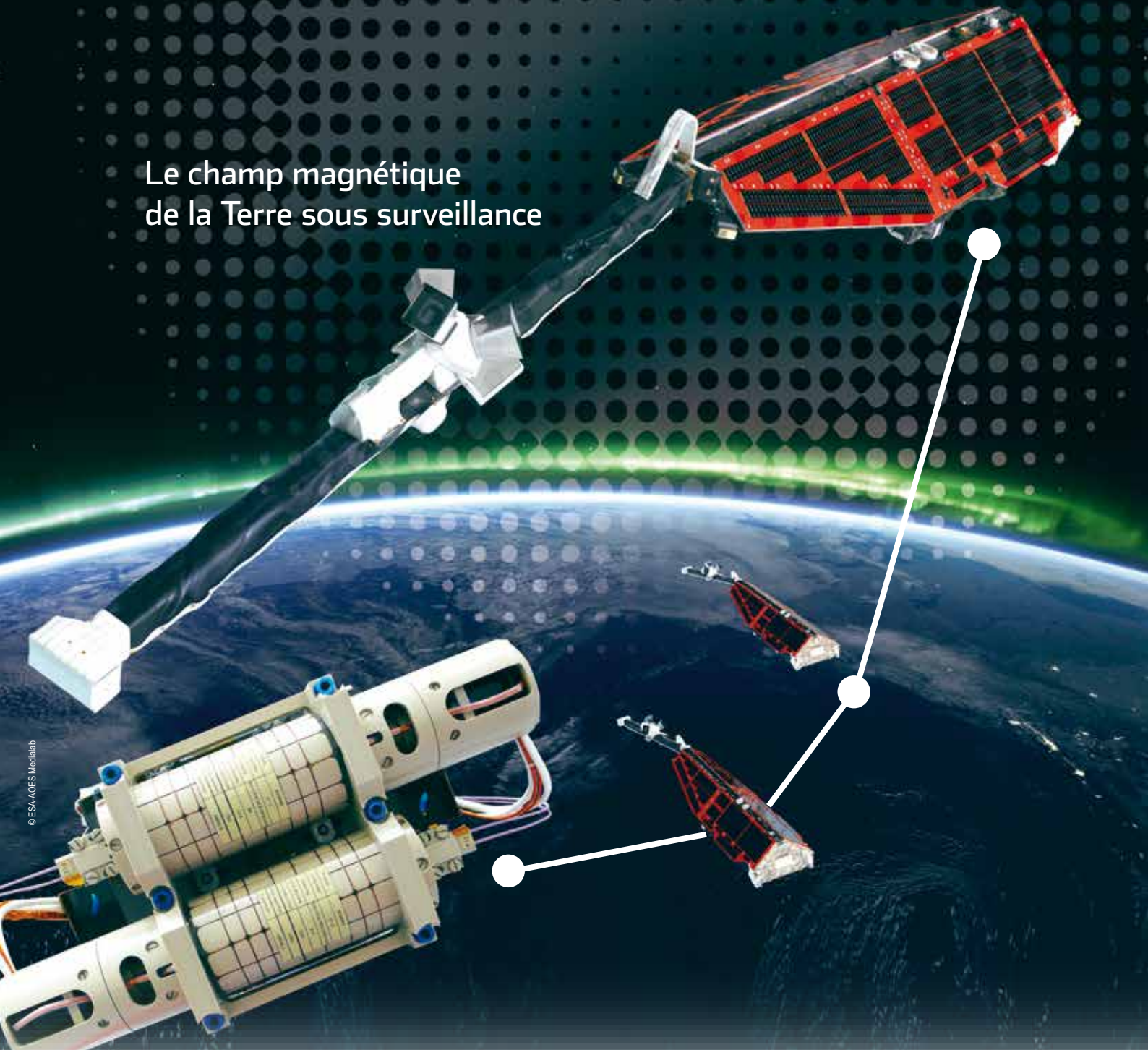


# SWARM

DOSSIER D'INFORMATION

Le champ magnétique  
de la Terre sous surveillance



© ESA-AOES Merislab

# Sommaire

p.4

p.6

p.10

p.14

p.16

p.18

p.22

p.24

## ● **En bref**

Swarm en chiffres

## ● **1. Le champ magnétique, bouclier protecteur de la Terre**

- Qu'est-ce que le champ magnétique de la Terre ?
- D'où vient le champ magnétique terrestre ?
- Que se passerait-il s'il disparaissait ?
- Le champ magnétique est-il constant ?
- Et s'il s'inversait ?

## ● **2. Les objectifs scientifiques de Swarm**

- Discerner et comprendre les différentes sources du champ magnétique terrestre
- Comprendre le champ magnétique est plus qu'un enjeu scientifique
- Le voyage au centre de la Terre
- Histoire d'une science... magnétique

## ● **3. Swarm : une constellation de boussoles**

- Boussoles spatiales
- Pourquoi une constellation ?
- Un design original
- Lancement et début de vie

## ● **4. Des magnétomètres absolument révolutionnaires**

- Le principe de fonctionnement
- Des mesures vectorielles absolues
- Un « observatoire terrestre automatique » dérivé de l'ASM

## ● **5. Une coopération exemplaire**

- Entre le CNES et l'ESA
- Entre le CNES et le CEA-Leti
- Entre le CNES et l'IPGP
- Entre le CNES et les laboratoires de recherche

## ● **Le CNES, Centre National d'Études Spatiales**

## ● **Contacts**



Les satellites sont sur des orbites quasi polaires. Deux d'entre eux naviguent en tandem, passant naturellement d'une altitude de 460 km initialement à 300 km en fin de mission.

Le troisième, à une altitude initiale de 530 km, sera sur une orbite qui produira une dérive relative de l'heure locale.



## EN BREF

**S**warm est une mission du programme Earth Explorer de l'Agence spatiale européenne (ESA), qui a pour objectif principal d'étudier les variations spatiales et temporelles du champ géomagnétique, ainsi que l'environnement ionosphérique de la Terre. Elle a été proposée par des équipes scientifiques de l'Université Technique du Danemark (DTU, Copenhague), du Centre allemand de Recherche en Géosciences (GFZ, Potsdam) et de l'Institut de Physique du Globe (IPGP, Paris). Elle met en œuvre une constellation de trois satellites identiques, lancés fin 2013 par un lanceur Rockot depuis Plessetsk en Russie.

En procédant à l'étude la plus complète jamais entreprise dans ce domaine, cette « constellation de boussoles » permettra aux scientifiques de mieux modéliser les différentes sources du champ magnétique de la Terre. Les données fournies par Swarm devraient améliorer notre connaissance du système terrestre, des processus qui l'animent et de l'influence qu'exerce le Soleil sur notre planète.

Pour étudier le champ magnétique dans ses moindres détails, chaque satellite

emporte deux magnétomètres : un magnétomètre vectoriel (VFM) couplé à une caméra stellaire (STR), tous deux conçus par le DTU, qui restituent la direction du champ magnétique dans l'espace, et un **magnétomètre scalaire absolu (ASM)**, qui en mesure l'intensité. Ce dernier constitue la contribution française à la mission.

Conçu par le CEA-Leti de Grenoble, avec le soutien technique et financier du CNES et le support scientifique de l'IPGP, cet instrument de nouvelle génération est beaucoup plus précis que ceux embarqués sur les satellites Ørsted et CHAMP.

A titre expérimental, cet instrument réalisera également des mesures vectorielles afin de valider sa capacité à fonctionner en magnétomètre vectoriel absolu autonome dans l'espace, ce qui constituerait une première mondiale. Avec le soutien du CNES, ces données expérimentales seront validées conjointement par le CEA-Leti et l'IPGP.

Le CNES a ainsi permis à ce magnétomètre innovant d'être au cœur de la mission de l'ESA.

## Swarm en chiffres ►

### 3 satellites identiques

#### Dimensions :

9,1 m de long (y compris le mât déployable de 4 m),  
1,5 m de large, 0,85 m de haut.

**Masse** totale de chaque satellite :  
473 kg au lancement.

**Durée nominale de la mission :**  
4 ans.

#### Charge utile :

Magnétomètre vectoriel (VFM) couplé à une caméra stellaire (STR), magnétomètre scalaire absolu (ASM), instrument champ électrique (EFI), accéléromètre (ACC), rétro-réflecteur laser (LRR) et GPS.

