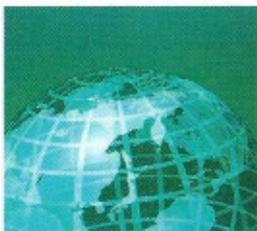




La géodésie

MESURER LA TERRE



La géodésie est une discipline dédiée à la mesure et à la représentation de la forme de la Terre. Cette définition proposée par l'allemand Friedrich Robert Helmert fait référence depuis 1880. Elle tire son nom du grec *geo*, la Terre, et *daïsis*, division. Les géodésiens s'intéressent aussi bien au champ de gravité terrestre (et à sa variation dans le temps et l'espace) qu'aux phénomènes géophysiques influant sur la forme de la Terre (mouvements de la croûte terrestre, marées...). Elle se pratique essentiellement à deux échelles : à l'échelle planétaire en tant que science théorique et à l'échelle régionale, permettant alors des applications plus pratiques telles que la cartographie.

LES ENJEUX DE LA GÉODÉSIE

La géodésie s'occupe de la détermination de la forme et des dimensions de la Terre et de son champ de gravité. Il est courant de parler de « figure de la Terre » pour faire référence à cette forme. Cette appellation peut s'interpréter de plusieurs façons possibles :

- L'ellipsoïde de référence n'est autre que la forme géométrique parfaite pouvant s'inscrire dans le même volume que la Terre : il correspond donc à la figure de géométrie approchant au mieux la surface terrestre.

- Le géoïde : c'est la forme qu'adopterait la surface de l'océan si la Terre était entièrement recouverte d'eau.
- La surface topographique, qui correspond à la frontière matérielle entre la lithosphère (couche de roches formée de la croûte et de la partie supérieure du manteau terrestre) et l'atmosphère ou l'hydrosphère (selon que l'on se place au-dessus d'un continent ou d'un océan).

L'ELLIPSOÏDE DE RÉFÉRENCE

D'un point de vue mathématique, un ellipsoïde est une « sphère aplatie » déterminée par deux dimensions caractéristiques : le rayon équatorial (ou demi-grand axe) et le rayon polaire (demi-petit axe). Le recours à cet ellipsoïde permet de décrire de manière très simplifiée la forme de la Terre. C'est néanmoins une représentation approximée de la forme de la Terre. L'utilité principale de cette figure est de fournir un support aux systèmes de coordonnées. Le système le plus traditionnel de repérage est formé de la latitude (angle compris entre -90° et $+90^\circ$ mesurant l'écart à l'équateur), de la longitude (angle compris entre -180° et $+180^\circ$ mesurant l'écart au méridien de Greenwich) et de l'altitude (référéncée par rapport au niveau des mers).

LA DÉTERMINATION DU GÉOÏDE



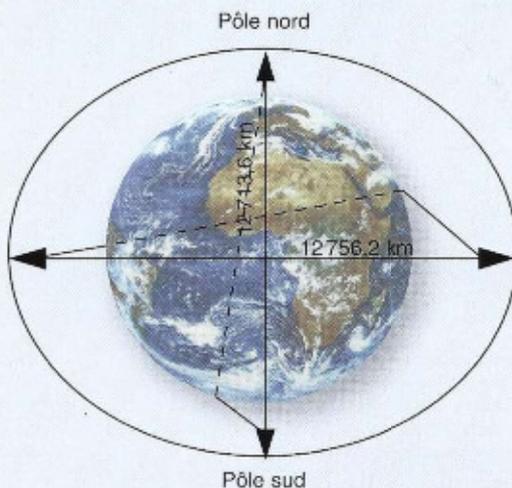
Selon **Gauss** qui en a donné la première définition, le géoïde est la figure mathématique décrivant au

mieux la Terre. C'est une surface lisse mais irrégulière, qui ne correspond pas forcément à la frontière matérielle de la croûte terrestre. Le géoïde désigne une surface équipotentielle du champ de gravité terrestre. En d'autres termes cela signifie que la pesanteur est identique en tout point du géoïde. Il a arbitrairement été décidé de choisir la surface la plus proche du niveau des océans. La force de gravité est partout perpendiculaire à cette surface. D'un point de vue pratique, elle se détermine par le recoupement de mesures gravimétriques et de simulations. L'outil mathématique permettant de caractériser les ondulations du géoïde est la représentation en harmoniques sphériques. Il est d'usage de calculer non pas le géoïde, mais la déviation de ce géoïde par rapport à l'ellipsoïde de référence de la Terre.

