

La représentation des données géographiques

Dans la même collection

- BAUELLE Guy, *Géographie du peuplement*, 2016, 3^e édition.
- CIATTONI Annette et VEYRET Yvette (dir.), *Les fondamentaux de la géographie*, 2013, 3^e édition.
- DAVID Olivier, *La population mondiale. Répartition, dynamique et mobilité*, 2015, 3^e édition.
- DI MÉO Guy, *Introduction à la géographie sociale*, 2014.
- GÉURY David et SIERRA Philippe, *Introduction à l'analyse des territoires*, 2016.
- GRATALOUP Christian, *Introduction à la géohistoire*, 2015.
- HUMAIN-LAMOURE Anne-Lise et LAPORTE Antoine, *Introduction à la géographie urbaine*, 2017.
- LOUCHET André, *Les océans. Bilan et perspectives*, 2013.
- LOUISET Odette, *Introduction à la ville*, 2011.
- MORANGE Marianne et SCHMOLL Camille, *Les outils qualitatifs en géographie. Méthodes et applications*, 2016.
- PUMAIN Denise et SAINT-JULIEN Thérèse, *Analyse spatiale. Les interactions*, 2010, 2^e édition.
- PUMAIN Denise et SAINT-JULIEN Thérèse, *Analyse spatiale. Les localisations*, 2010, 2^e édition.
- TIANO Camille et LOÏZZO Clara, *Le commentaire de carte topographique*, 2017.
- VEYRET Yvette et CIATTONI Annette, *Géo-environnement*, 2011, 2^e édition.
- VEYRET Yvette, *La France. Milieux physiques et environnement*, 2000.
- ZANIN Christine et LAMBERT Nicolas, *Manuel de cartographie*, 2016.

MICHÈLE BÉGUIN
DENISE PUMAIN

La représentation des données géographiques

Statistique et cartographie

Avec la collaboration de
Hélène Mathian et Olivier Finance,
Élisabeth Pascard et Lilliane Lizzi
pour les illustrations

4^e édition

ARMAND COLIN

Conception de couverture : Hokus Pokus créations

Illustration de couverture : extrait d'une carte du rapport pour le European Spatial Development Perspective (ESDP, 1999 ; part 2 : *Regions and rural-urban partnerships: Regional types of urban-rural spatial patterns*, p. 24).

Réalisation : UMR Géographie-cités ; conception : Denise Pumain et Hélène Mathian ; cartographie : Eugénie Dumas et Antonin Pavard.

Maquette intérieure : Raphaël Lefeuvre

Mise en page : Belle Page

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Armand Colin 2014, 2017

Armand Colin est une marque de Dunod Éditeur
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

ISBN 978-2-200-61782-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Sommaire

Introduction	11
1 Les principes de la cartographie	13
1. Définition de la carte	14
2. Notion de projection	15
2.1. La forme de la Terre	15
2.2. Les coordonnées géographiques	17
2.3. Les systèmes de projection	18
3. L'échelle de la carte	24
4. La généralisation	26
4.1. Qu'entend-on par sélection ?	27
4.2. Qu'entend-on par schématisation ?	27
4.3. Qu'entend-on par harmonisation ?	30
5. Le fond de carte	30
5.1. Définition	30
5.2. Où trouver un fond de carte ?	32
6. Quelques grandes étapes de l'histoire de la cartographie	35
2 L'information géographique	43
1. Définition	43
2. L'utilité de l'information géographique	44
3. Les moyens d'acquisition des données géographiques	46
4. Le stockage de l'information géographique	47
4.1. Les systèmes d'information géographique	48
5. Traitement statistique et cartographique de l'information	52

6. Formaliser les données	54
6.1. Types de variables ou de caractères	55
6.2. Les principes de la réduction de l'information	57
3 La sémiologie et le langage cartographique	61
1. Les composantes du langage cartographique	63
2. La variable visuelle : forme	65
2.1. Description	65
2.2. Propriétés	65
2.3. Utilisation	66
3. La variable visuelle : taille	68
3.1. Définition	68
3.2. Propriétés	68
3.3. Utilisation	70
4. La variable visuelle : couleur	80
4.1. Description	81
4.2. Propriétés de la couleur	82
4.3. Utilisation	84
5. La variable visuelle : valeur	88
5.1. Définition	88
5.2. Propriétés	88
5.3. Utilisation	90
6. La variable visuelle : texture-structure	92
6.1. Définition	92
6.2. Propriétés	92
6.3. Utilisation	93
7. La variable visuelle : grain	93
7.1. Définition	93
7.2. Propriétés et utilisation	94
8. La variable visuelle : orientation	94
9. Les modes de représentation cartographique	95

