

## Cartographie

### (Projections cartographiques et systèmes de coordonnées)

#### 1. Introduction générale

La détermination des coordonnées et de diverses caractéristiques de points dans l'espace occupe une place importante dans la plupart des études. L'objectif de ces déterminations est généralement l'étude de l'aspect géographique des inter-relations entre les divers paramètres ou indicateurs relevés.

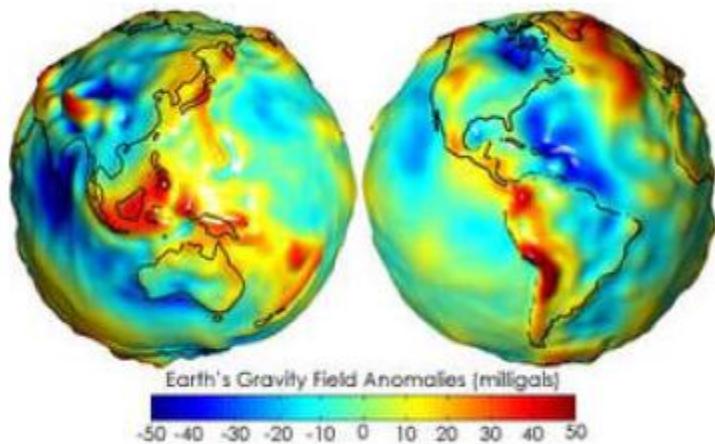
Dans une première partie, nous rappellerons les notions géodésiques de base nécessaire à la compréhension de ce cours.

#### Le besoin??

Pour les besoins cartographiques, on doit présenter sur une surface plane l'image de la terre assimilée à un ellipsoïde, ce qui nécessite l'utilisation d'une représentation plane (ou projection). Les coordonnées planes ainsi obtenues permettent la mesure directes sur la carte (angles, surfaces) mais toutes les représentations planes engendrent des déformations (les distances ne sont jamais conservées)

#### 2. La forme de la Terre

La Terre n'est pas plate. Ça, à peu près tout le monde le sait. La Terre n'est pas non plus une sphère, elle est aplatie aux pôles. Ça, beaucoup de monde le sait également. Mais la Terre n'a pas une forme régulière, c'est en fait un **géoïde**. Et ça, beaucoup moins de personnes le savent :

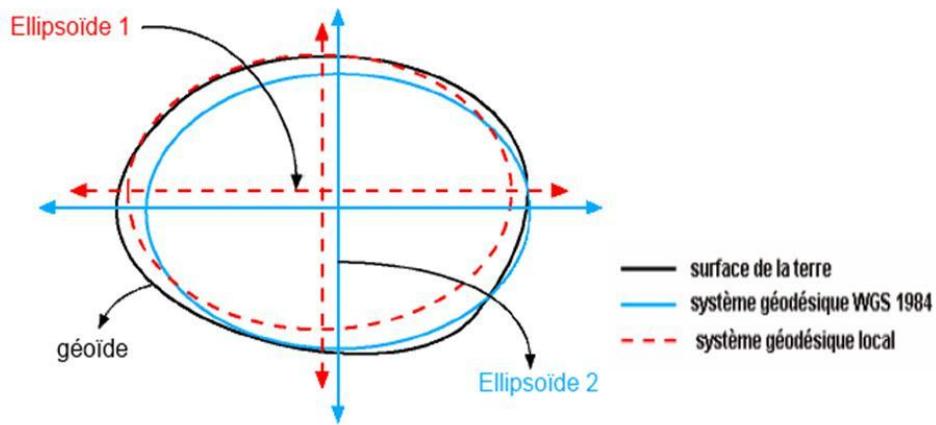


**Figure . Le géoïde**

Mais un **géoïde** est une forme géométrique trop complexe pour permettre des calculs performants, et donc pour être utilisée comme représentation de la Terre dans un système SIG. On considérera donc qu'elle a plutôt la forme d'un **ellipsoïde**, qui se définit par un rayon équatorial ( $a$ ), et un rayon polaire ( $b$ ) :

De nombreuses études se sont penchées sur la forme exacte de la Terre. La Terre, avec toutes ses irrégularités, ne peut être considérée comme un **ellipsoïde** parfait dans un système SIG. Cela

entrainerait de trop grosses approximations. (Par exemple, le pôle sud est dans la réalité plus proche de l'équateur que le pôle nord). On représentera donc la Terre par une combinaison de plusieurs ellipsoïdes, avec des caractéristiques différentes (rayons différents). Cette combinaison permettra de se rapprocher de la forme de géoïde :



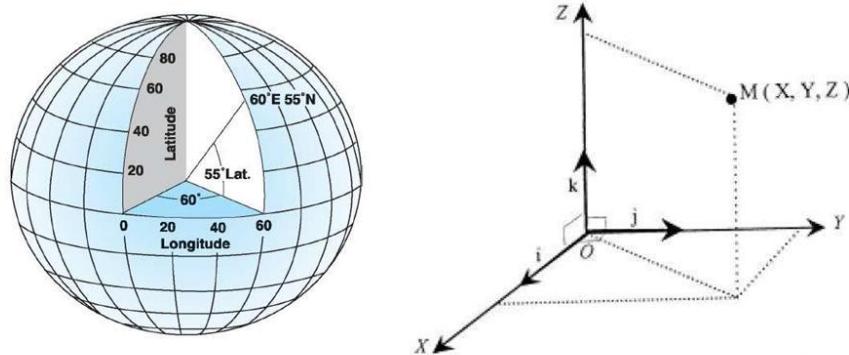
**Figure . Les ellipsoïdes de référence**

Lorsqu'on veut travailler avec une zone particulière du globe (un continent, un pays, ...), on sélectionne alors le meilleur ellipsoïde, c'est-à-dire celui représentant le mieux la courbure de la Terre dans cette zone. Ainsi, ce sont 2 ellipsoïdes différents qui représenteront la Terre selon que l'on veut modéliser des données aux États-Unis ou en Europe par exemple.

