnétisme sur les phénomènes migratoires.

## Ligne du champ magnétique terrestre

Les élèves doivent ici tourner une molette pour déplacer l'indicateur de champ magnétique autour du globe terrestre. Ils remarquent qu'il s'oriente selon les lignes du champ magnétique de la Terre.

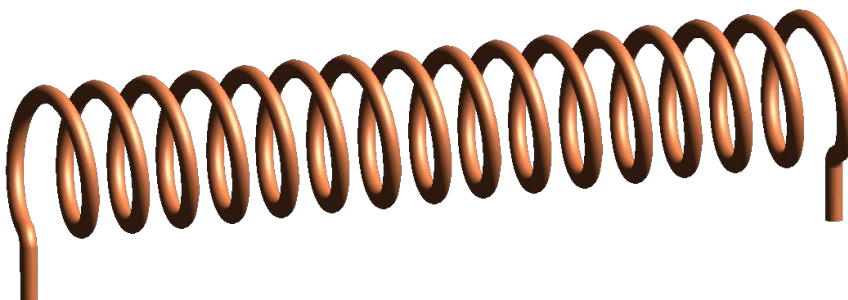
### Synthèse et compléments

La Terre est l'équivalent d'un gigantesque aimant droit produisant un champ magnétique de très faible valeur. Son intensité n'est que de  $0,000\ 047\ \text{T} = 0,047\ \text{mT}$ , qu'il convient de comparer au champ magnétique créé :

- par un morceau de magnétite ( $B \approx 0,1\ \text{T}$ ) ;
- par un aimant en ferrite ( $B \approx 0,2\ \text{à}\ 0,4\ \text{T}$ ) ;
- par un aimant en AlNiCo ( $B \approx 0,8\ \text{T}$ ) ;
- par un aimant au néodyme ( $B \approx 1,3\ \text{T}$ ) ;
- à  $1\ \text{cm}$  d'un fil de cuivre parcouru par un courant de  $5\ \text{A}$  ( $B \approx 0,1\ \text{mT}$ ) ;
- dans une bobine longue de  $10\ \text{cm}$  comportant  $1\ 000$  spires et parcourue par un courant de  $5\ \text{A}$  ( $B \approx 0,06\ \text{T}$ ) ;
- dans une bobine supraconductrice ( $B \approx 10\ \text{à}\ 20\ \text{T}$ ).

Le magnétisme de la Terre provient de son noyau externe contenant essentiellement du fer liquide, à plus de  $4\ 000\ ^\circ\text{C}$ . Ce liquide métallique est sujet à des mouvements de convection qui, par effet dynamo, sont à l'origine du champ magnétique terrestre.

L'étude des carottes de lave extraites d'anciennes coulées montre que les pôles de la Terre se sont souvent inversés. La dernière inversion date de  $780\ 000$  ans. La magnétite présente dans chaque coulée de lave conserve la mémoire de l'orientation du champ magnétique terrestre lors de son refroidissement.



## I.3.2 Îlot 2 - Magnétisme, comment l'expliquer ?

Cette section dévoile aux élèves l'origine des propriétés magnétiques des matériaux.

Elle leur propose un voyage vers l'infiniment petit, où s'observent les phénomènes responsables des comportements des matériaux magnétiques, qui sont illustrés grâce à des maquettes à l'échelle macroscopique. Une expérience présente l'apparition d'un comportement paramagnétique au-delà d'une certaine température, propre à chaque matériau ferromagnétique. La visite de cet espace se termine par une illustration expérimentale d'un comportement d'intensité extrêmement faible, mais commun à tout matériau : le diamagnétisme, qui peut être à l'origine d'un phénomène de lévitation.

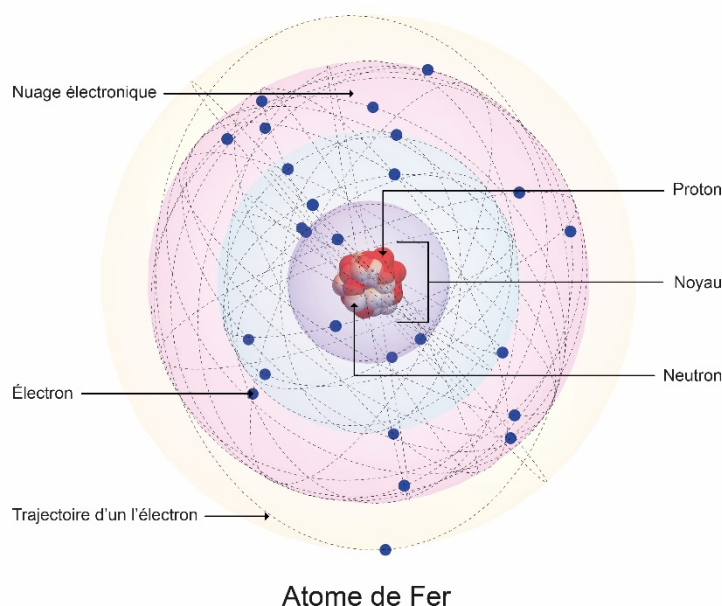
### Éléments d'exposition de l'îlot 2

#### Table 1 : magnétisme des matériaux

La première table de cet îlot invite à **voyager vers l'infiniment petit pour expliquer de façon simplifiée l'origine du magnétisme et comprendre les différents comportements des matériaux magnétiques** observés à l'îlot précédent.

#### L'atome de fer

On rappelle ici la structure de la matière, dans laquelle il faut plonger pour comprendre le magnétisme. Un schéma présente un atome de fer agrandi un milliard de fois. Un atome est composé de trois sortes de particules : les électrons en bleu, les protons en rouge et les neutrons en blanc. Le nombre de protons détermine la nature de l'atome (fer, oxygène, carbone, etc.) Le fer contient 26 protons et occupe la 26<sup>e</sup> place du tableau périodique. Certains atomes, dont ceux de fer, sont assimilables à de petits aimants. Leurs électrons sont à l'origine de leurs propriétés magnétiques.



## ✚ Magnétisme du fer

À l'échelle microscopique, un morceau de fer est formé de domaines magnétiques. Chaque domaine est composé d'atomes dont les aimantations pointent dans une même direction. Comme chaque domaine est orienté dans un sens différent, un morceau de fer ne produit globalement pas de champ magnétique.

Au voisinage d'un aimant, l'aimantation de chaque atome du morceau de fer s'aligne sur le champ magnétique produit par l'aimant. Le morceau de fer se transforme temporairement en aimant. Ce phénomène s'appelle le ferromagnétisme.

## ✚ Magnétisme d'un aimant

Dans un aimant, tous les domaines magnétiques sont orientés dans le même sens. Quelle que soit l'échelle à laquelle le matériau est observé, le champ magnétique pointe toujours dans la même direction.

### Synthèse et compléments

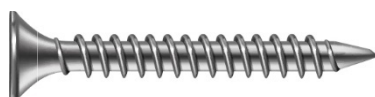
Le fer, comme tous les matériaux, est constitué d'atomes, eux-mêmes formés d'un noyau autour duquel gravitent des électrons. Le mouvement des électrons autour du noyau est à l'origine de leur moment magnétique orbital. Par ailleurs, l'électron possède un moment magnétique intrinsèque, appelé spin. Seule la mécanique quantique, qui décrit les phénomènes à l'échelle de l'infiniment petit, permet de l'expliquer. Le magnétisme des électrons explique pratiquement toutes les propriétés magnétiques de la matière.

L'association des champs créés par chaque électron selon les règles de la mécanique quantique détermine le moment magnétique porté par chaque atome. Sa valeur dépend du nombre d'électrons de l'atome. Quand ce moment n'est pas nul, l'atome porte une aimantation et se comporte comme un minuscule aimant.

Les atomes s'associent ensuite entre eux pour former les matériaux, dont la structure magnétique est le résultat d'une compétition entre la température, dont toute augmentation favorise le désordre magnétique, et les interactions entre les aimantations atomiques, qui favorisent un ordre magnétique. Cette compétition engendre les différents comportements magnétiques des matériaux.

### **Table 2 : ferromagnétisme**

La table 2 présente une maquette phénoménologique illustrant le **comportement magnétique du fer**. Elle explique plus spécifiquement **l'organisation en domaines magnétiques des petites aimantations portées par chaque atome de fer**, ainsi que l'effet d'un champ magnétique extérieur sur cette organisation.



## Comportement magnétique du fer

Les élèves sont invités à appuyer sur une poignée pour mettre un aimant en contact avec un barreau de fer et le rapprocher de vis. Ils constatent que le barreau attire les vis : il est lui-même devenu un aimant au contact de l'aimant. En relâchant la poignée, l'aimant se détache du barreau et les vis retombent : le fer a perdu son aimantation. Du fer qui acquiert et perd facilement une aimantation est appelé fer doux.

## Modélisation du magnétisme du fer

Une maquette représente l'organisation d'un plan d'atomes de fer cristallisé. Chaque pivot correspond à un atome de fer, chaque aiguille illustre son aimantation. Différentes configurations de structure magnétique du fer sont simulées grâce au champ magnétique produit par une bobine. L'appui sur un bouton déclenche la première des cinq étapes de l'expérience.

1. Un champ magnétique est appliqué : le fer devient un aimant, les aimantations de tous ses atomes pointent dans la direction du champ externe.
2. Le champ magnétique est renversé brutalement : toutes les aimantations s'inversent brusquement.
3. Le champ magnétique est renversé progressivement : les aimantations des atomes situés aux bords se retournent en premier.
4. La maquette simule l'état du fer à haute température : les aimantations des atomes s'agitent en désordre.
5. La maquette simule un refroidissement brutal : une organisation des aimantations des atomes en domaines magnétiques apparaît.

## Synthèse et compléments

Dans un matériau ferromagnétique dur (un aimant permanent), toutes les aimantations portées par les atomes sont alignées dans la même direction.

Dans un matériau ferromagnétique doux (du fer), toutes les aimantations portées par les atomes sont alignées dans une même direction, seulement à l'intérieur de domaines magnétiques de taille micrométrique. L'orientation des aimantations des domaines étant aléatoire, l'aimantation résultante est nulle. Un champ magnétique extérieur provoque l'alignement des aimantations des domaines magnétiques jusqu'à leur disparition. La structure magnétique acquise est alors similaire à celle d'un aimant. Cependant, cette structure n'est que temporaire. Dès la suppression du champ extérieur, les domaines magnétiques réapparaissent.

Pour annuler l'aimantation d'un matériau, c'est-à-dire le démagnétiser, il faut lui appliquer un champ magnétique, appelé champ coercitif, de sens opposé à son aimantation. Les matériaux ferromagnétiques doux possèdent un faible champ coercitif : ils se désaimantent facilement. Ils sont utilisés dans les transformateurs, les électroaimants... Les matériaux ferromagnétiques durs possèdent un fort champ coercitif : ils se désaimantent difficilement. Ils sont utilisés pour fabriquer des aimants permanents.

### Table 3 : paramagnétisme

La table 3 présente une maquette illustrant **l'évolution du comportement magnétique des matériaux avec la température**, et en particulier le passage d'un comportement ferromagnétique à un comportement paramagnétique au-delà d'une température critique.

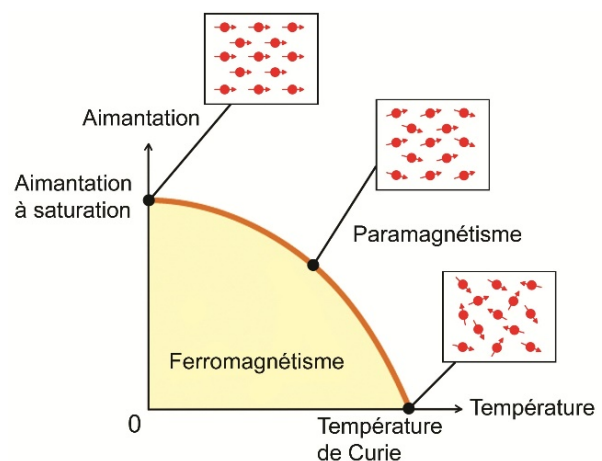
#### Magnétisme et température

Le gadolinium est un élément ferromagnétique classé parmi les *terres rares* dans le tableau périodique des éléments. Les élèves doivent d'abord pousser un aimant contre un morceau de gadolinium à température ambiante puis tirer l'aimant vers eux : le gadolinium, attiré par l'aimant, suit son mouvement. Ils appuient ensuite sur un bouton pour faire chauffer le gadolinium, qui se détache alors de l'aimant. Au-delà d'une température propre à chaque matériau (la température de Curie), le matériau ferromagnétique devient paramagnétique. Il est toujours attiré par l'aimant, mais si faiblement que l'attraction n'est plus perceptible.

#### Synthèse et compléments

Le comportement ferromagnétique des matériaux disparaît au-dessus d'une température critique, la température de Curie, propre à chaque matériau : 770 °C pour le fer, 19 °C pour le gadolinium. Au-delà de cette température critique, l'énergie d'agitation thermique brise l'ordre magnétique. Il n'existe alors plus d'interactions entre les aimantations portées par chaque atome, et donc plus de domaines magnétiques. Les directions des aimantations atomiques sont aléatoires et le matériau ne possède pas d'aimantation résultante. Si un champ magnétique extérieur est appliqué, le matériau acquiert une très faible aimantation, difficilement observable, dans le sens du champ appliqué. Ce comportement est qualifié de paramagnétique. Certains matériaux, dits paramagnétiques, ont un comportement paramagnétique quelle que soit la température. C'est le cas de l'aluminium ou du dioxygène.

Une aiguille aimantée est fabriquée en chauffant le fer au-delà de sa température de Curie, puis en le refroidissant brutalement sous champ magnétique. Alors, toutes les aimantations atomiques se figent dans la direction parallèle à celle du champ appliqué, et l'ordre magnétique est conservé : l'aiguille est aimantée.