TOPOGRAPHIE

La topographie consiste à mesurer la forme physique de la surface terrestre, et se pratique donc en général à une échelle plus locale. Elle est plus particulièrement destinée aux applications pratiques : cadastre, chantiers, cartographie... La topographie est parfois désignée par le terme géodésie inférieure, la géodésie à plus grande échelle étant alors désignée par géodésie supérieure. La surface de la Terre étant très irrégulière, on ne peut se limiter à une description purement mathématique pour en appréhender les détails. Par conséquent on a recours à des mesures de terrain pour déterminer la forme de la surface topographique. Elle présente des variations d'une dizaine de kilomètres par rapport à l'ellipsoïde de référence (8 km vers le haut dans le cas des plus hautes montagnes ou 11 km vers le bas dans le cas des fosses océaniques).

Ellipsoïde de référence



UN PEU D'HISTOIRE

ANTIQUITÉ

L'idée initiale d'une Terre plate a mis un temps considérable à se déraciner des esprits. Les premiers arguments en faveur d'une forme sphérique ont été les éclipses lunaires (l'observation d'une ombre circulaire ne pouvant être obtenue que par projection d'un objet sphérique) et l'observation de l'étoile polaire depuis les basses latitudes (celle-ci est plus basse dans le ciel en allant vers le sud). Nombre de savants grecs ont contribué à répandre l'idée d'une terre sphérique : Pythagore, **Aristote**,



Platon ou Archimède. Ératosthène fut l'un des premiers à proposer une méthode pour mesurer le rayon de la Terre. En mesurant l'angle séparant le zénith solaire de la verticale en plusieurs endroits, il a pu évaluer la courbure de la Terre et en estimer ainsi le rayon. Un autre célèbre défenseur de la théorie de la terre sphérique est Ptolémée. Il participa lui aussi à l'estimation du rayon terrestre. Les multiples tentatives de détermination du rayon terrestre donnèrent toutefois lieu à des résultats bien en dessous de la valeur réelle. Il faut quitter le monde hellénique pour l'Inde pour trouver les premières estimations de rayon terrestre raisonnables. Le

mathématicien Aryabhata a formulé l'hypothèse d'une terre tournant sur son axe et estimé la circonférence de la Terre avec moins de 1 % d'erreur.

MOYEN ÂGE

Les premières avancées significatives en géodésie peuvent être attribuées au perse Abu al-Rayhan al-Biruni (973-1048). Grâce à ses techniques de mesure des distances par triangulation il a réalisé une estimation du rayon de la terre particulièrement proche de la réalité : 6 339,6 km (soit 16,8 km de différence avec la valeur moderne de 6 356,7 km). Il a rédigé de nombreux travaux, notamment dans

le domaine de la projection cartographique. Il a en outre participé activement à la cartographie des villes du Moyen Orient. En Europe en revanche, il fallut attendre le xv^e siècle pour que les estimations des savants grecs soient revues à la hausse. C'est néanmoins grâce à l'influence des cartes de Ptolémée que les navigateurs européens se sont lancés dans l'exploration du globe. Le fait que le rayon terrestre ait été sous-estimé explique pourquoi Christophe Colomb s'attendait à rencontrer l'Asie dans son périple



autour du monde, et non un nouveau continent. C'est au cartographe flamand **Mercator** que l'on doit les estimations de rayon terrestre de l'époque.

De long en large

1687

Isaac Newton énonce la loi de l'attraction universelle.

1880

Formulation de la définition de la géodésie par Friedrich Robert Helmert.

9,81

Constante de gravitation au niveau de la surface terrestre.

6 378,1 km

Rayon terrestre équatorial.

6 356,8 km

Rayon terrestre polaire.