### 3. Le système géodésique (SG) ou système de référence géodésique ou Datum (anglais)

Un système géodésique est un repère affine possédant les caractéristiques suivantes :

- le centre O est proche du centre des masses de la Terre
- l'axe OZ est proche de l'axe de rotation terrestre
- le plan OXZ est proche du plan méridien origine



*Le monde sous forme de globe affichant les valeurs de longitude et de latitude.*

**Figure . Longitude et latitude**

Les coordonnées géodésiques du point M ne sont pas des valeurs objectives mais bien dépendantes d'un modèle théorique. Un point de la croûte terrestre est considéré fixe par rapport au système géodésique, malgré les petits déplacements qu'il peut subir (marée terrestre, surcharge océanique,

mouvements tectoniques). Ainsi, il apparaît la nécessité de disposer d'une surface de référence : l'ellipsoïde.

### 3.1. Le réseau géodésique

Un réseau géodésique est un ensemble de points de la croûte terrestre (tels que des piliers, des bornes...) dont les coordonnées sont définies, estimées par rapport à un système géodésique. Plusieurs types de réseaux sont distingués :

- les réseaux planimétriques
- les réseaux de niveling
- les réseaux tridimensionnels géocentriques

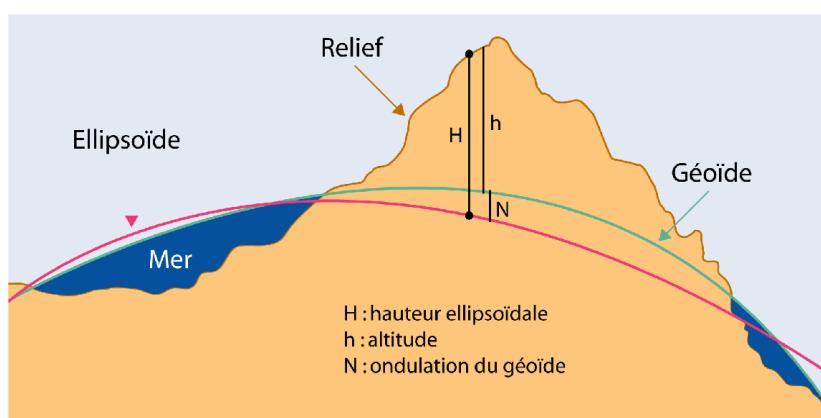
### 3.2. Les surfaces

Plusieurs surfaces sont à considérer lorsque l'on s'intéresse au positionnement géodésique.

La première est bien évidemment la **surface topographique**. C'est elle qui joue le rôle d'interface entre partie solide et partie liquide ou gazeuse de la Terre. C'est elle que nous connaissons le mieux, d'un point de vue sensoriel et physique, elle est l'objet de nombreuses sciences et techniques.

Le **géoïde** est la seconde surface à considérer. Elle se définit comme la surface équipotentielle du champ de pesanteur. L'accélération de pesanteur ( $g$ ) lui est donc normale en tout point. Une excellente réalisation physique de cette équipotentielle est la surface moyenne des mers et océans. Mais sous les continents, l'accès à cette surface ne peut être qu'indirect. On retiendra donc la réalité physique indéniable de cette surface tout en gardant à l'esprit les difficultés que nécessite sa détermination.

Enfin, l'**ellipsoïde** de révolution représente la dernière surface. Modèle mathématique défini pour faciliter les calculs et pour qu'il soit le plus près possible du géoïde, il peut être local ou global, selon le champ d'application souhaité du système géodésique auquel il est associé (couverture mondiale ou d'un territoire seulement).



**Figure . Différence entre altitude (géoïde) et hauteur (ellipsoïde)**

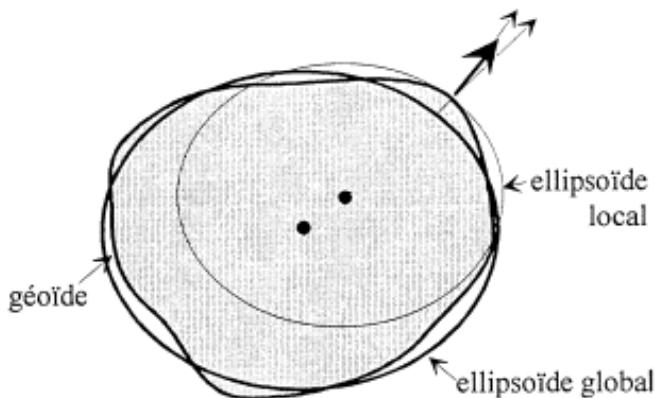
### 3.3. Géoïde, Ellipsoïde et Datum

Un **géoïde** est une représentation de la surface terrestre plus précise que l'approximation sphérique ou ellipsoïdale. Il correspond à une équipotentielle du champ de gravité terrestre, choisie de manière à coller au plus près à la « surface réelle ». Il sert de zéro de référence pour les mesures précises

d'altitude. Mais cette surface irrégulière est difficile à utiliser dans les calculs, et on préfère alors utiliser un **ellipsoïde**.