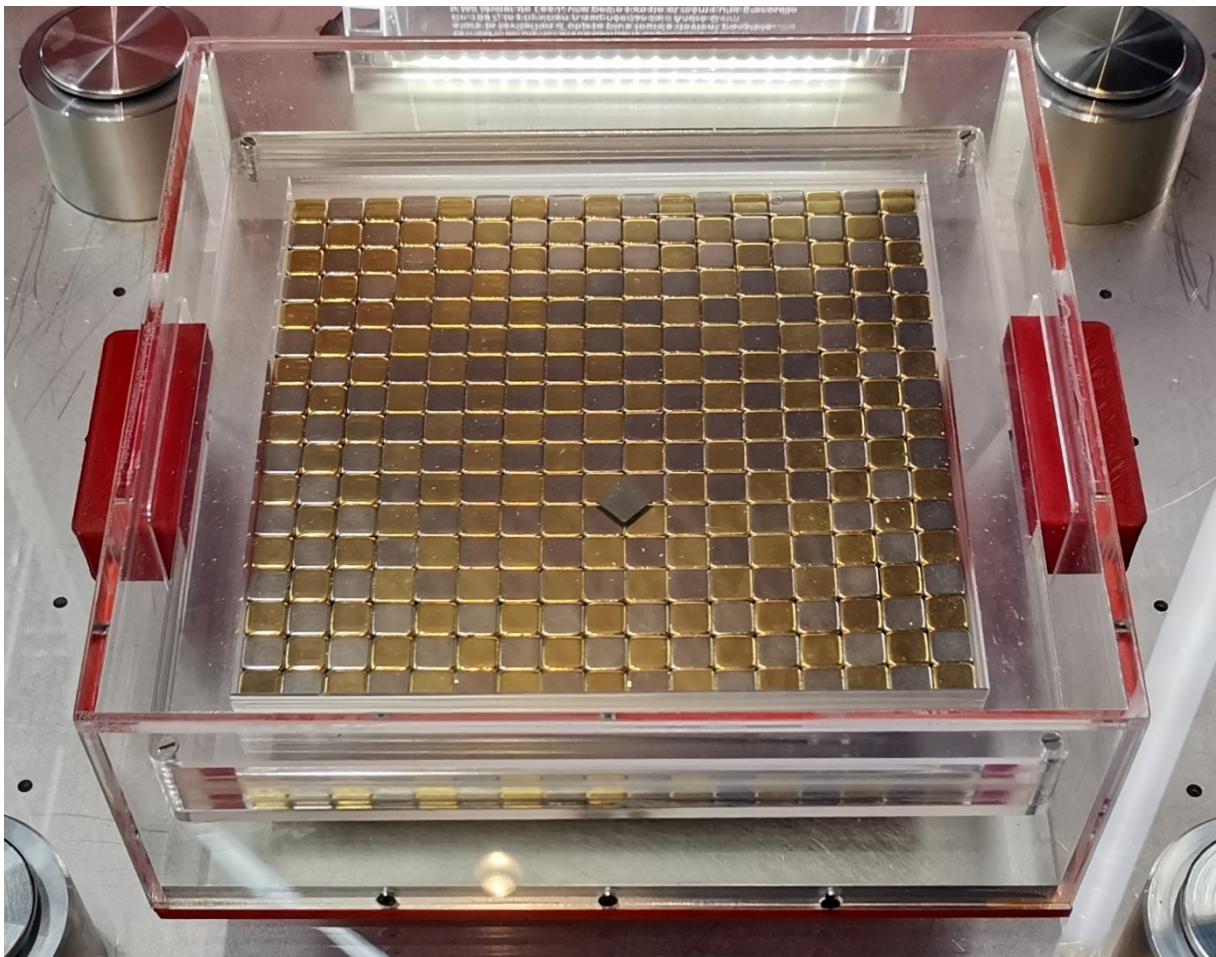
#### Table 4 : diamagnétisme

La dernière table de cet îlot est consacrée à l'illustration expérimentale d'un **comportement d'intensité extrêmement faible, mais commun à tout matériau, le diamagnétisme**, qui peut être à l'origine d'un phénomène de lévitation si toutes les conditions expérimentales sont réunies.

##### Lévitation diamagnétique

Les élèves doivent incliner délicatement une plaque sur laquelle est posé un fin morceau de graphite. Surprise, le graphite lévite !

En effet, il est placé sur un réseau d'aimants forts aux polarités inversées : les faces or et argent (cf. photographie ci-dessous) correspondent aux pôles opposés des aimants. Lorsque le carbone composant le graphite est placé dans un champ magnétique fort, il s'aimante très faiblement dans le sens opposé au champ auquel il est soumis. Il est donc repoussé. Ce comportement s'appelle le diamagnétisme.



La borne tactile voisine présente plusieurs courts films expliquant les propriétés magnétiques de la matière, ainsi que l'imagerie par résonance magnétique (IRM), qui en est une application.

## Synthèse et compléments

Dans tous les matériaux soumis à un champ magnétique extérieur apparaît une aimantation à l'origine d'un champ magnétique extrêmement faible, opposé au champ extérieur. Ce comportement, d'origine quantique, est qualifié de diamagnétique. Le diamagnétisme est une propriété générale de la matière : d'intensité extrêmement faible, elle est masquée par les effets du paramagnétisme ou du ferromagnétisme lorsque ceux-ci coexistent.

Un matériau est dit diamagnétique lorsqu'il ne présente aucun autre comportement magnétique. Le carbone, le cuivre, l'argent ou l'eau sont diamagnétiques.

Si le champ magnétique extérieur est très fort et que l'objet diamagnétique est très léger, cet effet peut conduire à la lévitation de l'objet. Ainsi, une feuille de carbone est en lévitation au-dessus d'un damier d'aimants au néodyme.

Si le champ magnétique est encore plus fort – créé, par exemple, par un électroaimant supraconducteur – alors la lévitation d'objets plus lourds devient possible. En 1997, le physicien russo-néerlandais André Geim a fait léviter de l'eau, une petite tomate et même une grenouille vivante dans un champ magnétique de 16 teslas. Mais attention, ces lévitations ne se produisent qu'aux basses températures de la supraconductivité, de l'ordre de  $-250\text{ °C}$  !

### **I.3.3 Îlot 3 - Magnétisme, pour quoi faire ?**

**Cet îlot invite les élèves à explorer diverses applications du magnétisme omniprésentes dans notre quotidien et en explique les principes de fonctionnement.**

Les élèves découvrent ici l'apparition d'une force, nommée « force de Laplace », qui s'exerce sur un circuit électrique parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique. Ils comprennent son utilité dans le fonctionnement des haut-parleurs, des moteurs électriques et des ventilateurs. Plus loin, ils observent le phénomène d'induction et se rendent compte qu'il peut servir pour produire de l'électricité, comme dans l'éclairage des vélos, les alternateurs et les éoliennes. Deux expériences matérialisent ensuite l'existence des courants de Foucault, ces courants électriques engendrés dans les matériaux conducteurs placés dans le champ magnétique d'un aimant en mouvement, et utilisés dans les ralentisseurs des camions ou des vélos d'appartement. Une expérience surprenante présente aussi le principe de la lévitation magnétique grâce à l'électromagnétisme, à la base du fonctionnement de certains trains ultrarapides. Les tables suivantes mettent enfin en lumière les fondements du chauffage par induction, des transformateurs électriques, du Witricity (contraction de *Wireless Electricity*, électricité sans fil en français) – utilisé dans les chargeurs sans fil des téléphones portables – en passant par le système RFID (Radio Frequency Identification) des antivols ou de la carte Navigo.

## Éléments d'exposition de l'îlot 3

### Table 1 : force de Laplace

Cette table a pour but d'illustrer la **force de Laplace produite par un courant circulant dans une zone où existe un champ magnétique**. Deux expériences sont présentées : l'une, le rail de Laplace, est pédagogique ; l'autre, le haut-parleur, illustre une application courante de la force de Laplace.

#### Force de Laplace

Un circuit fermé formé par une barre et deux rails conducteurs est placé dans un champ magnétique produit par un aimant en U, perpendiculaire au plan du circuit. Les élèves doivent tourner un bouton pour faire circuler un courant électrique : la barre, soumise à la force de Laplace, se déplace mais rebrousse chemin lorsque le sens du courant est inversé.

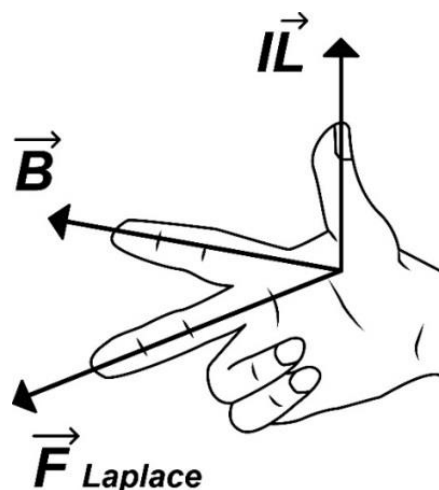
#### Application : le haut-parleur

Vos élèves travaillent ici sur une modélisation simplifiée de haut-parleur. L'appui sur un bouton permet d'établir un courant alternatif dans une bobine placée au centre d'un aimant en forme d'anneau. Le champ magnétique produit par l'aimant en anneau exerce alors une force de Laplace sur la bobine, qui se met à osciller de haut en bas à la fréquence du courant. Le mouvement d'oscillation est transmis à la membrane d'un haut-parleur, ce qui produit un son.

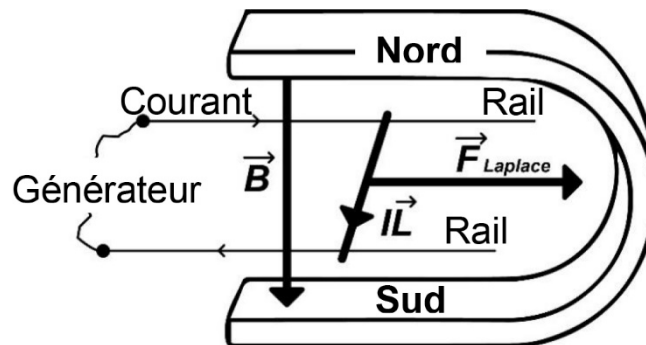
### Synthèse et compléments

Si un barreau conducteur parcouru par un courant est soumis à un champ magnétique, il subit une force appelée force de Laplace  $\vec{F}_{\text{Laplace}}$  :

- de norme proportionnelle à celle du champ magnétique  $\vec{B}$ , à l'intensité  $I$  du courant et à la longueur  $L$  du barreau conducteur ;
- perpendiculaire au champ magnétique  $\vec{B}$  et au barreau conducteur, orientée selon la règle des trois doigts de la main droite.



Dans le rail de Laplace, le mouvement de la barre conductrice est dû à la force de Laplace.



Tous les dispositifs destinés à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique utilisent cette découverte réalisée par André-Marie Ampère en 1820. Le haut-parleur électrodynamique fonctionne grâce à la force de Laplace s'appliquant sur une bobine parcourue par un courant modulé conformément au son à produire, et placée dans le champ magnétique d'un aimant torique.

### Table 2 : moteur

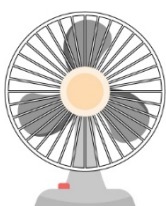
Cette table est la suite de la précédente : elle est aussi consacrée à la **force de Laplace et elle illustre son utilisation dans le fonctionnement des moteurs**. Une maquette présente le principe du moteur élémentaire de Lorentz et l'autre son application au fonctionnement d'un objet commun, le ventilateur.

#### Moteur électrique

Une bobine est placée dans le champ magnétique créé par deux aimants en attraction. Lorsqu'elle est parcourue par un courant établi par les élèves, elle subit une force de Laplace qui la met en mouvement. Selon le sens du courant, la bobine tourne dans un sens ou dans l'autre. C'est le principe du moteur électrique. La partie fixe (ici, les aimants) est appelée stator et la partie mobile (ici, la bobine) rotor. De l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique.

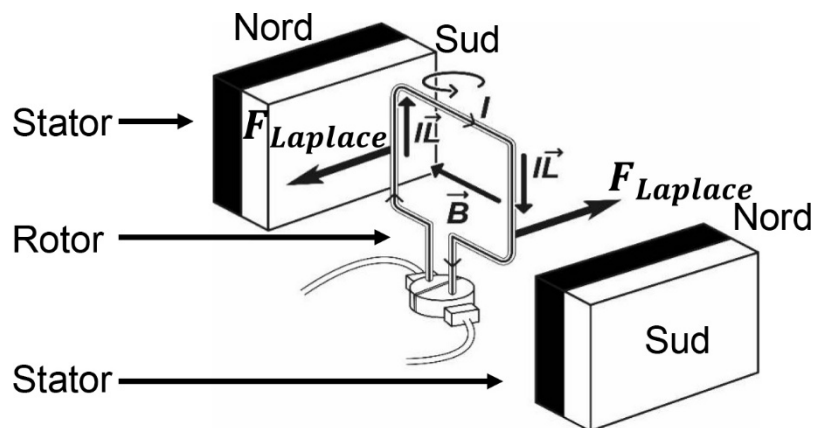
#### Application : le ventilateur

Quatre bobines sont plongées dans le champ magnétique produit par un aimant en anneau. Lorsque le courant est établi dans les bobines par les élèves, elles subissent une force de Laplace qui les fait tourner. Ce mouvement est transmis aux pales d'un ventilateur.



## Synthèse et compléments

Un moteur à courant continu comporte un stator, élément fixe constitué *a minima* de deux aimants permanents ou de deux bobines en regard, et un rotor, élément mobile formé d'un enroulement conducteur au moins, placé dans le champ magnétique créé par le stator. La circulation d'un courant dans le rotor crée une force de Laplace à l'origine de sa rotation : sa vitesse dépend de l'intensité et du sens du courant, ainsi que du champ magnétique créé par le stator.



Un moteur électrique reçoit une énergie électrique qu'il transforme en énergie mécanique. Les moteurs à courant continu permettent des réglages simples de la vitesse, du couple ou du sens de rotation. Dans un moteur asynchrone, les bobines du stator alimentées en courant alternatif produisent un champ magnétique tournant, non synchronisé avec celui du rotor. Ces moteurs sont utilisés dans les domaines des fortes puissances, notamment les transports, l'industrie ou l'électroménager.

### **Table 3 : induction**

La table 3 de l'îlot 3 est consacrée à **mise en expérience du phénomène d'induction, à l'origine de la création d'électricité**. La première expérience est pédagogique, la seconde illustre l'utilisation de cet effet dans l'éclairage des vélos.

#### Phénomène d'induction

À l'aide d'une poignée, les élèves font coulisser un aimant plus ou moins rapidement à l'intérieur d'une bobine reliée à un ampèremètre. Un courant apparaît dans ce conducteur soumis à un champ magnétique variable, d'autant plus important que la variation de champ est rapide. De l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique grâce au champ magnétique. C'est le principe de fonctionnement de l'éclairage d'un vélo.

La borne tactile voisine présente un court film expliquant comment produire de l'électricité.

#### ✚ Application : l'éclairage de vélo

Il convient de faire tourner une roue de vélo. On constate l'allumage d'une LED (diode électroluminescente) lorsque l'aimant fixé sur la roue passe devant elle.

#### Synthèse et compléments

Un courant électrique induit apparaît dans un circuit conducteur placé dans le champ magnétique d'un aimant mobile. Il apparaît aussi dans un circuit fermé mobile, placé dans un champ magnétique stationnaire. Un circuit fixe placé dans un champ magnétique variable et un circuit mobile placé dans un champ magnétique stationnaire sont deux situations équivalentes, à l'origine d'un courant induit. Le courant induit s'oppose toujours à la cause qui lui a donné naissance : ainsi, ce courant crée lui-même un champ magnétique induit, de sens opposé au champ magnétique initial. C'est la loi de modération de Lenz.

Dans un microphone, l'onde sonore provoque la vibration d'une membrane, reliée à une bobine mobile se déplaçant dans le champ magnétique produit par un aimant : une vibration sonore est transformée alors en signal électrique grâce à l'induction.

#### **Table 4 : alternateur**

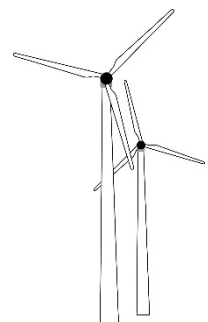
La table 4 de cet îlot est la suite de la précédente et **illustre la production d'électricité grâce au phénomène d'induction** avec deux maquettes, l'une consacrée au fonctionnement de l'alternateur, l'autre à celui des éoliennes.

#### ✚ Alternateur

Vos élèves doivent ici tourner une manivelle dans un sens puis dans l'autre, plus ou moins rapidement. Or, cette manivelle actionne le mouvement de deux bobines sous un aimant fixe : un courant est donc induit dans les bobines. Ce dispositif s'appelle un alternateur. Il permet de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique. Les alternateurs sont utilisés pour produire l'électricité alimentant les villes.

#### ✚ Application : l'éolienne

Presser vivement sur une poire pour souffler de l'air sur une éolienne provoque... l'allumage de LEDs, indiquant par-là l'apparition d'un courant ! L'éolienne produit de l'électricité grâce à un alternateur. L'air soufflé fait tourner ses pales, entraînant la rotation d'aimants dans des bobines. Le mouvement des aimants induit un courant dans les bobines et les LEDs s'allument.