4 Traiter et représenter l'information qualitative nominale	101
1. Représentation directe d'une information simple	102
1.1. Données en implantation ponctuelle	102
1.2. Données en implantation linéaire	104
1.3. Données en implantation zonale	104
2. Représentation directe d'une information qualitative complexe : la carte d'inventaire	104
3. Représentation graphique des caractères qualitatifs nominaux	109
5 Découper en classes les séries quantitatives	117
1. Le compromis statistique/cartographie	117
2. La réduction statistique de l'information	119
2.1. Informer sur l'ordre de grandeur	119
2.2. Conserver la forme de la distribution	126
2.3. Conserver la dispersion :	
maximiser la variance interclasse	129
2.4. Faire apparaître les irrégularités des séries ?	130
3. Méthodes de discrétisation	131
3.1. Classes d'amplitude égale	132
3.2. Utilisation de la moyenne et de l'écart type	134
3.3. Classes en progression géométrique	140
3.4. Méthode dite des « seuils naturels »	
ou des discontinuités	141
3.5. Classes d'effectifs égaux (discrétisation selon les quantiles)	143
4. Discrétisation pour la comparaison	144
6 Représenter les séries quantitatives ou l'information ordonnée	149
1. La représentation directe des séries quantitatives	149
1.1. Données en implantation ponctuelle	150
1.2. Données en implantation linéaire	160
1.3. Données en implantation zonale	162

2. La représentation des séries discrétisées	165
2.1. Représentation cartographique : cartes choroplèthes	165
2.2. Représentation graphique : l'histogramme	167
3. La représentation des séries ordonnées	171
4. Simple et double progression	171
4.1. Inversion des progressions	171
4.2. Mise en évidence d'un seuil	172
4.3. Représentation des écarts : double progression	173
7 Représenter deux caractères quantitatifs	179
1. Représentation graphique de la relation entre deux caractères : le diagramme cartésien	180
1.2 Construction d'un diagramme cartésien	180
1.2 Interprétation du diagramme cartésien	181
2. La combinaison de variables visuelles	185
2.1. Combinaison de deux tailles	185
2.2. Combinaison de deux variables visuelles différentes	186
3. L'ajustement linéaire	189
4. Cartographie des écarts à l'ajustement linéaire (résidus de régression)	192
8 Les graphiques fonctionnels	197
1. La fonction exponentielle et le graphique semi-logarithmique	198
2. La fonction puissance et le graphique logarithmique	206
3. La distribution lognormale et les graphiques gaussio-logarithmiques	210
4. La courbe de concentration	213
9 Traiter et représenter l'information quantitative multivariée	219
1. Le traitement des tableaux de contingence	220
1.1. Visualisation directe du tableau de contingence	222

1.2. Visualisation directe des profils en ligne : la carte par bandes (caractères à 4 ou 5 modalités maximum)	224
1.3. Le diagramme triangulaire	226
1.4. Analyse des correspondances	229
2. Les tableaux d'information géographique	236
2.1. Graphe de corrélation	236
2.2. L'analyse en composantes principales	237
3. La classification	242
4. La régression multiple, les surfaces de tendance	247
Conclusion	251
Bibliographie	261

Introduction

Notre société se veut celle de l'information et de l'image. En géographie, cela se traduit par une production et une consommation de cartes sans précédent. Les étudiants qui souhaitent se former aux méthodes de représentation des données géographiques sont confrontés, d'un côté à des manuels de statistiques qui leur apprennent comment traiter l'information, de l'autre à des manuels de cartographie qui leur enseignent les moyens de la représenter. L'enchaînement des opérations nécessaires à la réalisation d'une carte à partir de données brutes est rarement explicité de bout en bout. De plus, les vocabulaires employés diffèrent et ne sont pas toujours compatibles entre statistique et cartographie : un même terme est utilisé avec des sens différents, ou deux termes différents peuvent désigner la même chose.