#### Consommation :

instruments : 50 W, plateforme : 140 W

**Volume de données** fourni par jour et par satellite : 1,8 Gbit

**Capacité de stockage** des données :  
2 x 16 Go

**Coût de la mission** (ESA) :  
229,6 millions d'euros

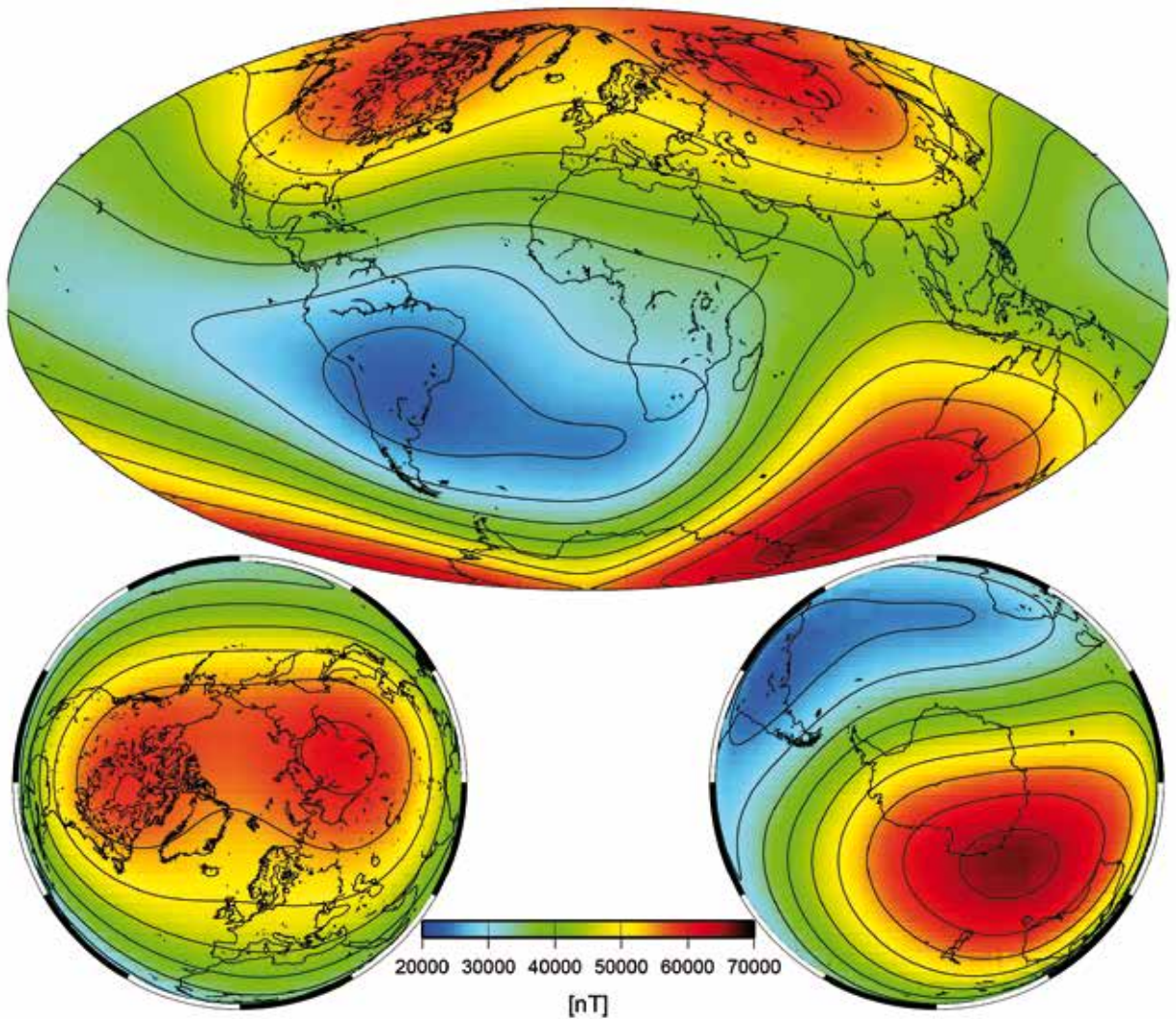
**Coût complet de la participation française :**  
22,3 millions d'euros



*L'agence spatiale française a pleinement joué son rôle en faisant le lien entre la définition des besoins exprimés par les scientifiques, les exigences élevées de fiabilité et de*

*disponibilité imposées par l'ESA et le prototype développé par le CEA-Leti, contenant de nombreuses innovations technologiques qu'il a fallu « spatialiser ».*





© G. Hulot, T.J. Sabaka, N. Olsen, A. Fournier.

Cartes de l'intensité du champ magnétique terrestre à la surface de la Terre en 2010, révélant l'extension de l'anomalie de l'atlantique Sud, où le champ est particulièrement peu intense.

# Le champ magnétique, bouclier protecteur de la Terre

## Qu'est-ce que le champ magnétique de la Terre ?

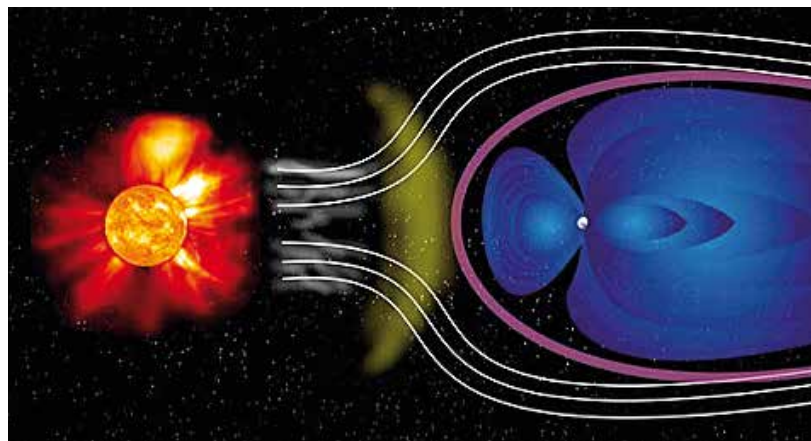
Le champ magnétique de la Terre est produit par l'ensemble des sources magnétiques - courants électriques ou matière aimantée - que l'on trouve à l'intérieur de la Terre, à sa surface et dans son environnement spatial proche. De loin le plus important, le champ produit par la géodynamo au cœur de la Terre est responsable de la structure principalement dipolaire qui oriente les boussoles vers le Nord. Il se comporte en première approximation comme le champ d'un aimant droit incliné actuellement d'environ 10 degrés par rapport à l'axe Nord-Sud de la Terre. Ce champ « principal » provient du noyau et constitue un bouclier protecteur contre les rayonnements cosmiques et les particules chargées du vent solaire. Il est aussi responsable de l'existence de nombreuses autres sources secondaires.

## D'où vient le champ magnétique terrestre ?

À 2 900 km sous nos pieds se cache le noyau de la Terre, principalement constitué d'un alliage de fer et de nickel. Sa partie centrale, la graine, est solide. Sa partie externe est encore fondue et très chaude (entre 4 000 °C et 6 000 °C). Se refroidissant très lentement depuis la formation de la Terre il y a 4,5 milliards d'années, ce noyau « externe » est animé de mouvements de convection à l'origine d'un mécanisme de dynamo auto-entretenu, qui est la source du champ magnétique principal. Ce champ principal est aussi, mais indirectement, à l'origine des autres sources de champ magnétique que l'on trouve sur Terre.

Ainsi, une petite partie du champ magnétique terrestre provient des roches de la croûte terrestre, partiellement aimantées. Une autre partie très dynamique du champ provient de courants électriques que l'on trouve dans l'ionosphère (électriquement très conductrice) et dans la magnétosphère (parcourue par des particules chargées).

Ces courants apparaissent du fait de l'interaction complexe entre le champ magnétique principal, l'ionosphère et le vent solaire. Ils provoquent également l'apparition d'autres courants électriques dans la croûte et le manteau terrestre, eux aussi conducteurs. Enfin, même les océans (eux-mêmes conducteurs) sont parcourus par de faibles courants électriques, constituant une source de champ magnétique.



## Que se passerait-il s'il disparaissait ?

Il n'est pas impossible qu'un jour la géodynamo cesse de fonctionner, comme cela s'est produit pour la dynamo de Mars. Ceci est cependant peu plausible à l'échelle des milliards d'années qui nous séparent de l'âge de la fin du système solaire. Si une telle éventualité devait se produire, notre planète ne serait plus protégée contre le vent solaire. Ce dernier frapperait alors de plein fouet l'atmosphère terrestre, qui resterait notre ultime rempart, provoquant un accroissement des aurores boréales, une modification des courants électriques circulant dans l'ionosphère et l'environnement spatial proche, et une plus forte exposition de la Terre aux rayonnements. Des modifications importantes finiraient par se produire dans l'atmosphère, et dans le monde vivant, mais sur des échelles de temps longues. A court terme, la conséquence serait par contre majeure pour notre civilisation. En effet, celle-ci s'appuie désormais massivement sur une technologie, spatiale et terrestre, qui compte beaucoup sur la protection offerte par le champ magnétique principal.

Le champ magnétique protège la Terre des rayonnements cosmiques et des particules chargées du vent solaire.



Valse des pôles magnétiques lors des dernières inversions : chaque couleur donne la trajectoire apparente du pôle magnétique Nord vue d'un point à la surface de la Terre.



© J.P. Valet - IUGG

## Le champ magnétique est-il constant ?

On a la preuve que le champ magnétique terrestre est présent depuis plus de trois milliards d'années et il y a lieu de penser que la géodynamo s'est mise en route avec la formation du noyau, très peu de temps après celle de la Terre. On sait cependant aussi que le champ est très dynamique à toutes les échelles de temps.