Un **ellipsoïde** est une surface régulière qui lorsqu'elle est bien choisie (centre, dimensions, orientation...) s'écarte au maximum de quelques dizaines de mètres du géoïde. L'ellipse est un ovale doté d'un grand axe (l'axe plus long) et d'un petit axe (l'axe plus court). Pour l'ellipsoïde terrestre, le demi-grand axe est le rayon entre le centre de la Terre et l'équateur, alors que le demi-petit axe est le rayon entre le centre de la Terre et le pôle.

Un **datum** (ellipsoïde local) est créé sur l'ellipsoïde sélectionné et peut incorporer des variations locales d'altitude. Le datum et l'ellipsoïde sous-jacents par rapport auquel les coordonnées d'un jeu de données sont référencées peuvent changer les valeurs de coordonnées. Par rapport à l'ellipsoïde, le géoïde présente des écarts maximaux de 100 m.



**Figure . Notion d'ellipsoïde (datum)**

Pour définir un système de coordonnées géographiques, un ellipsoïde n'est pas suffisant. Il faut également positionner l'origine de l'ellipsoïde par rapport au centre de la terre, et définir l'orientation des lignes de latitude et de longitude. Le système géodésique, aussi appelé **datum**, permet de définir ces paramètres.

On distingue 2 types de systèmes géodésiques :

- Les systèmes géodésiques globaux, ou géocentriques.
- Les systèmes géodésiques locaux.

## **LE SYSTEME GEODESIQUE GLOBAL**

Lorsqu'on a besoin de coordonnées à l'échelle de la Terre entière, on va devoir choisir un système de coordonnées basé sur un ellipsoïde qui épouse au mieux la forme de la Terre. Comme je l'ai écrit plus haut, la Terre a une géométrie complexe, et ne peut pas être représentée par un ellipsoïde de façon précise à tous les points du globe. Lorsqu'on utilise un tel système, on admet donc une certaine **marge d'erreur** dans la précision des coordonnées de notre système.

L'origine de cet ellipsoïde sera alors le centre de la Terre. (Il n'y aura pas de décalage permettant de faire correspondre au mieux l'ellipsoïde à un endroit particulier du globe.) Les lignes de latitude et de longitude seront alignées avec les méridiens et les parallèles.

Le système géodésique **WGS84**, par exemple, est basé sur l'ellipsoïde qui, globalement, représente le mieux la forme de la terre. C'est aujourd'hui devenu la référence des systèmes géocentriques, est utilisé à peu près partout : Applications GPS, Google Maps, Bing Maps, OpenStreetMaps, ... Sa précision est en moyenne de 1 à 2 mètres, ce qui est déjà très bien pour un système géocentrique.

### LE SYSTEME GEODESIQUE LOCAL

Lorsqu'on définit un système géodésique local, on s'arrange pour faire correspondre un point de la surface de l'ellipsoïde à un point de la surface de la terre. Ce point commun à l'ellipsoïde et au globe terrestre est appelé **point d'origine du système géodésique**. Les coordonnées du point d'origine sont fixes et tous les autres points sont calculés à partir de ce point d'origine. (Attention, ne pas confondre l'origine de l'ellipsoïde, qui est le centre de l'ellipsoïde, et l'origine du système géodésique défini ci-dessus)

L'origine de l'ellipsoïde ne se trouve pas au centre de la terre, mais est décalé par rapport à celui-ci. Puisqu'un système géodésique local aligne son ellipsoïde très précisément sur une zone particulière de la surface de la Terre, il n'est pas adapté à une utilisation en dehors de la zone pour laquelle il a été conçu. Par contre, il est beaucoup plus précis qu'un système géocentrique dans la zone pour laquelle il a été défini. Pour certains, on atteint une précision minimale de 5 mm sur tout un pays. (On peut identifier n'importe quel point du pays avec une précision de 5 mm !)

Pour résumer, un beau petit graphique, tiré tout droit du site d'**Esri**, vaut bien mieux que des lignes de texte supplémentaires :



**Figure . Exemple de datum**

## 4. LES SYSTEMES DE COORDONNEES GEOGRAPHIQUES

Voilà, après tous ces préliminaires, on peut enfin définir ce qu'est un **système de coordonnées géographique**.

La Terre est assimilée à un ellipsoïde. Cet ellipsoïde est ensuite utilisé dans un système géodésique (**datum**). Il reste à définir une origine et une unité pour les mesures, et on obtient un système de coordonnées géographiques. L'origine est tout simplement le **méridien d'origine** qui aura comme

latitude 0. La mesure des angles est en général exprimée en degrés décimaux ou en degrés/minutes/secondes. On pourrait par contre tout à fait imaginer un système de coordonnées utilisant des radians comme unité de mesure, mais traditionnellement ça ne se fait pas.

Il existe des centaines de systèmes de coordonnées géographiques différents. Pour avoir un ordre d'idée, lorsqu'on installe un serveur Esri 10.2.2, le logiciel connaît 672 systèmes différents. La grande majorité d'entre eux ont comme méridien d'origine **Greenwich**, et comme unité de mesure des **degrés**.