## Synthèse et compléments

Un alternateur utilise un rotor et un stator, tous deux constitués de bobines ou d'aimants permanents. Le fonctionnement de l'alternateur est l'inverse de celui du moteur : un alternateur reçoit une énergie mécanique qu'il transforme en énergie électrique grâce au phénomène d'induction.

L'énergie primaire d'origine nucléaire (réactions de fission), chimique (réactions de combustion) ou cinétique (vent, marées) est convertie en énergie cinétique de rotation à l'aide d'une turbine. Le stator, constitué de bobinages fixes, est plongé dans le champ magnétique variable créé par le rotor solidaire de la turbine. Il est le siège d'un phénomène d'induction qui génère un courant alternatif.

Si on exclut l'utilisation de panneaux photovoltaïques ou de piles à combustible, toute production d'électricité (nucléaire, à combustion, hydroélectrique, éolienne, marémotrice...) repose sur l'emploi d'un alternateur : le rotor est alors un gros électroaimant extrêmement puissant, dont l'axe est entraîné par la turbine.

### **Table 5 : courants de Foucault**

La table 5 met en expérience **l'existence des courants de Foucault induits dans les conducteurs par le mouvement d'un aimant** placé à proximité. La conséquence est un effet de ralentissement.

#### Freinage par courants de Foucault

Trois expériences sont présentées. Dans la première, un anneau aimanté, peut être remonté et glisser librement le long d'un tube vertical en plastique. Dans la deuxième et la troisième expérience, le tube en plastique est remplacé par un tube en cuivre, métal conducteur. La seule différence entre ces deux expériences réside dans la nature de l'anneau : l'un est en laiton, alliage non magnétique, l'autre est un aimant.

Les élèves constatent que l'aimant autour du tube en cuivre est freiné dans sa chute. L'aimant autour du tube en plastique et l'anneau en laiton autour du tube en cuivre ne sont pas ralentis. Le mouvement d'un aimant le long d'un tube conducteur engendre des courants électriques dans le tube, appelés courants de Foucault. Les champs magnétiques créés par ces courants s'opposent au mouvement de l'aimant, ce dernier est donc freiné dans sa chute. Si le tube est isolant ou si l'anneau n'est pas un aimant, il n'y a pas de courants de Foucault et l'anneau tombe en chute libre.

## Synthèse et compléments

Les courants de Foucault sont les courants induits qui apparaissent dans le volume d'un conducteur massif quand les conditions nécessaires à l'émergence d'un phénomène d'induction sont réunies.

Lors de la chute de l'aimant au néodyme autour du tube de cuivre, des courants de Foucault apparaissent dans le tube de cuivre dans deux zones :

- celle quittée par l'aimant lors de sa chute ;
- celle atteinte par l'aimant lors de sa chute.

Les champs magnétiques induits par les courants de Foucault dans ces deux régions sont tels que l'aimant est attiré par la zone qu'il fuit, et repoussé par la zone qu'il atteint : c'est une manifestation de la loi de modération de Lenz. Les courants de Foucault induisent un ralentissement d'autant plus important qu'ils sont intenses : le freinage est ainsi plus marqué avec un barreau qu'avec un tube.

Les courants de Foucault génèrent aussi un échauffement, comme tout courant circulant dans un conducteur. Les dispositifs utilisant des courants de Foucault transforment de l'énergie mécanique en énergie électrique, entièrement transformée ensuite en chaleur par effet Joule.

### **Table 6 : ralentisseur**

La table 6 met en expérience **l'utilisation des courants de Foucault dans les ralentisseurs de véhicules lourds, ou dans les home-trainers et autres vélos d'appartement.**

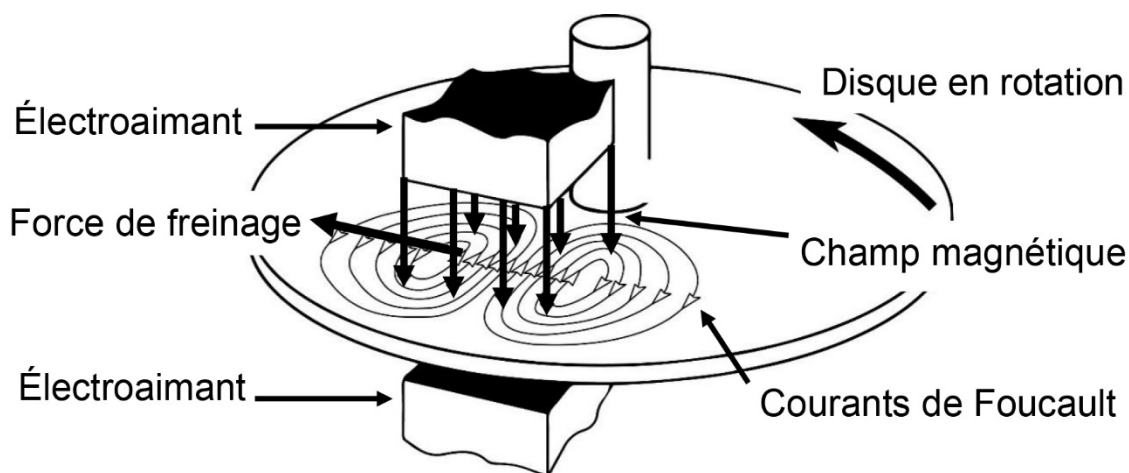
#### Ralentisseur à courants de Foucault

À l'aide d'une manivelle, on fait tourner un disque métallique puis on établit un courant dans les bobines placées de chaque côté du disque en appuyant sur un bouton. Le courant dans les bobines est à l'origine d'un champ magnétique. Comme le disque est en mouvement dans ce champ, des courants induits – les courants de Foucault – apparaissent dans le disque. Ils engendrent à leur tour un champ magnétique, qui s'oppose au mouvement. L'appui sur un second bouton établit un courant deux fois plus intense. Plus le courant, et donc le champ magnétique appliqué, est important, plus les courants de Foucault sont intenses, et plus le disque est ralenti.

### Synthèse et compléments

Le principe de freinage par courants de Foucault est utilisé pour ralentir les véhicules lourds ou des machines tournantes : un disque métallique est fixé sur l'axe de rotation et un électroaimant sur la partie fixe. Le freinage est obtenu lorsque l'électroaimant est alimenté et génère un champ magnétique.

Le freinage par courants de Foucault se fait sans contact, donc sans abrasion, mais il n'est efficace que si la vitesse de rotation est élevée. Il ne peut donc pas être utilisé pour bloquer un véhicule à l'arrêt. Ainsi, ce système est toujours doublé de freins classiques, à friction.



Les systèmes de freinage à courants de Foucault sont utilisés sur les véhicules lourds (camions, autocars, trains, avions) sous le nom de ralentisseurs, de nom commercial Telma. Dans la plupart des home-trainers ou vélos d'appartement, le système de résistance à l'effort utilise également les courants de Foucault.

### Table 7 : lévitation

La table 7 est consacrée à un effet spectaculaire lié au magnétisme, la **lévitation**. L'expérience présente une **lévitation stable** et explique les raisons de cette stabilité. C'est ce principe qui est à l'œuvre dans le train allemand Transrapid en fonctionnement en Corée du Sud et en Chine.

#### 🚦 Lévation magnétique stabilisée

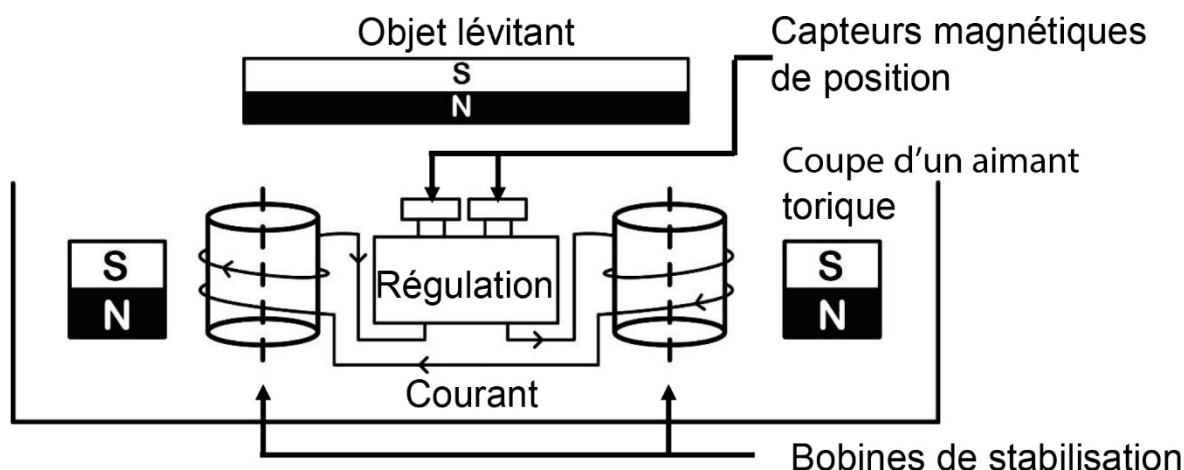
Un aimant en forme de disque lévite au-dessus d'une base contenant un aimant en anneau et quatre bobines. L'aimant en anneau repousse le disque et le fait léviter. Les bobines stabilisent la lévitation. Un dispositif électronique détecte le déplacement du disque vers l'extérieur et établit alors un courant dans les bobines pour le ramener vers le centre. Les bobines piègent donc le disque au centre du dispositif.

La borne tactile voisine présente le principe de la lévitation stabilisée grâce à l'électromagnétisme, principe de fonctionnement de certains trains ultrarapides.

### Synthèse et compléments

Le rapprochement des pôles identiques de deux aimants au néodyme engendre d'intenses forces de répulsion. Mais, dès que l'un des aimants est lâché, il se retourne pour répondre à l'attraction forte existant entre les pôles opposés de ces deux aimants. Ainsi, la lévitation obtenue par répulsion entre aimants permanents est toujours instable.

Des champs magnétiques supplémentaires, produits par des électroaimants, sont nécessaires pour stabiliser la lévitation magnétique. Leur intensité et leur direction sont asservis à la position de l'objet en lévitation.



Le train à sustentation allemand Transrapid fonctionne selon ce principe : les forces de répulsion entre les aimants et électroaimants disposés à bord du train et le long des voies sont à l'origine de la lévitation du train. D'autres électroaimants placés le long des voies le recentrent sur la voie lorsqu'il se rapproche trop d'un bord : ils stabilisent ainsi sa lévitation.

### Table 8 : chauffage par induction

La table 8 est consacrée au **chauffage par induction** : l'objectif est d'expliquer le principe à l'origine du fonctionnement des plaques chauffantes domestiques à induction.

#### 🔧 Chauffage par induction

Un anneau en aluminium peut coulisser autour d'une bobine possédant la forme d'un tube vertical. Il convient d'appuyer sur un bouton pour alimenter cette dernière en courant alternatif. Le courant alternatif dans la bobine induit un courant alternatif de sens opposé dans l'anneau. D'une part, les champs magnétiques dus à ces deux courants étant en sens opposés, l'anneau lévite. D'autre part, les courants qui parcourent l'anneau le font chauffer. Vos élèves doivent être prudents en le touchant car il peut être brûlant !

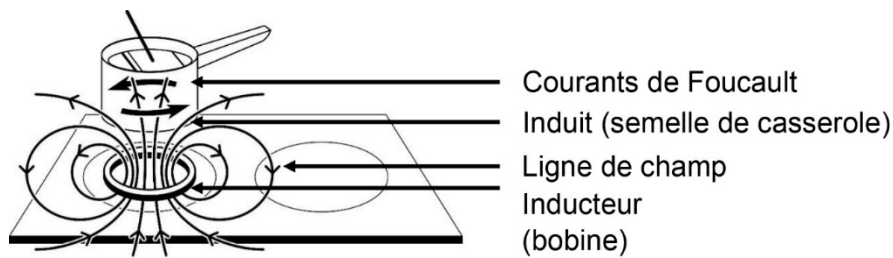
#### 🔧 Application : la plaque à induction

Une plaque à induction est une bobine parcourue par un courant alternatif. Des courants sont induits dans la casserole posée sur la plaque au-dessus de la bobine et la font chauffer. L'emploi d'un fond de casserole en matériau ferromagnétique permet d'y canaliser les lignes de champ magnétique, augmentant les courants induits et par conséquent le chauffage. Bien sûr, le poids de la casserole ne lui permet pas de léviter !

### Synthèse et compléments

Une plaque à induction permet de chauffer une casserole sans contact avec l'élément chauffant. Celui-ci, situé sous la plaque, est constitué d'une bobine alimentée par un courant alternatif, qui crée un champ magnétique alternatif.

La semelle de la casserole, placée dans ce champ, est le siège de courants induits provoquant une élévation de sa température par effet Joule. Si la plaque devient chaude, c'est uniquement à cause de la chaleur diffusée par le fond de la casserole.



Ce chauffage est plus efficace si la fréquence du courant alternatif est élevée (20 à 50 kilohertz plutôt que les 50 hertz du secteur) et si la réponse magnétique de la semelle de la casserole est importante (efficacité 10 000 fois meilleure avec un alliage ferromagnétique doux qu'avec un alliage non ferromagnétique).

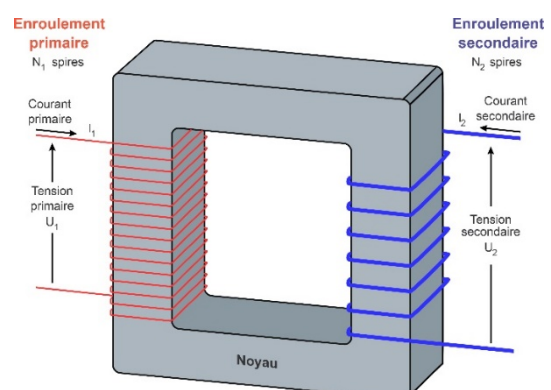
Les courants induits dans la semelle créent un champ magnétique opposé à celui créé par le bobinage. La casserole devrait léviter comme l'anneau, mais son poids l'en empêche.

### Table 9 : transformateurs

La table 9 a pour objectif d'expliquer le **fonctionnement des transformateurs**, omniprésents dans notre quotidien, dispositif à l'origine de la tension de 230 volts du secteur, ou du chargement de nos ordinateurs et smartphones sur ce même secteur.

#### 🔌 Transformateur

Comme dans le dispositif présenté ci-dessous, la bobine de gauche est alimentée en courant alternatif, celle de droite ne l'est pas. Un noyau en fer les relie. Le courant alternatif est à l'origine d'un champ magnétique alternatif qui induit un courant dans la bobine de droite grâce au noyau en fer. Les deux bobines diffèrent par le nombre de tours de fil (spires) : dans l'élément d'exposition, la bobine de droite en comporte quatre fois moins que celle de gauche. Des cadrans affichent les tensions aux bornes de chacune des bobines et on observe que la tension est quatre fois plus faible aux bornes de la bobine de droite. Ce dispositif est un transformateur de tension. Les transformateurs sont utilisés pour convertir l'énergie électrique de très haute tension (400 000 volts) des centrales EDF en basse tension (230 V) pour une utilisation domestique.



Crédit : D'après BillC / CC BY-SA 3.0.

## Transformateurs domestiques

Des transformateurs sont utilisés aussi dans certains chargeurs domestiques. Deux d'entre eux sont exposés :

- celui de gauche est un modèle très ancien, le transformateur est encombrant ;
- dans celui de droite, le circuit a été repensé dans son ensemble afin de réduire la taille du transformateur.

### Synthèse et compléments

Un transformateur est un dispositif passif qui permet de transformer un signal électrique alternatif en un autre signal électrique alternatif de même fréquence ayant des caractéristiques différentes en courant et en tension.