10 911 m

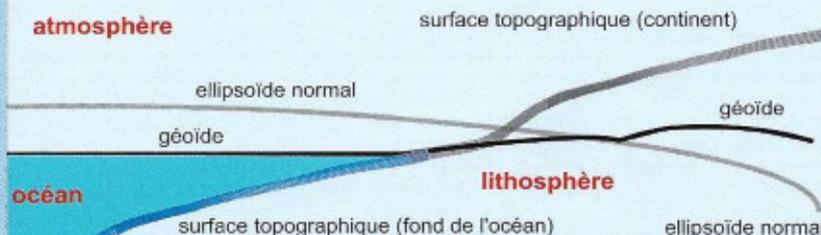
Plus grande dénivellation au-dessous de la mer (fosse des Mariannes).

Le mont Everest

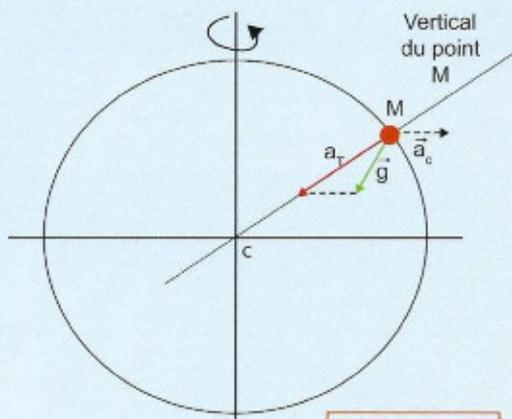


8 848 mètres

Les différentes définitions de la figure terrestre



Champ de gravité terrestre



C : centre de la terre
 \vec{a}_t : attraction terrestre
 \vec{a}_c : accélération centripète (mouvement de rotation)
 \vec{g} : accélération de la pesanteur

différents points de la surface terrestre pourra donc être très variable. Si l'on se place par exemple à proximité d'une montagne, on constate que la force de gravité se décale légèrement de la verticale et s'incline en direction de la montagne.

BILAN DES FORCES SUBIES PAR UN POINT MATÉRIEL

Outre l'attraction gravitationnelle exercée par la Terre, les points en surface de la Terre sont soumis à d'autres forces. La première est la force centrifuge due à la rotation de la Terre autour de son axe. Elle s'exerce perpendiculairement à l'axe de rotation de la Terre. L'intensité de cette force est fonction de la distance du point considéré à l'axe de rotation de la Terre. L'autre source de perturbation du champ de gravitation terrestre est l'attraction exercée par les autres astres. Cette attraction est plus ou moins grande selon la masse de ces astres et leur distance à la Terre. On peut considérer que seuls la Lune (de par sa faible distance) et le Soleil (de par sa masse très importante) exercent une force non négligeable sur les points de la surface terrestre. La force exercée par la Lune est connue de longue date puisqu'elle est à l'origine du phénomène de marée. L'eau constituant les océans étant un système plus mobile que les roches des continents, c'est là qu'on constate les effets du champ de gravité parasite. Il n'en reste pas moins que les roches constituant les continents subissent le même genre de contraintes.

LE POSITIONNEMENT GÉOGRAPHIQUE

Le positionnement géographique consiste à déterminer les coordonnées d'un point, que ce soit sur un continent ou à la surface d'un océan. Il peut s'effectuer depuis la surface terrestre, en procédant par triangulation, ou depuis l'espace grâce aux systèmes de positionnement par satellite tels le GPS. L'une des applications du



positionnement est de réaliser un grand nombre de relevés afin d'alimenter la cartographie.

LES SYSTÈMES DE COORDONNÉES

La position d'un point dans un espace à trois dimensions est communément décrite par des coordonnées cartésiennes. Une base cartésienne est formée de trois directions perpendiculaires les unes aux autres. Pour former un système de coordonnées, il faut ajouter une origine à cette base. On y décrit alors l'emplacement d'un point par l'usage de trois variables x , y et z qui quantifient la distance d'un point à cette origine selon chaque direction. En application au positionnement terrestre, il est classique de choisir le

centre de la Terre comme origine du système de coordonnées. La représentation tridimensionnelle n'est cependant pas toujours très adaptée pour estimer la position d'un point de la surface terrestre. En cartographie ou en topographie on a plus souvent recours à des systèmes plans. Différents systèmes peuvent être utilisés :

- Les coordonnées polaires planes : un point est repéré par sa distance s à l'origine et l'angle formé entre l'axe reliant ce point à l'origine et un axe de référence
- Les coordonnées cartésiennes planes : un point est repéré par les distances le séparant de deux axes perpendiculaires x et y pointant respectivement vers le nord et l'est.