Voici quelques exemples de systèmes de coordonnées géographiques :

SYSTEME	DATUM	ELLIPSOÏDE	MERIDIEN D'ORIGINE	UNITE	ZONE
WGS-84	WGS-84	WGS-84	Greenwich	degrés	Monde
ATF (Paris)	ATF	Plessis 1817	Paris RGS	gradians	France métropolitaine
CH-1903+	CH1903+	Bessel 1841	Greenwich	degrés	Suisse, Liechtenstein
Padang (Jakarta)	Padang 1884 (Jakarta)	Bessel 1841	Jakarta	degrés	Indonésie, Sumatra
NZGD-49	NZGD-49	International 1924	Greenwich	degrés	Nouvelle-Zelande
NAD-83	NAD-83	GRS 1980	Greenwich	degrés	Amérique de nord

#### 4.1. Systèmes de coordonnées projetées

##### 4.1.1. Définition des projections

**Projection** : C'est une fonction mathématique qui fait correspondre à un ellipsoïde un plan de projection en transformant les coordonnées sphériques du globe (longitude, latitude, [deg,min,sec]) en coordonnées planaires plates (coordonnées cartésiennes [x,y]) identifiés par des coordonnées x, y sur une grille, dont l'origine est située au centre de cette grille. Chaque position possède deux valeurs qui la situent par rapport à cet emplacement central. (Figure. 6).

Un système de coordonnées projetées est toujours basé sur **un système de coordonnées géographiques**, lui-même basé sur une sphère ou un ellipsoïde. Un système de coordonnées projetées se définit sur une surface plane, à deux dimensions. Contrairement à un système de coordonnées géographiques, un système de coordonnées projetées possède des **longueurs**, des **angles** et des **surfaces constants** dans les deux dimensions.

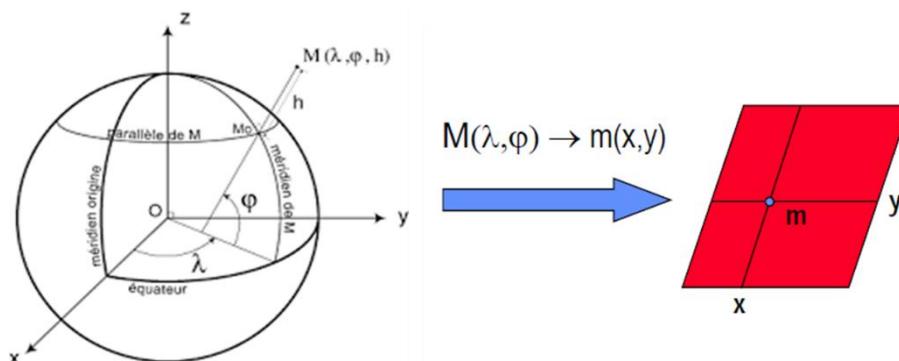


Figure . Principe de la projection cartographique

##### 4.1.2. Types de projections

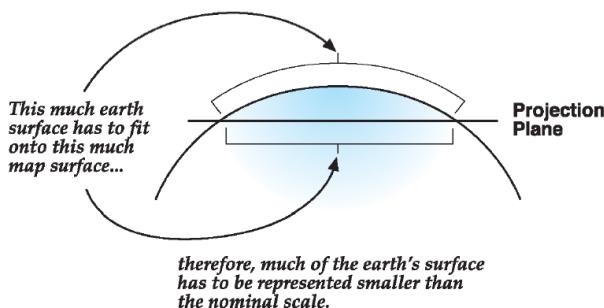
L'objectif des projections cartographiques est d'obtenir une représentation plane du modèle ellipsoïdal de la surface de la Terre. L'intérêt majeur réside alors dans les valeurs métriques, beaucoup plus facilement exploitables, en particulier pour les mesures de distance.

Mais une projection ne peut jamais se faire sans qu'il y ait de déformations. Pour s'en convaincre, il suffit d'essayer d'aplatir la peau d'une orange ! Néanmoins, par calcul, il est possible de définir le type et les paramètres d'une projection dans le but de minimiser certaines déformations. On choisit alors :

- soit de **conserver les surfaces** (projections équivalentes)
- soit de **conserver localement les angles** (projections conformes)
- soit de **conserver les distances à partir d'un point donné** (projections équidistantes)
- soit d'opter pour une représentation ne conservant ni les angles ni les surfaces (projections dites aphylactiques).

Les méthodes de projection varient par les surfaces développables. Elles définissent les formes de projection. Les exemples les plus courants sont: les cônes, les cylindres et les plans (Figure 2.7). On parle de :

