

Vue schématique de l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère terrestre. Le champ magnétique terrestre agit ici comme un bouclier de protection contre le vent solaire : la magnétosphère fait dévier une partie des particules du vent qui sont nocives pour la vie. This illustration shows how the solar wind interacts with the magnetosphere, where Earth's magnetic field acts as a protective shield against high-energy particles that would be harmful to life on the planet.

Dossier / Le champ magnétique

RÉALISÉ PAR ANNE LAMY POUR LE CNES

Dans chaque numéro du *CNES Mag*, vous retrouverez désormais ce quatre-pages. *CNES Mag Educ*, c'est son nom, s'adresse principalement aux enseignants...

Les thèmes traités ici feront écho à des éléments du programme scolaire des collèges et des lycées, avec un éclairage différent, pour permettre aux professeurs de s'approprier le contenu et de s'en servir en classe. Ce trimestre, le magazine s'intéresse de près aux brevets (cf. le dossier). *CNES Mag Educ* a donc choisi de faire un zoom sur l'un des domaines d'application de ces brevets : le champ magnétique. Un sujet qui est surtout abordé au lycée. Naturel et continu, comme le champ magnétique terrestre, le champ magnétique peut aussi être « fabriqué » par l'homme mais il est non permanent. Invisible, il ne le reste pas longtemps face aux différents instruments dont nous disposons désormais pour le mesurer, voire le contrôler si besoin est. L'observer de très près – comme le font les mini-sondes magnétiques récemment brevetées par le CNES, qui travaillent à l'échelle du micromètre – ou de très loin, comme en sont capables des satellites qui mesurent le champ magnétique terrestre, telles sont les possibilités technologiques actuelles. Il n'en fallait pas plus pour tenter de cerner sa complexité.



Portrait Profile
Philippe Perdu
> P. 4

www.cnes.fr

Magnetic fields

BY ANNE LAMY FOR CNES

Starting in this issue, *CNES Mag* is bringing you a new regular four-page feature called *CNES Mag Educ*, aimed primarily at teachers. Topics will be taken from junior and/or senior high school curricula, only with a different slant on the subject matter. Our purpose is to provide content that teachers can assimilate and use in class. This issue's Special Report focuses on patents, so this first *CNES Mag Educ* looks at an area where patents are important: magnetic fields. This topic is part of the French high-school physics syllabus.

Magnetic fields—like Earth's own magnetic field—occur naturally and are continuous. Non-permanent fields can also be created artificially. Magnetic fields are invisible, but different instruments are used to measure them and even control them. Technologies today allow us to observe magnetic fields at close quarters, like the miniature magnetic probes recently patented by CNES, which work at the micrometer scale, or from great distances, like the satellites that measure Earth's magnetic field—just two ways in which scientists are seeking to understand this complex phenomenon.

COMMENT SE CRÉE UN CHAMP MAGNÉTIQUE ?

En terminale, vous serez amenés à parler du champ magnétique, notamment en physique. Voici quelques pistes pour vous aider à illustrer d'où vient le champ magnétique terrestre (donc naturel), avant de rentrer dans le vif du sujet et d'étudier comment on le fabrique et comment il se calcule...

D'où vient le champ magnétique terrestre ?

À 2900 km sous la surface de la Terre se cache une masse liquide entre 3500 et 5000 °C, constituée de fer liquide, appelée noyau externe entourant une masse solide (le noyau interne). Cette masse liquide animée en permanence autour du noyau solide fonctionne comme un gigantesque électroaimant. C'est lui qui génère le champ magnétique terrestre.

Est-il constant ?

Il est permanent (sur une faible échelle de temps), mais pas constant en tout point du globe. Sans qu'on sache très bien pourquoi, les scientifiques ont observé une zone appelée « anomalie de l'Atlantique Sud », près de l'Afrique, où le champ magnétique est nettement plus faible qu'ailleurs. Le vol de satellites en orbite basse y est périlleux : des variations de trajectoire peuvent être enregistrées.

Que se passerait-il s'il disparaissait ?

Sans ce bouclier protecteur qu'est le champ magnétique terrestre, notre planète ne serait plus protégée contre les vents solaires. Elle deviendrait tout simplement inhabitable à cause de leurs particules mortelles à haute énergie que le champ magnétique terrestre dévie.

Et s'il s'inversait ?