LE POSITIONNEMENT

Le positionnement est la détermination des coordonnées d'un point dans une base donnée. Ce positionnement ne peut se faire que par référence à d'autres points de position connue. Le problème du positionnement peut se formuler de la façon suivante : étant donné un point A de position connue et un point B de distance et direction à A connues, quelles sont les coordonnées du point B ? La détermination des coordonnées d'un point fait appel à la méthode de la triangulation. Cette méthode consiste à viser deux points fixes depuis le point à positionner et à relever les directions de visée. En traçant ensuite ces droites sur une carte, on peut ainsi localiser la position du point recherché comme l'intersection des deux droites.

La cartographie est bien entendu l'application principale du positionnement. Chaque pays a participé à la constitution progressive de réseaux de points de position déterminée. Ces réseaux existent à différentes échelles, choisies en fonction du niveau de détail recherché.

LES MESURES EN GÉODÉSIE

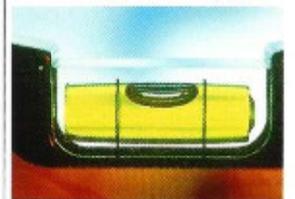
DÉFINITION DES OBSERVABLES

L'étude de la forme de la Terre et de son champ de gravité fait appel à différentes variables. Nous allons ici définir quelques points et directions de référence qu'il est courant d'employer en géodésie. La verticale est la direction parallèle au champ de gravité. Elle est partout perpendiculaire au géoïde que nous avons défini précédemment. Le zénith d'un point donné de la surface terrestre est l'intersection de la verticale partant de ce point avec la voûte céleste. À l'inverse, le nadir est pour un point donné de l'espace l'intersection de la verticale avec la surface terrestre. L'horizon céleste est le plan perpendiculaire au champ de gravité en un point donné. L'azimut est un angle du plan de l'horizon permettant de mesurer la distance au nord. L'élévation est l'angle qui mesure la distance d'un objet à l'horizon. L'élévation du zénith vaut donc 90° . Le pôle nord céleste est l'intersection de l'axe instantané de rotation de la Terre avec la voûte céleste en direction du nord (on définit similairement un pôle sud céleste). L'équateur céleste est l'intersection du plan équatorial terrestre avec la voûte céleste. Un plan méridien est un plan

contenant à la fois l'équateur céleste et les pôles célestes.

LES DIFFÉRENTS INSTRUMENTS DE MESURE

Ils permettent de localiser les points particuliers et directions privilégiées que nous venons de définir. L'un des instruments les plus rudimentaires est le fil à plomb. Constitué d'un fil dont l'une des extrémités est lestée d'un poids, il permet d'indiquer la direction verticale. Un autre instrument permet d'indiquer la direction horizontale : le niveau à bulle. Il existe différents types de niveaux. Le **niveau à bulle** est



constitué d'un tube partiellement rempli de liquide. Une fenêtre de lecture permet de visualiser la position de la bulle qui donne le repère d'horizontalité. Le niveau optique est quant à lui constitué d'une lunette fixée sur un trépied. Il permet de mesurer des dénivellés et de déduire l'altitude des points de repère. Parmi les instruments un peu plus sophistiqués, on trouve le théodolite. Cet instrument est constitué d'une lunette montée sur deux axes (un vertical et un horizontal). Chaque axe est équipé d'une graduation qui permet la mesure d'angles.

L'APPORT DES SATELLITES

Depuis quelques décennies, la géodésie connaît un nouvel élan grâce à l'avènement de l'ère du spatial. Le problème de la triangulation peut être abordé de manière tout à fait révolutionnaire grâce au système de positionnement par satellite (le GPS).