- Projection conique
- Projection cylindrique
- Projection planaire

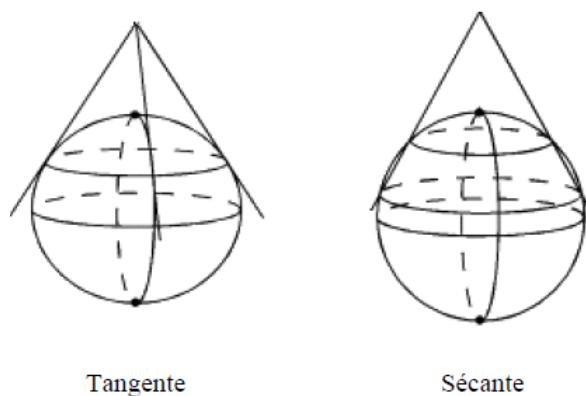


**Figure . Déformations dues aux projections**

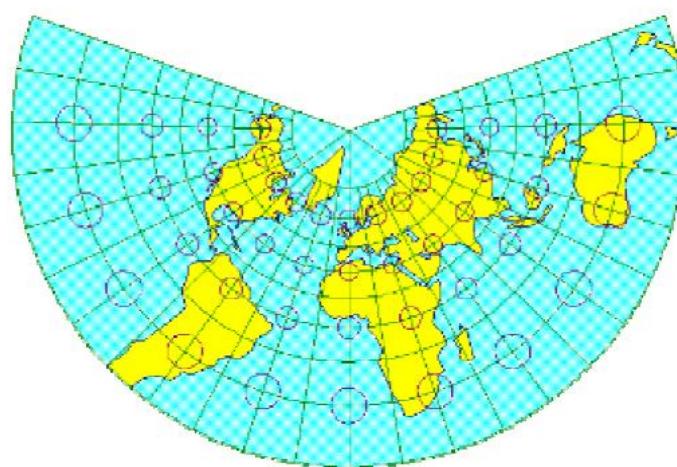
### a) Projections coniques

Dans le cas d'une projection conique, nous pouvons visualiser la Terre projetée sur un cône tangent ou sécant, qui est alors coupé sur la longueur et étendu. Les parallèles (lignes de latitude), sont représentés par des arcs de cercles concentriques, et les méridiens (lignes de longitude), par des lignes droites, également espacées.

Ce système de projection est utilisé pour dresser les cartes de régions situées au nord de l'Équateur, telles que le Canada et les États-Unis. Ainsi, il y a moins de distorsion de l'ensemble des formes du territoire et des eaux. La projection conique conforme de Lambert est une version couramment utilisée de type conique.



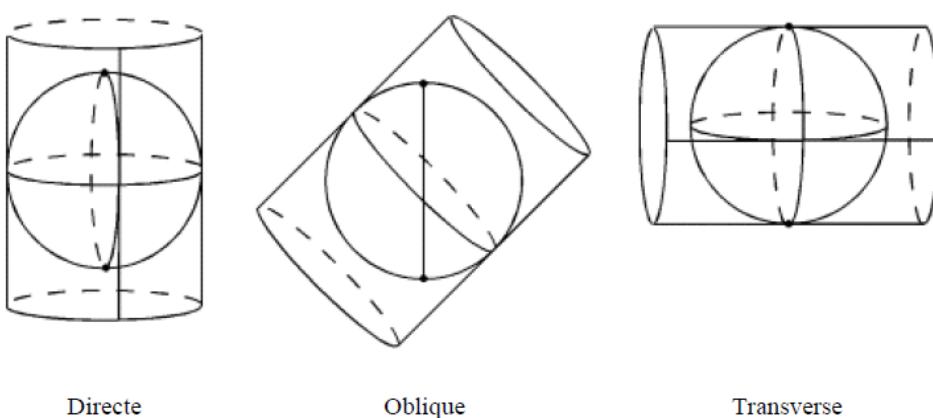
**Figure 8. Les projections coniques**



**Figure . Projection conique conforme de Lambert**

### b) Projections cylindriques

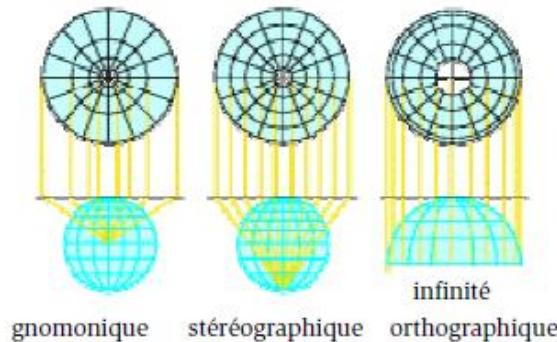
Dans ce type de représentation, l'image des méridiens est un faisceau de droites parallèles, et l'image des parallèles, un faisceau de droite parallèles, orthogonales à l'image des méridiens. Elles peuvent être réalisées de trois façons :



**Figure . Les projections cylindriques**

### c) Projections azimutales

Dans ce type de représentation, les images des méridiens sont des demi-droites qui concourent en un point image du pôle. Les parallèles sont des cercles entiers concentriques autour de ce point.



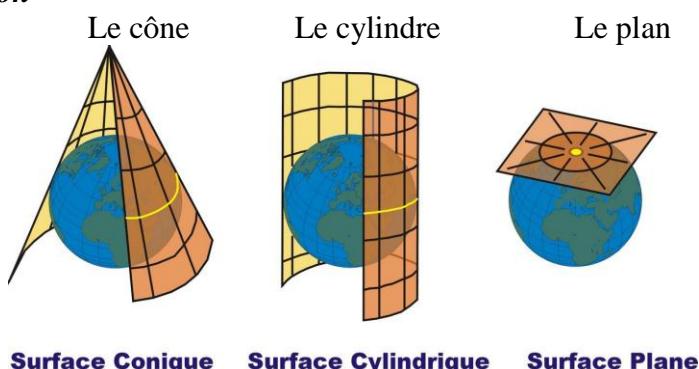
**Figure 11. Projection azimutale équivalente de Lambert**