Par le passé, il s'est déjà inversé... et à plusieurs reprises ! Lorsqu'on étudie le champ magnétique terrestre, on s'aperçoit que le Nord et le Sud magnétiques ont déjà migré, en moyenne tous les 200 000 ans à 500 000 ans. En témoignent des poteries en argile très anciennes, contenant des grains aimantés, qui reflètent l'orientation du champ magnétique de l'époque. En revanche, on s'explique mal les raisons de ces inversions et/ou migrations des pôles Nord et Sud qui peuvent se faire en quelques milliers d'années.

How is a magnetic field created?

High-school physics students will cover magnetic fields in their final year, if not before. Here are some pointers to help you illustrate where Earth's natural magnetic field comes from, followed by a more detailed look at how we can produce magnetic fields and calculate their parameters.

Where does Earth's magnetic field come from?

Some 2,900 km below Earth's surface

lies a mass of molten iron at 3,500 to 5,000°C called the outer core. Below this at the planet's centre is a solid mass called the inner core. The constant movement of molten iron around the solid inner core, which also contains iron, acts as a giant electromagnet. This is what generates Earth's magnetic field.

Is it constant?

It is permanent (on a short timescale at least) but not constant at all points around the globe. Scientists have observed an area called the South



Atlantic Anomaly near Africa where the magnetic field is significantly weaker, though the cause of this is not fully understood. The SAA can affect satellites in low-Earth orbits as they pass through, even altering their trajectories.

What would happen if it disappeared?

Earth's magnetic field acts as a protective shield against solar wind. Without it, our planet would be exposed to this deadly stream of high-energy particles, making it uninhabitable.

And what if it switched polarity?

Earth's magnetic field has repeatedly flipped over throughout history, so the magnetic north becomes the south and vice versa. Studies have shown that this phenomenon occurs every 200,000 to 500,000 years on average. Ancient earthenware containing magnetized particles reveals the orientation of the magnetic field at that time. But just why the north and south magnetic poles migrate and turn upside down in this way is hard to fathom.

Comment fabrique-t-on un champ magnétique ?

Pour fabriquer un champ magnétique, le plus simple est d'utiliser des aimants. Mais l'électricité est une source fréquemment utilisée, car tout courant électrique génère un champ magnétique. Qu'il s'agisse d'une ligne à haute tension ou d'un raccordement électrique, le champ magnétique est toujours proportionnel au courant. Si le courant augmente, le champ magnétique augmentera d'autant, en rayonnant au-delà, voire même à travers le métal.

How to create a magnetic field

The simplest way to create a magnetic field is to use magnets. Electricity is often used as well, since any electric current generates a field. From household extension leads to high-voltage power lines, the magnetic field will always be proportional to the current, not the voltage. If the current increases, the magnetic field will increase accordingly, radiating beyond—and even through—the metal cable.

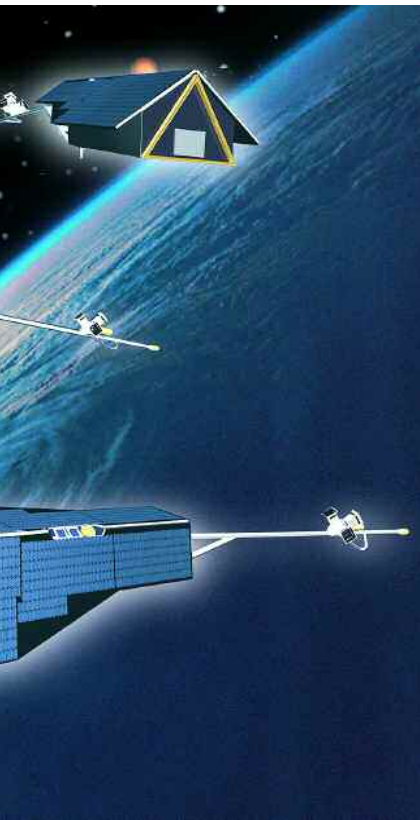
Où sont les sources de champ magnétique ?

Pour identifier les sources de champ magnétique fort, intéressons-nous aux sources de courant qui nous entourent. Les éléments chauffants comme les fours électriques sont de gros consommateurs de courant ; ils sont donc des sources importantes de champ magnétique. Les transformateurs sont, eux aussi, de forts « producteurs » en raison du bobinage : à chaque tour de bobinage supplémentaire, le champ magnétique augmente.

What are the sources of magnetic fields?

To identify the sources of strong magnetic fields, think about the sources of electric current around us. The heating elements of electric ovens and other such appliances draw heavy currents, thereby generating strong magnetic fields. Transformers also produce intense magnetic fields in their coils, since each individual winding adds to field strength.

