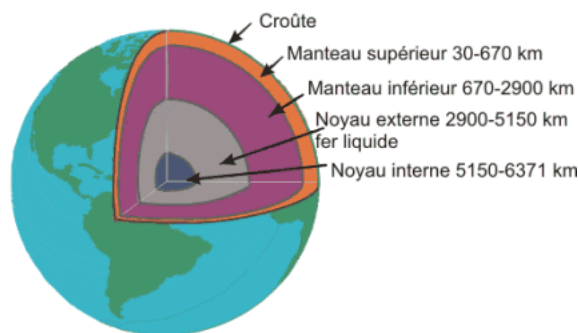


# Origine du champ magnétique terrestre

Bien que le champ magnétique de la Terre s'apparente à celui produit par un aimant droit, cette analogie ne permet pas d'expliquer son origine. En effet, aucun aimant permanent ne pourrait résister aux températures qui règnent dans le noyau terrestre. En outre, nous savons que le champ géomagnétique existe depuis des centaines de millions d'années. On ne peut pas, non plus, attribuer l'existence du champ géomagnétique actuel à un événement qui se serait produit dans le passé lointain. Le champ magnétique décroît et l'on peut démontrer qu'en l'absence d'un mécanisme qui le régènerait continuellement, il aurait disparu dans 15 000 ans.

On a proposé plusieurs mécanismes pour expliquer la production du champ magnétique, mais le seul qui ait été retenu propose que la source du champ géomagnétique soit analogue à une dynamo, un dispositif permettant de transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique. Pour comprendre comment cette dynamo planétaire fonctionne, nous devons comprendre les conditions physiques qui règnent à l'intérieur de la Terre.

La Terre est formée de couches : une mince croûte externe, un manteau silicaté, un noyau externe et un noyau interne. La pression et la température augmentent avec la profondeur. à la frontière entre le noyau et le manteau, la température s'élève à près de 4 800°; il y fait suffisamment chaud pour que le noyau externe soit liquide. En contrepartie, le noyau interne est solide à cause de la pression plus élevée. Le noyau est principalement composé de fer et d'une petite proportion d'éléments plus légers. Le noyau externe est constamment en mouvement à cause de la rotation terrestre et de la convection. La convection est causée par le mouvement des éléments légers vers le haut, alors que les éléments plus lourds se condensent sur le noyau interne.



## L'intérieur de la Terre

Le processus exact de la production du champ magnétique dans cet environnement est extrêmement complexe et plusieurs des paramètres nécessaires à une solution complète des équations mathématiques qui décrivent le problème sont mal connus. Toutefois, les concepts fondamentaux ne sont pas difficiles à comprendre. Plusieurs conditions doivent être satisfaites pour la production d'un champ magnétique :

1. la présence d'un liquide conducteur,
2. suffisamment d'énergie pour forcer le liquide à se déplacer assez rapidement dans une configuration d'écoulement adéquate,

### 3. la présence d'un champ magnétique « initial ».

Dans le noyau externe, toutes ces conditions sont remplies : le fer en fusion est un bon conducteur; on y trouve assez d'énergie pour entretenir la convection; et les mouvements convectifs, couplés avec la rotation terrestre produisent une bonne configuration pour l'écoulement. Avant même l'apparition du champ magnétique terrestre, le champ magnétique du Soleil exerçait son influence. Ce champ existant a servi de champ initial lors du démarrage du processus. Lorsque le fer en fusion circule dans le champ magnétique existant, il génère un courant électrique, grâce au mécanisme d'induction magnétique. Ce courant électrique nouvellement induit crée, à son tour, un champ magnétique. étant donné la relation entre le champ magnétique et la circulation du liquide, le champ magnétique induit s'ajoute au champ magnétique initial. Tant que le liquide du noyau externe pourra continuer à circuler, le mécanisme se maintiendra.