La transformation s'effectue en réalisant un couplage total entre un circuit primaire et un circuit secondaire, caractérisés par des bobinages dont le nombre de spires diffère. Le couplage est réalisé par un noyau en matériau ferromagnétique doux. Lorsqu'un courant alternatif circule dans le circuit primaire, il produit un champ magnétique alternatif dont les lignes de champ sont canalisées par le noyau ferromagnétique, induisant ainsi un courant alternatif de même fréquence dans le circuit secondaire. Le rapport de transformation de tension souhaité est obtenu en adaptant les nombres de spires de chaque bobinage.

Les noyaux ferromagnétiques des transformateurs sont formés de feuillets pour limiter la circulation des courants de Foucault, et donc les pertes d'énergie par échauffement (effet Joule) au moment de la transformation.

### **Table 10 : Witricity et système antivol RFID**

Cette dernière table de l'îlot 3 est consacrée à l'illustration de deux applications de l'induction en courant alternatif, le « witricity » comme « wireless electricity » à l'origine du fonctionnement des chargeurs de téléphone portable sans fil, et le système antivol RFID pour « radio frequency identification ».

#### Witricity

Une bobine est enroulée sur un cadre fixe. Elle est alimentée par un courant alternatif à l'origine d'un champ magnétique. Lorsque les élèves placent un palet mobile et conducteur au-dessus du cadre fixe, un courant est induit dans cet objet, qui allume des LEDs. Les chargeurs sans fil de téléphone portable fonctionnent sur ce principe. *Witricity* est un mot valise pour *wireless electricity*, électricité sans fil en français.

#### Antivol RFID

Des étiquettes antivol RFID (*Radio Frequency Identification*) sont présentées dans une vitrine. Les portiques des magasins sont constitués de deux bornes équipées chacune d'une bobine. L'une est alimentée en courant alternatif, ce qui induit un courant dans l'autre borne. Si la

bobine d'un antivol RFID passe entre les bornes, le courant induit est modifié. Cela déclenche l'alarme du portique.

La borne tactile voisine présente un court film expliquant le fonctionnement des antivols RFID et autre carte Navigo.

### Synthèse et compléments

Le terme Witricity désigne une expérience de transmission sans fil de l'électricité réalisée en 2007 au MIT. Le champ magnétique alternatif produit par une bobine parcourue par un courant alternatif (de quelques mégahertz) traverse une bobine réceptrice placée au-dessus. Celle-ci est alors le siège d'un courant induit, capable d'activer des dispositifs demandant peu de puissance (des LEDs, des moteurs de type vibreur...) ou d'alimenter des chargeurs sans fil de téléphones portables.

Une radioétiquette RFID comprend un bobinage plat relié à une puce électronique contenant des données. Un portique de sécurité comprend deux bobines en vis-à-vis, l'émettrice et la réceptrice. L'émettrice, alimentée en courant alternatif, produit un champ magnétique alternatif. Le passage de l'antivol RFID devant l'émettrice engendre des courants induits dans l'antivol, à l'origine d'un champ magnétique induit. Les champs magnétiques produits par l'émettrice et perçus par la réceptrice sont donc différents, ce qui déclenche l'alarme.

## **I.3.4 Îlot 4 - Magnétisme, quels rôles dans un ordinateur ?**

**Cet îlot est pleinement consacré à l'ordinateur. L'objectif est de montrer combien le magnétisme est omniprésent dans son fonctionnement, que ce soit dans ses composants ou pour l'enregistrement des données.**

Après s'être familiarisés avec le codage binaire, les élèves observent le principe de l'écriture et de la lecture d'un octet, l'unité d'information, sur un support magnétique. La déambulation les amène ensuite à découvrir combien les objets résultants d'une manipulation des aimantations à l'échelle de l'infiniment petit sont omniprésents dans leur quotidien, que ce soit dans les cartes bancaires, les tickets de métro ou dans un objet si familier et pourtant de structure si élaborée, le magnet du réfrigérateur ! La visite se poursuit avec la découverte et l'explication de la magnéto-résistance géante, qui a valu au physicien français Albert Fert le prix Nobel de physique en 2007. Les recherches les plus récentes, visant au stockage ultrarapide et miniaturisé de l'information et à la diminution de la consommation d'énergie, sont évoquées à travers deux exemples : l'écriture par impulsions laser ultrabrèves et le codage sur quatre états.





## Éléments d'exposition de l'îlot 4

### **Table 1 : magnétisme dans un ordinateur**

La table 1 présente un ordinateur ouvert : l'objectif est d'une part de **retrouver dans l'ordinateur tous les éléments décrits à l'îlot 3**, et d'autre part de découvrir que le **magnétisme est aussi présent pour l'enregistrement des données**.

#### Magnétisme dans un ordinateur

Vous observez ici l'intérieur d'un ordinateur. Repérez ces composants utilisant des phénomènes magnétiques :

- le ventilateur ;
- le disque dur ;
- le haut-parleur ;
- l'alimentation contenant le transformateur pour convertir les 230 V de nos prises électriques en 3,3 V, 5 V ou +/-12 V alimentant les composants de l'ordinateur.

#### Bandes, disquettes et disques durs magnétiques

Ces objets servent à stocker de l'information. Les disquettes et bandes magnétiques sont remplacées aujourd'hui par les disques durs. Dans tous ces dispositifs, l'information est stockée sur de très fines couches magnétiques, d'épaisseur 10 à 10 000 fois plus faible que celle d'un cheveu. Le bras sur le disque dur permet d'écrire et de lire les informations contenues dans le disque.

### Synthèse et compléments

Dans un ordinateur, le magnétisme classique est omniprésent, que ce soit dans :

- les transformateurs nécessaires pour l'alimentation en basses tensions continues 5 volts et 12 volts ;
- les moteurs électriques pour la rotation des plateaux de disque dur ou des ventilateurs ;
- l'asservissement par capteur à effet Hall pour le contrôle de la vitesse de rotation des plateaux ;
- les moteurs pas à pas pour le déplacement piste par piste des bras supportant les têtes du disque dur ;
- les haut-parleurs et les microphones.

Le magnétisme est présent également sous forme de couches minces magnétiques, appelées médias magnétiques, utilisés pour l'enregistrement des données. Le média, de 30 nanomètres d'épaisseur environ, est déposé sur les deux faces d'un support constitué de disques rigides en verre pour un disque dur, de disquettes souples ou de rubans jadis.

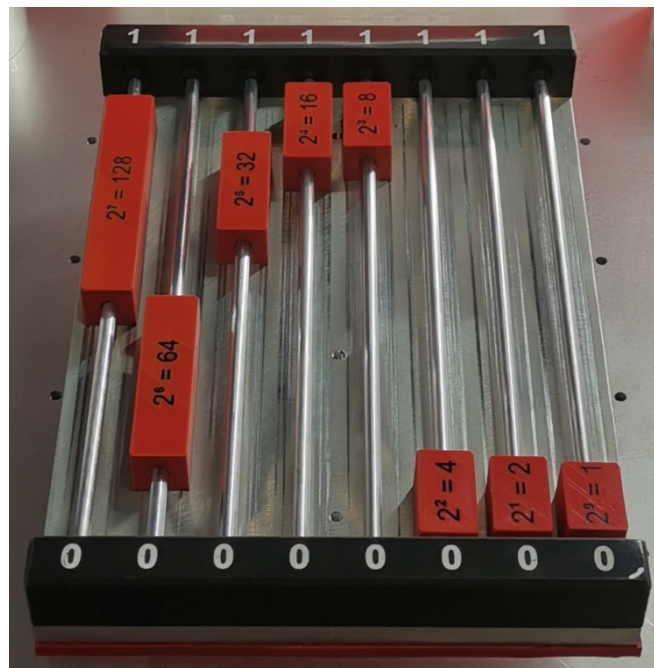
Dans un disque dur, l'information est enregistrée sur plusieurs disques superposés pour augmenter la capacité de stockage. Elle est écrite dans le média grâce à plusieurs têtes d'écriture et lue grâce à plusieurs têtes de lecture.

## Table 2 : enregistrement magnétique

La table 2 présente un boulier permettant de rappeler les **principes du codage binaire de toute information**, et montre **comment le magnétisme peut être utilisé pour réaliser ce codage binaire**.

### Codage binaire

Un boulier convertit un nombre en binaire, le langage de l'informatique. Le codage binaire de l'information se fait sous forme de « bit » (pour *binary digit*), qui peut prendre les valeurs « 0 » ou « 1 ». L'octet, formé de 8 bits, est l'unité d'information.



*Comment écrire le nombre 11 en binaire à l'aide de notre boulier ?*

Sur le boulier, chaque colonne est associée à une puissance de 2.

En partant de la gauche, mettez à 0 toutes les colonnes de valeur supérieure à 11. Ainsi, les colonnes de 128, 64, 32 et 16 sont à 0.

Mettez la colonne du 8 à 1.

Pour obtenir 11, il faut ajouter 3 à 8. La colonne du 4 est donc trop grande, mettez-la à 0.

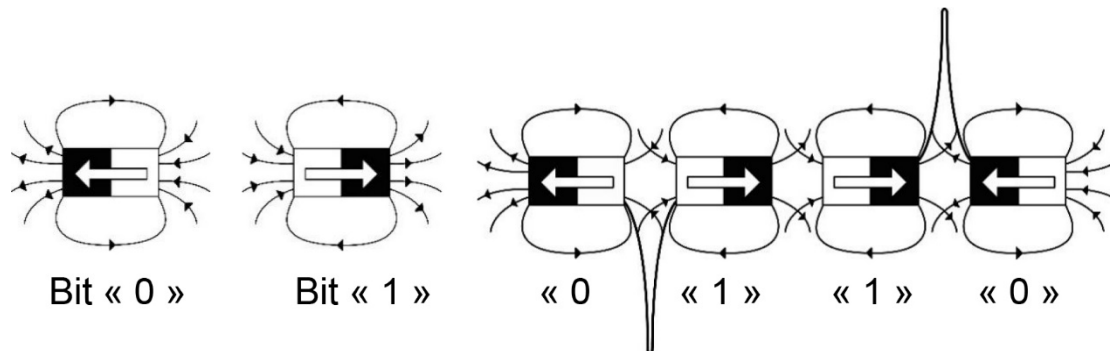
Les colonnes du 2 et du 1 sont nécessairement à 1 :  $11 = 8 + 2 + 1$ .

Lisez l'octet associé au nombre 11 sur le boulier : 0000 1011. C'est la seule représentation possible de 11 en binaire.

Codez en binaire un nombre au choix entre 0 et 255, et vérifiez votre code à la table 3 !

## Synthèse et compléments

Les médias magnétiques sont des couches minces magnétiques formées par un assemblage de petits moments magnétiques permanents qui se comportent comme de petits aimants. Ceux-là permettent de matérialiser les bits du codage binaire, leur sens codant les valeurs « 0 » et « 1 ».



Écrire l'information avec des « 0 » ou des « 1 » sur un média magnétique consiste à orienter localement ces petits moments magnétiques dans des sens opposés. La succession de deux bits opposés engendre la succession de deux polarités identiques (nord-nord ou sud-sud) sur le média magnétique, ce qui génère des champs magnétiques locaux. Lire l'information enregistrée sur un média magnétique consiste à lire ces champs locaux.

D'abord orientés dans le plan du média, ces petits moments magnétiques sont actuellement orientés perpendiculairement à ce plan pour augmenter la densité d'enregistrement.

### **Table 3 : tête d'écriture et de lecture**

La table 3 présente la maquette du **principe de l'écriture et de la lecture d'un bit d'information, et illustre donc le fonctionnement d'une tête d'écriture et d'une tête de lecture.**

#### Enregistrement magnétique numérique

Il faut ici taper sur un clavier un nombre inférieur à 256 pour l'enregistrer. Il est converti instantanément en code binaire à l'écran. En appuyant sur le bouton « Écrire », on simule une écriture magnétique de cet octet à l'aide des huit aimants. En appuyant ensuite sur le bouton « Lire », on lit les orientations prises par les huit aimants. Le nombre lu par la machine s'affiche en bas. Est-ce bien celui qui a été enregistré ?

Le support de stockage est donc représenté ici par une rangée de huit aimants, chacun correspondant à un bit, l'ensemble formant un octet. Chaque tête d'écriture est une bobine parcourue par un courant dont le sens est imposé par la valeur du bit à écrire, 0 ou 1. Ce courant est à l'origine d'un champ magnétique dans un sens ou dans l'autre qui oriente l'aimant pour coder le bit.

Chaque tête de lecture est une boucle fermée conductrice située au-dessus de l'aimant correspondant au bit à lire. Le sens du courant induit par l'aimant dans la boucle détermine s'il s'agit d'un bit 0 ou 1.

La maquette présentée dans l'exposition montre les principes de base de l'écriture et de la lecture de l'information sur un support magnétique, que la recherche scientifique permet de faire évoluer.

### Synthèse et compléments

Une tête d'écriture est un électroaimant : quand son bobinage est parcouru par un courant, ce dernier crée un champ magnétique. Au passage du média, la tête d'écriture oriente les petits moments magnétiques du média dans un sens ou dans l'autre selon le sens du courant dans l'électroaimant. La tête d'écriture transforme donc un codage électrique en un codage magnétique pérenne de l'information.

Une tête de lecture est une boucle conductrice fermée : le défilement sous la tête de lecture des champs magnétiques locaux dus à la succession de deux polarités identiques (nord-nord ou sud-sud) sur le média y génère des microcourants induits, dans un sens ou dans l'autre selon le sens du champ magnétique local. La tête de lecture transforme donc un codage magnétique pérenne en un codage électrique de l'information.

De nombreuses recherches visent à réduire la taille des petits moments magnétiques utilisés pour coder un bit, ainsi que les tailles des têtes d'écriture et de lecture. L'impossibilité de miniaturiser les têtes de lecture à l'échelle des petits moments magnétiques, supports du codage de l'information sur le média, a nécessité de développer une nouvelle génération de têtes de lecture à magnétorésistance géante.

### **Table 4 : codes magnétiques**

Deux expériences figurent sur cette table : l'une permet de **découvrir le code magnétique qui se cache dans une carte bancaire ou un billet de métro**. L'autre invite les élèves à s'attarder sur la **structure du matériau à l'origine des films magnétiques**, en fait également issus d'une manipulation de l'aimantation.

#### Lecture optique d'un code magnétique

Vos élèves prennent un ticket de métro, une carte bancaire ou tout objet comportant une bande magnétique. Ils plaquent la bande magnétique de l'objet sous le rectangle doré du *magview*, un microscope magnétique qui permet de visualiser des zones aimantées jusqu'à l'échelle du micromètre. En regardant à travers l'oculaire, ils devraient voir le code-barres magnétique, la couleur des traits observés correspondant à l'orientation de l'aimantation. Si une information est stockée, la largeur des bandes est irrégulière.

Dans la vie de tous les jours, cette information est inscrite et lue comme sur la table précédente, grâce à des têtes d'écriture et de lecture.

