

9 Projections cartographiques et systèmes de références

Miljenko Lapaine, Croatie and E. Lynn Usery, Etats-Unis

Traduction : Didier Halter et Jean-François Hangouet

Harmonisation : Felix de Montety

9.1 Introduction

Une carte est le résultat de la projection, sur la surface plane d'une feuille de papier ou d'un écran numérique, de mesures relatives à la Terre, à un corps céleste, à un monde imaginaire. Le plus souvent, la carte est créée en deux étapes : en rapportant d'abord les données du monde physique à une surface sphérique ou ellipsoïdale (le modèle géométrique du globe), puis le résultat à un plan. Les caractéristiques de ce modèle sont telles que les valeurs des angles, ou des distances, ou des aires qu'on y mesure sont proportionnelles à celles qu'on mesure dans la réalité. La transformation de la surface courbe sur un plan est connue sous le nom de projection cartographique et peut prendre une multitude de formes différentes, qui toutes engendrent des déformations d'angles, d'aires et/ou de distances. S'il est possible dans une projection cartographique de maîtriser telle déformation, de manière à préserver des caractéristiques spécifiques, d'autres caractéristiques des objets représentés seront nécessairement déformées. Le principal problème en cartographie est qu'il n'est pas possible de projeter ou de transformer une surface sphérique ou ellipsoïdale sur une surface plane sans générer de déformations. Seul un globe de forme sphérique ou ellipsoïdale convient à la restitution de toutes les caractéristiques liées à la rotondité de la Terre ou d'un corps céleste dans leurs véritables proportions.

Le processus de projection cartographique consiste en trois étapes spécifiques :

1) approcher la taille et la forme de l'objet (la Terre, par exemple) par une figure mathématique qui est soit une sphère, soit un ellipsoïde ;

2) réduire l'échelle de la figure mathématique à un modèle géométrique du globe (modèle réduit de la Terre à partir duquel les projections cartographiques seront effectuées) ; on nomme échelle principale, ou nominale, le rapport du rayon de ce modèle géométrique du globe au rayon homologue de la figure mathématique qui approche l'objet (la Terre), et qui équivaut à l'échelle de la carte ;

3) transformer le modèle géométrique du globe en une carte à l'aide d'une projection cartographique (fig. 9.1).

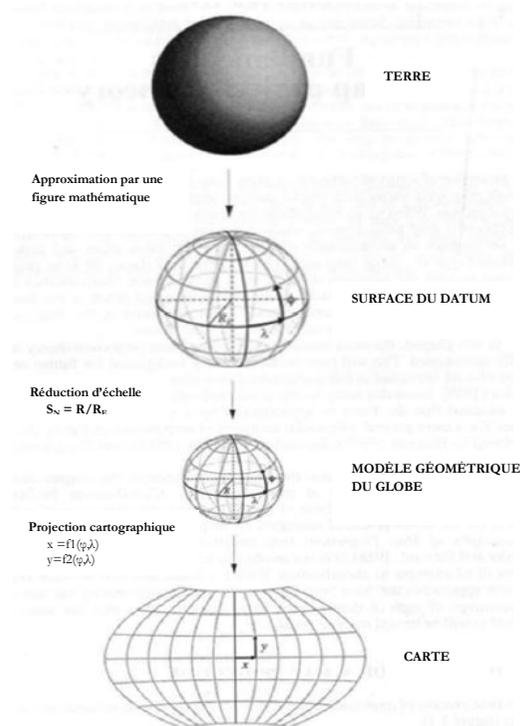


Figure 9.1. La projection cartographique de la Terre, depuis le modèle géométrique du globe jusqu'à la carte (Repris de Canters, 2002)

Les projections cartographiques dépendent d'abord d'hypothèses sur les paramètres spécifiques de l'objet lui-même (la Terre), comme sa forme (sphérique ou ellipsoïdale), le rayon de la sphère (ou les longueurs du demi-grand axe et du demi-petit axe de l'ellipsoïde), la position des axes et d'un point origine pour définir le système de coordonnées. La connaissance précise de ces paramètres est l'objet fondamental de la géodésie ; ils sont actuellement établis en recourant à des mesures satellitaires du type Système de positionnement mondial (Global Positioning System, GPS), Glonass, ou Galileo (voir ci-dessous § 9.2). Une fois ces valeurs fixées, l'expression ellipsoïdale des coordonnées peut être produite, sous forme de latitude et de longitude. Ces coordonnées elles-mêmes peuvent à leur tour être transformées, via des équations de projection cartographique, dans un repère cartésien plan aux coordonnées x et y . L'équation générale pour cette dernière transformation est de la forme :

$$x = f_1(\phi, \lambda) \quad y = f_2(\phi, \lambda)$$

où :

- x est la coordonnée plane dans la direction est-ouest (l'abscisse cartésienne).
- y est la coordonnée plane dans la direction nord-sud (l'ordonnée cartésienne).
- ϕ est la coordonnée ellipsoïdale appelée latitude.
- λ est la coordonnée ellipsoïdale appelée longitude.

Les formules adoptées pour les fonctions f_1 et f_2 déterminent totalement la transformation à effectuer et, avec elle, les caractéristiques de la représentation ellipsoïdale ou sphérique qui seront préservées.

Avant de traiter des différents types de transformation et des caractéristiques respectives qu'ils préservent, il est nécessaire de regarder plus en détail la nature géodésique des coordonnées ellipsoïdales et la manière dont celles-ci sont produites avec les systèmes modernes de positionnement par satellites.

9.2 Géodésie et systèmes de navigation par satellites (GNSS)

Les projections cartographiques ont leur application la plus fréquente dans la production de cartes destinées à montrer une portion plus ou moins grande de la surface terrestre. Pour dresser la carte d'une région, il est nécessaire de réaliser un levé géodésique de cette région et ensuite de visualiser les résultats de ce levé.

La géodésie est à la fois une technologie et une science qui traite des mesures et de la représentation de la surface de la Terre, de la détermination de sa forme, de ses dimensions ainsi que de son champ de gravité. La géodésie peut être divisée en trois disciplines : la géodésie appliquée, la géodésie physique, et la géodésie spatiale.

La géodésie appliquée est cette partie de la géodésie qui englobe la topographie, la géodésie d'ingénierie et la gestion de l'information géolocalisée. La topographie est une technique qui permet de mesurer la position relative des objets sur la surface terrestre, en faisant abstraction de la rotondité de la Terre. La géodésie d'ingénierie traite quant à elle de la conception, de la mesure et du contrôle des ouvrages d'art et autres objets (routes, tunnels, ponts...).

La géodésie physique est la partie de la géodésie qui traite du champ de gravité de la Terre et de ses effets sur les mesures de position. L'objectif principal de la géodésie physique est la détermination des dimensions du géoïde, surface équipotentielle du champ de pesanteur servant à modéliser la surface terrestre. La *géodésie géométrique* s'intéresse à la détermination de la forme de la Terre, à ses dimensions, à la localisation précise de ses différentes parties, ainsi qu'à la mesure de sa courbure.

La géodésie spatiale est la partie de la géodésie qui utilise les satellites pour effectuer des mesures. Dans le passé, la position absolue de points sur la Terre était

déterminée par des méthodes de géodésie astronomique, en réalisant des mesures par référence aux étoiles. Les techniques de mesure en géodésie spatiale sont celles qui utilisent à des fins géodésiques des systèmes de positionnement et de datation par satellites (GNSS) tels que GPS, Glonass et Galileo.

Un système de positionnement par satellites est une constellation de satellites artificiels de la Terre capable de fournir un positionnement géospatial en tout point du globe. Elle permet à de petits récepteurs électroniques de déterminer leur position (longitude, latitude, et altitude) avec une précision de quelques mètres en exploitant des signaux fréquentiels qui sont émis par radio par les satellites, et qu'ils sont capables de recevoir si tant est qu'aucun masque ne s'interpose entre récepteur et satellites. Les récepteurs calculent aussi bien l'heure précise que la position. Un système de positionnement par satellite qui offre une couverture mondiale peut être qualifié de « système de positionnement mondial par satellites », ou GNSS (pour « Global Navigation Satellite System »). En avril 2013, seuls les systèmes de positionnement NAVSTAR des États-Unis (GPS) et GLONASS de la Russie sont des systèmes GNSS opérationnels à l'échelle du globe. La Chine étend actuellement son système de positionnement régional Beidou pour en faire un GNSS d'ici 2020. Le système de positionnement Galileo de l'Union européenne est un GNSS qui est aujourd'hui dans sa phase de déploiement initial ; il ne sera pas opérationnel avant 2020 au plus tôt. La France, l'Inde et le Japon développent également des systèmes de positionnement régionaux. La couverture globale pour tout système mondial est généralement assurée par une constellation de 20 à 30 satellites d'altitude moyenne répartis sur plusieurs plans orbitaux. Les systèmes varient en pratique mais exploitent tous des orbites inclinées à plus de 50° et des périodes orbitales d'environ douze heures, pour une altitude de l'ordre de 20 000 kilomètres.