L'objectif de ce manuel est de mettre à la portée des étudiants débutants des méthodes éprouvées associant le passage pertinent des données à l'information par un traitement statistique approprié, et une communication efficace de cette information grâce à un bon usage du langage graphique. L'étudiant qui veut réaliser une carte trouvera dans ce livre des solutions aux trois types de difficultés qu'il rencontre :

- Connaître les règles fondamentales du traitement des données et du langage graphique, celles qu'il n'est pas question de transgresser sous peine de commettre des erreurs ou de « mentir », délibérément ou inconsciemment.

- S'orienter parmi les choix possibles tout en respectant ces règles. On a toujours plusieurs solutions pour résumer et pour représenter une information. En choisir une dépend principalement de l'objectif de la communication. Cet ouvrage aide à former une décision en signalant les avantages et les inconvénients des différentes solutions et en proposant souvent le « meilleur choix » pour un type de problème donné.

- Se construire une image claire de l'outillage statistique et cartographique, en dépit des ambiguïtés de langage qui subsistent entre les

deux disciplines et dans leur application aux sciences humaines. Ce livre propose un cadre commun de présentation et de traitement des données, un vocabulaire unifié avec des définitions précises, compatibles avec celles du Comité français de cartographie et des grands ouvrages de statistique. Les synonymes sont signalés, ainsi que les usages ambigus ou erronés.

Il est vivement recommandé d'apprendre dès que possible à effectuer toutes les opérations décrites dans ce livre à l'aide d'outils informatiques. Les logiciels de traitement de données, de cartographie automatique et de dessin, les systèmes d'information géographique sont si nombreux qu'il est hors de question d'apprendre à les utiliser tous. Il est en revanche indispensable de connaître les principes et les méthodes énoncés dans ce livre, car aucun logiciel ne permet de prendre automatiquement les bonnes décisions de représentation selon la nature de l'information et les objectifs de la communication. Cet ouvrage tient lieu, en quelque sorte, de « système expert » pour mener à bien toute la chaîne d'opérations qui va du choix d'une méthode de traitement des données à la conception du document graphique ou cartographique.

Que les statisticiens de métier veuillent bien nous pardonner si nous avons pris quelque liberté avec les fondements rigoureux de leur discipline : nous insistons sur l'interprétation géographique de résultats en vue de leur communication visuelle plus que sur les justifications théoriques de l'utilisation des paramètres statistiques.

■ Chapitre 1

Les principes de la cartographie

On a toujours besoin de cartes. Pour se déplacer dans une ville, le visiteur utilise des plans de rue, l'usager ceux du réseau des autobus ou du métro. Pour trouver un itinéraire à l'écart des grands axes de circulation, la carte routière est indispensable. Pour s'orienter sur les chemins de randonnée, il faut savoir lire une carte à grande échelle. D'une manière générale, les cartes aident à comprendre le monde en en donnant des représentations globales, faciles à mémoriser ou à consulter. Elles permettent aussi de communiquer une information géographique, un message plus ou moins élaboré et font, à ce titre, partie des outils médiatiques dont la diffusion est de plus en plus large.

L'étudiant géographe est un consommateur de cartes parmi d'autres, qui doit apprendre à utiliser et à décoder ces documents. Mais il est aussi un réalisateur. Il doit être capable de concevoir et de produire des images cartographiques pertinentes, qui communiquent efficacement de l'information géographique. Il doit savoir utiliser les cartes de base, traiter des données statistiques et fabriquer de nouvelles cartes thématiques, par exemple pour des utilisateurs spécialisés comme les collectivités responsables de l'aménagement du territoire.

C'est l'usage final de la carte qui va déterminer l'apparence et le contenu de ce document : son support (écran ou papier par exemple), son format (grande planche d'Atlas ou simple feuillet A4), les caractéristiques du fond de carte (projection, échelle, généralisation), le type de traitement de l'information et son mode de représentation.

Mais qu'est-ce qu'une carte ?