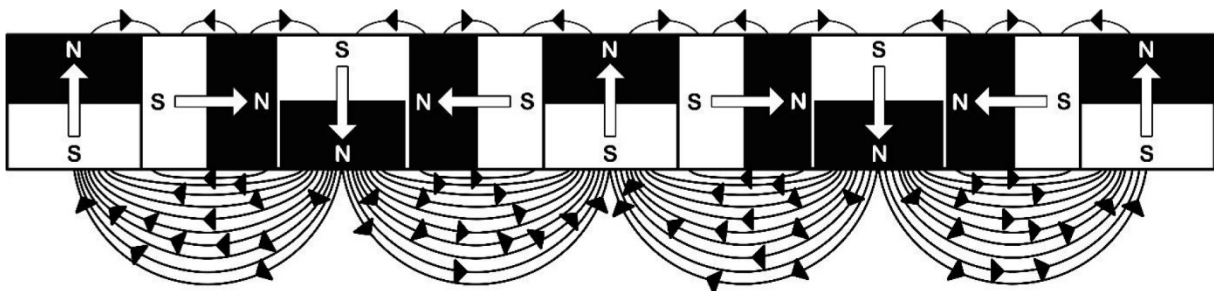
## Les magnets

Les élèves placent un magnet sur une plaque en fer. Seule sa face noire colle à la plaque. Ils constatent que deux magnets peuvent être empilés et coller à la plaque, malgré le décor imprimé. Sur la table, on dispose d'un détecteur de flux magnétique, qui dévoile la structure magnétique d'un magnet, constituée de bandes aimantées. Celles-là concentrent le champ magnétique d'un seul côté, comme la maquette, qui est une représentation agrandie de la structure d'un magnet. Le magnet illustre ainsi une autre application obtenue par manipulation d'aimantation.

### Synthèse et compléments

Les aimants collés sur la porte d'un réfrigérateur, les magnets, sont pour le moins étranges : ils ne collent que d'un seul côté ! Pourquoi ?

L'aimantation d'un magnet à l'échelle du micron est analogue à celle obtenue, à l'échelle du centimètre, en organisant des aimants parallélépipédiques selon le schéma ci-dessous :



Cet arrangement très spécifique d'aimants est à l'origine d'un champ magnétique très intense d'un côté de la barre d'aimants et presque nul de l'autre côté. Les magnets collés au réfrigérateur ont la même structure à l'échelle microscopique et présentent donc le même comportement. Tout comme les médias magnétiques, les magnets résultent d'une manipulation de l'aimantation et sont donc fabriqués selon les mêmes procédés.

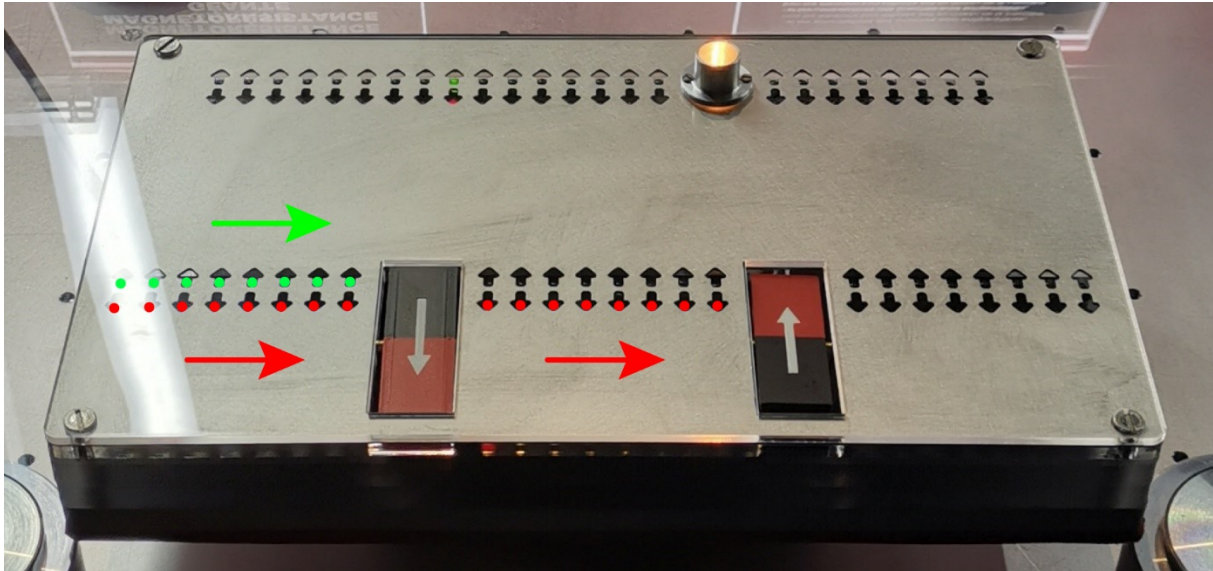
Cette configuration d'aimants, nommée réseau de Halbach, du nom de son inventeur en 1979, permet d'obtenir des champs magnétiques spatialement périodiques et très intenses. Elle est utilisée dans les accélérateurs de particules, ainsi que dans les trains à lévitation magnétique.

### **Table 5 : magnétorésistance géante**

Cette table est consacrée à la présentation et à l'explication de la **magnétorésistance géante**, découverte à l'origine du prix Nobel d'Albert Fert en 2007, et à l'origine des meilleures performances des têtes de lecture de nos ordinateurs.

## ✚ Magnétorésistance géante

Le courant électrique est formé d'électrons représentés sur la maquette ci-dessous par les flèches rouges ou vertes. Celles-là correspondent aux deux directions possibles du spin, vers le haut  $\uparrow$  ou le bas  $\downarrow$ , que possède chaque électron. Les appareils électriques (ampoules, etc.) ne sont pas sensibles au spin des électrons.



En revanche, une couche mince magnétique, représentée par un aimant pouvant tourner sur lui-même sur la maquette, filtre les électrons selon leur spin. Après l'aimant de gauche, seule une catégorie de flèches subsiste (celles qui pointent vers le bas), car une couche laisse passer uniquement les électrons de même direction de spin que son aimantation.

Pour un empilement de deux couches, si les aimantations des couches sont de même sens, les électrons de même direction de spin traversent l'empilement : le courant passe. Quand les aimantations des deux couches sont de sens opposé comme dans notre exemple, aucun électron ne traverse l'empilement : le courant ne passe pas. Ces empilements dits « à magnétorésistance géante » sont à la base de têtes de lecture plus performantes.

La borne tactile voisine présente un film en expliquant le principe.

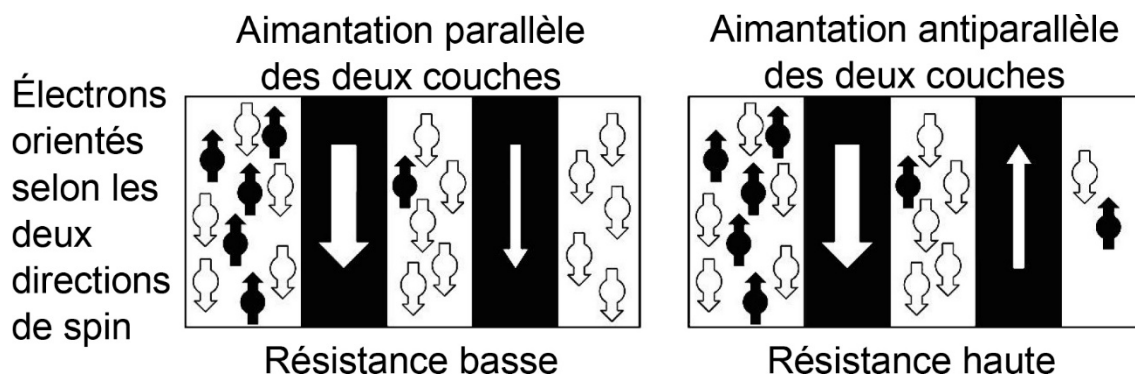
### Synthèse et compléments

L'électron se comporte à la fois comme une charge électrique et comme un microscopique aimant dont le moment magnétique est appelé spin. Le spin est une grandeur purement quantique, qui ne peut prendre que deux orientations : il est dirigé soit vers le haut (spin up «  $\uparrow$  »), soit vers le bas (spin down «  $\downarrow$  »). Un courant électrique comporte autant d'électrons de spin «  $\uparrow$  » que de spin «  $\downarrow$  ».

Un conducteur non magnétique n'est pas sensible à la direction du spin des électrons. Les deux populations participent au courant électrique indifféremment. Au contraire, une fine couche magnétique placée sur le trajet d'un courant électrique filtre les électrons selon leur spin, ne laissant passer principalement que l'un des deux types d'électrons. Elle présente une résistance au passage du courant dépendant de la direction de l'aimantation de la fine couche magnétique, encore appelée magnétorésistance.

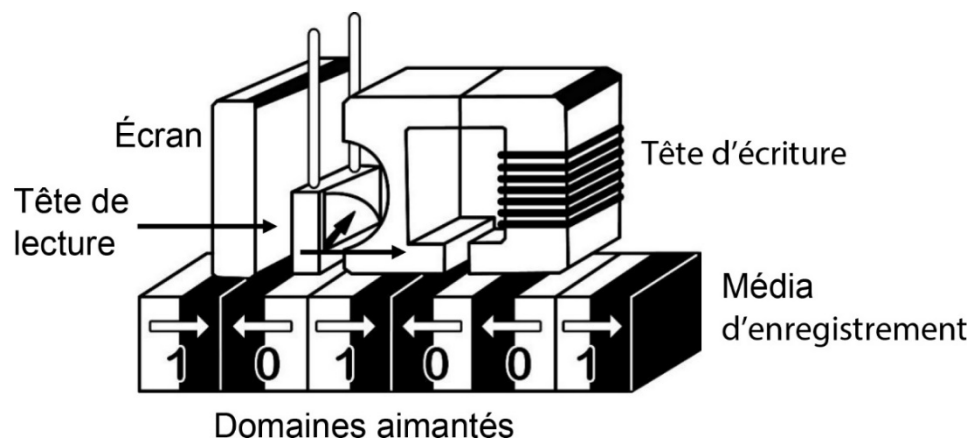
Plus encore, l'empilement de deux films magnétiques nanométriques séparés par une fine couche non magnétique, traversé par un courant, permet d'obtenir deux niveaux de courant de sortie selon que les aimantations pointent dans la même direction ou dans des directions opposées :

- si les aimantations des couches sont parallèles, les électrons de direction de spin parallèle à cette aimantation passent librement à travers toute la structure permettant l'établissement d'un courant, alors que les électrons de direction de spin antiparallèle diffusent dans la première couche ;
- si les aimantations des couches sont antiparallèles, tous les électrons sont diffusés soit au niveau de la première couche, soit au niveau de la seconde, ce qui se traduit par une résistance plus élevée et une diminution du courant.



### Têtes de lecture à magnétorésistance géante

Les nouvelles têtes de lecture des disques durs fonctionnent selon ce principe de filtre à spins. Ainsi, des bits d'information plus petits peuvent être lus, ce qui permet d'augmenter les densités d'enregistrement.





Les mémoires MRAM (pour *Magnetic Random Access Memory*) utilisent le principe de la magnétorésistance géante. Ces mémoires sont non volatiles, rapides, réinscriptibles, peu énergivores et sans pièce mécanique.

### Table 6 : deux sujets de recherche en cours

Sur cette table sont présentées **deux exemples de recherches actuelles**, ayant tous deux pour objectifs d'augmenter encore les performances (densité et rapidité) de nos ordinateurs en termes d'écriture et lecture d'informations enregistrées, à moindre coût énergétique.

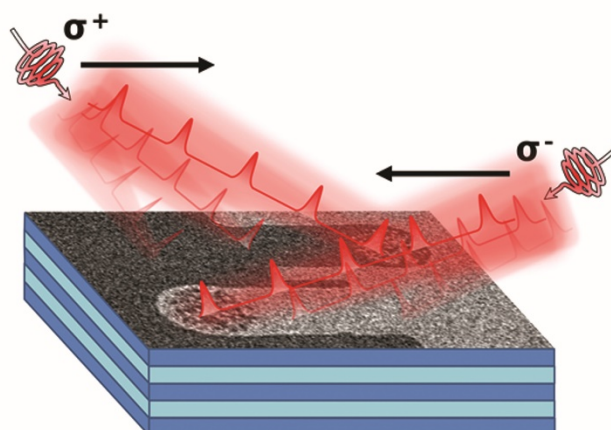
✚ Vers une écriture toute optique : retourner l'aimantation par laser

La technologie de stockage magnétique actuelle est limitée par les capacités de stockage, les vitesses d'accès et la consommation d'énergie.

Des chercheurs ont découvert récemment qu'il était possible de changer l'orientation de l'aimantation, et donc d'écrire de l'information, grâce à des impulsions laser ultrabrèves. Cette technique permettrait de répondre aux besoins actuels de stockage ultrarapide de l'information, de miniaturisation de la taille des éléments de stockage et de diminution de la consommation d'énergie, liés à l'utilisation d'Internet et des réseaux sociaux.



Objectif : écriture optique de l'information sur média magnétique.



Retournement de l'aimantation avec de la lumière polarisée circulaire.

## Synthèse et compléments

Retourner des aimants de taille nanométrique en utilisant un faisceau laser... L'idée paraît incroyable, et pourtant ! Des chercheurs de l'institut Jean Lamour se sont intéressés à des alliages particuliers cobalt-fer-gadolinium, dont l'aimantation peut s'annuler pour une concentration et une température particulières définissant ainsi un point de compensation. Dans ce cas très particulier, les chercheurs sont parvenus à contrôler, par des impulsions ultrabrèves de lumière, les propriétés magnétiques de ces alliages. Ils ont même observé un retournement d'aimantation tout optique sur des multicouches d'alliages magnétiques, avec ou sans terre rare, mais présentant toujours un point de compensation. La polarisation du laser suffit alors à déterminer l'état final du système magnétique et permet de coder des bits « 0 » et « 1 ». Enregistrer de l'information sur un media magnétique là où le laser agit pourrait devenir possible à l'avenir !

Ces résultats majeurs laissent envisager le développement de nouvelles technologies plus rapides et moins énergivores dans le domaine de l'enregistrement magnétique. L'enjeu est crucial tant la consommation d'énergie liée au stockage des données est préjudiciable à l'avenir de notre planète.

 Vers de nouveaux médias magnétiques : changer de code pour stocker plus

Pour stocker plus d'information dans un même volume, des chercheurs ont proposé de changer le codage de l'information. Au lieu d'utiliser seulement deux états comme dans le code binaire, ils ont imaginé de minuscules carrés dont les diagonales seraient le support de l'aimantation. Comme il y a deux diagonales et que l'aimantation peut pointer dans les deux sens, l'information pourrait être codée sur quatre états, ce qui permettrait d'augmenter le volume de stockage.

## Synthèse et compléments

En cherchant à développer de nouveaux matériaux permettant d'augmenter les performances des médias magnétiques, des chercheurs de l'institut Jean Lamour ont imaginé des matériaux engendrant un codage de l'information sur plus que deux états. Ils ont réussi ainsi à concevoir et réaliser des réseaux carrés de nanoaimants de quelques dizaines de nanomètres, à quatre orientations possibles de spin, selon les deux diagonales des carrés, dans un sens ou dans l'autre. Ces nouveaux matériaux laissent envisager la possibilité de coder l'information sur quatre états.

À partir d'un même pavage carré, ils ont même conçu plusieurs réseaux tournés progressivement de 0 à 45° et observé des organisations magnétiques collectives différentes selon les réseaux créés. Ces travaux permettent d'envisager l'apparition de nouveaux métamatériaux (matériaux composites artificiels) magnétiques dont les propriétés seraient ajustées par de simples variations géométriques. Ils pourraient permettre l'émergence de composants électroniques dédiés au calcul bio-inspiré, qui effectueraient des opérations complexes comme de la reconnaissance de forme à moindre coût énergétique.

### I.3.5 Îlot 5 - Magnétisme, quelles recherches ?

À la fin de leur parcours, les élèves découvrent les instruments de travail de l'Institut Jean Lamour et leur utilisation pour fabriquer des matériaux aux propriétés magnétiques nouvelles.