La photogrammétrie est une technologie performante pour acquérir des informations quantitatives fiables sur les objets physiques et sur l'environnement, en réalisant et en exploitant, au travers de mesures et d'interprétations, des photographies et, plus largement, des scènes de rayonnements électromagnétiques enregistrés par des capteurs dédiés. *La télédétection* est une méthode de recueil et d'interprétation de données sur des objets distants. La méthode est caractérisée par le fait que l'appareil de mesure n'est pas en contact avec l'objet à mesurer. La plupart de ces applications se font à partir de capteurs aériens ou satellitaires.

L'étude de la transformation allant d'un modèle de surface terrestre, ou d'un modèle géométrique du globe, à une représentation bidimensionnelle exige de recourir aux concepts suivants : ellipsoïde, datum géodésique, et système de coordonnées. Chacun de ces concepts est présenté ci-dessous.

L'ellipsoïde terrestre est tout ellipsoïde qui approche la forme de la Terre. Au sens le plus général, un ellipsoïde a trois axes différents, mais en géodésie et en cartographie, il s'agit le plus souvent d'un ellipsoïde de révolution, où l'aplatissement, en outre, est faible (fig. 9.2).

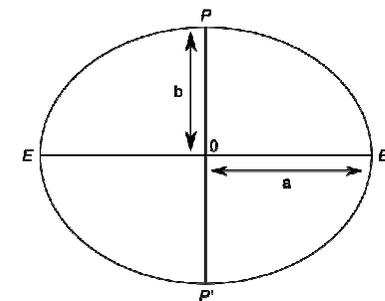


Figure 9.2. Caractéristiques de l'ellipsoïde de révolution : EE' est le grand axe, PP' est le petit axe et l'axe de révolution, a est le demi-grand axe et b est le demi-petit axe

L'ellipsoïde de révolution est la surface qui résulte de la rotation d'une ellipse autour d'une ligne droite passant par les extrémités opposées de l'ellipse. Il sert à modéliser la Terre. Les ellipsoïdes de la Terre les plus célèbres comptent celui qu'a élaboré Bessel (1841), et ceux, plus récents, qui sont associés aux systèmes WGS84 et GRS80. L'aplatissement est un paramètre utilisé pour caractériser la différence entre l'ellipsoïde et

la sphère. Il est défini par l'équation : $f = \frac{a-b}{a}$ où a

et b sont les longueurs des demi-grand et demi-petit axe, respectivement. Le demi-grand axe a est à considérer comme le rayon de la Terre à l'équateur, dans la mesure où l'équateur est un cercle. Le demi-petit axe b n'est pas le rayon d'un cercle, car toute section plane de l'ellipsoïde qui comprend à la fois les pôles P et P' est une ellipse, et non un cercle.

D'une façon générale, un datum est un ensemble de paramètres fondamentaux qui servent de référence pour la définition d'autres paramètres. Un datum géodésique exprime la relation de l'origine et de l'orientation des axes d'un système de coordonnées à la Terre. Au moins huit paramètres sont nécessaires pour définir un ellipsoïde global : trois pour la détermination de l'origine, trois pour la détermination de l'orientation du système de coordonnées et deux pour la détermination de l'ellipsoïde géodésique. Un datum à deux dimensions est une référence pour définir des coordonnées bidimensionnelles sur une surface. Cette surface peut être un ellipsoïde, une sphère ou même un plan quand la zone d'intérêt est relativement petite. Un datum unidimensionnel, aussi appelé datum vertical, est une base pour la définition des hauteurs, qui se trouve le plus souvent reliée, d'une manière ou d'une autre, au niveau moyen des mers.

Les ellipsoïdes des systèmes GRS80 et WGS84 ont été établis par des techniques de positionnement satellitaires. Ils sont centrés au centre de masse de la

Terre (c.-à-d. ils sont géocentriques) et fournissent un modèle qui convient à l'ensemble de la Terre. Le datum WGS84 constitue la référence des coordonnées collectées à partir du GPS, même si les récepteurs modernes sont capables de transformer les coordonnées dans presque n'importe quel datum choisi par l'utilisateur.

Le besoin de conversion de data se présente quand les données sont fournies dans un certain système, et qu'il est nécessaire de les exprimer dans un autre système (par exemple, quand il faut passer du datum WGS84 au datum NAD1927 nord-américain de 1927, ou vice versa). Il y a plusieurs manières différentes d'opérer les transformations de data, sur ce point les lecteurs sont invités à consulter la littérature géodésique spécifique (voir le paragraphe « Aller plus loin » à la fin du chapitre) ou le manuel d'utilisation de leur récepteur.

9.3 Les systèmes de références de coordonnées tridimensionnelles

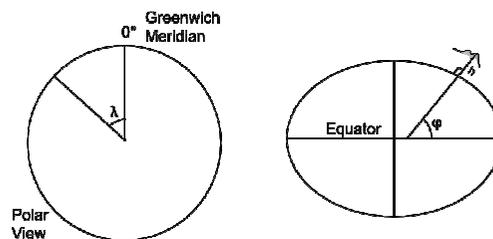


Figure 9.3. Système de coordonnées géodésiques, ou ellipsoïdales

Les coordonnées géodésiques sont la latitude géodésique et la longitude géodésique, avec ou sans la hauteur. On les appelle aussi coordonnées ellipsoïdales.

La latitude géodésique est un paramètre qui détermine la position d'un parallèle sur l'ellipsoïde terrestre ; elle est définie par l'angle entre le plan équatorial et la

normale (ou ligne perpendiculaire) à l'ellipsoïde en un point donné. Elle est habituellement comptée dans l'intervalle $[-90^\circ, 90^\circ]$ et est identifiée par la lettre grecque ϕ (phi). La latitude géodésique croît en direction du nord, et décroît en direction du sud. La longitude géodésique est un paramètre qui détermine la position d'un méridien sur l'ellipsoïde terrestre ; elle est définie par l'angle entre le plan contenant le méridien origine (p. ex. le méridien de l'observatoire de Greenwich près de Londres) et le plan contenant le méridien du point donné. Elle est le plus souvent comptée dans l'intervalle $180^\circ, 180^\circ]$ et est identifiée par la lettre grecque λ (lambda). La longitude géodésique croît en direction de l'est, et décroît en direction de l'ouest (Figure 9.3).

Il revient au datum géodésique de définir la manière dont les coordonnées géodésiques sont liées à la Terre. Les coordonnées géodésiques ϕ, λ et la hauteur peuvent être transformées dans un système cartésien tridimensionnel centré sur la Terre en utilisant les équations suivantes :

$$X = (N + h) \cos \phi \cos \lambda$$

$$Y = (N + h) \cos \phi \sin \lambda$$

$$Z = (N(1 - e^2) + h) \sin \phi$$

où

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}, e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

Si l'on souhaite représenter une grande partie de la Terre, un continent, voire le monde entier, l'aplatissement de la Terre peut être négligé. Dans ce cas, on parle de système de coordonnées géographiques au lieu de système de coordonnées géodésiques. Les coordonnées géographiques sont la latitude géographique et la longitude géographique, avec ou sans la hauteur. On les appelle également coordonnées sphériques. La latitude géographique est un paramètre

qui détermine la position d'un parallèle sur la sphère terrestre ; elle est définie par l'angle formé entre le plan équatorial et la normale (ou ligne perpendiculaire) à la sphère en un point donné. Elle est habituellement comptée dans l'intervalle $[-90^\circ, 90^\circ]$ et est identifiée par la lettre grecque Φ (phi). La latitude géographique croît en direction du nord, décroît en direction du sud. La longitude géographique est un paramètre qui détermine la position d'un méridien sur la sphère terrestre ; elle est déterminée par l'angle formé entre le plan qui contient le méridien origine (p. ex. le méridien de l'observatoire de Greenwich près de Londres) et le plan qui contient le méridien du point donné. Elle est le plus souvent comptée dans l'intervalle $[-180^\circ, 180^\circ]$ et est identifiée par la lettre grecque λ (lambda). La longitude géographique croît en direction de l'est, décroît en direction de l'ouest. (fig. 9.4)

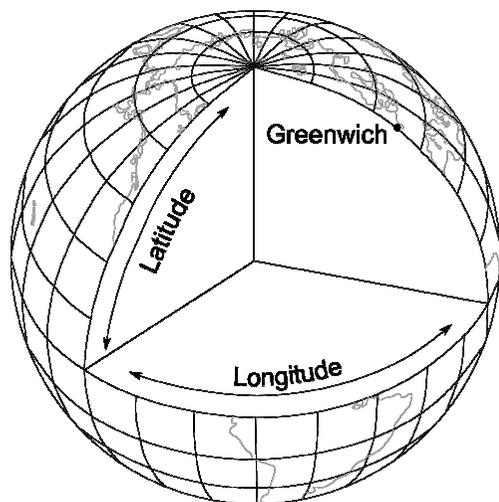


Figure 9.4. Système de coordonnées géographiques, ou sphériques : latitude ϕ , longitude géographique λ .