A l'échelle humaine, par exemple, le champ varie de manière tout à fait significative. Ainsi, les pôles magnétiques Nord et Sud, définis comme les points à la surface de la Terre où le champ magnétique est exactement vertical, ne sont pas antipodaux. Le pôle magnétique Nord se trouve au-delà du Grand Nord canadien, actuellement à plus de 85° de latitude Nord géographique, tandis que le pôle magnétique Sud se trouve au large de la base française de Dumont d'Urville en Antarctique, à seulement 65° de latitude Sud. Ces pôles bougent au cours des âges de manière irrégulière. Au cours des années 1990, le pôle magnétique Nord, qui se déplaçait à une vitesse de l'ordre de 15 km par an, s'est ainsi mis à se déplacer à une vitesse bien supérieure, à près de 60 km par an.

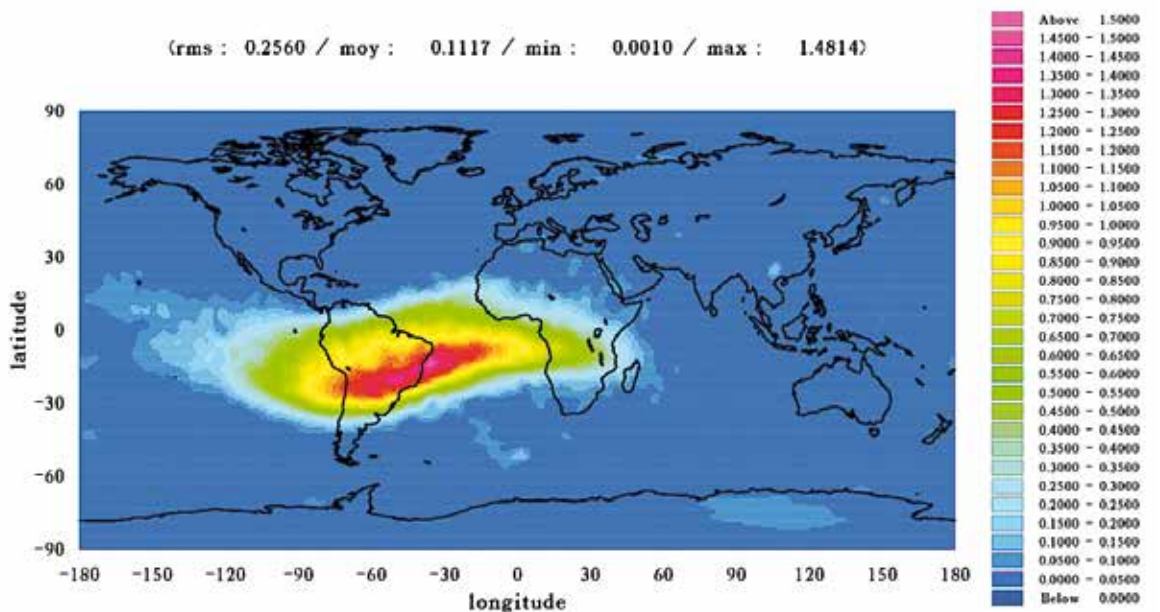
Une autre manifestation particulièrement importante de la dynamique du champ magnétique est la présence d'une très forte anomalie,

dite «anomalie de l'Atlantique Sud», où le champ est nettement plus faible. Cette anomalie évolue elle aussi. Grâce aux précédentes missions spatiales, il a ainsi pu être constaté qu'au cours des 30 dernières années, elle s'est encore étendue et l'intensité du champ magnétique y a diminué de près de 5 %. Ceci n'est pas sans conséquence sur les satellites évoluant en orbite basse, qui souffrent beaucoup plus des rayonnements dans cette zone.

## Et s'il s'inversait ?

Par le passé, le champ principal s'est déjà inversé... et à de nombreuses reprises ! On le sait grâce à l'étude des roches aimantées par le champ magnétique ancien. Ces roches révèlent par exemple qu'il y a 780 000 ans, les pôles magnétiques Nord et Sud se sont inversés. Elles montrent aussi qu'une précédente inversion s'était produite il y a 900 000 ans, et que d'autres encore se sont produites auparavant, de manière très irrégulière, tous les 200 000 ans en moyenne. Les études révèlent que ces inversions se produisent à l'échelle de plusieurs milliers d'années et sont toujours précédées d'une décroissance importante de l'intensité du champ principal. Aujourd'hui le champ décroît assez rapidement (il a perdu environ 6 % de son intensité en un siècle), mais conserve néanmoins une

Exposition du satellite Jason-1 aux effets de l'anomalie de l'Atlantique Sud, mesurée sur la période 2002-2004 en utilisant l'oscillateur Doris.



© Cnes/CLS

Unités sans dimension



intensité bien supérieure à celle que l'on observe avant que ne débute une inversion. Il n'est d'ailleurs pas exclu qu'il reprenne de la vigueur dès le siècle prochain. Même si une inversion ne manquera pas de se produire un jour, il est donc peu plausible que cela soit avant plusieurs milliers d'années. De ce point de vue, le problème de l'extension et de l'évolution de l'anomalie de l'Atlantique Sud est bien plus immédiat ! Lorsque la prochaine inversion se produira, il sera cependant important de s'y adapter. L'intensité du champ diminuera jusqu'à moins de 10 % de sa valeur actuelle. Progressivement, les pôles magnétiques Sud et Nord se scinderont en plusieurs pôles, qui entameront une migration complexe vers leur hémisphère opposé, où, à l'issue de l'inversion, ils se réuniront à nouveau en un seul pôle. Le champ se mettra alors à recroître dans la nouvelle polarité.

Durant ce long épisode, la faiblesse du champ et son caractère multipolaire modifieront considérablement la façon dont le champ interagit avec le vent solaire. La magnétosphère sera beaucoup plus facilement agitée et le « bouclier magnétique », affaibli, produira des aurores boréales en plus grand nombre, tandis que des orages magnétiques très intenses pourront se développer. La technologie sensible à ces orages, ainsi qu'aux rayonnements, que cela soit au sol ou dans l'espace proche, devra impérativement être adaptée. Les êtres vivants seront également plus exposés aux rayonnements.



Aurore boréale.

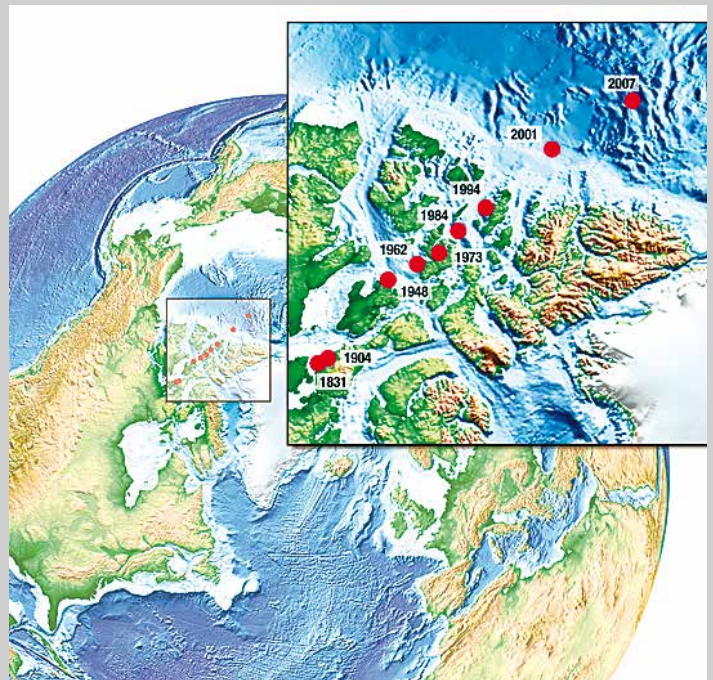
© CNRS Photothèque/J. MOUETTE

## Pas de boussole sans carte ▶

Une boussole indique la direction du champ magnétique local, et ne pointe en général que très approximativement vers le pôle Nord magnétique.

Par contre, en suivant à tout instant la direction donnée par une telle boussole, on parvient inéluctablement au pôle Nord magnétique.

On peut bien sûr également utiliser la boussole pour connaître la direction du Nord géographique. Pour cela, cependant, il est indispensable de connaître la valeur de l'angle entre la direction donnée par la boussole et celle du Nord géographique, que l'on appelle la déclinaison, pour corriger d'autant la direction donnée par la boussole. Cet angle varie selon l'endroit où l'on se trouve à la surface de la Terre, et varie dans le temps. Pour s'orienter précisément avec une boussole, il faut donc aussi disposer d'une carte suffisamment récente !