Les élèves sont invités à observer une maquette en trois dimensions de la plateforme DAUM de dépôt et analyse sous ultravide de nanomatériaux, un équipement de renommée internationale. Ils explorent le principe de la croissance cristalline sous ultravide, dont le but est de créer des monocristaux de nouveaux matériaux, puis les expériences permettant de fabriquer par lithographie des objets nanométriques. Ils terminent leur visite par deux exemples de recherches plus appliquées : les nouveaux capteurs magnétiques innovants à magnétorésistance géante, et les recherches visant à renforcer les performances de la magnétographie, technique d'impression sécurisée très utile aux services juridiques ou bancaires.



## Éléments d'exposition de l'îlot 5

### **Table 1 et 2 : plateforme DAUM**

Les deux premières tables de cet îlot présentent une maquette en trois dimensions de l'équipement phare de l'institut Jean Lamour, **la plateforme DAUM de dépôt et analyse sous ultravide de nanomatériaux**. C'est actuellement **le plus grand équipement au monde de fabrication de nouveaux matériaux**.

#### La plateforme DAUM

Cette maquette représente un instrument scientifique unique au monde : la plateforme DAUM (dépôt et analyse sous ultravide de nanomatériaux). Cet équipement permet notamment de créer des nanomatériaux aux nouvelles propriétés magnétiques. À l'intérieur des chambres de la plateforme, les matériaux sont fabriqués en déposant des atomes les uns après les autres. Ils forment des couches d'épaisseur 50 000 fois plus faible que celle d'un cheveu (de l'ordre d'un milliardième de mètre). Les chambres sont dédiées à la fabrication de couches minces ou à leur analyse. Elles sont toutes reliées entre elles par un tube sous ultravide de 70 mètres de long, ce qui permet de réaliser et d'analyser des échantillons sans les sortir à l'air libre.

La borne tactile voisine comporte plusieurs films présentant la plateforme DAUM.

#### Un tube géant pour étudier le nanomonde

Le caractère novateur de la plateforme DAUM repose sur l'association de matériaux de nature très différente au départ, des métaux, semi-conducteurs, isolants, oxydes, supraconducteurs, au sein d'une même nouvelle structure. Cette possibilité est née de la connexion entre elles, le long du tube, de treize chambres de croissance propres à chaque type de matériaux, complétées de neuf chambres d'analyse.

#### L'ultravide

Contrairement aux apparences, le vide n'est pas vraiment vide. Il y a toujours des atomes, même entre les étoiles. Les physiciens déterminent la qualité du vide en évaluant la distance moyenne qu'un atome doit parcourir avant d'en rencontrer un autre : c'est le libre parcours moyen. Dans l'air de la salle d'exposition, un atome rencontrera un autre atome après un parcours moyen de 68 nanomètres, c'est-à-dire 0,000 068 millimètre. Dans l'ultravide, un atome parcourra en moyenne 1 kilomètre avant d'en rencontrer un autre. C'est le même vide qu'entre les étoiles ! Ce vide très poussé permet de contrôler le dépôt des atomes sur l'échantillon.

#### Le nanomonde

La structure d'un matériau à l'échelle du nanomètre (= milliardième de mètre) détermine toutes ses propriétés physiques. C'est la raison pour laquelle les scientifiques travaillent à cette échelle pour créer de nouveaux matériaux.

Les objets nanométriques sont caractérisés par un nombre d'atomes en surface identique à celui en volume. Les phénomènes de surface et d'interface y jouent donc un rôle prédominant.

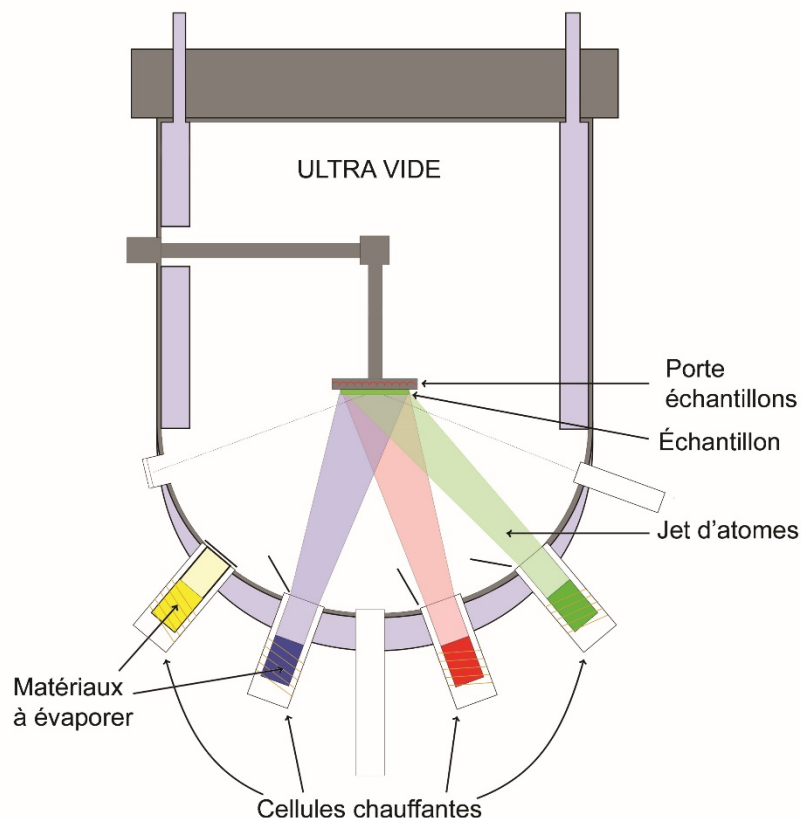
### Table 3 : croissance cristalline

Cette table est consacrée aux explications du **principe de la croissance cristalline sous ultravide**, dont le but est de fabriquer des **monocristaux de nouveaux matériaux**, à la structure quasi parfaite.

✚ Fabriquer des nanomatériaux

Les nanomatériaux sont fabriqués dans des chambres sous ultravide en déposant des couches d'atomes les unes sur les autres. Pour réaliser une « source » d'atomes, un matériau (ici, un métal) est chauffé jusqu'à ce qu'il s'évapore. Un jet d'atomes est obtenu ainsi et dirigé vers une cible, le substrat, sur laquelle les atomes se déposent. C'est le même principe que lorsque de l'eau chauffée dans une casserole se dépose sur les vitres de la cuisine. Grâce à l'ultravide, les atomes évaporés ne sont pas déviés de leur trajectoire par collisions avec d'autres atomes. Leur dépôt s'effectue très lentement et ils s'arrangent en couches minces quasi parfaites. Ce procédé s'appelle l'épitaxie par jets moléculaires.

### Fabrication des nanomatériaux

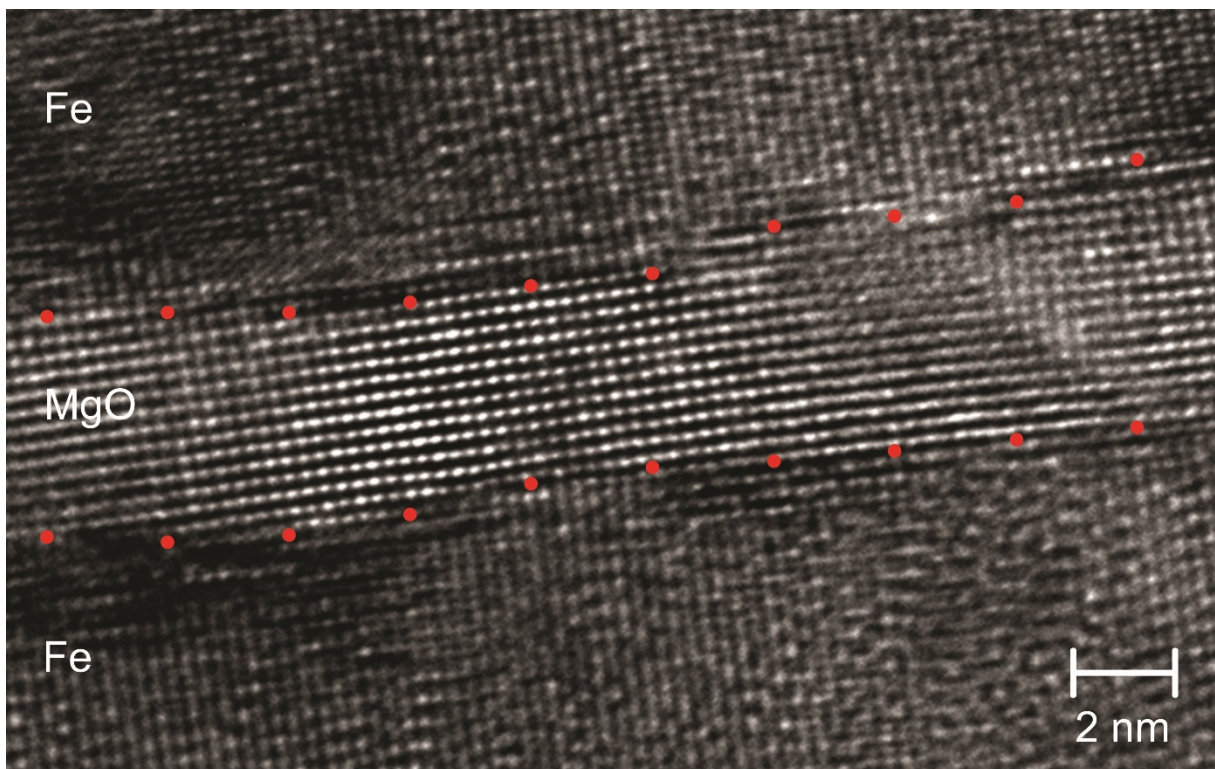


### Chambre d'épitaxie par jets moléculaires



## 🚦 Observer des nanomatériaux

La maquette exposée dans cet élément représente un empilement de couches minces fabriquées dans une chambre d'épitaxie par jets moléculaires. Chaque boule correspond à un atome. Les couches d'un véritable échantillon ont été observées au microscope et vous sont dévoilées ci-dessous. L'image a été obtenue grâce à un microscope électronique à balayage (MEB), capable de visualiser des objets 10 000 fois plus petits que l'épaisseur d'un cheveu. Chaque point blanc est un atome : leur disposition témoigne d'un empilement quasi parfait. Cet échantillon est un exemple d'empilement à magnétorésistance géante utilisé dans les capteurs magnétiques : les deux couches foncées sont ferromagnétiques, la couche claire au centre est isolante.



Empilement à magnétorésistance géante Fe/MgO/Fe obtenu par épitaxie par jets moléculaires.

### Synthèse et compléments

La croissance cristalline est le processus par lequel un cristal se forme par adjonction progressive d'atomes sur la surface d'un germe préexistant. Ainsi, dans une chambre de croissance cristalline, une source d'atomes est générée par évaporation d'un matériau chauffé intensément. Les atomes évaporés sous ultravide se déplacent en ligne droite, avant de rencontrer un obstacle comme le substrat ou la paroi de la chambre : ces trajectoires rectilignes permettent d'élaborer des couches minces homogènes très bien organisées. Les couches déposées peuvent être monocristallines si l'évaporation est réalisée sous ultravide avec des vitesses de croissance très lentes (un plan atomique en quelques secondes) et s'il y a accord entre les paramètres des réseaux cristallins des matériaux déposés.

À l'institut Jean Lamour de Nancy, diverses couches nanométriques de divers matériaux peuvent être empilées sur le même substrat dans diverses chambres de croissance, toutes reliées entre elles sous ultraviolet grâce au tube de l'équipement DAUM. L'empilement forme un monocristal complexe.

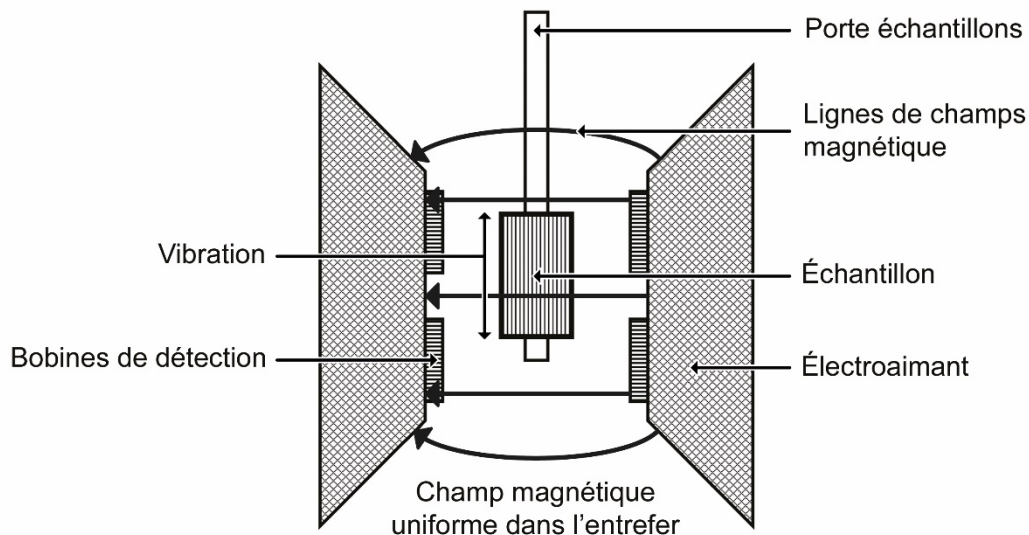
#### Table 4 : lithographie

Sur cette table sont expliqués les expériences permettant de fabriquer, par **lithographie**, des objets aux dimensions nanométriques dans les trois directions de l'espace, et d'en **caractériser les propriétés magnétiques**.

##### Caractérisation magnétique

Le schéma ci-dessous représente un appareil de mesure extrêmement sensible, utilisé pour déterminer les caractéristiques magnétiques d'échantillons réalisés sur la plateforme DAUM. L'échantillon est placé sur un support vibrant de haut en bas. Il est plongé ensuite dans le champ magnétique produit par un électroaimant. L'oscillation verticale de l'échantillon induit un courant dans les bobines de détection. L'analyse de ce courant permet de déterminer les propriétés magnétiques de l'échantillon.