Les coordonnées géographiques ϕ , λ et la hauteur h fixée ici à zéro, peuvent être transformées dans un système cartésien tridimensionnel centré sur la Terre à l'aide des équations suivantes :

$$X = R \cos \phi \cos \lambda$$

$$Y = R \cos \phi \sin \lambda$$

$$Z = R \sin \phi$$

où R est le rayon de la Terre sphérique

Un système de coordonnées sphériques peut être considéré comme le cas particulier d'un système de coordonnées ellipsoïdales dans lequel l'aplatissement est nul ($f = 0$) ou, de manière équivalente, dans lequel l'excentricité est nulle ($e = 0$).

Il arrive en pratique, en géodésie comme en cartographie, d'avoir à transformer des coordonnées cartésiennes tridimensionnelles en coordonnées sphériques voire ellipsoïdales. Il est même parfois nécessaire d'effectuer une transformation d'un système de coordonnées tridimensionnelles vers un autre système. Il existe pour cela des méthodes et des équations que le lecteur trouvera dans les ouvrages disponibles sur le sujet (voir le paragraphe « Aller plus loin »).

9.4 Les systèmes de références de coordonnées bidimensionnelles

Généralement, un cadre commun de référence est nécessaire à l'exploitation des données géospatiales, et celui-ci se réalise habituellement dans un système de référence plan. Puisque les cartes recourent à un système géométrique plan, les coordonnées sphériques ou ellipsoïdales produites à partir des systèmes de positionnement par satellite, ou de tout autre dispositif de lever, doivent être transformées mathématiquement en géométrie plane. La transformation la plus simple consiste à poser que la coordonnée plane x équivaut à ϕ ,

et que la coordonnée plane y équivaut à λ . Le résultat est connu sous le nom de projection plate carrée. Bien qu'elle soit simple, elle entraîne une déformation significative des positions, si bien que les aires, la plupart des distances, et les angles sont eux-mêmes altérés, ou déformés, dans le plan.

Des transformations plus complexes permettent de préserver la représentation des aires, ou des distances, ou des angles, ou d'autres caractéristiques, mais aucune ne peut préserver l'exactitude des trois caractéristiques simultanément. En fait, habituellement, une seule caractéristique, par exemple l'exactitude des aires, peut être maintenue, ayant pour conséquence la distorsion des autres caractéristiques. C'est pourquoi de nombreuses projections cartographiques différentes ont été conçues, permettant de préserver telle ou telle caractéristique spécifique en fonction des besoins des utilisateurs de la carte. Les sections qui suivent se proposent de commenter la base mathématique d'un certain nombre de transformations et leurs effets au regard des caractéristiques spécifiques mesurées sur la Terre que sont les aires, les angles, ou les distances.

Le système de coordonnées de la projection Transverse universelle de Mercator (UTM) est basé sur la projection de fuseaux qui s'étendent chacun sur six degrés en longitude, de 80° S à 84° N en latitude, et dont le facteur d'échelle est fixé à 0,9996 pour le méridien central, résultant en une erreur maximum à proportion de 1 pour 2 500. Dans l'hémisphère nord, la coordonnée x du méridien central est décalée à la valeur de 500 000 mètres au lieu de zéro, convention qui est nommée « fausse abscisse ». La coordonnée y est fixée à zéro à l'équateur. Dans l'hémisphère sud, l'origine de la fausse abscisse x est également fixée à 500 000 mètres et à l'équateur, la valeur de y , ou « fausse ordonnée », est fixée à 10 000 000 mètres. Ces décalages font que toutes les coordonnées système restent positives.

Dans le système de carroyage militaire (MGRS, pour

Military Grid Reference System), les régions polaires, au nord de 84° N et au sud de 80° S, sont projetées selon le carroyage stéréographique polaire universel (UPS, pour Universal Polar Stereographic) avec le pôle comme centre de projection et un facteur d'échelle de 0,9994. Elles sont nommées « zone nord » et « zone sud ».

La projection cartographique est aussi choisie en fonction de la forme du pays. Aux États-Unis d'Amérique, le système de coordonnées planes des États est établi de telle manière qu'un État qui présente une élongation est-ouest, le Tennessee par exemple, emploiera la projection Lambert conique conforme, tandis qu'un État dont l'élongation est nord-sud, l'Illinois par exemple, utilisera la projection transverse de Mercator. La projection et l'échelle ne sont pas les seuls éléments importants d'une carte : compte aussi l'unité dans laquelle sont exprimées les coordonnées. Pour s'assurer de l'exactitude des données relevées sur une carte, il convient de lire soigneusement toutes les informations écrites dans le bord de la carte (l'orle) et, s'il y a lieu, de demander des compléments d'information à l'Agence cartographique nationale.

Un dernier type de coordonnées planes d'importance pour la modélisation et l'analyse des données géographiques, en particulier pour les images satellitaires et photographiques, est le système de coordonnées de l'imagerie. Le système de l'image numérique n'est pas un repère cartésien direct étant donné que, le plus souvent, le point origine (0, 0) est assigné au coin supérieur gauche de l'image. La coordonnée x, souvent appelée colonne, augmente vers la droite, mais la coordonnée y, appelée ligne, augmente vers le bas. L'unité communément adoptée est le composant le plus élémentaire de la trame de l'image, soit le pixel (contraction de l'expression « picture element »). Dans sa relation géométrique au terrain, le pixel représente une portion unitaire et discrète de la surface terrestre, le plus souvent de forme carrée, à la taille définie, généralement exprimée en mètres.

Il arrive en pratique, en géodésie comme en cartographie, d'avoir à transformer des coordonnées cartésiennes bidimensionnelles planes dans un autre système de coordonnées bidimensionnelles planes. La méthode indirecte consiste à transformer d'abord les coordonnées bidimensionnelles planes en coordonnées sphériques ou ellipsoïdales en utilisant des équations de projection cartographique dites inverses. Il suffit ensuite d'appliquer les équations de projection cartographique appropriées pour obtenir les résultats dans le second système de coordonnées bidimensionnelles planes. La méthode directe transforme quant à elle les coordonnées planes d'un système à l'autre à l'aide de rotations, translations, mises à l'échelle, et autres transformations bidimensionnelles. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter la littérature disponible sur le sujet (voir le paragraphe « Aller plus loin »).

9.5 Classification des projections cartographiques

Les projections peuvent être classées en fonction de critères de géométrie, de forme, de propriétés spécifiques, de paramètres de projection et de nomenclature. La classification géométrique se fonde sur l'observation des motifs du graticule (composé du réseau des parallèles en latitude et des méridiens en longitude). Dans cette classification, les projections cartographiques sont qualifiées par les termes les plus fréquents de *cylindrique*, *conique*, et *azimutale*, mais il y en a d'autres. Les références données dans le paragraphe « Aller plus loin » offrent un panorama plus large de ces motifs géométriques et des noms associés.

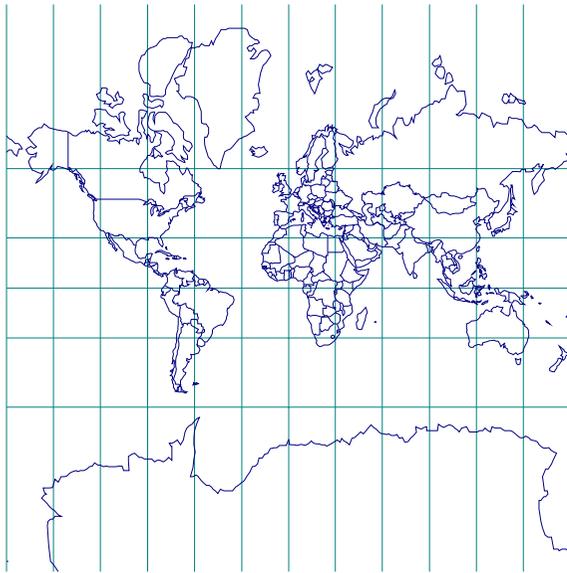
Une projection azimutale projette l'image de la Terre sur un plan à partir d'un point central. Une carte produite dans une projection cylindrique peut être roulée en cylindre (jusqu'à assurer la continuité de la représentation), et une carte produite dans une projection conique peut être roulée en un cône (jusqu'à assurer la continuité de la représentation). D'emblée, il

faut insister sur le fait que la grande majorité des projections cartographiques en usage ont été obtenues grâce aux mathématiques, et notamment grâce à cette branche connue sous le nom de calcul différentiel. C'est ce qui permet d'assurer que sont préservées des caractéristiques spécifiques et que sont minimisées des distorsions, au niveau des relations angulaires (et, partant, des formes) ou des aires.