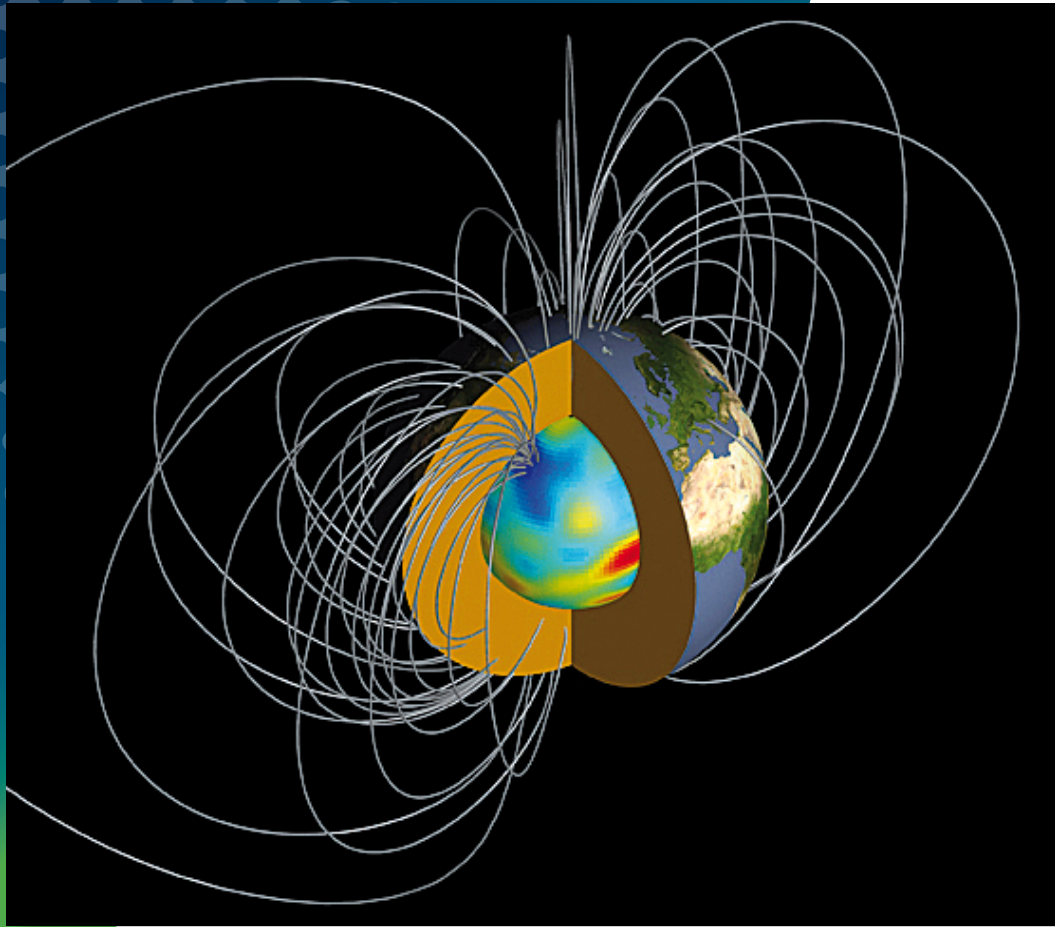
Carte de la dérive du pôle Nord magnétique.

© IGP

### Le saviez-vous ?

- La première localisation directe du pôle Nord magnétique date de 1831. Il était alors à environ 70°N, 97°W. En 2010, ce pôle était à 85°N, 133°W et s'était donc déplacé de près de 2 000 km.
- Les numéros inscrits sur les pistes d'aéroports sont fonction de la déclinaison magnétique locale et doivent donc être repeints régulièrement du fait de l'évolution de la direction du champ.
- En 1989, un violent orage magnétique a mis hors service le réseau électrique du Québec, plongeant toute la province canadienne dans l'obscurité pendant 9 heures. L'aurore boréale générée par cet orage était visible jusqu'en Floride et à Cuba.

# 2



© CNRS / Julien Aubert

Vue écorchée de l'intérieur de la Terre. Les lignes de champ magnétique s'échappent du noyau de la Terre depuis les zones en rouge qui dominent dans l'hémisphère Sud, et y replongent dans les zones en bleu, majoritaires dans l'hémisphère Nord.

*La mission Swarm a pour objectif de procéder à l'étude la plus complète jamais entreprise du champ magnétique et de l'environnement ionosphérique terrestres. Cette constellation de trois satellites doit mesurer l'intensité, la direction et les variations du champ magnétique terrestre, et de manière complémentaire, le champ électrique, la densité et les vents thermosphériques.*

### Les principaux objectifs sont de mieux caractériser et comprendre :

- le champ magnétique principal et le mécanisme de dynamo par lequel il est engendré dans le noyau de la Terre,
- la dynamique du noyau et la façon dont celui-ci interagit avec le manteau,
- les sources aimantées du champ magnétique lithosphérique,
- les hétérogénéités de la conductivité électrique dans le manteau,
- les courants électriques circulant dans l'ionosphère et la magnétosphère, et l'influence du Soleil sur ces derniers,
- le rôle du champ magnétique et des couplages entre l'ionosphère et la magnétosphère dans l'apport d'énergie dans la thermosphère,
- le signal magnétique produit par les marées et courants océaniques.

En outre, les données d'orbitographie et d'accélérométrie permettront d'améliorer notre connaissance du champ de gravité terrestre. Swarm est la première mission de ce type, constituée de plusieurs satellites. Elle prend la relève du satellite allemand CHAMP (2000-2010), qui embarquait une instrumentation comparable, et du satellite danois Ørsted, lancé en 1999, dont le magnétomètre scalaire continue de fournir des données.



# ● Les objectifs scientifiques de Swarm

Ces données, de même que celles des observatoires magnétiques qui enregistrent les variations du champ à travers le monde, permettront de mieux encore tirer parti de la mission Swarm, notamment pour ce qui concerne l'évolution à long terme du champ principal.

## Discerner et comprendre les différentes sources du champ magnétique terrestre

Pour bien étudier le champ magnétique terrestre, il est crucial d'adopter une stratégie d'observation qui permette d'identifier les contributions de ses différentes sources. La constellation de trois satellites constituant la mission Swarm a été optimisée dans ce but. Il sera ainsi possible d'étudier le signal provenant du noyau, du manteau, de la lithosphère, de l'ionosphère et de la magnétosphère, et peut-être même des courants océaniques.

### Le noyau

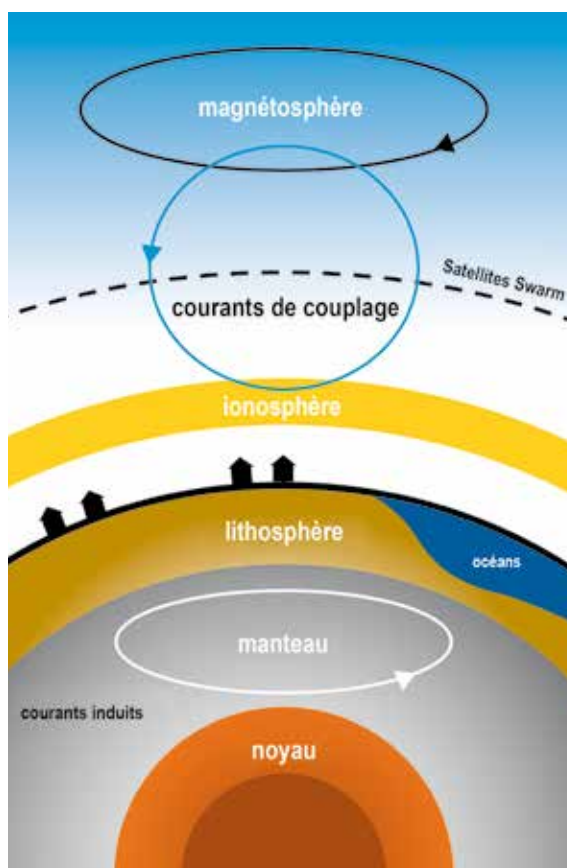
En étudiant le champ principal, il sera possible de « voir » la dynamique du noyau et la façon dont la géodynamo fonctionne actuellement, afin de progresser dans notre capacité à prédire l'évolution du champ principal (et donc celle de la fameuse anomalie de l'Atlantique Sud), sur peut-être quelques dizaines d'années.

### Le manteau

A partir des données de Swarm, il sera également possible de progresser dans la construction de modèles en trois dimensions de la conductivité électrique du manteau terrestre. Ces modèles sont importants pour mieux connaître la nature et l'état thermodynamique des roches constituant le manteau, en complément des informations fournies par l'étude des ondes sismiques et du champ de gravité de la Terre.

### La lithosphère

La lithosphère est l'enveloppe terrestre rigide de surface. Elle comprend la croûte terrestre et une partie du manteau supérieur. Jusqu'à une certaine profondeur, à partir de laquelle la température atteinte fait disparaître toute aimantation, les roches qui la composent sont souvent aimantées. La distribution et l'intensité de cette aimantation donnent des informations



précieuses sur la géologie, l'activité tectonique et l'histoire du champ magnétique. L'analyse de l'aimantation des fonds océaniques, par exemple, a donné des éléments clés pour comprendre l'histoire de ces fonds et déterminer la séquence des inversions du champ magnétique terrestre. En analysant le signal provenant de ces sources, Swarm devrait combler les lacunes actuelles, qui empêchent encore à ce jour d'avoir une cartographie complète, à toutes les échelles spatiales, de ce signal particulièrement riche en informations.