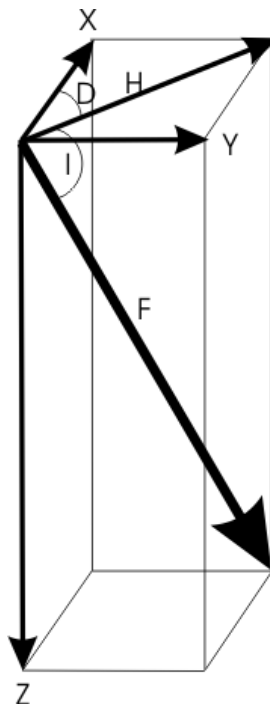
[http://www.geomag.nrcan.gc.ca/mag\\_fld/fld-fr.php](http://www.geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/fld-fr.php)

## Éléments du champ magnétique

Le champ magnétique terrestre est une quantité vectorielle : il possède, à chaque point de l'espace, une intensité et une direction particulières. Trois valeurs sont nécessaires à sa description complète en un point. Ce peut être :

- les composantes orthogonales de l'intensité du champ (**X**, **Y**, et **Z**);
- l'intensité totale du champ et deux angles (**F**, **D**, **I**); ou
- deux composantes de l'intensité du champ et un angle (**H**, **Z**, **D**)

La relation entre ces sept éléments est montrée dans le diagramme suivant.



## Éléments du champ magnétique

Composant	Description
F	intensité totale du vecteur champ magnétique
H	intensité horizontale du vecteur champ magnétique
Z	composante verticale du vecteur champ magnétique; par convention, Z est positif vers le bas
X	composante nord du vecteur champ magnétique; X est positif vers nord
Y	composante est du vecteur champ magnétique; Y est positif vers l'est
D	déclinaison magnétique, définie comme étant l'angle entre le nord vrai (nord géographique) et le nord magnétique (la composante horizontale du champ magnétique), est positif vers le nord vrai
I	inclinaison magnétique, soit l'angle que fait le vecteur champ magnétique par rapport au plan horizontal et dont la valeur est positive vers le bas

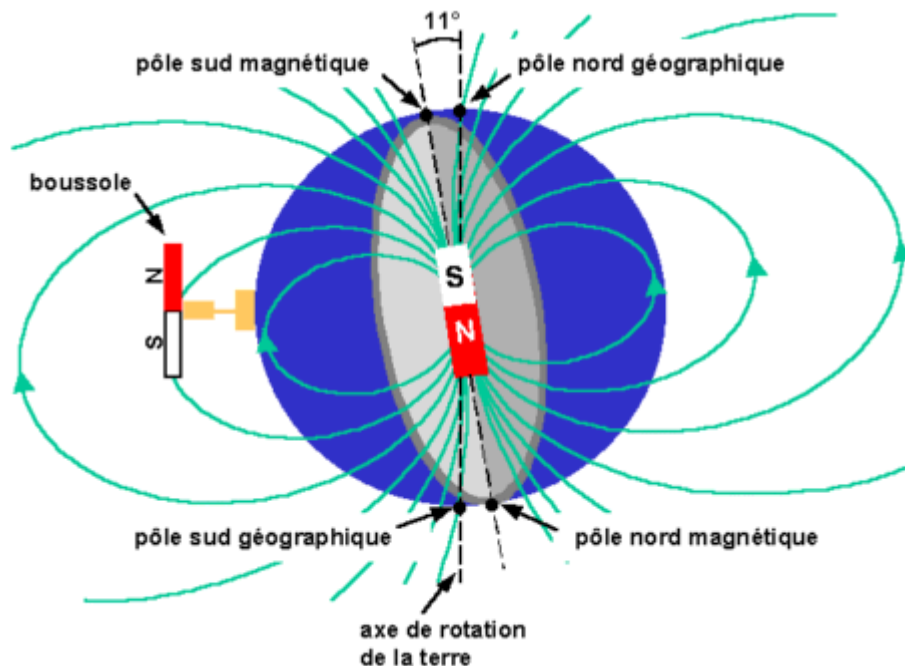
On mesure **D** et **I** en degrés et les autres éléments en nanotesla (nT; 1 nT = 10<sup>-9</sup> Tesla).