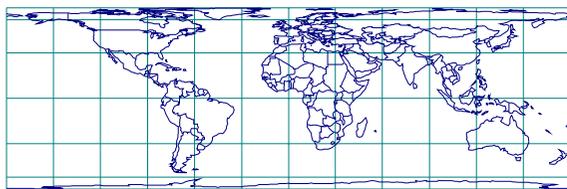
9.5.1 Les projections cylindriques

Les projections cylindriques sont celles qui confèrent une apparence rectangulaire au graticule. Le rectangle peut être vu comme le développement d'une surface cylindrique qui peut, à son tour, être enroulée en un cylindre. Bien que ces projections soient créées de manière purement mathématique, plutôt qu'en introduisant la géométrie d'un cylindre, l'aspect final peut suggérer une construction cylindrique. Une projection cartographique cylindrique peut présenter une ligne ou deux lignes qui sont sans altération d'échelle. Des exemples classiques de projections cylindriques sont la projection de Mercator, conforme (elle conserve localement les angles), et la projection cylindrique équivalente de Lambert (qui conserve les surfaces) (fig. 9.5).

Les projections cylindriques sont souvent employées pour les cartes du monde ; la latitude y est volontairement limitée vers le sud et vers le nord pour éviter la trop grande déformation des régions polaires qu'entraîne cette méthode de projection. L'aspect normal de la projection Mercator (où l'axe du « cylindre » est dans la direction nord-sud) est employé pour les cartes marines dans le monde entier, alors que son aspect transverse (où l'axe du « cylindre » est orthogonal à la direction nord-sud) est régulièrement employé pour les cartes topographiques et est la projection utilisée pour le système de coordonnées UTM décrit plus haut.



a.



b.

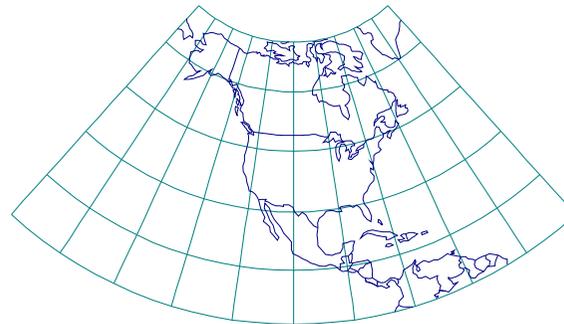
Figure 9.5. Projection cylindrique conforme de Mercator (a) et projection cylindrique équivalente de Lambert (b)

9.5.2 Les projections coniques

Les projections coniques donnent l'apparence d'une surface conique développée qui pourrait être roulée en un cône. Ces projections sont des constructions mathématiques souvent plus complexes que la projection sur une simple surface conique. On peut y trouver une seule ligne, ou deux lignes, qui soient exemptes d'altérations de l'échelle.



a.



b.

Figure 9.6. Projection conique conforme de Lambert (a) et projection conique équivalente d'Albers (b)

Des exemples classiques de projections coniques sont la

projection conique conforme de Lambert et la projection conique équivalente d'Albers (fig. 9.6). Les projections coniques sont inappropriées pour les cartes du monde et trouvent leur meilleur usage pour les zones qui présentent une élongation dans la direction est-ouest. Cela en fait les projections idéales pour représenter les masses continentales de l'hémisphère nord, telle celles des États-Unis, de l'Europe, ou de la Russie.

9.5.3 Les projections azimutales

Les projections azimutales sont celles qui préservent les azimuts (c.-à-d. les directions par rapport à une direction donnée, celle du nord dans leur aspect normal). Un point seul ou un cercle peuvent exister sans déformation d'échelle. Les exemples classiques de projections azimutales incluent la projection stéréographique et la projection azimutale équivalente de Lambert (fig. 9.7)

9.5.4 Autres classifications

D'autres modes de classification des projections cartographiques se fondent sur leur aspect (c.-à-d. l'apparence et la position relative du graticule, des pôles ou de l'équateur dans la projection). L'aspect peut être polaire, équatorial, normal, transverse ou oblique. On parle ainsi de projections polaires, de projections normales, de projections équatoriales, de projections transverses et de projections obliques. Ces noms désignent des qualités particulières des projections cartographiques et ne sont pas les clés d'une classification systématique. En effet, une projection peut être à la fois, par exemple, polaire et normale. En théorie, toute projection peut exister sous tout aspect. Cependant, beaucoup de projections sont employées sous certains aspects privilégiés qui permettent de restituer au mieux leurs caractéristiques.

Par exemple, de nombreux facteurs tels que la température, les infections et la biodiversité dépendent du climat (et donc de la latitude). Pour des projections qui, dans leur aspect équatorial, assurent une distance constante entre les parallèles, la latitude peut être

directement convertie en distance verticale, ce qui facilite la comparaison lors de la lecture de la carte. Certaines projections où le graticule, sous leur aspect normal, est composé de courbes simples furent à l'origine définies par construction géométrique.

Mais étant donné que le graticule de la plupart des projections transverses et obliques est composé de courbes complexes, ces projections ne furent pas systématiquement explorées avant l'arrivée de l'ordinateur. D'une manière générale, le calcul des projections obliques pour un ellipsoïde donné est très complexe, et n'a pas encore été développé pour toutes les projections. Néanmoins, les projections obliques trouvent des applications.

Une projection cartographique est une projection normale, ou elle est sous son aspect normal, si l'apparence et la position relative du graticule, des pôles et de l'équateur sont les plus naturelles, au sens, le plus souvent, des principes de base de l'approche géométrique. L'aspect normal est celui qui découle de la forme la plus simple des calculs ou de l'apparence la plus simple du graticule. L'aspect polaire est l'aspect normal des projections azimutales, tandis que l'aspect équatorial est l'aspect normal des projections cylindriques. Dans les projections azimutales et coniques, le graticule se compose de droites et d'arcs de cercles ; les projections cylindriques d'aspect normal ont des graticules constitués seulement de droites formant une grille rectangulaire.

Une projection cartographique est une projection transverse, ou elle est sous un aspect transverse, si l'apparence et la position relative du graticule, des pôles ou de l'équateur dans la projection résultent de l'application des formules de la projection d'aspect normal à un globe préalablement tourné de 90° autour de son centre, de sorte que ses pôles se trouvent dans le plan équatorial original.

Une projection cartographique est une projection

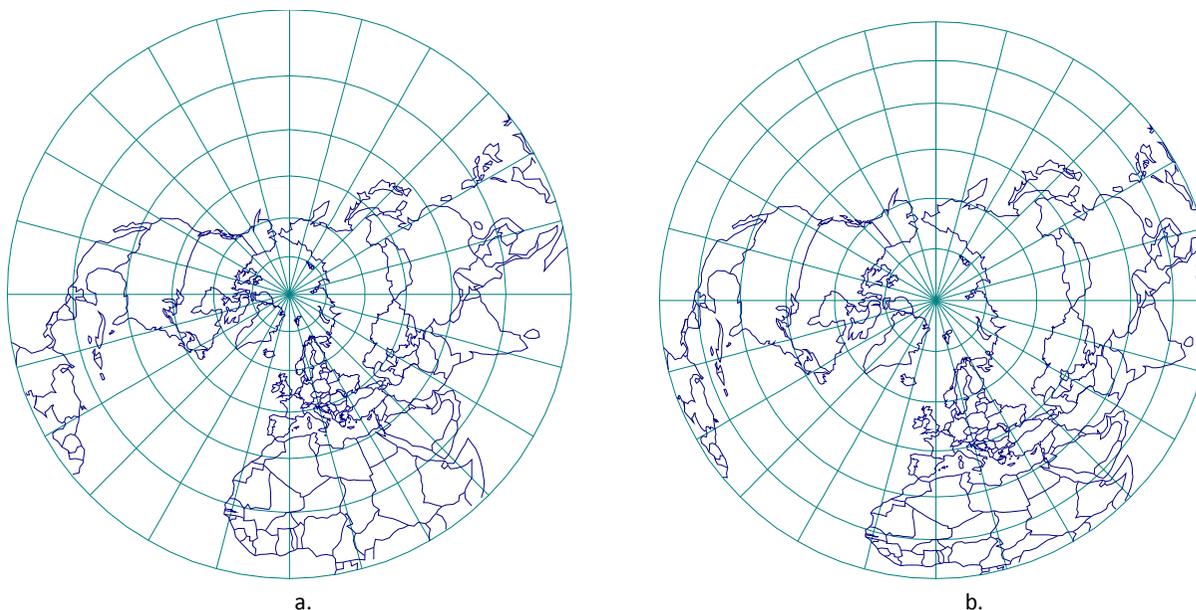


Figure 9.7. Projection stéréographique (a) et projection azimutale équivalente de Lambert (b)

polaire, ou elle est sous un aspect polaire, si l'image d'un pôle est au centre de la carte. La dénomination est souvent synonyme de projection azimutale d'aspect normal.