### Caractérisation magnétique



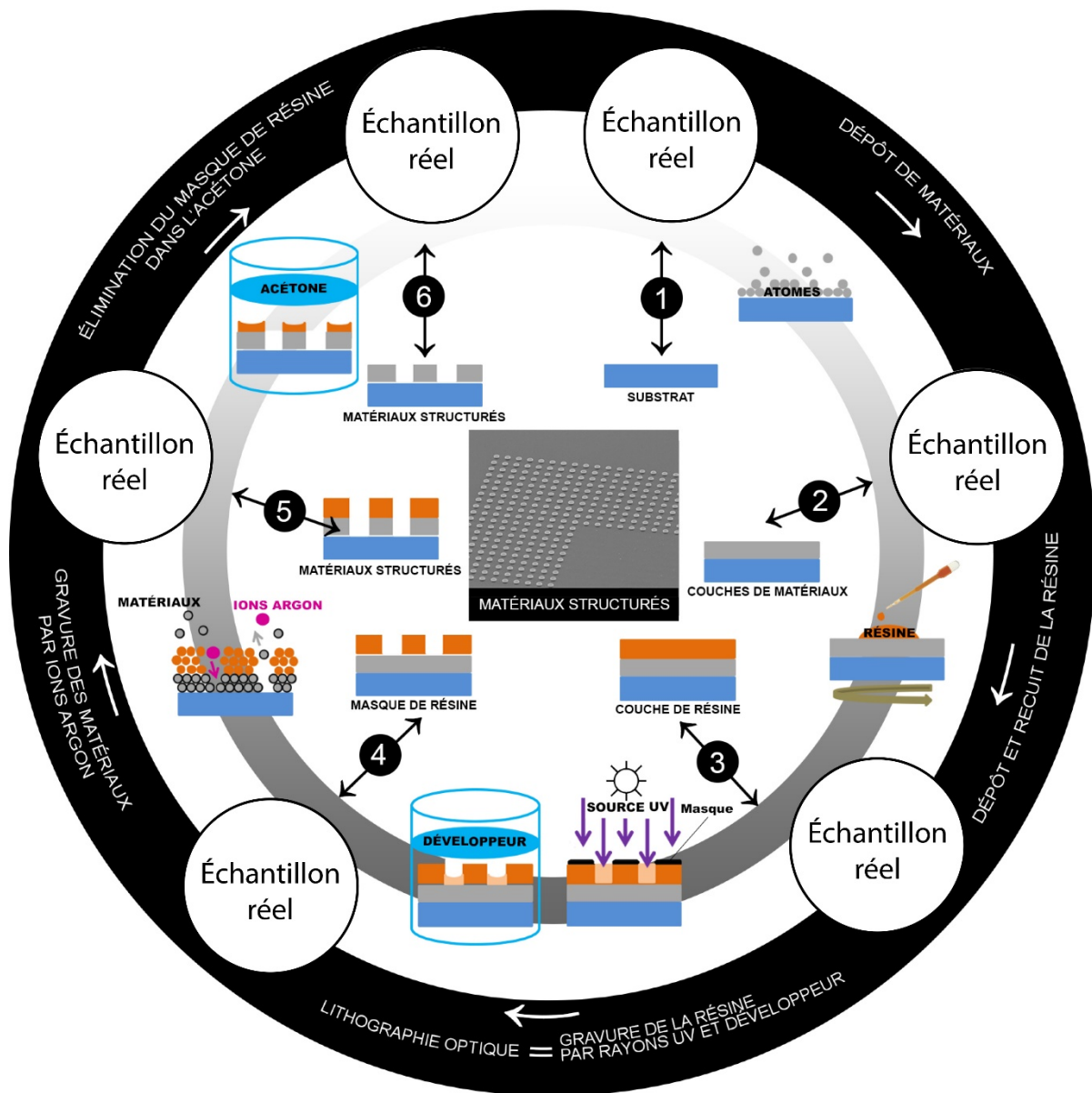
#### Magnétomètre à échantillons vibrants (VSM ou Vibrating Sample Magnetometer)



## Lithographie

La lithographie est une technique de gravure de précision nanométrique. Elle s'utilise par exemple sur des échantillons fabriqués sur la plateforme DAUM pour les structurer en trois dimensions. Le schéma ci-dessous montre les six étapes de la lithographie. Dans l'exposition, un échantillon réel est présenté à chaque étape. Les objets obtenus grâce à cette technique sont utilisés notamment pour imprimer des circuits électroniques miniatures ou des capteurs magnétiques.

Sur la borne tactile voisine, un film explique le principe de la lithographie. Vous pourrez admirer aussi des images d'objets réalisés par le biais de cette technique.



## Synthèse et compléments

La lithographie (du grec *lithos*, « pierre » et *graphein*, « écrire ») est une technique d'impression qui permet la création et la reproduction en de multiples exemplaires d'un tracé exécuté à l'encre ou au crayon sur une pierre calcaire. Les techniques de lithographie de micro et nanofabrication permettent de structurer latéralement les films élaborés par croissance cristalline dans l'une des chambres de la plateforme DAUM : le but est d'obtenir à partir de ces films des nano-objets aux dimensions nanométriques dans les trois directions de l'espace et d'étudier les nouvelles propriétés engendrées par la basse dimensionnalité.

La caractérisation des propriétés magnétiques de ces nano-objets s'effectue avec un magnétomètre très sensible à échantillon vibrant encore nommé VSM (pour *Vibrating Sample Magnetometer*). Son principe est basé sur l'induction : il consiste à placer l'échantillon étudié entre des bobines et à le faire vibrer verticalement à une fréquence donnée, avec une amplitude constante, en contrôlant sa température. La vibration de l'échantillon magnétique induit un courant électrique dans les bobines proportionnel à son moment magnétique.

### **Table 5 : capteurs magnétiques et capteur de l'ABS**

Cette table présente un exemple de sujet de recherche appliquée actuellement mené au laboratoire : il s'agit du **développement de capteurs magnétiques utilisant des empilements à magnétorésistance géante, bien plus performants que les traditionnels capteurs à effet Hall.**

#### Encodeur magnétique

On demande ici aux élèves de rabattre un détecteur de flux magnétique sur un encodeur, sous la forme d'un anneau fixé sur un support. Le détecteur de flux magnétique met en évidence une alternance de segments noirs et verts. Ce sont des zones d'aimantation différente. Un encodeur magnétique est un élément métallique sur lequel a été déposée une fine couche magnétique dont l'orientation de l'aimantation a été structurée en bandes radiales. Dans une voiture, un encodeur magnétique est placé dans le roulement de chaque roue.

#### Capteur magnétique

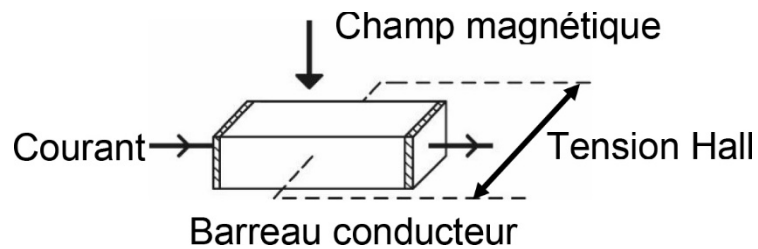
Une roue miniature, munie d'un encodeur magnétique, peut être actionnée à l'aide d'une manivelle. Un capteur magnétique est placé devant l'encodeur. Il détecte les zones d'aimantation passant devant lui et les convertit en signal électrique – des créneaux plus ou moins espacés apparaissent d'ailleurs sur l'écran de contrôle – permettant de connaître la vitesse de la roue, et donc celle du véhicule. Dans une voiture, le signal permet de détecter si une roue se bloque, ce qui déclenche le dispositif ABS (pour *Antiblokiersystem*) d'antiblocage des roues.

La borne tactile voisine présente un film sur le fonctionnement des capteurs magnétiques utilisés dans l'ABS.

## Synthèse et compléments

- Les capteurs magnétiques

Les capteurs magnétiques classiques sont basés sur l'effet Hall : une tension dite *tension de Hall* apparaît entre les faces latérales d'un barreau conducteur, lorsqu'il est parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique perpendiculaire. Les capteurs à effet Hall sont très robustes, mais sensibles à la température et énergivores.



Les capteurs à magnétorésistance géante sont les plus récents. Leur résistance électrique dépend de l'orientation relative de l'aimantation des deux couches magnétiques. Avec une couche séparatrice métallique, la variation de résistance peut atteindre 100 %. Comme nous l'avons vu, ce résultat est à l'origine du prix Nobel de physique d'Albert Fert (Français) et Peter Grünberg (Allemand) en 2007. Avec une couche séparatrice isolante, la variation de résistance peut atteindre 1 000 %. L'empilement est appelé jonction tunnel magnétique.

Les capteurs à magnétorésistance géante sont très sensibles, et peu énergivores. Ils sont utilisés pour mesurer courants, distances et vitesses, ou détecter des pièces métalliques.

- Capteurs de l'ABS

Le capteur magnétique utilisé actuellement dans le dispositif ABS des voitures est un capteur à effet Hall. Ce type de capteur, énergivore, ne peut pas fonctionner en permanence : son alimentation est coupée à chaque arrêt du véhicule, ce qui entraîne une perte de référence. Au démarrage du véhicule, une initialisation par quelques rotations de la roue est nécessaire pour que le capteur de position ou de vitesse redevienne opérationnel.

Une collaboration entre chercheurs de l'institut Jean Lamour et industriels de la SNR (Société nationale des roulements) a permis le développement d'un capteur innovant à jonction tunnel magnétique. L'encodeur magnétique est un anneau magnétique multipolaire placé dans le joint d'étanchéité lié au roulement. En rotation, il est capable de générer un champ magnétique alternatif mesurable à distance par le capteur inséré dans le dispositif. Le dispositif ainsi développé consomme 1 000 fois moins de courant que le système antérieur.

Le développement de ce capteur a permis également d'étendre la plage de mesures à distance, ce qui laisse envisager le développement de nouvelles applications comme la mesure de la position d'une pièce à travers une paroi.

## Table 6 : impression magnétographique

Cette table présente un autre exemple de sujet de recherche appliquée en magnétisme actuellement mené au laboratoire : il s'agit là de recherches visant à améliorer les performances de la **magnétographie**, technique d'impression sécurisée très utile aux services juridiques ou bancaires.

### Impression magnétographique

Cette technique d'impression utilise une encre magnétique pour sécuriser les documents. Le tambour d'impression – un exemple est présenté dans l'exposition – est un cylindre métallique recouvert de couches magnétiques.

Une tête d'écriture aimante des domaines magnétiques micrométriques sur la surface du tambour. La surface aimantée correspond au texte à écrire. L'encre contenant des nanoparticules magnétiques est attirée ensuite par les domaines aimantés du tambour, avant d'être déposée sur le papier. Après nettoyage des restes d'encre et effacement des zones aimantées, un nouvel encodage peut être réalisé sur le tambour. Le document ainsi imprimé est plus difficile à falsifier grâce à sa signature magnétique.

### Synthèse et compléments

La magnétographie est une technique d'impression magnétique sécurisée. Elle concerne les marchés des services juridiques, notariaux, bancaires, etc. Dans une imprimante magnétographique digitale, le média d'enregistrement est un cylindre métallique, le tambour, recouvert de couches magnétiques. Le passage de la tête d'écriture sur le tambour permet d'écrire l'information à sa surface en orientant de petits moments magnétiques micrométriques, dans un sens ou dans l'autre. L'encre utilisée, contenant de fines particules magnétiques, est attirée par les forces magnétiques des microaimants écrits sur le tambour, ce qui permet le développement de l'information enregistrée et son transfert sur le support en papier.

L'augmentation significative de la vitesse d'écriture, sans démagnétisation ou perte en qualité d'écriture, est limitée actuellement par un manque de compréhension de certains processus de magnétisation et de démagnétisation à l'échelle du micron. Une collaboration entre scientifiques de l'institut Jean Lamour et industriels de la société Nipson Technology est en cours afin de développer les modèles nécessaires pour rendre cette technique plus performante.

### **En fin d'exposition**

À la sortie de l'exposition, les élèves découvrent une véritable chambre d'analyses spectroscopiques de dépôt sous ultraviolette ayant été utilisée dans la recherche pendant plus d'une vingtaine d'années.



Des atomes déposés sous ultraviolette sur un support s'organisent dans des structures différentes de leur structure naturelle. Leurs propriétés électroniques en sont modifiées, ce qui engendre des propriétés magnétiques nouvelles. Des analyses spectroscopiques réalisées dans des chambres sous ultraviolette connectées au tube DAUM permettent de déterminer la composition atomique des couches ou de nouvelles caractéristiques électroniques des atomes. La chambre est prêtée par l'institut Jean Lamour et a été utilisée de 1985 à 2005.

### I.3.6 Les bornes multimédia

Quatre bornes multimédia sont réparties dans l'exposition. Leur emplacement et leur numéro se trouvent dans le plan de la page 3 de ce document. Ces bornes diffusent de trois à cinq vidéos pédagogiques de quelques minutes chacune, dont voici les titres.

#### Borne 1

Aurores polaires

Comment les animaux migrateurs retrouvent-ils leur chemin ?

Comment se forment les aurores boréales ?

Magnétisme terrestre et magnétisme solaire



## **Borne 2**

Magnétisme et température

Domaines magnétiques

Comment fonctionne une IRM ?

Pourquoi les magnets collent-ils aux frigos ?

Magnétisme d'un atome

## **Borne 3**

Comment fonctionnent les antivols de magasin, les télépéages ou la carte Navigo ?

Comment fabrique-t-on de l'électricité ?

Un train peut-il voler au-dessus de ses rails ?

## **Borne 4**

Comment fonctionnent les disques durs ?

Microscopie à force magnétique

Construction de la plateforme DAUM

Principes de la lithographie

Principes des capteurs magnétiques

# **II Ressources**

## **II.1 Médiations**

Elles se déroulent dans les salles de médiation permanentes du Palais de la découverte.

### **Physique**

- **Matière, atome et champ magnétique**

Ferromagnétisme, paramagnétisme, diamagnétisme, visualisation des domaines magnétiques, point de Curie... Des expériences pour explorer les propriétés magnétiques de la matière en profondeur.

- **Supraconduction**

Comment la résistance électrique varie-t-elle avec la température ? Induction, conduction parfaite, diamagnétisme, effet Meissner dans les supraconducteurs, lévitation... Quelques expériences surprenantes pour aborder la supraconduction et les supraconducteurs.

- **Expériences d'électromagnétisme**

Exploration des phénomènes électromagnétiques à l'aide de courants et de champs magnétiques intenses.

## Informatique et sciences du numérique

- Textes, images et sons : au cœur du numérique

Comment stocker l'information ? Les solutions sont nombreuses, mais d'un point de vue physique, on en revient souvent au magnétisme : des 0 et des 1 enregistrés sur des bandes magnétiques, des disquettes ou des disques durs. Cet exposé lève le voile sur la façon dont les données sont représentées dans nos ordinateurs.

### II.2 1 chercheur·e, 1 manip

Espace d'exposition éphémère et pluridisciplinaire, « 1 chercheur·e, 1 manip » est un lieu de rencontre avec la « science en train de se faire ». Démonstrations expérimentales à l'appui, des équipes de scientifiques présentent leurs travaux de recherche et les activités de leurs laboratoires. L'exposition constituée de panneaux, de vidéos et d'objets est accessible en dehors des heures de présentation.

En janvier et février 2020, le visiteur était invité à rencontrer des spécialistes du magnétisme à l'échelle de l'infiniment petit. Des chercheurs de l'institut Jean Lamour de Nancy ont présenté comment fabriquer et caractériser les matériaux magnétiques de demain, grâce à la plateforme DAUM. Des informations pratiques sont délivrées sur la [page internet](#) de l'espace d'exposition « 1 chercheur·e, 1 manip ».

### II.3 Un livret pour le jeune public

Un [livret d'accompagnement](#) est proposé pour aider les plus jeunes à comprendre le magnétisme et ses principaux phénomènes. À partir de 12 ans.

### II.4 Conférences

Le Palais de la découverte organise régulièrement des cycles de conférences dont vous pouvez obtenir le programme [ici](#). En février, mars et octobre 2020, cinq conférences sont en lien direct avec notre exposition. Elles prennent place dans la salle de conférences.

#### ***Champ magnétique, champ de Higgs... Qu'est-ce qu'un champ ?***

**Samedi 29 février 2020**

avec Gilles Cohen-Tannoudji, physicien théoricien en physique des particules, chercheur émérite au Larsim.

#### ***Champs magnétiques : architectes de l'Univers ?***

**Samedi 7 mars 2020**

avec Patrick Hennebelle, chercheur au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Paris-Saclay.



## ***Des bactéries qui ne perdent pas le nord !***

**Samedi 14 mars 2020**

avec David Pignol, directeur de recherche en biosciences et biotechnologies à l'institut d'Aix-Marseille.

## ***Stockage des données : l'ère de la spintronique***

**Samedi 10 octobre 2020 à 14 h**

avec Hélène Fischer, enseignante chercheuse, institut Jean-Lamour, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), université de Lorraine.

## ***Stocker plus, plus vite et plus sobre***

**Samedi 10 octobre 2020 à 15h30**

avec Stéphane Mangin, enseignant chercheur, institut Jean Lamour, CNRS – université de Lorraine.