1. Définition de la carte

Comme tout objet complexe qui a une longue histoire, la carte a reçu de nombreuses définitions. Nous en retiendrons trois. La première, plus technique et concrète est proposée par le Comité français de cartographie (CFC) : « La carte est une représentation géométrique conventionnelle, généralement plane, en positions relatives, de phénomènes concrets ou abstraits, localisables dans l'espace ; c'est aussi un document portant cette représentation ou une partie de cette représentation sous forme d'une figure manuscrite, imprimée ou réalisée par tout autre moyen. »

La deuxième définition, proposée par le professeur Salitchev (1967) précise la première et introduit une référence à la finalité géographique et à l'utilisation de la carte : « La carte est une représentation réduite, généralisée, mathématiquement précise de la surface terrestre sur un plan montrant la situation, la distribution et les rapports de divers phénomènes naturels et sociaux, choisis et définis en fonction du but de chaque carte. La carte permet également de montrer les variations et les développements des phénomènes dans le temps ainsi que leurs facteurs de déplacement dans l'espace. »

L'étudiant pourra retenir simplement la troisième définition proposée par F. Joly (1976) : « Une carte est une représentation géométrique plane simplifiée et conventionnelle de tout ou partie de la surface terrestre, et cela dans un rapport de similitude convenable qu'on appelle échelle. »

Ces trois définitions font appel à des notions que nous allons préciser : donner de la surface de la Terre une représentation géométrique plane suppose que l'on utilise une méthode mathématique appelée projection. La nécessaire réduction de dimension entre la portion de surface terrestre et le document (il n'est en effet pas question que la carte de l'Empire soit aussi grande que l'Empire) implique de maîtriser la notion d'échelle ; la réduction nécessite une simplification de l'image globale par la généralisation ; le choix des objets représentés introduit la notion de type de carte.

Un planisphère est une représentation plane d'un seul tenant de la surface terrestre tandis qu'une mappemonde figure séparément les deux hémisphères.

2. Notion de projection

L'étudiant qui recopie un fond de carte sur un atlas doit être capable de le choisir à bon escient. Pour sélectionner un fond de carte adapté à la carte à réaliser, il faut connaître le système de projection à partir duquel le fond a été construit. Même si la réalisation des projections cartographiques est l'affaire de spécialistes, il est bon de connaître leurs principales caractéristiques et leurs propriétés avant de les utiliser. Dans les atlas, les projections sont désignées le plus souvent par le nom de leur inventeur. Le tableau 1.1 précise, pour chaque région du monde, quelles sont les projections les plus couramment utilisées et quelles sont leurs propriétés.

Lorsqu'il est important de se repérer exactement (cartes de navigation ou cartes topographiques), on choisit des projections conformes (par exemple, une projection de Mercator pour les cartes marines ou la projection conique conforme de Lambert pour les cartes topographiques de l'IGN ou encore une projection stéréographique polaire pour certaines cartes aéronautiques); lorsqu'il est plus important que les rapports entre les surfaces soient conservés et que les proportions des continents soient respectées, on choisit des projections équivalentes (par exemple, une projection cylindrique de Eckert IV pour un planisphère) ou aphyllactiques (par exemple, la projection cylindrique de Gall, utilisée dans de nombreux atlas).

Pour situer chacun de ces termes techniques et surtout pour comprendre la signification de ces choix, il est nécessaire de rappeler quelques notions élémentaires relatives aux projections.

2.1. La forme de la Terre

La Terre est assimilable à une sphère bien que cette sphère soit imparfaite. On appelle géoïde la surface théorique que l'on sait déterminer par des mesures et qui se rapproche le plus de la forme réelle de la Terre. La surface des océans (3/4 du globe) se confond avec le géoïde (les océans ont une surface d'altitude zéro dont les variations dues aux vagues n'excèdent pas 20 mètres). La surface solide s'écarte davantage du géoïde (Everest = 8 848 mètres), mais compte tenu de la taille de la Terre, l'irrégularité est faible : sur un globe de 1,30 m de diamètre, l'Everest apparaîtrait avec un dénivelé de 0,9 mm.