Une projection cartographique est une projection équatoriale, ou elle est sous un aspect équatorial, si l'image de l'équateur est au centre de la carte. L'image de l'équateur est placée dans la direction de l'un des principaux axes de la carte, le plus souvent l'axe horizontal. Par projection équatoriale, on désigne souvent une projection cylindrique d'aspect normal.

Une projection cartographique est une projection oblique, ou elle est sous un aspect oblique, si elle n'est ni polaire ni équatoriale, ni d'aspect transverse ou normal (fig. 9.8).

9.6 Préservation des propriétés particulières lors de la projection cartographique

Les projections cartographiques sont habituellement conçues pour préserver des caractéristiques particulières mesurables sur le globe, telles que les aires, les angles, les distances, ou la présence de propriétés spécifiques, comme lorsque les grands cercles (intersections de la Terre et des plans qui passent par son centre) deviennent des droites. Des cartes où les angles sont conservés s'appellent des *projections conformes*. Des cartes où les surfaces sont conservées sont appelées *projections équivalentes*.

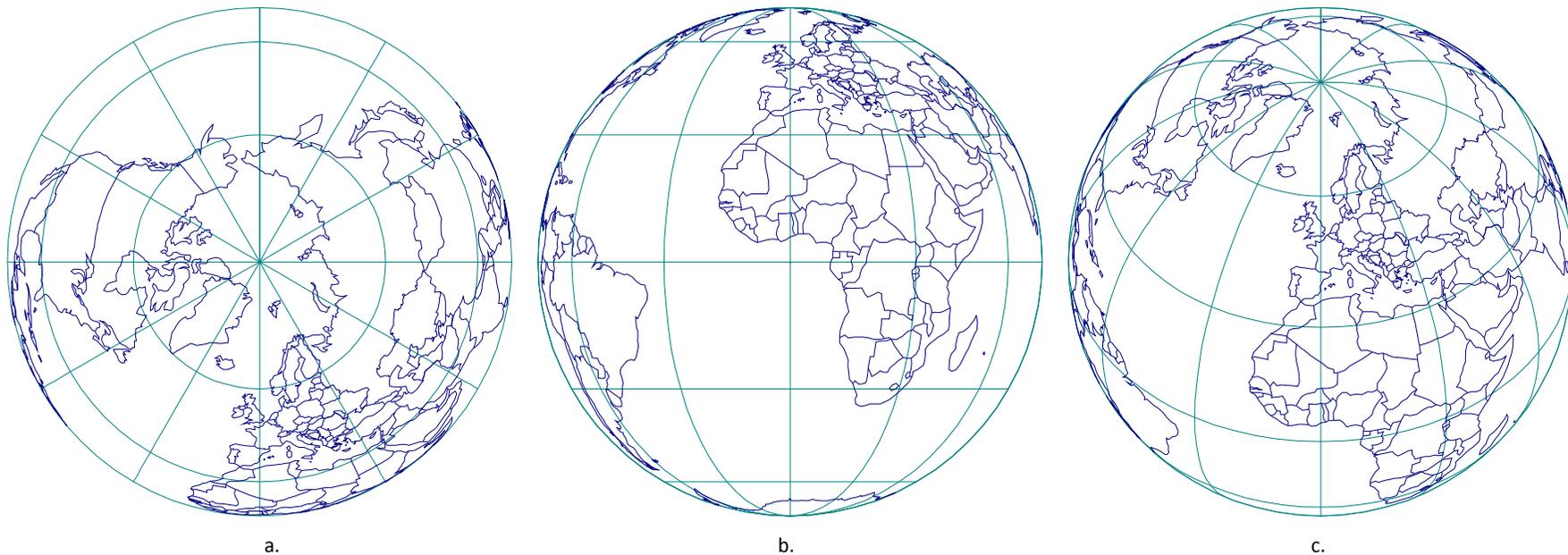


Figure 9.8. Différents aspects de la projection orthographique : normale (a), transverse (b) et oblique (c)

9.6.1 Préserver les angles

Gérard Mercator a mis au point en 1569 une projection cylindrique conforme qui porte son nom. Il l'a conçue de manière à ce que les loxodromies, c'est-à-dire les trajectoires à cap constant, puissent apparaître comme des droites, ce qui simplifie l'usage de la carte pour la navigation à cap constant. Dans la projection de Mercator, les méridiens apparaissent comme des lignes parallèles équidistantes, et les parallèles sous la forme de droites perpendiculaires aux méridiens et parallèles entre elles, mais inégalement espacées, se resserrant près de l'équateur. Le pôle Nord et le pôle Sud ne peuvent pas être représentés. L'échelle est vraie le long de l'équateur ou le long de deux parallèles équidistants de l'équateur. Les déformations de taille deviennent

importantes aux latitudes les plus élevées, raison pour laquelle la projection de Mercator n'est pas recommandée pour les cartes du monde (fig. 9.5a). La projection de Mercator, standard des cartes marines, fut créée pour les cartes de navigation et trouve son meilleur emploi en navigation.

Projection de Mercator transverse

La projection de Mercator transverse, également connue sous le nom de projection de Gauss-Krüger, est une projection où la ligne d'échelle constante est le long d'un méridien plutôt que sur l'équateur. Le méridien central et l'équateur sont des lignes droites. Les autres méridiens et parallèles sont des courbes complexes dont la concavité est tournée vers le méridien central. La projection possède une échelle vraie le long du méridien

central ou le long de deux lignes parallèles équidistantes du méridien central. Elle est généralement utilisée pour des cartes à grande échelle, sur de petites zones. En raison de la distribution de la déformation, elle est habituellement utilisée en divisant la région à cartographier en zones de trois degrés (3°) ou de six degrés (6°) limitées par des méridiens. Cette projection est très utilisée pour les cartes topographiques aux échelles comprises entre 1:25 000 et 1:250 000, et est à la base du système de coordonnées UTM.

Projection Lambert conique conforme

La projection conique conforme de Lambert, proposée par Johann Heinrich Lambert en 1772, montre les méridiens comme des droites régulièrement réparties convergeant en un des pôles (fig. 9.6a). Les angles entre

les méridiens de la projection sont plus petits que les angles homologues sur le globe. Les parallèles sont des arcs de cercles qui sont tous centrés sur le pôle et dont l'espacement augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne du pôle. Le pôle le plus proche du parallèle standard est un point et l'autre pôle ne peut pas être représenté. L'échelle est vraie le long du parallèle standard ou le long de deux parallèles standards, et elle est constante le long de n'importe quel parallèle donné. La projection conique conforme de Lambert est très largement employée pour la cartographie à grande échelle des régions dont la forme est allongée dans la direction est-ouest et pour les régions situées dans des latitudes moyennes. Elle est un standard dans beaucoup de pays pour les cartes à l'échelle de 1 : 500 000, aussi bien que pour les cartes aéronautiques aux échelles similaires.

Projection stéréographique

La projection stéréographique, dont l'invention remonte au moins au II^e siècle avant Jésus-Christ, est une projection azimutale en perspective qui conserve les angles (c.-à-d. conforme). Cette projection est la seule projection dans laquelle tous les cercles du globe sont représentés comme des cercles dans le plan de la projection. Les aspects polaire, équatorial et oblique conduisent à différentes apparences du graticule. L'aspect polaire est réalisé en prenant l'un des pôles comme centre de la projection et en projetant les points sur un plan tangent à l'autre pôle. Dans cet aspect, les méridiens sont des droites concourantes au pôle selon des angles qui sont les angles vrais. Les parallèles sont des cercles qui sont tous centrés sur le pôle, représentés quant à lui par un point. L'espacement entre les parallèles augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne du pôle. La projection stéréographique est employée sous son aspect polaire pour les cartes topographiques des régions polaires. La projection stéréographique universelle polaire (UPS) est la projection complémentaire de l'UTM pour la cartographie militaire. Cette projection est généralement choisie pour les

régions dont la forme est à peu près circulaire. Elle est employée dans une forme ellipsoïdale oblique dans nombre de pays du monde, dont le Canada, la Roumanie, la Pologne et les Pays-Bas. Les algorithmes mathématiques ou les versions de la projection stéréographique diffèrent en fonction des pays.

9.6.2 Préserver les aires

Projection cylindrique équivalente de Lambert

La projection cylindrique équivalente fut proposée pour la première fois par Johann Heinrich Lambert en 1772. Elle est devenue la base pour beaucoup d'autres projections qui conservent de même les aires, telles la projection orthographique de Gall, ou les projections de Behrmann et de Trystan-Edwards.