Les sept éléments sont reliés entre eux par ces expressions simples :

Déclinaison (D)  $D = \tan^{-1} (Y/X)$  Inclinaison (I)  $I = \tan^{-1} (Z/H)$  Horizontale (H)  $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$

Nord (X)  $X = H \cos (D)$  Est (Y)  $Y = H \sin (D)$  Intensité (F)  $F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$

On peut calculer les éléments du champ magnétique pour tous les lieux à l'aide du [calculateur du champ magnétique](#).



# Le champ magnétique de la Terre

Dans tout l'espace, autour et à l'intérieur de la Terre se trouve un champ magnétique. Plusieurs phénomènes naturels ou artificiels se somment et constituent le champ magnétique total, qui varie constamment selon les variations des sources qui le génèrent. Ecran protecteur contre les particules à haute énergie en provenance du cosmos, le champ magnétique est fortement affecté par les événements de météo de l'espace, qui peuvent perturber tous les systèmes technologiques terrestres. Son étude permet de comprendre tout autant la structure et la dynamique interne de la Terre que les phénomènes qui se produisent dans la haute atmosphère et dans l'espace.

## • GÉODYNAMO

Le champ magnétique de la Terre est en premier lieu généré à l'intérieur de la Terre, par l'effet de dynamo dû aux mouvements de convection dans le noyau terrestre, composé à 90% de fer liquide. Ces mouvements sont générés par le refroidissement progressif du noyau et de la graine solide située au centre de la Terre.

Il en résulte un champ magnétique dipolaire, incliné d'environ  $10^\circ$  par rapport à l'axe de rotation de la Terre.

## • LITHOSPHERE

Une petite partie du champ magnétique terrestre provient des roches aimantées de la croûte terrestre. L'analyse de l'aimantation des roches des fonds océaniques a notamment permis de mettre en évidence les inversions des pôles, qui se produisent environ une fois par million d'années.

## • IONOSPHERE

La radiation solaire X et UV est absorbée dans les couches les plus hautes de l'atmosphère, où des couples ion-électron sont produits du côté de la Terre illuminé par le soleil. Ces particules libres produisent des courants électriques autour de 100 km d'altitude, responsables de la variation diurne du champ magnétique.

## • MAGNÉTOSPHERE

La partie la plus externe du champ magnétique terrestre est exposée au vent solaire, un flux de particules chargées émis constamment par le soleil. Les courants électriques magnétosphériques provoquent eux aussi des variations du champ magnétique observé au sol.

## • DÉRIVE DES PÔLES MAGNÉTIQUES

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 exactement antipodaux. Le pôle magnétique Nord

se trouve dans le grand Nord Canadien, tandis que le pôle magnétique Sud se trouve au large de la base française de Dumont d'Urville en Antarctique. La variation séculaire du champ magnétique terrestre se traduit par une lente dérive des pôles magnétiques. Ainsi le pôle magnétique Nord se déplace actuellement à la vitesse de 55 km/an vers la Sibérie.

#### • UN BOUCLIER DE PROTECTION POUR LE VIVANT

La magnétosphère, créée par le champ magnétique terrestre, a joué un rôle essentiel pour le développement de la vie sur la Terre en déviant les particules de haute énergie du vent solaire et des rayons cosmiques. Ceci a permis à l'atmosphère terrestre de se maintenir au cours du temps, contrairement à ce qui s'est passé sur Mars, où en l'absence d'un champ magnétique important, le vent solaire a arraché à son passage une grande partie de l'atmosphère de cette planète. Le bouclier fourni par la magnétosphère terrestre a ainsi réduit le flux de rayonnement à haute énergie qui arrive jusqu'au sol, permettant le maintien de la vie sur Terre.

#### • MÉTÉOROLOGIE DE L'ESPACE

Le soleil alterne des périodes calmes et des périodes où son activité augmente. Dans les périodes de forte activité solaire, on peut avoir des éruptions solaires provoquant une augmentation brutale du rayonnement UV et X en provenance du soleil, ainsi que de la vitesse du vent solaire. On peut alors avoir un orage magnétique sur Terre. Des particules chargées pénètrent dans la cavité formée par le champ magnétique terrestre donnant lieu à des phénomènes spectaculaires : les aurores boréales et australes.