## **II.5 Liens avec les programmes scolaires de cycle 4**

### **❖ Physique – chimie**

Les objectifs de formation du cycle 4 en physique et chimie s'organisent autour de quatre thèmes :

- organisation et transformations de la matière ;
- mouvements et interactions ;
- l'énergie et ses conversions ;
- des signaux pour observer et communiquer.

Même si aucun d'entre eux n'a pour objectif le développement d'une compréhension de la nature et des effets du magnétisme chez le collégien, il est possible d'employer certaines des connaissances apportées à cette fin. Ainsi, appréhender correctement les forces d'origine magnétique nécessitent la maîtrise de la caractérisation des mouvements et de la modélisation des interactions par des forces caractérisées par leur point d'application, leur direction, leur sens et leur valeur. De même, la description microscopique des phénomènes magnétiques impose une connaissance de la constitution de la matière. On pourra également insister sur l'identification des sources d'énergie, des transferts ainsi que sur les conversions et les formes d'énergie. Enfin, on ne pourra se passer d'un savoir relatif aux signaux utilisés pour observer et communiquer.

Des croisements entre enseignements sont possibles.

Dans la thématique « Transition écologique et développement durable », en lien avec les sciences de la vie et de la Terre, la technologie, les mathématiques, l'histoire et la géographie et le français, on peut évoquer le recyclage des matériaux, en particulier, le tri des déchets.

La thématique « Information, communication, citoyenneté », en lien avec la technologie et l'éducation aux médias et à l'information, permet de travailler l'information et la communication par l'intermédiaire des signaux sonores, lumineux et électriques.

La thématique « Monde économique et professionnel » permet, elle, d'aborder les applications des recherches en physique et en chimie impactant le monde économique, en lien avec la technologie et les sciences de la vie et de la Terre.

Enfin, dans la thématique « Sciences, technologie et société », en lien avec les mathématiques, l'histoire, la géographie, la technologie, des projets peuvent être proposés sur les instruments scientifiques, en particulier les instruments de navigation comme la boussole.

### ❖ Sciences de la vie et de la Terre

L'exploration et l'explication de certains phénomènes géologiques liés au fonctionnement de la Terre sont corrélés au géomagnétisme. Comme en physique – chimie, des croisements entre enseignements sont envisageables.

Dans les thématiques « Transition écologique et développement durable » et « Sciences, technologie et société », en lien avec la physique-chimie, la technologie, les langues vivantes, les mathématiques, l'éducation aux médias et à l'information, on peut traiter des flux d'énergie sur Terre.

### ❖ Technologie

Les changements induits dans la société par les objets techniques fondés sur les propriétés magnétiques de la matière sont innombrables et parsèment l'exposition : ordinateurs, cartes bleues, chargeurs sans fil, imageurs par résonance magnétique...

En ce qui concerne les croisements entre enseignements, on peut travailler la thématique « Corps, santé, bien-être et sécurité » (en lien avec le français, les langues vivantes, l'enseignement moral et civique, la géographie, l'éducation physique et sportive, les mathématiques, l'éducation aux médias et à l'information) à travers le prisme de l'imagerie médicale.

Dans la thématique « Sciences, technologie et société », en lien avec la physique, les mathématiques, l'histoire, on peut étudier des objets dans le temps et relier les évolutions technologiques aux inventions et innovations qui marquent des ruptures dans les solutions techniques.

Dans la thématique « Monde économique et professionnel », en lien avec l'histoire, la physique-chimie, les sciences de la vie et de la Terre, les mathématiques, des travaux sont possibles autour des thèmes l'Europe de la révolution industrielle ; les nouvelles théories scientifiques et technologiques qui changent la vision du monde ; la connaissance du monde économique et des innovations technologiques en matière d'industrie chimique, de chaînes de production et de distribution d'énergie, métrologie...



## II.6 Bibliographie

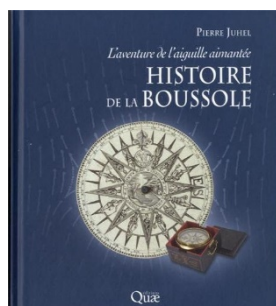
Pierre Juhel, **Histoire de la boussole. L'aventure de l'aiguille aimantée**, éd. Quæ, 2013.

Présentation de l'éditeur : « L'aiguille aimantée a révolutionné la physique. Et l'histoire de la boussole est aussi son histoire. Des générations de savants choyèrent ce petit objet dans le but de percer les mystères du magnétisme terrestre et de résoudre le problème de la longitude. Ce beau livre nous raconte les heurs et malheurs des navigateurs et des explorateurs, les premiers s'aventurant sur les mers lointaines, les seconds jusqu'aux régions polaires, tous munis de l'indispensable boussole. Il nous apprend aussi comment, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, alors que les navires sont construits en fer, les savants se mobilisent pour rendre sa « vertu » à la boussole marine accusée de perdre le nord ! »

Jean Matricon et Georges Waysand, **La guerre du froid. Une histoire de la supraconductivité**, éd. Seuil, 1994.

Présentation de l'éditeur : « Cet ouvrage s'adresse aux lecteurs aussi curieux du mouvement des idées que de celui des particules. Il est consacré à une des manifestations du froid qui, dès sa découverte, a fasciné les physiciens : la supraconductivité. Cet étrange phénomène est la propriété qu'ont certains corps de pouvoir conduire parfaitement l'électricité, sans résistance aucune, à des températures assez basses. Son explication repose fondamentalement sur la théorie quantique. Les applications industrielles de ce phénomène sont potentiellement considérables – à condition d'être techniquement réalisables... et économiquement rentables.

La supraconductivité n'a rencontré pendant longtemps qu'une audience limitée, malgré la distribution, à chacune de ses étapes essentielles, de nombreux prix Nobel. La situation a changé du tout au tout avec la découverte à partir de 1986 de matériaux qui, contrairement à l'opinion dominante jusque-là, pouvaient être supraconducteurs bien loin au-dessus du zéro absolu. L'histoire de la supraconductivité est donc loin d'être close, mais elle s'éloigne des très grands froids. Elle est un bon exemple de l'évolution de la physique dans notre siècle, tant du point de vue scientifique que celui de l'épistémologie et des relations entre sciences et société. Plus que d'une vulgarisation de la supraconductivité mettant en lumière ses indéniables succès, il s'agit ici d'une mise en perspective originale de son évolution, depuis un siècle, et de ses rapports parfois tumultueux avec le reste de la physique et maintes fois tragiques avec l'histoire de notre temps. »



Stephen Blundell, **La supraconductivité. 100 ans après**, éd. Belin, 2011.

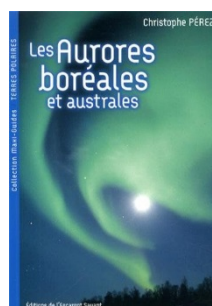
Présentation de l'éditeur : « La supraconductivité est l'un des domaines de recherche les plus fascinants de la physique : à très basse température, certains matériaux se mettent à conduire le courant électrique sans pertes, et font léviter les aimants ! Découverte il y a exactement 100 ans, elle a défrayé la chronique à la fin des années 1980 quand de nouvelles classes de matériaux « à haute température critique » ont vu le jour. Ces températures relatives « chaudes » (130 °C tout de même) laissaient entrevoir des applications inédites, tout en fragilisant l'explication théorique admise jusque-là. La recherche a rebondi encore tout récemment, quand d'étranges composés à base de fer se sont révélés supraconducteurs. Cet ouvrage propose la première introduction à cette énigme de la physique moderne. Il détaille la découverte de la supraconductivité, et l'incroyable frénésie créatrice qui s'est emparée des chercheurs pour en percer théoriquement les mécanismes, sans oublier les multiples applications, de l'IRM aux trains à sustentation magnétique. »

Christophe Pérez, **Les aurores boréales et australes**, éd. de l'Escargot Savant, 2013.

Présentation de l'éditeur : « Objets de légendes et de superstitions depuis l'aube de l'Humanité, les aurores polaires sont aujourd'hui au cœur de l'expérimentation scientifique. En Finlande, aurore boréale se dit « revontuli », qui signifie feu du renard. En effet, on les explique par la présence dans la forêt du mythique renard qui balaie de sa queue les flocons de neige, les envoyant scintiller dans le ciel de nuit. Rideaux, draperies ou couronnes, vertes, rouges ou encore roses, flottant pendant quelques dizaines de minutes au-dessus de l'horizon ou défilant dans toute la voûte céleste en quelques secondes, les peintres ou les écrivains ont essayé maintes fois de les décrire sans toutefois en atteindre toute la magie. Les scientifiques les plus éminents ont débattu durant des siècles avant que la science moderne accède à une explication crédible, grâce au domaine de l'électromagnétisme. Depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, nous savons qu'elles s'accompagnent de perturbations géomagnétiques. Aujourd'hui, à l'ère de la communication, alors que nos appareils deviennent de plus en plus sensibles, les scientifiques tentent d'en comprendre chaque mécanisme, le but étant de prévoir ces perturbations le plus justement possible. Car des conséquences désastreuses peuvent toucher les villes et les voyageurs en tout genre. Passionné de photographie et physicien de formation, l'auteur s'intéresse au phénomène depuis 1998 lors de voyages annuels en Laponie finlandaise. »

Frantizek Zvardon, **Aurora Borealis**, éd. du Signe, 2015.

Présentation de l'éditeur : « Frantisek Zvardon présente, dans cet ouvrage, la magie des aurores boréales et restitue leur splendeur dans le paysage hivernal, au plus profond des nuits islandaises. »



Fabrice Mottez, **Aurores polaires. La Terre sous le vent du Soleil**, éd. Belin, 2017.

Présentation de l'éditeur : « Dans les régions proches des cercles polaires, le ciel nocturne offre de fabuleux spectacles. Avec un peu de chance et une météo clémente, les visiteurs y admirent de grands voiles colorés danser d'un horizon à l'autre... Ce sont les aurores polaires, aussi appelées aurores boréales dans l'hémisphère Nord, et aurores australes dans l'hémisphère Sud. Quelle est l'origine de ces gigantesques parades lumineuses ?

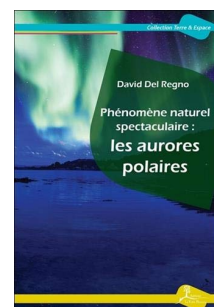
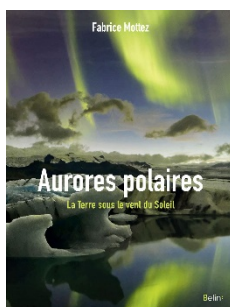
Il a fallu attendre l'avènement de l'ère spatiale pour acquérir les premiers indices fiables sur leur origine. En effet, bien que les aurores se manifestent à moins de 400 kilomètres au-dessus de nos têtes, elles sont issues d'un phénomène qui englobe l'environnement lointain de la Terre, jusqu'à plus de 100 000 kilomètres de distance.

Le moteur des aurores est un vent peu dense et très rapide provenant du Soleil, qui a des relations agitées avec le champ magnétique de notre planète ! Mais aujourd'hui encore, de fausses explications circulent sur les aurores.

Dans cet ouvrage, l'auteur traque avec brio les idées reçues. Page après page, avec une grande pédagogie, il explique la machinerie invisible et silencieuse, mais turbulente et brusque, à l'origine des aurores. L'ouvrage est abondamment illustré de figures explicatives et de photographies d'aurores, depuis celles prises les pieds dans la neige avec un simple appareil photo, à celles issues de caméras spécialisées embarquées à bord de sondes spatiales. »

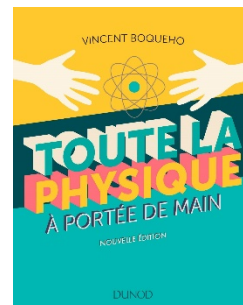
David Del Regno, **Phénomène naturel spectaculaire : les aurores polaires**, éd. La Vallée Heureuse, 2018.

Présentation de l'éditeur : « Appelée « aurore boréale » dans l'hémisphère Nord et « aurore australe » dans l'hémisphère Sud, l'aurore polaire est peut-être le phénomène lumineux le plus beau du monde que seuls quelques privilégiés ont la chance d'observer. Si la science connaît aujourd'hui ses mécanismes de formation, il n'en reste pas moins que l'aurore polaire défend jalousement sa part de magie, car bon nombre de peuples – Samis, Inuits, Indiens, Vikings –, depuis l'Antiquité voire depuis la Préhistoire, ont intégré dans leurs croyances l'idée d'une manifestation surnaturelle. Nombreux ont été et sont toujours les chasseurs d'aurores polaires, et bienheureux soient-ils quand ils atteignent leur but, car les observer relève du parcours du combattant, ce qui rend l'événement encore plus magique. Pour vous aider, l'auteur vous indique les meilleures destinations et la meilleure période d'observation. Enfin, l'aurore polaire est-elle réservée à la Terre ? Bien sûr que non. Dans ce livre, vous explorerez aussi l'univers à la découverte de ce phénomène majestueux aux diverses couleurs selon où il se produit. »



Vous tirerez également profit de la lecture des chapitres 14 (« Une interaction improbable : la force magnétique »), 15 (« Quelques phénomènes magnétiques »), 16 (« L'induction, un précieux couplage électromagnétique ») et 17 (« Quelques applications de l'induction ») du livre **Toute la physique à portée de main** de Vincent Boqueho, éd. Dunod, 2019.

La lecture des chapitres 34 (« Le magnétisme de la matière »), 35 (« Paramagnétisme et résonance magnétique »), 36 (« Ferromagnétisme ») et 37 (« Milieux magnétiques ») du tome « électromagnétisme 2 » du **Cours de physique de Feynman** (éd. Dunod, 2017) vous permettra d'explorer en profondeur ces domaines. Ce livre est issu des notes de cours donnés par le grand physicien au début des années 1960 à des étudiants de premier cycle universitaire de Caltech.



### III Informations pratiques

#### Adresse

Palais de la découverte  
Avenue Franklin D. Roosevelt  
75008 Paris  
Tél. : 01 56 43 20 20  
[www.palais-decouverte.fr](http://www.palais-decouverte.fr)

#### Accès

Métro : Champs-Élysées Clémenceau (ligne 1 et ligne 13) ou Franklin Roosevelt (ligne 9)  
Bus : 28, 42, 52, 63, 72, 73, 80, 83, 93  
R.E.R. : Invalides (ligne C)

#### Horaires d'ouverture

Du mardi au samedi de 9 h 30 à 18 h, le dimanche et jours fériés de 10 h à 19 h.  
Fermeture les lundis, le 1<sup>er</sup> janvier, le 1<sup>er</sup> mai et le 25 décembre.

#### Tarifs scolaires (valables à partir du 1<sup>er</sup> septembre 2020)

Tarif par élève : 4,50 €  
Tarif « réseau éducation prioritaire » : 2,50 €  
Supplément planétarium : 2,50 €



Pour les accompagnateurs :

- 1 billet gratuit pour 5 élèves (école maternelle)
- 1 billet gratuit pour 12 entrées payantes (école élémentaire)
- 1 billet gratuit pour 15 entrées payantes (collège et lycée)

Un pass individuel annuel est offert à l'enseignant ayant réservé et effectué une visite au Palais de la découverte.

### Réservation groupes (à partir de 10 personnes)



[groupe.palais@universcience.fr](mailto:groupe.palais@universcience.fr)



01 56 43 20 25



[palais-decouverte.fr/enseignants](http://palais-decouverte.fr/enseignants)



Palais de la découverte  
Bureau des groupes  
Avenue F. Roosevelt  
75008 Paris