Dans sa version originale, la projection de Lambert n'introduit qu'une seule ligne d'échelle constante, sur l'équateur (fig. 9.5b). Les projections équivalentes qui s'en sont inspirées prennent deux parallèles comme lignes d'échelle constante. Dans la projection cylindrique équivalente de Lambert, les méridiens apparaissent comme des droites parallèles équidistantes et la longueur de l'équateur vaut π fois celle des méridiens. Les lignes de latitude sont des droites parallèles dont l'espacement s'accroît en se rapprochant de l'équateur ; elles sont perpendiculaires aux méridiens. Changer l'espacement des parallèles est la méthode employée pour conserver les surfaces. Les altérations des longueurs et des angles, cependant, deviennent très importantes dans les latitudes élevées à l'approche des pôles. Cette projection est rarement utilisée telle quelle pour faire des cartes, mais c'est un standard pour exposer les principes de la projection cartographique dans les manuels, et elle a grandement servi en tant que prototype à la conception d'autres projections.

Projection de Mollweide

En 1805, Carl Brandan Mollweide conçut une projection pseudo cylindrique équivalente où le méridien central est une droite moitié moins longue que l'équateur,

définissant une surface de forme elliptique où projeter le globe entier. Les méridiens à 90° de part et d'autre du méridien central forment ensemble un cercle sur la projection de Mollweide. Les autres méridiens sont des demi-ellipses régulièrement réparties qui s'intersectent aux pôles et dont la concavité est tournée vers le méridien central. Les parallèles sont des droites perpendiculaires au méridien central ; inégalement espacés, ils sont d'autant plus éloignés qu'on s'approche de l'équateur.



Figure 9.9. Le logo de l'ACI, dans la projection de Mollweide

Les pôles Nord et Sud apparaissent comme des points. L'échelle est vraie le long des seules latitudes 40°44' Nord et Sud, et constante le long d'une latitude donnée. La figure 9.9 montre la Terre entière ainsi projetée, centrée sur le méridien de Greenwich. La projection de Mollweide a été utilisée occasionnellement pour des cartes du monde, en particulier pour des cartes thématiques où la préservation des aires est nécessaire. Différents aspects de la projection de Mollweide ont été employés à des fins pédagogiques, et elle a été choisie pour le logo de l'ACI (fig. 9.9).

9.6.3 Les projections de compromis

Les projections cartographiques qui ne sont ni conformes ni équivalentes peuvent être appelées projections de compromis. La variété des formes qu'elles peuvent prendre est quasiment illimitée. Parmi elles figurent de nombreuses projections importantes et utiles.

Projection orthographique

La projection orthographique, qui existait déjà au II^e siècle avant Jésus-Christ, est une projection en perspective azimutale qui n'est ni conforme ni équivalente. Elle est utilisée dans les aspects polaire, équatorial et oblique et permet de représenter un hémisphère entier. Dans l'aspect polaire de la projection, les méridiens sont des droites qui s'intersectent au pôle central selon des angles qui sont les angles vrais. Le pôle est un point et les parallèles sont des cercles qui sont tous centrés sur le pôle et dont l'espacement diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du pôle. L'échelle est vraie au centre et le long de la circonférence de tout cercle centré sur le centre de projection. La projection présente un aspect qui ressemble à un globe (fig. 9.8). Essentiellement, il s'agit d'une projection en perspective du globe sur un plan à partir d'un point de vue situé à une distance infinie au-dessus (orthogonalement) du point choisi pour centre. Elle est généralement utilisée pour représenter la Terre comme si celle-ci était vue de l'espace.

Projection gnomonique

La projection gnomonique n'est ni conforme ni équivalente. C'est une projection en perspective azimutale où le point de projection est placé au centre de la Terre (d'où pour certains son nom : au centre de la Terre habitent les gnomes de la mythologie.⁽¹⁾ Elle a été inventée par le grec Thalès, probablement aux alentours de 580 av. J-C. Tous les grands cercles du globe, dont tous les méridiens et l'équateur apparaissent comme des droites dans cette projection, une propriété qui lui est unique. (Fig. 9.10).

L'apparence du graticule change avec l'aspect, comme c'est le cas pour les autres projections azimutales. Dans l'aspect polaire, les méridiens sont des droites qui s'intersectent au pôle central selon des angles qui sont les angles vrais. Les parallèles sont des cercles qui sont tous centrés sur le pôle ponctuel, et dont l'espacement augmente au fur et à mesure qu'on s'en éloigne. La

projection ne peut montrer que moins d'un hémisphère. L'échelle augmente rapidement quand on s'éloigne du centre. Ce qui la rend utile est sa qualité spécifique de représenter les grands cercles par des droites, ce qui aide les navigateurs et les aviateurs dans la détermination de la route la plus courte.

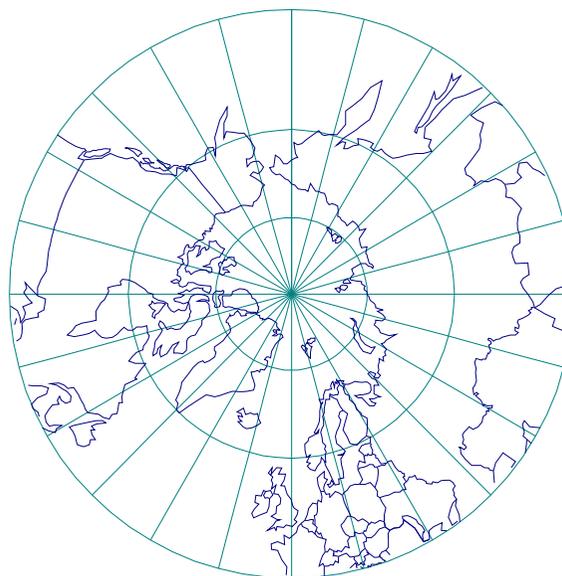


Figure 9.10. La projection gnomonique transforme les grands cercles en droite

Projection azimutale équidistante

Dans l'aspect polaire de la projection azimutale équidistante, les méridiens sont des droites qui s'intersectent au pôle central selon des angles qui sont les angles vrais. Les parallèles sont des cercles équidistants qui sont tous centrés sur le pôle ponctuel. La Terre entière peut être représentée, mais le pôle opposé est un cercle englobant dont le rayon est le double de celui de l'équateur. Dans l'aspect équatorial de cette projection, les méridiens sont des courbes complexes, équidistantes au niveau de leur intersection avec l'équateur, et concourantes en chacun des pôles.

Les parallèles sont des courbes complexes dont la concavité est tournée vers le pôle le plus proche et qui sont régulièrement espacées au niveau de leur intersection avec le méridien central et avec les méridiens situés à 90° de part et d'autre du méridien central. L'échelle est vraie sur toute droite passant par le centre de la projection. Elle augmente dans une direction perpendiculaire au rayon, et cela d'autant plus que la distance à partir du centre augmente. La déformation est modérée pour un hémisphère mais devient extrême pour une carte de la Terre entière. La distance entre deux points quelconques d'une droite qui passe par le centre de la projection est donnée à une échelle vraie ; cette caractéristique est particulièrement utile si l'un de ces deux points est le centre.

L'aspect polaire de cette projection est généralement utilisé pour les cartes des régions polaires des hémisphères Nord et Sud, et pour la Terre de « l'âge de l'aviation ». L'aspect oblique est fréquemment employé pour des cartes mondiales centrées sur des villes d'importance et, occasionnellement, pour des cartes de continents. La projection azimutale équidistante fut adoptée par l'ONU qui l'a utilisée pour son drapeau (fig. 9.11).



Figure 9.11. La projection azimutale équidistante pour préserver les distances sur le drapeau de l'ONU

Projection triple de Winkel

La projection triple de Winkel n'est ni conforme ni équivalente. Elle fut proposée par Oswald Winkel en Allemagne en 1921



Figure 9.12. Projection triple de Winkel

Cette projection fut obtenue en effectuant la moyenne arithmétique des coordonnées de la projection cylindrique équidistante et de la projection d'Aitoff.. Winkel l'a qualifiée de « triple » (« tripel » en allemand) parce qu'elle est construite sur la projection d'Aitoff qui est construite elle-même à partir de l'aspect équatorial sur un hémisphère de la projection azimutale équidistante, dans laquelle cependant les coordonnées horizontales sont doublées, les méridiens ayant été préalablement positionnés à la moitié de leur longitude d'origine.

Le méridien central est droit. Les autres méridiens sont des courbes, équidistantes au niveau de leur intersection avec l'équateur, et leur concavité est tournée vers le méridien central.

L'équateur et les pôles sont des droites. Les autres parallèles sont des courbes, équidistantes le long du méridien central et tournant leur concavité vers le pôle le plus proche. Les pôles sont des droites dont la longueur est environ 0,4 fois celle de l'équateur, valeur qui peut varier en fonction de la latitude choisie pour les

parallèles standard. L'échelle est vraie le long du méridien central et constante le long de l'équateur. La déformation est modérée à l'exception des zones proches des méridiens les plus extérieurs dans les régions polaires. La projection triple de Winkel est utilisée pour les cartes du monde (fig. 9.12).