Tableau 1.1 : Quelques projections d'usage courant

	Propriétés	Projection et type de construction
Les planisphères	équivalentes	– Mollweide, Hammer (type azimutal), – Eckert IV, Samson-Flamsteed (assimilée aux projections coniques)
	conformes	– Mercator (cylindrique) – Gall (stéréographique), Winkel, Eckert III
Les mappemondes	équivalentes	– Projection azimutale équivalente de Lambert dite de Lorgna
	conformes	– Les projections azimutales stéréographiques polaires
Les masses continentales		
Asie, Amérique du Nord	équivalentes	– Albers (conique sécante) – Bonne (conique dérivée) – Lambert (azimutale transverse)
Europe, Australie	équivalentes	– Lambert-Lorgna (azimutale transverse) – Albers (conique sécante) Les projections coniques simples avec deux parallèles sécants sont les plus utilisées.
Afrique, Amérique du Sud et régions proches de l'équateur	équivalentes	– Lambert-Lorgna (azimutale transverse) – Hatt (azimutale oblique) – Mollweide, Hammer, Mercator (pour les régions proches de l'équateur)
Régions polaires	équivalente	– Bonne (conique dérivée)
	aphylactique	– Postel (azimutale polaire)
		– Albers (projection tronconique) – Bonne (projection conique dérivée)
Petits pays aux latitudes moyennes	équivalentes	– projections coniques : Albers et Bonne
Pour la navigation et la météorologie		
conformes		– projection stéréographique polaire – projection cylindrique de Mercator (loxodromie rectiligne) – les projections gnomoniques (orthodromie rectiligne) – les projections de Mercator oblique (construction des routiers US) – projection conique de Lambert (orthodromie rectiligne)
Cartes topographiques		
conformes		– projection de Gauss/UTM cylindrique transverse (80 % de la production mondiale) – projection conique conforme de Lambert, France (10 %)
aphylactique		– projection polyconique COAST and GEODESIC SURVEY (10 %)

On appelle ellipsoïde la surface mathématique qui se rapproche le plus du géoïde. La Terre est assimilée à un ellipsoïde de révolution aplati

aux pôles. Le calcul de l'ellipsoïde est établi à partir d'un point fondamental arbitraire tel qu'en ce point l'ellipsoïde et le géoïde sont confondus. Il en résulte que de nombreux ellipsoïdes peuvent être ajustés à la surface de la Terre.

Les coordonnées géodésiques, qui permettent de repérer la position de chaque point à la surface de la Terre, dépendent des caractéristiques de l'ellipsoïde. Sur les documents anciens, le tracé des méridiens et des parallèles sur des cartes à petite échelle peut donc présenter des différences non négligeables avec ceux utilisés actuellement. L'ellipsoïde de Hayford (1909) a été retenu comme ellipsoïde international par l'assemblée générale de l'Union géodésique et géographique internationale en 1924. Son aplatissement (longueur du demi-grand axe moins longueur du demi-petit axe divisé par la longueur du demi-grand axe) est de 1/297.

La triangulation française, encore utilisée actuellement pour réaliser les cartes topographiques, avait été calculée sur l'ellipsoïde de Clarke (1880) dont le point fondamental est le Panthéon (il présente un aplatissement de 1/293). Depuis 2001, le Réseau géodésique français 1993 (RGF93) fondé sur le ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) lui a succédé comme système de référence officiel.

2.2. Les coordonnées géographiques

Comment repère-t-on un point à la surface de la Terre ? Le globe a été divisé par un système de repérage qui est un réseau de lignes orthogonales :

- les méridiens : grands cercles passant par les pôles,
- les parallèles : lignes circulaires parallèles à l'équateur qui est le parallèle origine.

La longueur totale de l'équateur et de chacun des méridiens est graduée en degrés ou en grades. On repère un point P à la surface de la Terre par sa longitude et sa latitude (figure 1.1).

La longitude d'un point P est la mesure de l'arc de l'équateur entre le méridien passant par le point P et un méridien choisi comme origine. Les mesures de longitude sont comptées de 0 à 180 degrés ou de 0 à 200 grades de part et d'autre du méridien origine. On distingue une longitude Ouest et une longitude Est.

Depuis 1884, le méridien international de Greenwich a été retenu comme méridien d'origine pour toutes les séries de cartes internationales et pour un grand nombre de cartes nationales. Mais de nombreux pays ont conservé leur méridien d'origine pour leur production de cartes à grandes et moyennes échelles. Par exemple, la France utilisait comme méridien origine celui de Paris dont la longitude par rapport au méridien de Greenwich est de $2^{\circ} 20' 14''$ Est.