### Système de projection

Un système de projection peut être décrit par les caractéristiques suivantes :

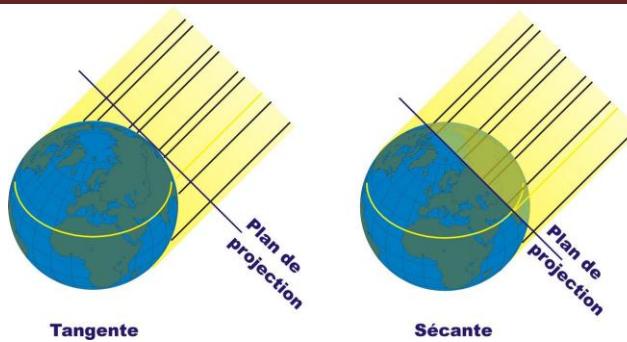
- la surface de projection,
- la position de la surface développable,
- les aspects du système de projection,
- les altérations des éléments de la surface à représenter.

### *La surface de projection*

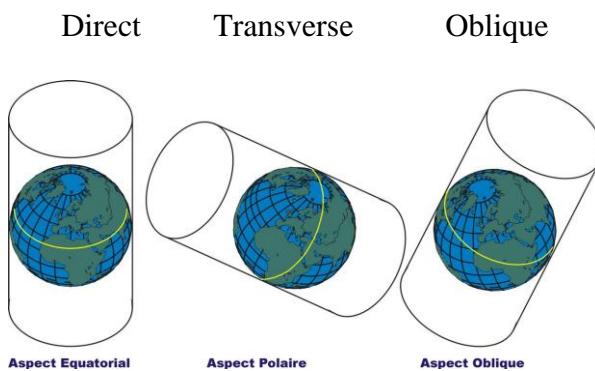


### *Position de la surface développable (point de contact avec l'ellipsoïde ou la sphère)*

Tangente                    Sécante



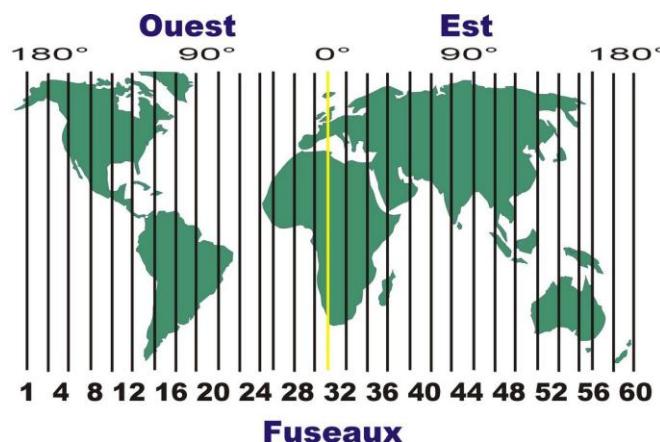
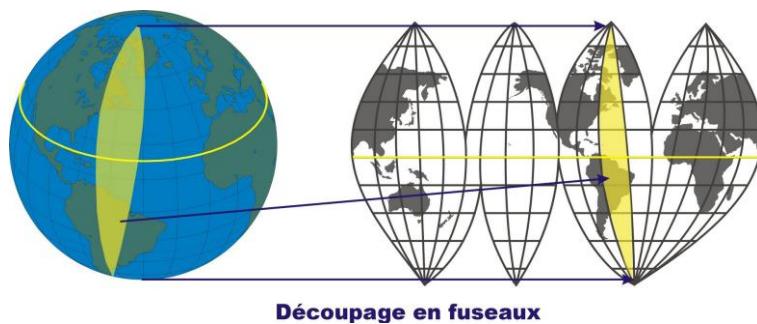
*Aspect du système de projection (position de la surface de projection)*



### Exemples

*Le système UTM (Universel Transverse Mercator) :*

Projection conforme cylindrique de l'ellipsoïde terrestre sur un cylindre tangent à un méridien. On a défini un découpage terrestre en 60 fuseaux avec une zone de 3° de part et d'autre.



### 4.1.3. Critère de choix d'une projection

S'il existe tant de projections cartographiques, c'est parce qu'aucune n'est apte à satisfaire tous les besoins. Le choix d'une projection cartographique qui convienne à une application donnée dépend d'un ensemble de facteurs, dont :

- l'objectif de la carte ou le but de l'utilisation de la carte ;
- le type de données à y faire figurer ;
- la région du monde à représenter et l'échelle de la carte finale ;

Pour la navigation, des directions adéquates sont importantes ; sur des cartes routières, des distances précises sont importantes et pour les cartes thématiques (qui présentent des données concernant la région), la bonne dimension et formes des régions sont importantes.

D'autres considérations quant au choix de la meilleure projection sont l'étendue et le lieu de la région dont on veut dresser la carte. Quant à l'étendue de la carte, plus le territoire à être cartographié est grand, plus la surface courbée de la Terre est importante et par conséquent, la distorsion des propriétés «souhaitables» est plus grande.

Quant au lieu à cartographier, les conventions suivantes peuvent être appliquées : pour des régions de basse latitude (près de l'équateur), utilisez des projections cylindriques ; pour des régions de latitude moyenne, utilisez des projections coniques ; et pour des régions polaires, utilisez des projections azimutales. Le but est toujours de trouver une projection réduisant au minimum les distorsions pour la partie de la surface terrestre représentée. Ainsi, un pays dont le territoire s'étale en direction Nord-sud choisira une projection cylindrique transversale, par contre un pays dont le territoire s'étale en direction Est-Ouest choisira une projection conique.