### L'ionosphère et la magnétosphère

L'ionosphère est la partie supérieure de l'atmosphère en partie ionisée par le rayonnement ultra-violet solaire. Elle s'étend de 60 à 800 km d'altitude. De par sa nature même, l'ionosphère est donc un très bon conducteur électrique du côté jour, particulièrement en certains lieux comme le long de l'équateur magnétique. Se dilatant tous les matins et se contractant tous les soirs, elle se déplace dans le champ magnétique principal, provoquant l'apparition de courants électriques et d'un signal magnétique

associé. Des courants nettement plus complexes et irréguliers, alimentés depuis la magnétosphère en suivant les lignes du champ magnétique principal, la parcourent également. Tous ces courants produisent des signaux magnétiques, parfois très intenses, que les satellites Swarm détecteront. Il en sera de même des courants électriques associés à la circulation de particules chargées dans la magnétosphère, à bien plus grande distance (typiquement 3 à 5 rayons terrestres). Pour l'identification et l'analyse des signaux produits par ces courants, la constellation adoptée pour Swarm est également très adaptée.

La présence d'un accéléromètre et les mesures *in situ* des caractéristiques électriques du plasma ionosphérique, permettront en outre d'étudier l'impact de ces courants en termes, par exemple, d'apport d'énergie dans la thermosphère.

Comprendre la façon dont fonctionnent les courants couplés entre l'ionosphère et la magnétosphère, et l'influence de l'activité solaire sur ces courants, constitue un défi majeur pour mieux appréhender l'environnement proche de la Terre.

### Comprendre le champ magnétique est plus qu'un enjeu scientifique

Les enjeux scientifiques qui ont motivé la mission Swarm sont donc multiples et il est clair que l'étude détaillée du champ magnétique terrestre reste l'une des clés privilégiées pour étudier le système Terre dans son ensemble.

Mais il importe de souligner aussi l'enjeu que constitue la nécessité de progresser vers une meilleure connaissance de ce champ, pour des applications plus larges, comme la technologie spatiale, les systèmes de navigation et de guidage, ou l'exploitation des ressources. Être capable de prédire son évolution à l'échelle de la durée des systèmes exposés aux forts orages magnétiques (comme les lignes de haute tension) ou aux rayonnements (comme les satellites) est aussi un enjeu, d'autant que l'anomalie de l'Atlantique Sud continue de s'étendre et de se creuser. Ceci permettrait en effet d'adopter des mesures de précaution et de développer les technologies adaptées.

## Le voyage au centre de la Terre

Dans son roman de science-fiction publié en 1864, Jules Verne avait envisagé la possibilité d'une expédition au cœur de notre planète. Las ! La réalité en est loin. Tandis que Jules Verne avait imaginé un accès vers les entrailles de notre planète depuis un volcan islandais éteint, le trou le plus profond jamais percé par l'homme dans le sol terrestre se situe sur la presqu'île de Kola en Russie.

Entrepris en 1970, le « forage profond de Kola », ou forage « sg3 », avait pour but d'atteindre la discontinuité de Mohorovičić, connue sous le nom abrégé de Moho, c'est-à-dire la limite entre la croûte terrestre et le manteau supérieur de la Terre, située en moyenne à 35 km de profondeur.

Le forage fut stoppé en 1989 à 12 262 mètres de profondeur, ce qui en fait le forage le plus profond de l'histoire... mais une simple égratignure à l'échelle du globe terrestre. D'autres équipes ont essayé de rééditer l'exploit, notamment dans l'Océan Pacifique, mais aucune n'y est parvenue.

Bien qu'inaccessible, le centre de la Terre peut néanmoins être sondé par des méthodes indirectes. La sismologie a ainsi permis de détecter et caractériser une graine solide au cœur du noyau liquide, et même d'en imager les hétérogénéités. Fournies notamment par le satellite GOCE, les données gravimétriques ont, quant à elles, pu donner accès à la distribution des hétérogénéités de masse dans les profondeurs de la Terre. Mais c'est à l'observation du champ magnétique terrestre que revient la possibilité d'imager la dynamique du noyau de la Terre. En fournissant un nouvel éclairage sur le champ magnétique, la mission Swarm apportera donc sa pierre à cette quête littéraire et humaine... du centre de la Terre.



© Hervé Cayrol/Photostop



# Histoire d'une science... magnétique

**1<sup>er</sup> siècle après J-C** - Premières boussoles magnétiques connues inventées en Chine.



© DR

**1269** - Dans son *Epistola de magnete*, traité sur l'aimant, le savant français Pierre de Maricourt, surnommé Pierre le Pèlerin ou Petrus Peregrinus, définit les lois fondamentales du magnétisme et décrit le fonctionnement du compas.



© DR

**1600 - 1800** - William Gilbert évoque le magnétisme terrestre, Nautonnier dresse une carte sur laquelle les pôles et l'équateur magnétique sont indiqués, Henry Gellibrand consigne les changements du champ magnétique avec le temps, Edmund Halley et

Alexander von Humboldt effectuent des études du champ magnétique.

**1819** - Le physicien danois Hans Christian Ørsted découvre la relation entre l'électricité et le magnétisme.

**1821** - Michael Faraday établit les fondements du concept de champ magnétique en physique.

**1840** - Carl Friedrich Gauss publie le premier modèle de champ géomagnétique démontrant l'origine principalement interne du champ magnétique terrestre.



© DR

**1909** - Le *Carnegie*, navire constitué entièrement de bois et d'autres matériaux non magnétiques, prend la mer en vue de collecter des données sur le magnétisme océanique.



© DR

**1919** - Joseph Larmor suggère que les dynamos pourraient s'alimenter elles-mêmes naturellement dans les fluides conducteurs, expliquant comment le champ géomagnétique se forme au plus profond de la Terre.

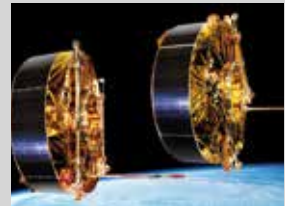
**1979** - La Nasa lance le satellite MAGSAT afin de dresser une cartographie du champ magnétique terrestre.



© Image courtesy : DSR

**1999** - Le Danemark lance le satellite Ørsted pour mesurer le champ magnétique terrestre, emportant à son bord le magnétomètre scalaire Overhauser développé par le CEA-Leti en collaboration avec le CNES.

**2000** - L'ESA lance la mission Cluster afin d'étudier l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère.



© ESA/JL. Ateley

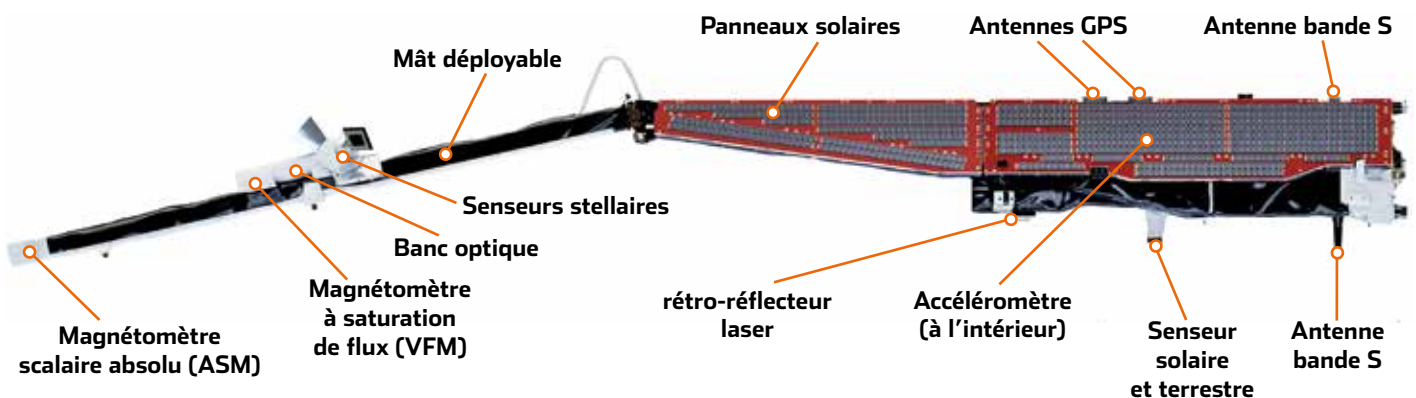
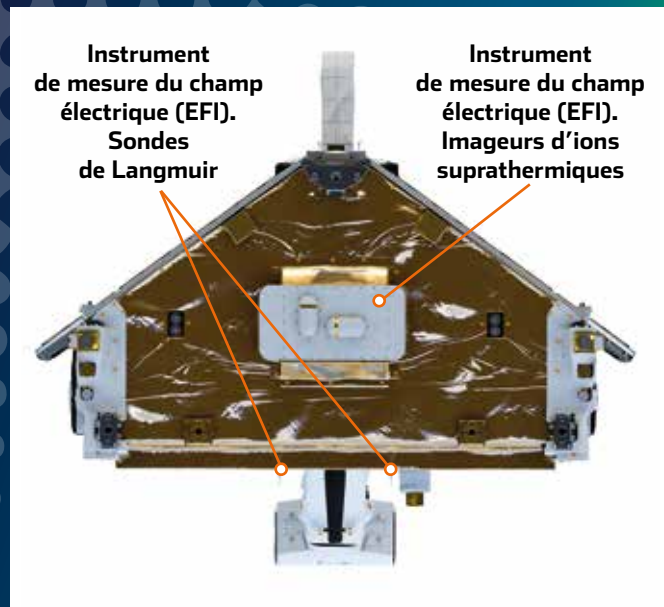
**2000** - L'Allemagne lance le satellite CHAMP, en vue de mieux comprendre les variations des champs magnétique et de gravité, avec à son bord le même magnétomètre scalaire que sur Ørsted.