COMMENT MESURER UN CHAMP MAGNÉTIQUE ?



La mission Swarm est constituée d'une constellation de trois satellites semblables destinés à étudier le champ magnétique terrestre. The SWARM mission comprises a constellation of three similar satellites designed to study Earth's magnetic field.

Exercice de physique n° 1

Un promeneur se trouve sous une ligne à haute tension de 18 m de haut. Il subit un champ magnétique de $1,6 \mu\text{T}$ (microtesla) pour un courant dans la ligne de 500 A. Quelle doit être la distance entre le promeneur et la ligne pour que le champ magnétique soit divisé par 4 ? L'équation simplifiée du champ magnétique (B), qui est fonction du courant (I), décroît au carré de la distance (R): $B = a \times I/R^2$ (a est simplement un coefficient de proportionnalité).

Réponse : $R_2 = 2 \times R_1 = 36 \text{ m}$.

La valeur du champ est de $0,4 \mu\text{T}$, ce qui, selon les ordres de grandeur indiqués plus bas, s'inscrit en zone orange.

Exercice de physique n° 2

Un des satellites Swarm est placé sur une orbite située à 450 km autour de la Terre. Sa mission est de mesurer les variations du champ magnétique terrestre. Calculez la valeur du champ (B_{swarm}) que mesurera ce satellite depuis son orbite en utilisant la même équation simplifiée que dans l'exercice 1. Pour trouver le résultat, vous pouvez partir de la valeur du champ magnétique terrestre mesurée depuis la France à $47 \mu\text{T}$. L'épaisseur de la croûte terrestre à cet endroit est d'environ 30 km.

Réponse : $B_{\text{swarm}} = 0,20 \mu\text{T}$.

Il est prévu qu'un des autres satellites Swarm soit placé sur une orbite plus basse. En quoi est-ce intéressant ?

Réponse : le champ magnétique diminuant au carré de la distance, ce second satellite sera donc beaucoup plus sensible au champ terrestre.

How do we measure a magnetic field?

Physics exercise 1

A person stands directly below a high-voltage power line 18 metres overhead. S/he is exposed to a magnetic field of $1.6 \mu\text{T}$ (microtesla), generated by the current in the line (500 A). How far must s/he move away from the power line to reduce the field to a quarter of this value? Magnetic field strength (B) can be calculated according to a simplified equation, where B is a function of the current (I) divided by the square of the distance (R). Thus $B = a \times I/R^2$ (a is simply a coefficient of proportionality)

Answer: $R_2 = 2 \times R_1 = 36 \text{ m}$

The field strength is $0.4 \mu\text{T}$.

This value would fall into the orange zone below.

Physics exercise 2

One of the Swarm satellites is placed in an orbit at 450 km above Earth. Its mission is to measure variations in the planet's magnetic field. Using the simplified equation described in Ex. 1, calculate the strength of the field (B_{swarm}) that the satellite will measure in its orbit. Assume that the strength of Earth's magnetic field as measured in France is $47 \mu\text{T}$. The thickness of Earth's crust at this location is approx. 30 km.

Answer: $B_{\text{swarm}} = 0.20 \mu\text{T}$

Another Swarm satellite is planned to fly in a lower orbit. Why will this be useful?

Answer: Since Earth's magnetic field decreases with the square of the distance, this second satellite would measure a much stronger field, thereby improving accuracy.

QUELQUES ORDRES DE GRANDEUR

- Champ magnétique terrestre: $50 \mu\text{T}$
- Entre $0 \mu\text{T}$ et $0,3 \mu\text{T}$ = zone verte (zone de vie)
- Entre $0,3 \mu\text{T}$ et $0,7 \mu\text{T}$ = zone orange (zone de travail)
- Au-delà de $0,7 \mu\text{T}$ = zone rouge (on ne doit ni y vivre ni y travailler en permanence)

SOME ORDERS OF MAGNITUDE

- Earth's magnetic field: $50 \mu\text{T}$
- $0 \mu\text{T}$ to $0.3 \mu\text{T}$ = green zone (living environment)
- $0.3 \mu\text{T}$ to $0.7 \mu\text{T}$ = orange zone (work environment)
- Over $0.7 \mu\text{T}$ = red zone (people must not live or work in these environments for extended periods)

EN PRATIQUE...

Déterminer quels sont les appareils domestiques qui émettent un champ magnétique ?