## 5. Système cartographique en Algérie

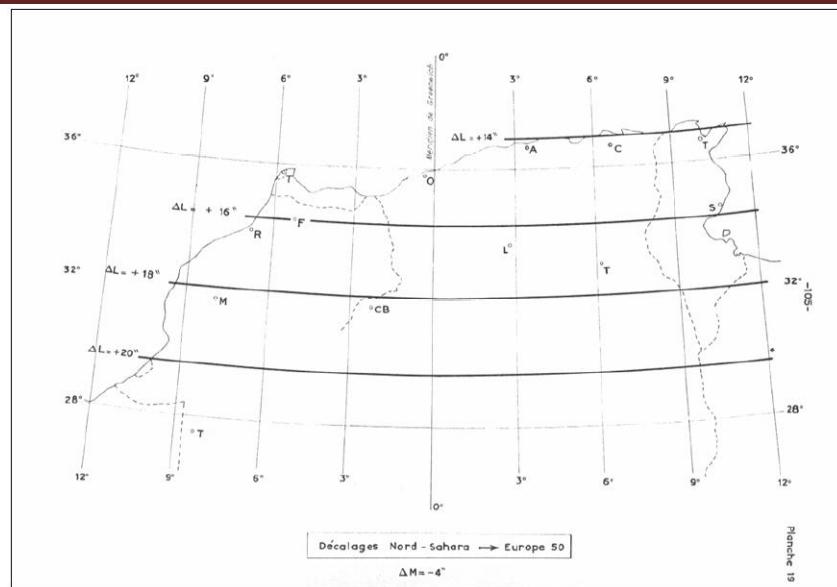
### 5.1. Système géodésique Nord Sahara 1959

En 1959, l'IGN était en possession d'un réseau de 1er ordre compensé dans le système Europe 50, sur l'ellipsoïde international de HAYFORD.

D'autre part, tout le système cartographique de l'IGN dans l'Afrique était basé sur l'ellipsoïde de Clarke 1880 recommandé à la conférence Internationale de Eukavu (Congo-Zaire) en 1953, et d'autre part, les cartes sahariennes étaient établies sur un canevas astronomique qui, arrivant au contact du réseau géodésique, présentait des hiatus ou des recouvrements variables, dont l'ordre de grandeur est appréciable pour la cartographie.

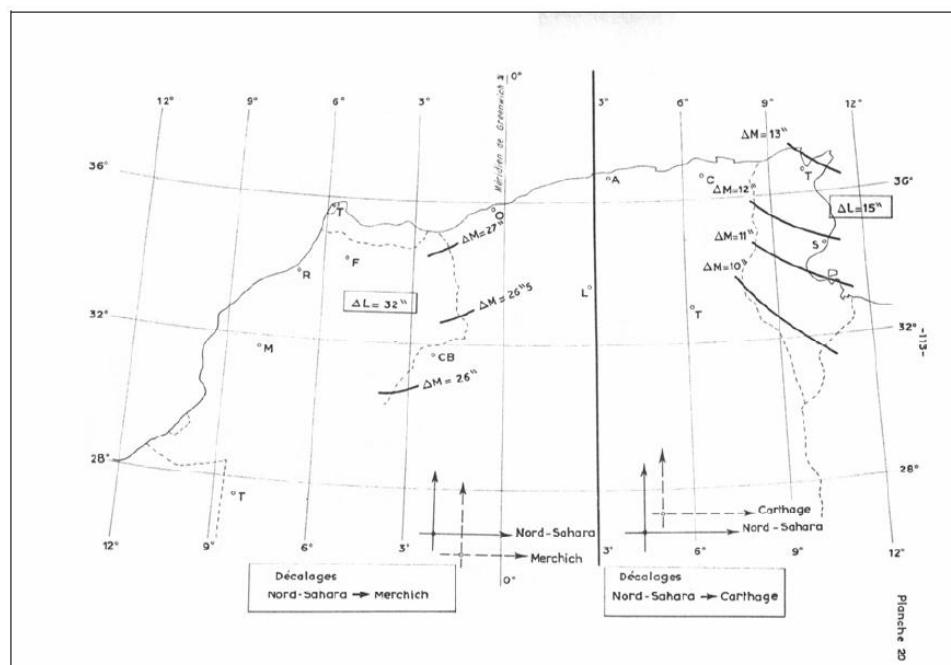
Pour concilier les deux canevas de triangulation avec les canevas astronomiques, l'IGN a établi sur l'ellipsoïde de Clarke un système de méridiens et parallèles tel que les discordances moyennes entre les coordonnées géographiques issues de la triangulation et les coordonnées géographiques issues de l'astronomie soient au minimum.

La planche suivante représente les décalages entre les latitudes du système Europe 50 et les latitudes correspondantes du système Nord-Sahara.