Le GPS est une constellation de 24 satellites orbitant à une altitude de 20 000 km. Ces satellites émettent en permanence des signaux qui peuvent être captés depuis les récepteurs GPS terrestres. La réception du signal d'un satellite permet à l'utilisateur de connaître sa distance par rapport à ce satellite. Le recoupement de cette information pour 4 satellites différents permet le positionnement absolu du point. Mais le positionnement n'est pas le seul apport du spatial. Il existe en effet une pléiade d'instruments scientifiques permettant d'acquérir des informations sur la forme de la surface terrestre et le champ de gravité. L'utilisation d'instruments à base de technique laser permet la détermination de la topographie des continents et de la hauteur des océans. Il s'agit d'envoyer une onde laser depuis le satellite et de réceptionner l'onde réfléchie par la surface terrestre (ou océanique). Le temps que met l'onde à revenir au satellite est fonction de la distance parcourue. On peut ainsi accéder à l'altitude du point au nadir du satellite.

TEMPS MODERNES

La révolution scientifique du xv^e donna un nouvel essor à la géodésie grâce à l'invention d'instruments adaptés : les **télescopes** et les théodolites. Le



développement d'outils de calcul adaptés tels les tables de logarithmes a aussi permis des avancées majeures en termes de précision de la technique de triangulation et de la mesure de la courbure de la surface terrestre. Picard fut à l'origine des premières mesures de courbure, ensuite relayé par Cassini. L'idée commença alors à émerger que la forme du globe terrestre relevait davantage de l'ellipsoïde (figure géométrique de forme oblongue) que de la sphère parfaite. En réponse à ces interrogations, l'Académie des sciences française lança une expédition dont la mission consistait à mesurer la distance entre des couples de points du globe de verticales formant un angle donné. La distance entre de tels couples de points augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche des pôles dans le cas d'une planète oblongue. Ces expéditions permirent de conclure à l'ellipticité de la terre et d'en mesurer le ratio de l'aplatissement : 1,210. George Everest constata au xix^e siècle que la verticale (direction indiquée par un fil de plomb) tendait à dévier vers la direction des montagnes. Ce phénomène est la conséquence de l'attraction gravitationnelle subie par un objet proche de vastes masses de roches. Ces observations remettaient donc en question le fait que la figure de la Terre soit un simple ellipsoïde. La figure du champ de gravité terrestre est en effet plus irrégulière. L'étude de ces irrégularités constitua l'étape suivante de l'histoire de la géodésie.

QUELQUES NOTIONS DE GÉOPHYSIQUE

DÉFINITION DU CHAMP DE GRAVITÉ TERRESTRE

Newton est connu pour avoir postulé l'existence de la loi d'attraction universelle. Celle-ci énonce que deux corps de masses données s'attirent mutuellement avec une force dont l'intensité croît avec les masses des corps et décroît avec la distance séparant les corps. Dans le cas de figure qui nous intéresse, cela signifie que tout objet au voisinage de la Terre subira une force dirigée vers le centre de la Terre (la rétraction de cet objet sur la Terre est négligeable). On parle de champ de pesanteur pour décrire l'effet attractif auquel sont soumis les objets. Dans la pratique, on constate que tous les objets chutent selon la même direction verticale, qui est en fait la direction perpendiculaire au géoïde. À la surface de la Terre, le champ de pesanteur vaut approximativement 9,81 N/kg. La force de gravitation varie avec la distance séparant les corps mis en jeu, aussi la force de pesanteur qu'exerce la Terre sur les objets qui l'entourent diminue avec l'altitude de ceux-ci au-dessus de la surface.

VARIATIONS DE LA PESAUTEUR

Il faut maintenant nuancer la définition précédente par le fait que la Terre n'est pas un point matériel de petite taille mais une sphère aplatie aux pôles dont la masse n'est pas uniformément répartie au sein de la figure terrestre. Le champ de pesanteur n'est par conséquent pas tout à fait le même en tout point de la Terre. En raison de l'ellipticité de la Terre, la pesanteur varie avec la latitude du point considéré. Le rayon terrestre est en effet moins important aux pôles qu'à l'équateur. La distance entre un corps en surface et le centre de la Terre est donc plus élevée à l'équateur, ce qui entraîne une pesanteur moindre. D'autre part, la croûte terrestre est une couche d'épaisseur variable et constituée de roches de densité variable. La masse présente en