OBJET	ÉMISSION DE CHAMP MAGNÉTIQUE
1 Lave-vaisselle	+++
2 Lave-linge	++ (+ suivant la température de lavage)
3 Four à micro-ondes	++ (le transformateur situé à l'arrière et non le four lui-même)
4 Télévision à écran plat/ à tubes cathodiques	- / +++ (à cause de la source à haute tension)
5 Radio-réveil	+ (à cause du transformateur)
6 Ampoule basse consommation	- / + (surtout lors de l'allumage)
7 Console de jeux	+ (à cause du transformateur)
8 Enceinte acoustique	-- (courant très faible)
9 Ordinateur	+ (transformateur), - (consommation faible des nouveaux ordinateurs)
10 Téléphone portable	Pour le portable et la borne Wi-Fi, qui fonctionnent en haute fréquence, on ne parle pas de champ magnétique, mais de champ électromagnétique.
11 Borne Wi-Fi	

Practical applications ...

Which of these domestic appliances generate a magnetic field?

Appliance	Field strength
1 Dishwasher	+++
2 Washing machine	++ (+ depending on the wash temperature)
3 Microwave oven	++ (the transformer at the back, not the oven part)
4 Flatscreen / CRT TV	- / +++ (due to the high-voltage feed)
5 Radio alarm clock	+ (due to the transformer)
6 Energy-saver light bulb	- / + (when first switched on)
7 Games console	+ (due to the transformer)
8 Hi-fi speakers	-- (very low current)
9 Computer	+ (transformer) / - (latest computers use less power)
10 Mobile phone	Mobiles and WiFi devices operate at high frequencies and generate electromagnetic rather than magnetic fields
11 WiFi device	

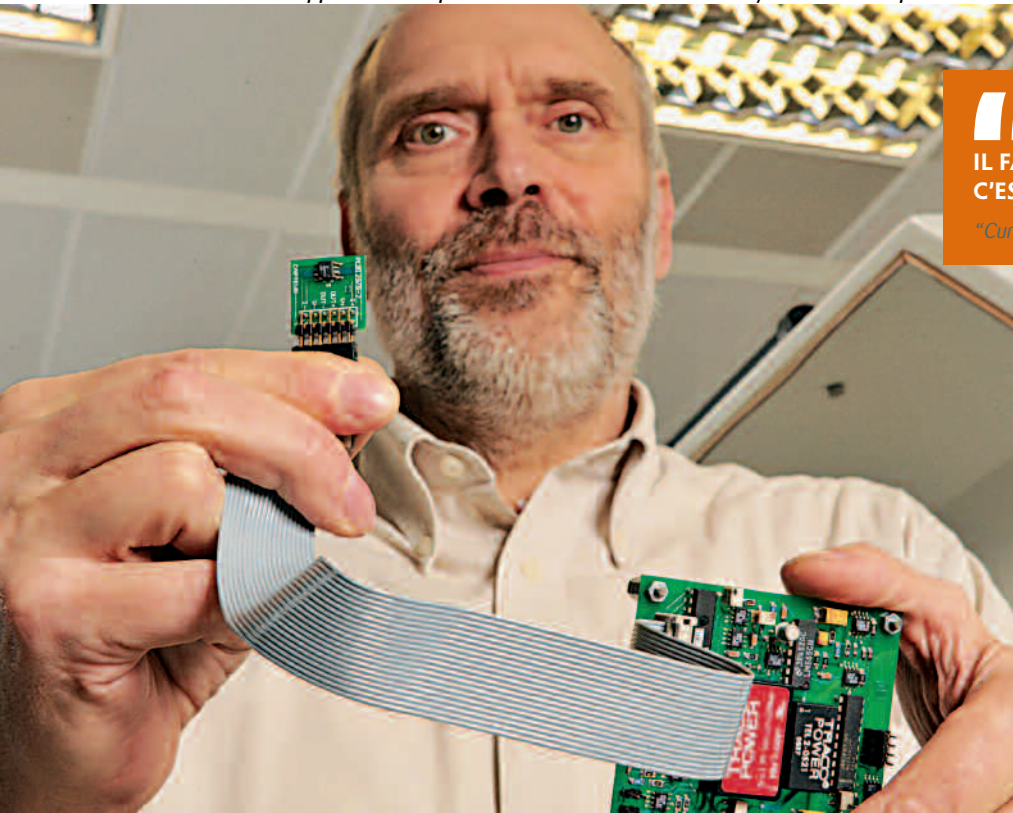
+++ Source importante Strong source

++ Source moyenne Average source

+ Source non négligeable à moins de 1 m Non-negligible source at less than 1 m

- / - - source négligeable Negligible source

Portrait *Philippe Perdu, expert senior au laboratoire d'analyses électroniques du CNES*



IL FAUT SAVOIR RESTER CURIEUX. C'EST LE MOTEUR DE NOTRE MÉTIER. "

"Curiosity is what drives you in this job."