**Figure 12. Décalages entre les latitudes du système Europe 50 et les latitudes correspondantes du système Nord-Sahara.**

Les décalages des systèmes Merchich (Maroc) et Cartage (Tunisie) par rapport au système Nord-Sahara sont illustrés dans la figure suivante :



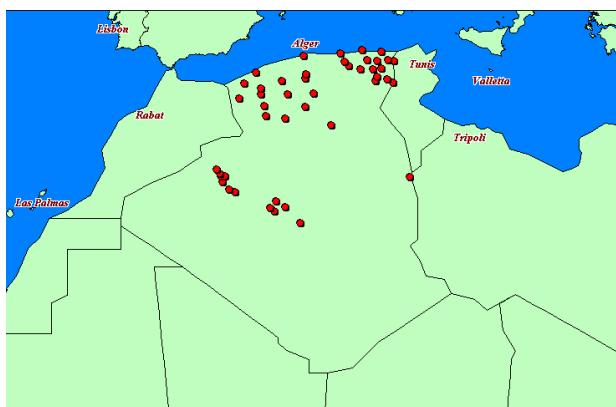
**Figure . Décalages des systèmes Merchich (Maroc) et Cartage (Tunisie) par rapport au système Nord-Sahara.**

## 5.2. Transformation entre le WGS 84 et le Nord-Sahara

La transformation des coordonnées issues du positionnement par GPS et donc exprimés dans le système WGS 84 au système local Nord Sahara en vigueur, nécessite la connaissance des paramètres de passage.

La détermination de ces paramètres a été effectuée sur la base de la connaissance des coordonnées des points doubles déterminées dans les deux systèmes. Le modèle de transformation tridimensionnel utilisé est celui dit modèle d’Helmert ou de Bursa Wolf à sept paramètres.

Sur un ensemble de 79 points géodésiques doubles connus dans les deux systèmes, 45 points ont servi à cette détermination, et dont la répartition géographique est illustrée dans la figure suivante :



**Figure . Répartition géographique des points ayant servi au calcul des paramètres de passage.**

L’écart type de cette détermination étant de 0.9288 m est jugé acceptable pour les travaux de cartographie.

## 5.3. Représentations cartographiques planes

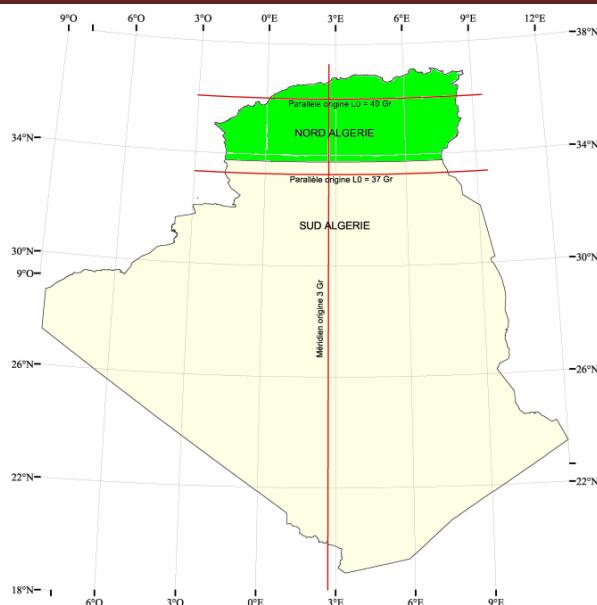
### 5.3.1. La projection Lambert

Durant la période coloniale, l’Algérie a utilisé la projection Lambert qui se caractérise par les points suivants :

#### a- Caractéristiques de la projection Lambert :

C'est une projection conique conforme tangente de Lambert. Dans le but de minimiser les déformations (altérations linéaires), l’Algérie a été découpée en deux zones :

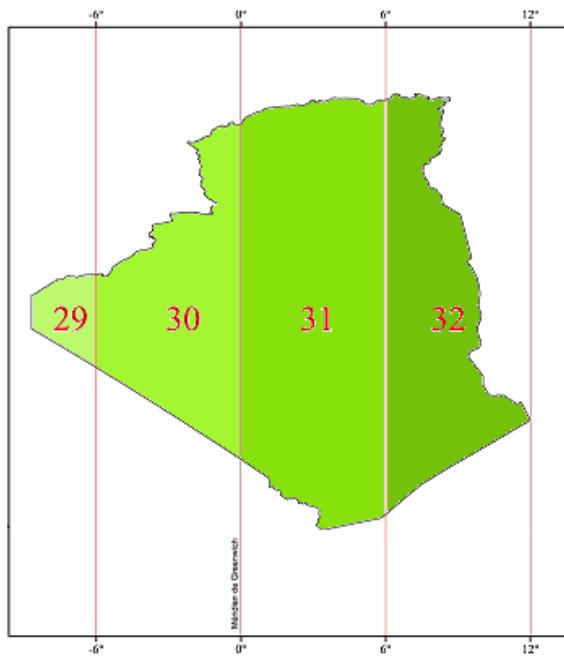
- Une projection appelée "Lambert Nord" qui couvre le nord de l’Algérie
- Une projection appelée "Lambert Sud" qui couvre le sud de l’Algérie.



**Figure . Projection Lambert en Algérie.**

### 5.3.2. La représentation cartographique UTM

La représentation cartographique plane en vigueur adopté par l'Algérie en 2003 est l'UTM (Universel Transverse Mercator). L'Algérie s'étale de l'Ouest à l'Est sur quatre fuseaux : le 29, 30, 31 et 32 soit de  $9^{\circ}$  à l'Ouest du méridien d'origine et à  $12^{\circ}$  à l'Est du méridien d'origine.



**Figure . Fuseaux de la projection UTM en Algérie.**