Ces phénomènes naturels peuvent avoir des conséquences sérieuses sur les systèmes technologiques humains :

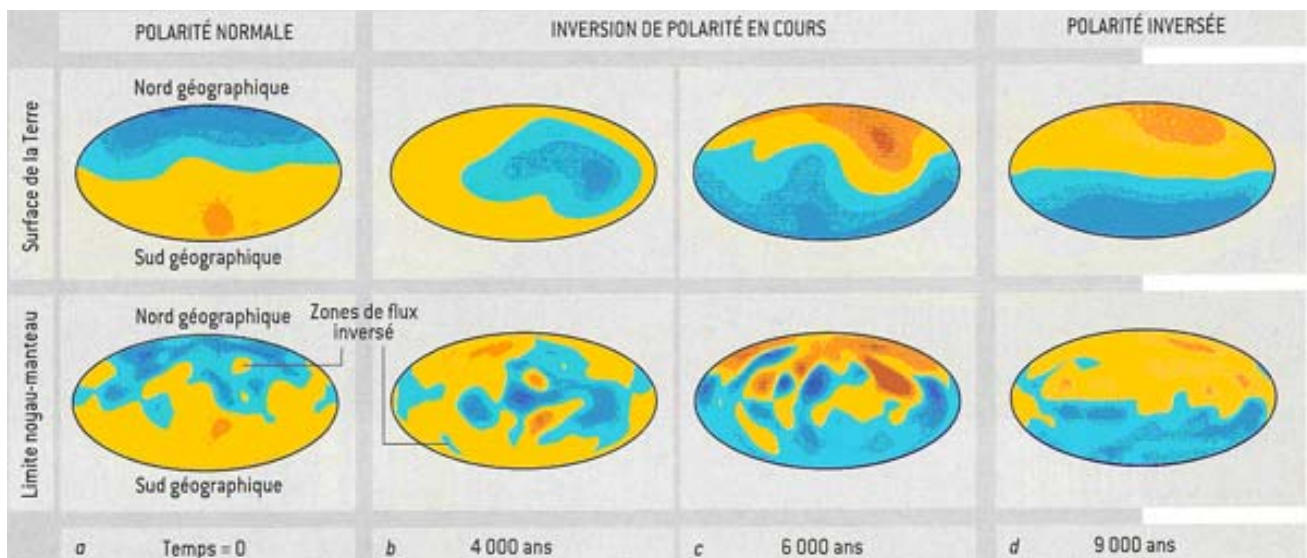
- avaries de satellites
- perturbations des systèmes de télécommunication : satellites, câbles sous-marins...
- dégradation ou interruption des services de positionnement par satellite, e.g. GPS ou Galileo
- augmentation des radiations reçues par les astronautes et les passagers des avions
- courants induits dans les oléoducs, accélérant leur usure
- courants parasites dans les réseaux électriques, susceptibles de provoquer des pannes de courant sur des vastes régions

<http://www.ipgp.fr/fr/obsmag/champ-magnetique-de-terre>

# Inversion des pôles

On pense que le champ magnétique s'affaiblit, car il est proche d'une inversion magnétique. Le champ magnétique de la Terre s'inverse en moyenne tous les 250 000 ans. Lorsque ce phénomène survient, le pôle Nord magnétique bascule au Sud et vice-versa. Des inversions se sont déjà produites à plusieurs reprises dans le passé. Depuis 50 millions d'années, on calcule que le champ magnétique terrestre s'est inversé plus de 100 fois. La dernière inversion remonte à environ 780 000 ans. Cela laisse croire que nous pourrions être sur le point de vivre une nouvelle inversion.