PROFILE

Philippe Perdu, senior engineer, CNES electronic analysis laboratory

A very inventive engineer

Philippe Perdu's job as a senior engineer is to track down electronic systems glitches in search of the tiny detail that is preventing an integrated circuit component in space from working as expected. Sometimes, the margin for error is no more than a micrometer. "The moment a problem arises, you have to be really inventive because the satellite may be at risk," says Philippe. "Grey hairs are one of the rewards for being a senior engineer!" he quips. During his 20-year career with CNES, Philippe Perdu has risen through the ranks. He started out as an electronics technician, then attended evening classes at CNAM* and obtained his engineering diploma. He pursued his studies to postgraduate level, completing his PhD while holding down a full-time job at the agency, and was accredited to direct research work in 2000. So, inventiveness is a way of life for him. "Curiosity is what drives you in this job," he says. His own curiosity has led him to contribute to 130 publications and file 15 patents. He remembers his first patent well, an invention designed to improve a microscope imaging technology. Technology advances are a constant source of innovation for analytical methods. "Optical masking of short-circuits led us to develop magnetic field analysis techniques to locate this kind of defect in complex structures like solar panels," explains Philippe. "We need to understand the root cause of a failure to avert problems occurring once a satellite is in orbit." Today, Philippe Perdu is managing new developments at CNES's electronic analysis laboratory, in partnership with universities and integrated circuit manufacturers—which just goes to show that innovation can be contagious.

* Conservatoire Nationale des Arts et Métiers, which provides vocational training for adults

(NDLR nos remerciements vont à Jean-Paul Castro et Stéphane Plat, professeurs de physique et chimie, Michel Vauzelle, professeur chargé de mission auprès du CNES, et Romain Desplats pour leur précieuse collaboration.)

(Editor's note: Thanks to Jean-Paul Castro, physics teacher, Stéphane Plat, chemistry teacher, Michel Vauzelle, teacher and adviser to CNES, Michel Vauzelle, and Romain Desplats for their valuable assistance.)

Un expert très inventif...

Son quotidien? Traquer les défaillances des systèmes électroniques, chercher la petite bête qui va expliquer que tel ou tel composant d'un circuit intégré utilisé pour une application spatiale n'a pas été fiable à 100 %.

Le tout se joue parfois à un micromètre : dans le spatial, pas le droit à l'erreur : « Dès qu'un problème surgit, comme il fait courir un risque au satellite, on est obligé d'être inventif ! », annonce Philippe Perdu, ingénieur expert. « Expert, c'est pour les cheveux blancs », s'amuse-t-il. En réalité, il n'usurpe pas son expertise, lui qui travaille au CNES depuis vingt ans et y a gravi beaucoup d'échelons. Il a démarré comme technicien en électronique, puis a suivi les cours du soir du Cnam (Conservatoire national des arts et métiers), passé un diplôme d'ingénieur qu'il a complété par un DEA d'électronique, avant de passer sa thèse (en étant salarié au CNES) et d'obtenir, enfin, une habilitation à diriger les recherches en 2000. Depuis toujours, l'activité inventive fait partie de son quotidien : « Il faut savoir rester curieux. C'est le moteur de notre métier. » Grâce à sa curiosité, il a participé à 130 publications et déposé une quinzaine de brevets. Le premier d'entre eux ? Il s'en souvient bien : il consistait à améliorer une technique d'imagerie d'un microscope. En fait les évolutions technologiques constituent une source d'innovation permanente pour les méthodes d'analyse. « Le masquage optique de courts-circuits nous a conduit à développer des techniques d'analyse par champ magnétique pour localiser ce type de défaut dans des objets complexes comme les panneaux solaires. Il nous faut comprendre la cause de la défaillance pour éviter qu'une telle situation ne se produise en orbite. » Aujourd'hui, Philippe Perdu pilote les nouveaux développements du laboratoire d'analyses électroniques du CNES, en coopérant aussi bien avec des universités qu'avec des fabricants de circuits intégrés. Preuve, s'il en fallait, que le virus de l'innovation n'a pas fini de faire parler de lui...

Cursus classique

Baccalauréat S,
Master 2,
ou école d'ingénieur
et Doctorat.

Career path
Baccalauréat S (science)
Masters degree
or Engineering school
PhD