**2013** - L'ESA lance la constellation de satellites Swarm, dont la mission consiste à discerner et modéliser les différentes sources du champ magnétique terrestre, avec à bord les magnétomètres absolus de nouvelle technologie développés spécifiquement par le CEA-Leti en collaboration avec le CNES.



© ASTRUM / 2010

# 3



## Boussoles spatiales

Chacun des satellites de la constellation Swarm est équipé d'un dispositif d'instruments comparable à une boussole en trois dimensions, capable de fournir des mesures précises à la fois de l'intensité et de la direction du champ magnétique.

En outre, un accéléromètre et un instrument de mesure du champ électrique fournissent des informations supplémentaires sur l'état de l'environnement ionosphérique dans lesquels ils évoluent.

## Pourquoi une constellation ?

Au début de leur vie en orbite, les trois satellites se trouvent relativement près les uns des autres. Deux d'entre eux volent en tandem à la même altitude (environ 460 km initialement) selon une inclinaison de  $87,35^\circ$ ; cette altitude décroît naturellement jusqu'à 300 km environ en fin de mission.

Le troisième satellite est positionné à une altitude plus élevée (530 km au début de la mission), avec une inclinaison légèrement différente ( $87,95^\circ$ ).





© ESA/ACES Medialab

## ● Swarm : une constellation de boussoles

Les orbites des satellites dérivent et, de fait, le satellite le plus haut croise la trajectoire des deux autres, selon un angle de  $90^\circ$ , au cours de la troisième année d'exploitation. Ainsi, des données sont acquises simultanément à des altitudes et heures locales différentes, ce qui aide à discerner les effets des différentes sources du champ magnétique.

### Un design original

Les trois satellites Swarm ont une forme trapézoïdale, inhabituelle pour des satellites, avec un long mât déployé dès leur mise en orbite. Ce design original répond à plusieurs défis : réduire la traînée aérodynamique sur ces orbites basses, rendre la charge utile la plus compacte possible pour pouvoir embarquer les trois satellites dans la coiffe du lanceur Rockot, mais aussi répondre aux exigences de propreté magnétique inhérentes à la mission.

Développé pour le compte de l'ESA par un consortium industriel conduit par EADS-Astrium GmbH, chaque satellite mesure environ 9 mètres de long, mât compris, et affiche une surface frontale d'environ  $1 \text{ m}^2$ , ceci afin de réduire la traînée aérodynamique et la quantité de propergol gaz nécessaire à son maintien à poste. Le mât est pointé dans le sens opposé au vol. En effet, l'instrument de mesure du champ électrique (EFI), placé sur la face avant du corps du satellite, doit pouvoir sonder le plasma ionosphérique sans être gêné par le sillage du satellite.

Lorsque le mât est déployé, le satellite n'a plus aucun élément mobile. En particulier, les panneaux solaires sont fixes, ceci afin de ne pas perturber les mesures effectuées par l'accéléromètre installé au centre du satellite.

Enfin, chacun des magnétomètres scalaires absolus (ASM) a été installé en bout de mât, pour être éloigné au maximum des perturbations magnétiques générées par les équipements du corps du satellite.

Le banc optique qui supporte le magnétomètre à saturation de flux (VFM), ainsi que les trois senseurs stellaires sont, quant à eux, montés sur la partie médiane du mât.

### Lancement et début de vie ►

La mission Swarm doit être placée sur orbite par un lanceur Rockot depuis le cosmodrome de Plessetsk au nord de la Russie, avec une séparation simultanée des trois satellites.

L'ESOC (*European Space Operations Centre*), à Darmstadt en Allemagne, supervise la mission via la station principale de réception de Kiruna en Suède (des stations complémentaires seront également utilisées en début de vie). La phase délicate de lancement et de début de vie dure environ trois jours, au cours desquels les mâts sont déployés et les équipements critiques de la plate-forme sont activés. Puis, les différents instruments scientifiques sont activés successivement. La recette en vol, d'une durée de trois mois, a ensuite pour but de vérifier que tout fonctionne correctement, avec les performances attendues. L'ESRIN (*European Space Research Institute*), installé à Frascati en Italie, assure la gestion et la distribution des données scientifiques, le traitement et l'archivage étant effectués au Royaume-Uni.



Séparation des trois satellites



Rockot

© ESA

© Eurocot Launch Services

# 4

© CNES/Jacobs Chetrit.



© CNES/CHETRIT Jacob, 2012

Préparation  
du magnétomètre ASM  
pour des essais.



© CNES/MALIGNE Frédéric, 2013

*Sur chacun des satellites de la mission Swarm, le champ magnétique est mesuré par la combinaison de trois instruments : un magnétomètre vectoriel relatif (VFM, pour Vector Field Magnetometer), qui mesure les composantes du champ magnétique selon trois directions perpendiculaires ; une caméra stellaire (STR), qui restitue l'attitude de ce champ dans l'espace ; et un magnétomètre absolu (ASM pour Absolute Scalar Magnetometer) qui mesure l'intensité du champ de manière absolue avec une extrême précision.*

La précision scalaire absolue de l'ASM est en effet meilleure que 65 pT, ce qui représente un millionième de la grandeur à mesurer. Ces instruments ASM fourniront les données d'intensité de champ de référence de la mission, et serviront à calibrer les données vectorielles du champ fournies par l'association des instruments VFM couplés aux caméras stellaires STR. En raison de son rôle crucial pour la mission, l'ASM est entièrement redondé sur Swarm (redondance froide).

Conçu par le CEA-Leti à Grenoble et fourni par le CNES, qui a par ailleurs contribué à la spatiali-

sation de cet instrument, ce magnétomètre scalaire de nouvelle génération améliore les performances et supprime les limitations des sondes à résonance magnétique nucléaire (RMN) à précession de protons utilisées pour les missions Ørsted et CHAMP (sondes des magnétomètres scalaires Overhauser du CEA-Leti, développés en collaboration avec le CNES pour Ørsted).

## **Le principe de fonctionnement**

Le principe de fonctionnement du magnétomètre scalaire (ASM) repose sur la spectroscopie atomique de l'Hélium 4.



# Des magnétomètres absolument révolutionnaires

Il exploite l'effet Zeeman, le signal étant amplifié par une technique de pompage optique des atomes d'Hélium 4. Cette technologie innovante lui confère une sensibilité et des performances inégalées, identiques en tout point de l'orbite. Ces mesures sont absolues, c'est-à-dire sans dérive ni biais, en raison du principe de la mesure, ce qui permet d'utiliser ce magnétomètre en tant que référence magnétique pour la mission Swarm. Véritable condensé de technologies, le défi majeur résidait dans la qualification pour l'utilisation spatiale de ses composants, dont notamment une source laser à fibre et un moteur piézoélectrique a-magnétique. Ces technologies seront embarquées pour la première fois sur Swarm. Le choix et la qualification de matériaux a-magnétiques a également été un challenge. Le PEEK pur (un polymère non chargé) a ainsi été sélectionné. C'est la première fois que ce matériau est utilisé dans une application spatiale pour réaliser entièrement une structure mécanique complexe, incluant des capteurs composés de nombreuses pièces dont une partie mobile et des vis contribuant à la tenue mécanique.

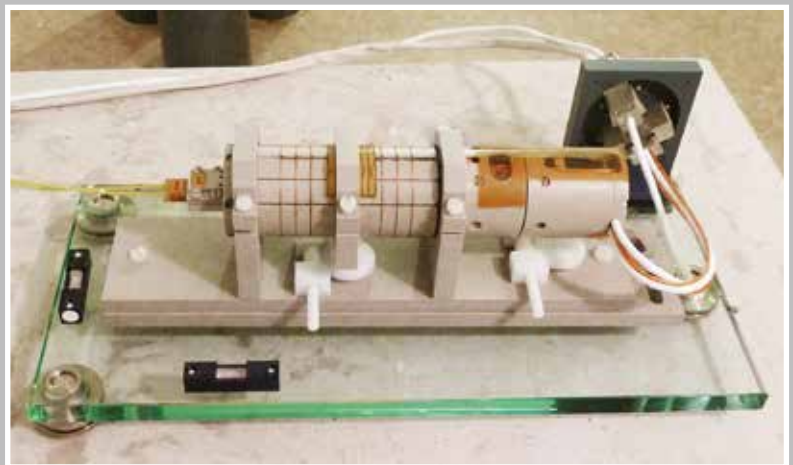
L'ASM fournit en routine un jeu de mesures par seconde. Cependant, il est aussi capable de fournir des mesures scalaires à une fréquence de 250 Hz. Cette faculté sera exploitée en début de vie pour analyser le contenu spectral du champ magnétique au-delà de 1 Hz, qui est actuellement mal connu.