9.7 Approches modernes des projections cartographiques

9.7.1 La projection Web Mercator

Nombreux sont les principaux services en ligne de cartographie à l'échelle urbaine (Bing Maps, OpenStreetMap, Google Maps, MapQuest, Yahoo Maps, et d'autres) à utiliser Web Mercator, variante de la projection de Mercator pour l'affichage cartographique. En dépit des évidentes déformations aux petites échelles, cette projection convient bien à une carte interactive mondiale dans laquelle zoomer sans raccords visibles jusqu'à obtenir des cartes à grande échelle, locales, où les déformations sont faibles du fait des qualités de quasi-conformité de la projection employée.

Le facteur d'échelle en un point donné d'une carte en projection conforme (telles la Mercator sphérique ou la Mercator ellipsoïdale) est uniforme dans toutes les directions à partir de ce point. Cela n'est pas vrai avec la projection Web Mercator. Désignons par m le facteur d'échelle dans la direction méridienne nord-sud et par n le facteur d'échelle dans la direction est-ouest du parallèle passant par le point. On a pour une projection de Mercator sphérique la relation $m = n$, parce que, pour cette projection, le facteur d'échelle en un point est le même dans toutes les directions. Autrement dit, la projection Mercator sphérique est conforme.

Les équations pour la projection de Mercator ellipsoïdale sont plus complexes, notamment pour ce qui concerne le traitement de la latitude. Elles impliquent les paramètres a (demi-grand axe) et e (excentricité) qui sont connus pour un ellipsoïde donné. Mais dans ce cas

encore, $m = n$ parce que, dans la projection de Mercator ellipsoïdale, le facteur d'échelle en un point est le même dans toutes les directions autour du point. En d'autres termes, la projection de Mercator ellipsoïdale est conforme.

La projection Web Mercator consiste, quant à elle, à transformer des coordonnées latitude/longitude qui sont exprimées dans le datum WGS84 (c.-à-d. dans un système ellipsoïdal) en utilisant, pour établir les coordonnées easting / northing, les équations conçues pour la projection de Mercator sphérique (en imposant $R = a$). Cette projection a été popularisée par Google dans Google Maps (mais pas dans Google Earth). D'un côté la référence est bien l'ellipsoïde WGS84, d'un autre côté les formules sont sphériques, le rayon R étant égal au demi-grand axe a de l'ellipsoïde WGS84 : voilà « Web Mercator ».

Le facteur d'échelle en un point varie ici dans toutes les directions. Il est en effet fonction des rayons de courbure du globe dans le plan méridien et dans le premier vertical du point, ainsi que de l'azimut de la direction. Dans le cas de la projection Web Mercator, m et n ne sont pas égaux. Web Mercator n'est donc pas une projection conforme.

Si on se contente d'utiliser Web Mercator pour imprimer la direction d'un nouveau restaurant à travers la ville, ou à des fins de visualisation sur l'écran de l'ordinateur ou pour d'autres utilisations sur le Web, il n'y aura aucun problème. Mais Web Mercator est une projection qui a étendu son domaine d'application (le Web) à un autre domaine (SIG), où elle démarre une nouvelle vie. En témoignent les codes EPSG, Esri et FME créés pour Web Mercator. Mais les géomètres et les professionnels des SIG se doivent de savoir que Web Mercator n'est pas une projection conforme. Si des calculs de distance sur une projection Web Mercator sont faits sans précautions (avec l'impression de la simplicité qui caractérise une projection conforme), ils seront erronés. Si on veut les

effectuer correctement, ils demanderont beaucoup de travail.

Pour une région dont la taille est de l'ordre d'un quart d'hémisphère (l'Amérique du Nord par exemple), les différences paraissent légères. Il se trouve en effet que les valeurs en abscisses (easting) sont identiques. Les différences sont dans les ordonnées (northing). Il n'y a aucune différence des ordonnées sur l'équateur, mais à la hauteur de 70 degrés nord, la différence est de 40 km. Cet étirement nord-sud de la projection Web Mercator est la raison de son caractère non conforme.

Les projections de Mercator sont utiles à la navigation parce que les loxodromies, ces lignes de cap vrai constant que les navigateurs utilisaient pour naviguer avant le GPS, y sont des droites. Mais, malgré son nom, nous devons garder à l'esprit que les lignes droites dans la projection de Web Mercator ne sont pas des loxodromies.

Pour résumer le cas de la projection Web Mercator :

- C'est une projection cylindrique
- Ses méridiens sont des droites équidistantes
- Ses parallèles sont des droites inégalement espacées mais d'une manière qui n'est pas celle de la projection de Mercator conforme.
- Ses loxodromies ne sont pas des droites

- Ce n'est pas une perspective
- Ses pôles sont à l'infini
- Elle n'a pas été proposée par Mercator en 1569, mais par Google, récemment
- Elle n'est pas conforme

9.7.2 L'application Map Projection Transitions

Map Projection Transitions (« Fondu enchaîné de projections cartographiques ») est l'une des multiples applications conçues et proposées par Jason Davies. Sa page Web <http://www.jasondavies.com/maps/transition> présente une carte du monde avec son carroyage et les frontières des pays dans une projection d'Aitoff oblique sur le pôle Sud. La carte n'est pas statique, mais animée. Le pôle Sud descend et la Terre tourne autour de son axe. L'animation dure cinq secondes, après quoi la projection change et le mouvement continue pendant encore cinq secondes, au bout desquelles la projection change à nouveau. Les noms des projections apparaissent dans un champ distinct. Il y a au total 56 projections. Le pôle Sud finit par disparaître et le pôle Nord apparaît par le haut. Les diverses parties de la Terre défilent centre de la carte au fur et à mesure de la rotation autour de l'axe des pôles (fig. 9.13).

En cliquant sur *pause*, l'animation s'arrête et il est possible de sélectionner une autre projection. Par un clic gauche, il est possible de faire tourner la vue et de sélectionner un aspect : projection normale, projection transverse ou l'une des nombreuses projections obliques. Les différences entre deux projections peuvent être visualisées clairement de cette manière. Par exemple, on sélectionne la projection Ginzburg VI dans le menu déroulant, puis son aspect normal en déplaçant la souris. Si on veut voir comment le graticule de cette projection diffère de celui de la projection triple de Winkel, il suffit de cliquer sur « Winkel Tripel » dans le menu. L'image à l'écran se transforme dans la projection

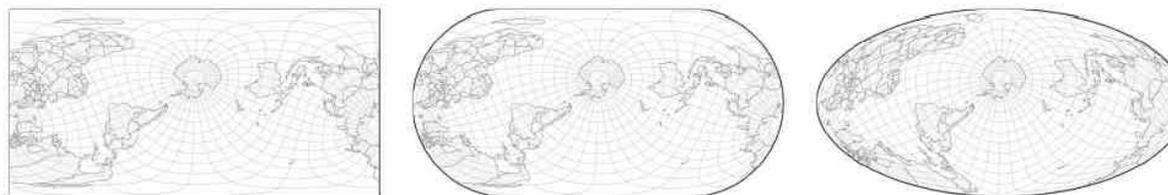


Figure 9.13. Images arrêtées extraites de l'application Map Projection Transitions (<http://www.jasondavies.com/maps/transition>)

de Winkel et les différences vont apparaître clairement.

En cliquant sur Maps, on trouve tout un ensemble d'applications également remarquables, concernant les cartes interrompues, les cartes en forme de papillon, les projections rétro-azimutales et autres. Pour une majorité de ces applications, il est possible de changer les vues à l'aide de la souris. Par exemple, en sélectionnant la projection sinusoidale interrompue (« Interrupted Sinusoidal Projection »), une carte du monde en trois fuseaux apparaît. Il est possible à la

souris de déplacer les parties de la Terre d'un fuseau à un autre, et le curseur en bas de l'écran peut être utilisé pour changer le nombre de fuseaux, depuis une carte du monde ininterrompue jusqu'à une représentation en 24 fuseaux.

Une option semblable est disponible pour la projection de Berghaus en étoile (Snyder et Voxland, 1989). L'application *Azimuth and Distance from London* (« Azimut et Distance à partir de Londres ») permet, en déplaçant la souris, de connaître la distance et l'azimut de Londres en tout point de la Terre sur deux cartes du monde coordonnées, l'une en projection cylindrique équidistante oblique et l'autre en projection azimutale équidistante oblique. Quand le texte d'accompagnement de l'application fait mention d'une projection, il comporte également un lien vers l'entrée qui la décrit dans Wikipédia.