La latitude du point P est la mesure de l'arc du méridien passant par P, compris entre l'équateur et le point P. Les mesures de latitude sont comptées de 0 à 90° entre l'équateur et le pôle (équateur = 0° de latitude, pôle = 90°). On distingue latitude Nord et latitude Sud.

La longitude et la latitude du point P sont les coordonnées géographiques du point P. Les termes de longitude et de latitude ont été créés par les Grecs en référence aux directions décrivant respectivement la longueur et la largeur de leur espace connu, celui de la Méditerranée.

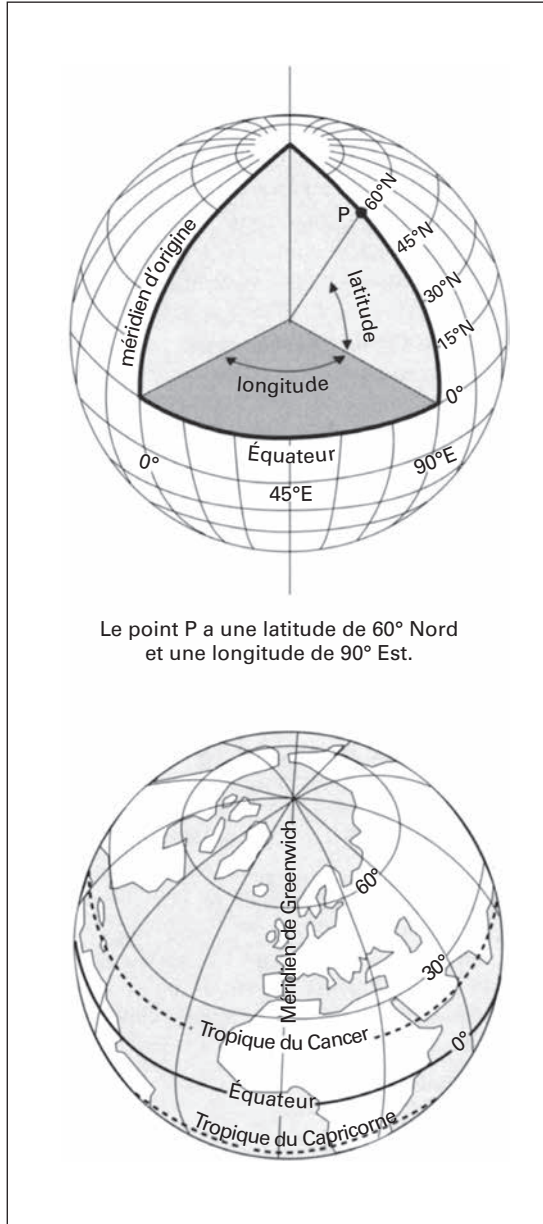
2.3. Les systèmes de projection

Comment passer de la surface de l'ellipsoïde à sa représentation sur une surface plane, la carte ? (Les définitions qui suivent sont empruntées au cours de M. Weger [ENSG, IGN].) On utilise un système de projection cartographique. Une projection est un procédé mathématique permettant d'effectuer la transposition graphique de l'ellipsoïde sur le plan de telle sorte qu'à un point M de l'ellipsoïde correspond un point m et un seul du plan et réciproquement.

Comme il est impossible de développer une sphère ou une portion de sphère sur un plan, on a recours à un artifice qui consiste à projeter géométriquement les portions de sphère sur une surface plane ou sur une surface que l'on puisse développer (cylindre ou cône). Tout système de représentation plane va introduire des déformations qui altèrent les longueurs, les angles et les surfaces.

Les altérations sont d'autant plus importantes que la portion d'ellipsoïde représentée est vaste et d'autant plus grandes (significatives) que l'on s'éloigne du centre de projection (c'est-à-dire du lieu d'altération nulle, par exemple, pour une projection conique, le cercle de contact avec l'ellipsoïde). La qualification des systèmes de projection relève de deux types de classement, l'un en fonction des altérations, l'autre en fonction des propriétés géométriques de ces systèmes.

Figure 1.1 : Les coordonnées géographiques



Le point P a une latitude de 60° Nord
et une longitude de 90° Est.