## Des mesures vectorielles absolues

Grâce à un concept innovant, cet instrument permet également de réaliser des mesures vectorielles absolues, autrement dit de mesurer de manière absolue les composantes du champ magnétique selon trois directions perpendiculaires. Ceci en fait le premier instrument capable de réaliser des mesures scalaires et vectorielles simultanément au même point, avec une excellente stabilité. Swarm offre ainsi une opportunité unique de valider ce concept dans l'environnement spatial.

Les données vectorielles expérimentales de l'ASM pourront alors être comparées pour validation avec celles, nominales, du VFM.

Les résultats permettront aussi de vérifier la qualité des données nominales de la mission, et pourraient ouvrir des perspectives particulièrement intéressantes pour les futures missions de magnétométrie spatiale. Celles-ci pourraient alors s'affranchir de la nécessité d'embarquer à la fois un magnétomètre scalaire absolu et un magnétomètre vectoriel relatif.



## Un « observatoire terrestre automatique » dérivé de l'ASM

Un des modèles d'ingénierie de l'ASM a été adapté pour réaliser un prototype de magnétomètre automatique destiné aux observatoires terrestres.

Le mode vectoriel a été optimisé pour obtenir des performances comparables à celles des magnétomètres à saturation de flux actuellement utilisés dans ces installations. Ce prototype a l'avantage d'offrir une stabilité qui devrait éviter de le calibrer pendant un an, alors que les équipements actuels des observatoires nécessitent une calibration plusieurs fois par semaine.

Ce prototype est actuellement en test à l'observatoire magnétique de l'IPGP à Chambon-La-Forêt.

La validation de cet instrument sera une opportunité pour envisager d'installer des observatoires terrestres dans des zones lointaines difficiles d'accès, qui viendraient compléter les mesures de la constellation Swarm.

Cette expérience est réalisée en collaboration entre le CNES, le CEA-Leti et l'IPGP.



# 5



© ESA/Mohammed Shafiq

Les trois satellites Swarm, mâts repliés, photographiés à Plessetsk quelques semaines avant le lancement.

*En proposant pour la mission Swarm un instrument ayant des capacités uniques et des performances inégalées, le CNES a joué pleinement son rôle de vecteur d'innovation, à la fois vis-à-vis de l'ESA, afin de répondre aux exigences de fiabilité et de disponibilité posées par l'agence spatiale européenne, mais aussi vis-à-vis du CEA-Leti, en permettant au prototype de magnétomètre développé par le laboratoire de « gagner ses galons » pour le vol spatial.*

# Une coopération exemplaire



## Entre le CNES et l'ESA

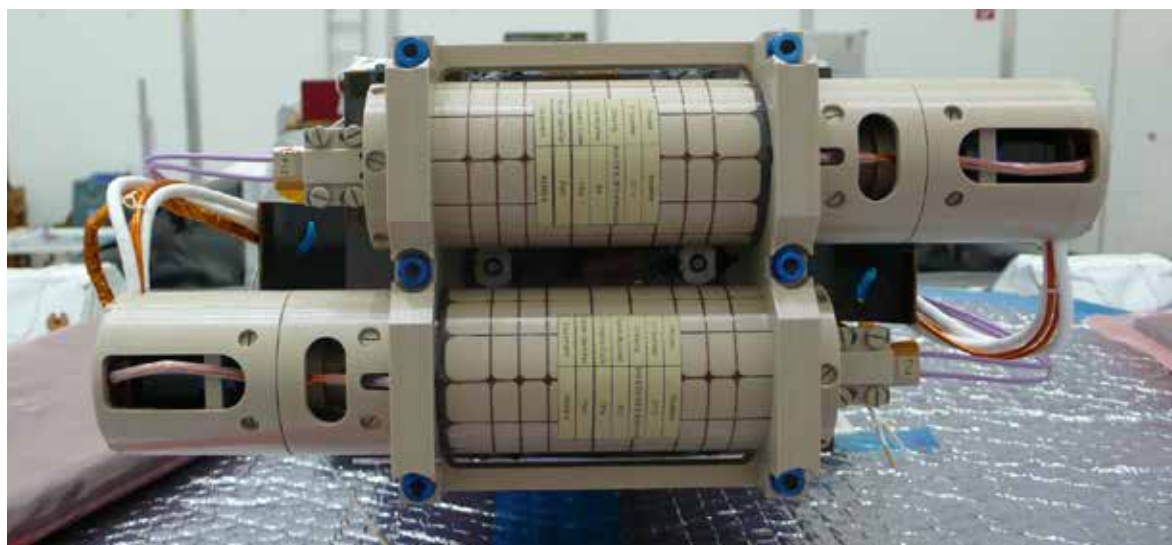
La responsabilité du CNES a été de fournir à l'ESA les six magnétomètres absolus qui équipent les trois satellites Swarm, ainsi que les algorithmes associés.

L'agence spatiale française a également apporté son support au maître d'œuvre du satellite, EADS-Astrium GmbH, pour l'intégration et les tests des magnétomètres sur les satellites. Enfin, le CNES est responsable de la validation des données de niveau 1b des magnétomètres absolus.

De son côté, l'ESA est responsable du développement, des tests, du lancement et de l'exploitation de la constellation Swarm. L'agence spatiale européenne, chargée de la diffusion des données Swarm, s'engage également à fournir au CNES un accès à toutes les données nécessaires pour valider les données des magnétomètres, notamment les mesures vectorielles du champ magnétique.

## Entre le CNES et le CEA-Leti

Le CNES a confié la réalisation des magnétomètres ASM au CEA-Leti, mais s'est largement impliqué pour aider le Leti tout au long du développement, afin notamment de garantir la maîtrise des procédés de fabrication, assurer la reproductibilité des performances sur les différents modèles de vol et vérifier l'aptitude des nombreuses technologies innovantes embarquées dans ces instruments à résister aux conditions spatiales sur la durée de la mission. Certains composants du magnétomètre ont dû être entièrement qualifiés pour le vol spatial, car rien n'était disponible « sur étagère », du fait des besoins spécifiques de l'instrument. Principaux éléments concernés par cet effort de « spatialisation » : le laser à fibre inclus dans le boîtier électronique de commande de l'instrument, le moteur piézoélectrique chargé de commander la sonde de mesure, ainsi que divers matériaux (dont le PEEK), composants et procédés.



La structure des magnétomètres ASM a été fabriquée en PEEK, un polymère sélectionné pour ses propriétés a-magnétiques.

© Astrium



Par ailleurs, les experts du CNES sont intervenus à plusieurs reprises pour réaliser des analyses d'ingénierie lors des phases de conception et des expertises sur anomalies lors des phases d'intégration et essais.

Le partenariat très ouvert noué entre le laboratoire du CEA et le CNES, a permis de poser les bases d'une coopération exemplaire où chaque partie a pu livrer le meilleur de son savoir-faire.

### Entre le CNES et l'IPGP

L'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), sous la conduite du chercheur principal de ce projet, Gauthier Hulot, assure l'expertise scientifique sur les magnétomètres. L'IPGP sera chargé de la phase de validation scientifique des données fournies par les magnétomètres ASM, un travail qui bénéficiera à l'ensemble de la communauté scientifique impliquée dans Swarm, l'IPGP jouant par ailleurs un rôle majeur dans l'exploitation scientifique de l'ensemble de la mission.

### Entre le CNES et les laboratoires de recherche

Enfin, via son comité scientifique TOSCA (Terre, Océan, Surface Continentale, Atmosphère), le CNES soutient la recherche sur le magnétisme terrestre dans les laboratoires français et la communauté scientifique impliquée dans la mission Swarm. Après le lancement de Swarm, le CNES continuera de soutenir la mission, via les « Propositions de recherche scientifique spatiale ».



© Astrium/Phelaj



© CNES/Emmanuel Grimaud

**Isabelle Fratter,**  
Chef de projet ASM / Swarm au CNES

« Le niveau d'implication du CNES varie selon les projets mais il fut très significatif sur Swarm. Les deux partenaires, CEA-Leti et IPGP, ont vraiment travaillé en toute transparence, chacun livrant le meilleur de son savoir-faire. Nous avons ainsi pu bâtir une coopération exemplaire qui portera bientôt ses fruits, alors que le défi technologique était très grand au départ. »



# Témoignages



© CNES/CHÉTRIT Jacob, 2012

**Jean-Michel Léger,**  
Chef de projet ASM / Swarm  
au CEA-Leti

« Cette coopération s'est déroulée dans un très bon esprit. J'ai le sentiment que chacun des partenaires a beaucoup donné, mais aussi beaucoup appris.