## Inversion de polarité en image



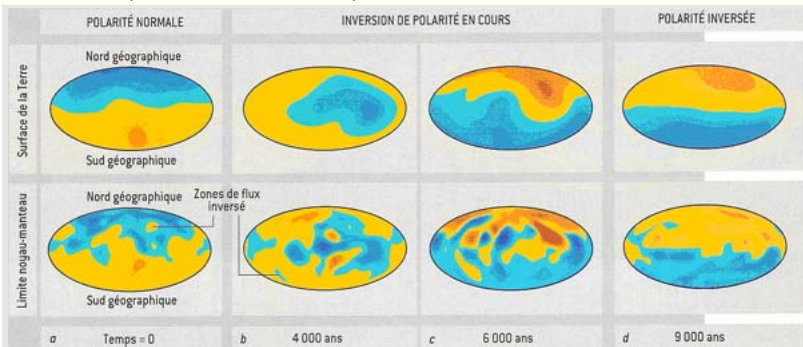
**Cette simulation vient d'un article publié plus bas (page 7)**

<http://www.sciencepresse.qc.ca/blogue/mathieu-rancourt/2016/04/19/champ-magnetique-terrestre-cette-force-invisible-nous-protege>

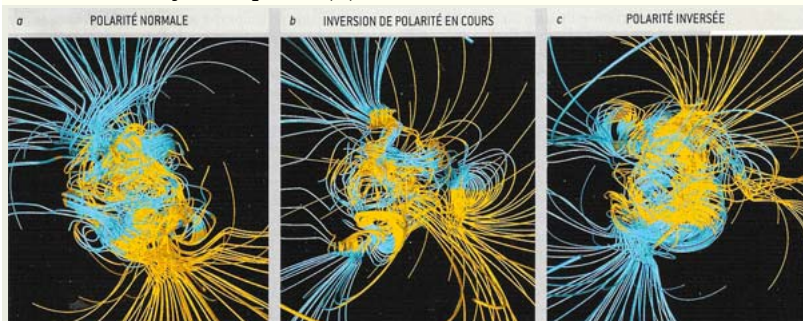
Site du CNRS, pour en savoir plus : <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/699.htm>

La simulation des inversions de polarité (d'après un article de la revue "pour la science" n°331 -mai2005 )

Aujourd'hui, les simulations de la géodynamo en trois dimensions parviennent à reproduire des inversions spontanées du dipôle magnétique de la Terre. Les cartes ci-dessous illustrent une inversion obtenue lors d'une simulation. L'inversion, d'une durée de 9000 ans, est représentée par des cartes de la composante verticale du champ magnétique à la surface de la Terre (cartes supérieures) et à l'interface noyau-manteau (cartes inférieures).



Les cartes magnétiques ci-dessus montrent l'évolution géographique du champ magnétique terrestre pendant l'inversion. Initialement (a), la polarité est normale, bien que la différence entre l'hémisphère Sud et l'hémisphère Nord soit moins bien définie à la surface du noyau. Quelque 3 000 ans plus tard (b), le début de l'inversion se manifeste par l'apparition de plusieurs zones de flux magnétique inversé à la surface du noyau liquide (du bleu au Sud et du jaune au Nord). Le processus d'inversion bat son plein après 6000 ans (c); à la surface du noyau liquide, les zones de flux inversé ont commencé à dominer les surfaces où subsiste la polarité d'origine, tandis qu'à la surface de la Terre, l'inversion semble déjà complète. Toutefois, il faut attendre encore 3 000 ans pour que le dipôle terrestre soit complètement inversé au niveau du noyau liquide (d).



Ces cartes du champ magnétique à la surface du noyau, plus précisément de sa composante verticale sur cette surface, ont été établies à l'aide de satellites. On peut les extrapoler pour cartographier le champ régnant à la limite entre le noyau et le manteau. Elles montrent que dans l'hémisphère Sud, le champ

magnétique pointe presque toujours vers l'extérieur de la Terre, tandis que c'est le contraire dans l'hémisphère Nord. Dans quelques régions atypiques, l'orientation est opposée. Or ces régions de flux inversé ont proliféré depuis 1980. Si le phénomène se poursuit au point que les régions de flux inversé englobent les pôles, la polarité du champ magnétique terrestre s'inversera. Des centaines de telles inversions se sont produites au cours des 150 derniers millions d'années, et certainement avant aussi.