9.7.3 La recherche sur les nouvelles projections cartographiques

En 2007, inspirés par la méthode de Robinson, B. Jenny, T. Patterson et L. Hurni ont développé Flex Projector, programme interactif qui permet à l'utilisateur de créer facilement de nouvelles projections cartographiques du monde. Il intègre la possibilité de traiter de l'aspect normal des projections cylindriques. Le programme est gratuit, open-source et compatible Linux, Mac OS X et Windows. À l'exécution du programme, une carte du monde apparaît à l'écran dans la projection de Robinson (fig. 9.14). La partie droite de l'écran comporte des curseurs permettant de changer la longueur des parallèles. Cliquer sur le bouton distance fait apparaître des curseurs permettant de modifier l'éloignement des parallèles à l'équateur. La courbure des parallèles

(Bending) et les distances entre les méridiens (Meridians) sont également modifiables. L'option Linked Sliders (« curseurs liés ») permet à l'utilisateur de déplacer chaque curseur séparément, ou plusieurs curseurs à la fois. L'option associée Move permet de choisir la forme du front des curseurs liés. Les tailles relatives du méridien central et de l'équateur peuvent être changées avec le curseur proportions (hauteur/largeur). Au lieu de partir de la projection de Robinson, on peut choisir l'une des nombreuses projections proposées, réparties en trois groupes. Si le résultat ne convient pas, on peut toujours utiliser l'option de réinitialisation pour retrouver la projection initiale. Cette option se trouve dans le coin supérieur droit de l'écran.

Cliquer sur Display (« affichage ») ouvre des options supplémentaires. On peut changer la longueur du méridien central, choisir la densité du graticule, afficher l'ellipse indicatrice des altérations en chacun des nœuds du graticule, tracer les lignes où l'altération des aires est constante, et celles où l'altération maximale des angles est constante. Le fond de la nouvelle projection créée peut inclure le graticule et les contours des continents

de toute projection active (fonctionnalité Show Second Projection, « afficher la seconde projection »). En bas à gauche de l'écran apparaissent des indicateurs chiffrés globaux sur les altérations des longueurs, des aires, des angles, pour toutes les projections actives et la projection en cours (fig. 9.14).

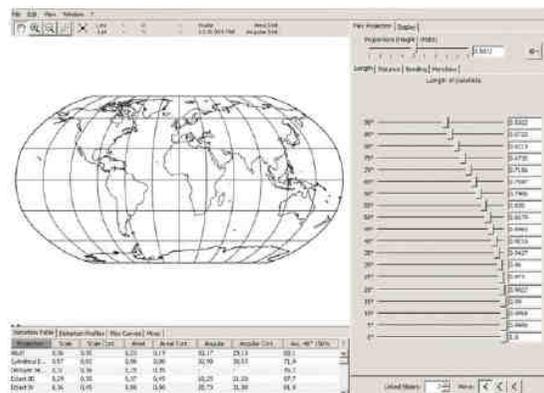


Figure 9.14. L'interface du logiciel Flex Projector

Flex Projector peut importer et exporter des données vecteur et raster dans plusieurs formats. Le programme est à recommander à tous ceux qui souhaitent mettre au point une nouvelle projection pour leur carte du monde, et il peut également être exploité pour enseigner les projections cartographiques.

Les techniques qui permettent de conjuguer deux projections existantes pour en créer une nouvelle sont à l'origine de l'apparition d'une grande variété de projections. À celles que nous avons déjà mentionnées s'ajoutent d'autres techniques. Par exemple, le logiciel Geocart de Mathematics peut combiner les paramètres de deux projections données, telle la latitude des parallèles standard. Mais on peut vouloir combiner plus de deux projections pour en créer une nouvelle. Le cas extrême serait une infinité de projections paramétrées

de manière différente, concept qui est sous-jacent aux projections polyconiques et polycylindriques. Et il y a d'autres approches pour créer une nouvelle projection en partant de rien, qu'il s'agisse de la dériver à partir de celles qui existent, ou d'ajuster des paramètres. Certaines de ces techniques sont employées dans les projections composites contextuelles, utiles à la cartographie sur le web, et qui constituent un nouveau champ de recherche en matière de projection cartographique. Le but de cette recherche est de développer une solution de remplacement à la projection Web Mercator pour la cartographie internet à petite échelle, où les cartes s'afficheraient automatiquement dans une projection optimale, elle-même fonction de l'échelle souhaitée, des proportions entre la hauteur et la largeur de la carte, et de la latitude au centre de la zone à visualiser.

9.8 Conseils sur les projections

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, le type de données à y faire figurer, la région du monde à représenter et l'échelle de la carte finale. Des recommandations pour aider à raisonner son choix sont données dans tout un ensemble d'ouvrages imprimés et de ressources Internet (voir le paragraphe « Aller plus loin »). Dans les SIG, les jeux de données à grande échelle (couvrant une faible étendue géographique) sont généralement projetés à l'aide de projections conformes de manière à préserver les angles. Pour de telles applications, l'altération des aires est si faible au regard de l'étendue géographique qu'elle en est négligeable : une projection qui conserve les aires n'est donc pas nécessaire. Généralement, les données à grande échelle sont destinées à des applications SIG dont l'étendue géographique est restreinte (par exemple, un bassin hydrologique, une région ou un État). Les deux projections les plus communément utilisées pour ces échelles sont la

projection conique conforme de Lambert et la projection de Mercator transverse, à la base du système UTM (Universal Transverse Mercator) et de la plupart des systèmes de coordonnées planes des États-Unis d'Amérique. Pour les cartes mondiales à usage général, notre recommandation est d'éviter les projections cylindriques et de leur préférer certaines projections pseudo-cylindriques (par exemple, celle de Robinson ou une projection de compromis comme la projection triple de Winkel).

9.9 Conclusions

Les projections cartographiques et les transformations de coordonnées sont les fondamentaux pour établir un cadre de référence commun à l'exploitation des données géographiques. C'est le recours à un ellipsoïde commun, à un datum commun, à des projections cartographiques communes et enfin à un système de coordonnées cartésiennes commun qui rend possible l'utilisation de la géométrie plane pour toutes les opérations de superposition de données et d'analyse spatiale. La projection des données géographiques d'un modèle ellipsoïdal de la Terre vers un système de coordonnées planes a toujours comme conséquence la déformation des aires, des formes, des distances et d'autres propriétés. En choisissant de manière appropriée la projection, l'utilisateur peut préserver les caractéristiques qui lui importent, mais, inéluctablement, au détriment d'autres. Dans ce chapitre nous avons examiné brièvement les concepts de base des systèmes de coordonnées et des projections cartographiques. Pour approfondir le sujet, le lecteur est invité à consulter les textes et sources référencés ci-dessous.

9.10 Aller plus loin

De plus amples références et un exercice avec des questions et des réponses sont fournis au chapitre 18.

Ouvrages traitant des projections cartographiques, à télécharger en version numérique sur Google books :

- Bureau of Navigation (1869), *Projection Tables for the Use of the United States Navy Comprising A New Table of Meridional Parts for the Mercator Projection*, Government Printing Office, Washington.
- De Morgan, A. (1836), *An Explanation of the Gnomonic Projection of Sphere*, Baldwin and Cradock, London.
- Department of the Army (1967), *Grids and Grid References*. United States Headquarters, Department of Army.
- Snyder, J. P. (1987), *Map Projections Working Manual*. US Geological Survey, Professional paper 1395, Washington.
- Snyder, J. P. and H. Steward (1988), *Bibliography of map projections*, US Geological Survey Bulletin 1856.
- Spilhaus, A. (1991), *Atlas of the World Geophysical Boundaries—Ocean, Continents and Tectonic Plates Their Entirety*. American Philosophical Society, Philadelphia.

Ouvrages sur les projections cartographiques, disponibles ailleurs sur l'Internet

- Anoni, A., C. Luzet, E. Gubler, and J. Ihde (Eds.) (2003), *Map projections for Europe*. Institute for Environment and Sustainability, European Communities.
<http://www.ec-gis.org/sdi/publist/pdfs/annoni-et-al2003eur.pdf>
- Frankich, K. (1982), *Optimization of geographic map projections for Canadian territory*. Simon Fraser University, Vancouver.
<http://summit.sfu.ca/item/4135>
- Hager, J. W., J. F. Behensky, and B.W. Drew (1989), *The universal grids: Universal Transverse Mercator (UTM) and Universal Polar Stereographic (UPS)*. Tech. Rep. TM 8358.2, Defense Mapping Agency.

- http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tm8358.2/TM8358_2.pdf
- Krüger, J. H. L. (1912), *Konforme Abbildung des Erdellipsoides in der Ebene*. New Series 52. Royal Prussian Geodetic Institute, Potsdam.
<http://bib.gfz-potsdam.de/pub/digi/krueger2.pdf>
- Snyder, J. P. and M. P. Voxland (1989), *Album of Map Projection*, US Geological Survey, Professional Paper 1453. <http://pubs.usgs.gov/pp/1453/report.pdf>
- Thomas, P. D. (1952), *Conformal projections in geodesy and cartography*. Special Publication 251. US Coast and Geodetic Survey.
http://docs.lib.noaa.gov/rescue/cgs_specpubs/QB275U35no2511952.pdf
- Tobler, W. R. (1961), *Map transformation of geographic space*. University of Washington, Seattle.
http://www.geog.ucsb.edu/~tobler/publications/pdf_docs/cartography/projections/cartograms/Transformations.pdf