Nous avons le savoir-faire sur l'instrument et sa conception, le CNES nous a apporté son expertise et fortement soutenus pour transformer et fiabiliser les magnétomètres dans l'environnement spatial. L'ASM sera l'instrument de référence des trois satellites formant la mission, et jouera un rôle crucial dans leurs performances. »



© CNES/PASCAUD Olivier, 2012

**Gauthier Hulot,**  
Directeur de recherche au CNRS,  
responsable de l'équipe  
de géomagnétisme à l'IPGP,  
responsable scientifique  
du magnétomètre ASM

« J'ai beaucoup apprécié l'interaction avec le CNES, qui a très bien géré le projet Swarm. Ce type de coopération internationale étendue n'est jamais simple : il faut savoir faire preuve à la fois de diplomatie et de rigueur, afin de bien définir les responsabilités de chacun.

Le partenariat entre le CNES et l'IPGP ne date pas d'hier. Forts de l'expérience de Swarm, nous espérons que le CNES continuera à jouer un rôle prééminent dans les programmes européens d'observation de la Terre, lesquels répondent aux attentes d'une large communauté scientifique. »



© DR

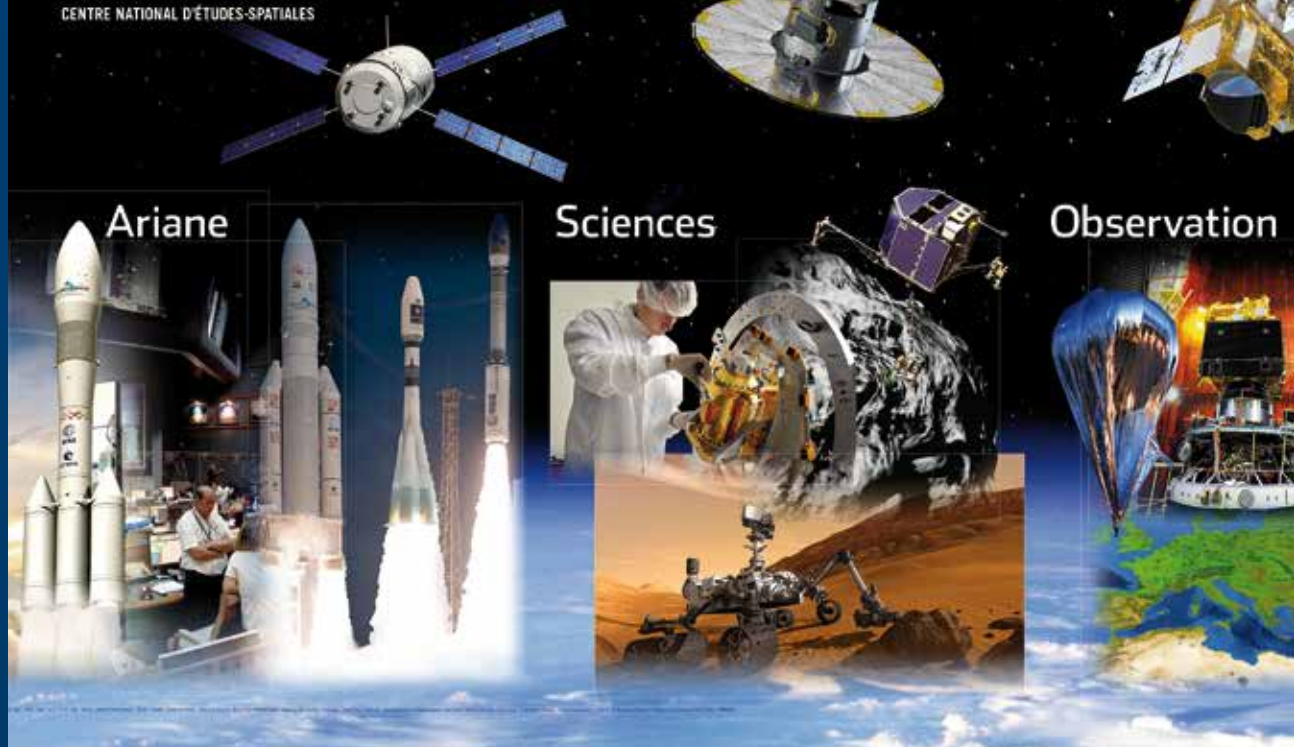
**Mioara Manda,**  
Expert thématique Terre Solide  
au CNES

« Le CNES continuera à être fortement impliqué dans la mission Swarm, pendant la phase d'exploitation.

Un suivi en vol des technologies nouvelles mises en œuvre par le CEA-Leti apportera des informations cruciales sur le comportement dans la durée de ces nouveaux capteurs.

De plus, le comité scientifique du CNES en observation de la Terre, le TOSCA, apportera son soutien à la communauté scientifique française. »





## Le Centre National d'Études Spatiales

*Créé en 1961, le CNES (Centre National d'Études Spatiales) est l'établissement public chargé de proposer au gouvernement la politique spatiale française et de la mettre en œuvre au sein de l'Europe. Il conçoit et met en orbite des satellites et invente les systèmes spatiaux de demain ; il favorise l'émergence de nouveaux services, utiles au quotidien. Le CNES est à l'origine de grands projets spatiaux, lanceurs et satellites, qu'il fait réaliser par l'industrie. Il s'entoure également de partenaires scientifiques et est engagé dans de nombreuses coopérations internationales. La France, représentée par le CNES, est le principal contributeur de l'Agence spatiale européenne (ESA), chargée par ses 20 États membres de conduire la politique spatiale de l'Europe.*

### Quatre centres d'excellence

Le CNES compte près de 2 500 collaborateurs, femmes et hommes passionnés par cet espace qui ouvre des champs d'application infinis, innovants, utiles à tous.

Implanté en Midi-Pyrénées depuis 1968, le **Centre spatial de Toulouse (CST)** est le plus grand centre technique et opérationnel du CNES. Ses ingénieurs étudient, conçoivent, développent, réalisent, mettent à poste, contrôlent et exploitent les systèmes orbitaux, satellites et instruments.

**A Paris Daumesnil, la Direction des lanceurs (DLA)** préside depuis plus de 40 ans aux destinées de la famille Ariane. Ses spécialistes sont plus que jamais engagés dans l'avenir du lanceur européen au sein d'une équipe intégrée avec l'Agence spatiale européenne.

**En Guyane, les équipes du Centre spatial guyanais (CSG)**, coordonnent les activités de lancement de la gamme des lanceurs européens. Idéalement situé à proximité de l'équateur, le port spatial de l'Europe est un atout majeur du programme spatial européen.

**Enfin, à Paris Les Halles**, les collaborateurs du siège sont chargés d'élaborer la politique spatiale de la France et de l'Europe et de conduire les programmes du CNES.





## Telecommunications

## Defense

### Cinq domaines d'intervention

Les activités du CNES se répartissent en cinq domaines d'intervention, qui recouvrent l'ensemble des compétences nécessaires à la définition et la mise en œuvre de notre politique spatiale :

- **Ariane** : l'autonomie d'accès à l'espace est un enjeu de souveraineté garanti par la gamme des lanceurs européens.
- **Les sciences** : l'exploration de l'espace recherche les réponses aux questions fondamentales de l'humanité sur l'origine du système solaire, des galaxies, de la vie...
- **L'observation** : la planète Terre vit sous le regard constant des satellites qui l'observent, étudient son atmosphère et fournissent des données indispensables pour la météorologie, l'océanographie, l'altimétrie, etc.
- **Les télécommunications** : les satellites jouent un rôle irremplaçable pour les télécommunications à haut débit, la localisation, la collecte de données environnementales, la recherche et le sauvetage.
- **La défense** : l'observation optique à très haute résolution, l'écoute, les télécommunications hautement sécurisées, la surveillance de l'espace, contribuent à la paix et à la sécurité des citoyens.

### Le CNES et l'emploi

En inventant les systèmes spatiaux de demain, le CNES est un acteur majeur de l'innovation technologique, du développement économique et de la politique industrielle de la France.

80 % de son budget revient vers les entreprises françaises et 40 % de l'industrie spatiale européenne est localisée en France. En France métropolitaine, 16 000 emplois sont générés par l'activité spatiale et en Guyane, l'espace représente 9 000 emplois directs et indirects, soit 15 % de l'emploi local. **Au total, avec 20 € de retombées économiques pour 1 € investi**, l'innovation spatiale représente un effet de levier considérable pour l'industrie, l'économie, la recherche, la société et les politiques publiques.

● [www.cnes.fr](http://www.cnes.fr)



<https://fr-fr.facebook.com/CNESFrance>



[twitter.com/CNES\\_France](https://twitter.com/CNES_France)



<https://plus.google.com/108355510043392743703/posts>



# Ccontacts

## Le CNES

### Siège

2 place Maurice Quentin  
75039 Paris Cedex 01

### Direction des lanceurs

52 rue Jacques Hillairet  
75612 Paris Cedex

### Centre spatial de Toulouse

18 avenue Edouard Belin  
31401 Toulouse Cedex 9

### Centre spatial guyanais

BP 726 – 97387 Kourou Cedex  
Guyane

---

### Information grand public :

<http://www.cnes.fr>, rubrique Contact

---

### Information presse :

<http://www.cnes.fr/presse>  
[cnes-presse@cnes.fr](mailto:cnes-presse@cnes.fr)

Octobre 2013

Swarm sur le site des missions scientifiques du CNES :

<http://smc.cnes.fr/SWARM/Fr/>