Si l'on classe les projections selon les altérations, elles sont désignées par trois adjectifs :

- *Les projections conformes.* On observe une conservation des angles élémentaires formés par des directions quelconques. Les méridiens et les parallèles se coupent à angle droit. En revanche, l'altération des surfaces s'amplifie au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de projection. Une projection conforme célèbre : la projection de Mercator directe introduit une dilatation des terres dans les latitudes élevées, par exemple de l'île du Groenland (figures 1.2 et 1.3).

- *Les projections équivalentes.* On obtient une conservation des surfaces ou, plus précisément, du rapport des surfaces de la Terre à la carte. Mais plus on s'éloigne du centre de projection, plus les formes des surfaces considérées sont déformées car les altérations angulaires sont alors maximales.

- *Les projections aphyllactiques.* Aucune projection ne peut être à la fois conforme et équivalente. Les projections qui essaient de compenser au mieux les différentes altérations sont dites aphyllactiques. Les plus connues sont les projections équidistantes (équidistance des parallèles et orthogonalité du réseau géographique).

Les projections peuvent être classées selon leurs propriétés géométriques qui varient selon le point de vue de la projection, la position et la forme de la surface utilisée. Selon le choix du pivot (centre de projection), ces projections seront dites, par ailleurs, en aspect direct ou polaire si le pivot est l'un des pôles ; en aspect transverse si le pivot est un point de l'équateur ; en aspect oblique pour tous les autres cas.

- *Les projections azimutales.* On projette une portion de l'ellipsoïde sur un plan tangent à la sphère à partir d'un point de vue. Ces projections purement géométriques sont dites perspectives (figure 1.2) : si le point de vue est au centre de la Terre, la projection est dite gnomonique ; si le point de vue est à l'opposé du point de tangence du plan et de la sphère, la projection est dite stéréographique ; si le point de vue est à l'infini, la projection est dite orthographique.

- *Les projections cylindriques.* La surface de référence a la forme d'un cylindre tangent ou sécant à l'ellipsoïde.

- *En aspect direct* : le cylindre est tangent au niveau de l'équateur ou sécant au niveau de deux parallèles symétriques de part et d'autre de l'équateur. Lorsque l'on développe le cylindre, les méridiens et les parallèles se présentent sous forme de droites se coupant à angle droit (canevas rectangulaire), mais dont l'espacement dépend de la position

du point de vue et de la loi de projection choisie. Le centre de projection est l'équateur quand le cylindre est tangent à l'équateur ; dans le cas d'un plan cylindrique sécant, ce sont les deux parallèles qui deviennent les centres de projection. La projection cylindrique en aspect direct la plus fréquemment utilisée est la projection de Mercator, qui présente d'énormes déformations des surfaces aux latitudes élevées.

Figure 1.2 : Les types de projection

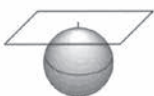


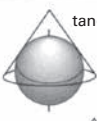




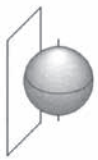

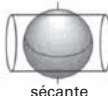



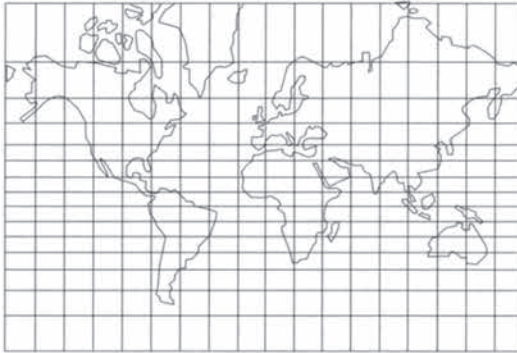
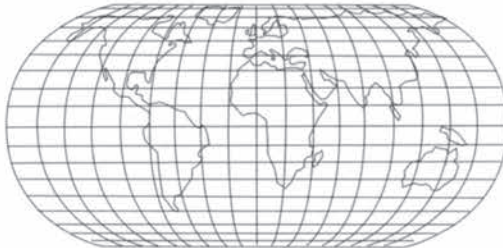
		Types de construction		
		azimutale	cylindrique	conique
Aspect	direct		 tangente  sécante	 tangente  sécante
		Exemples : G. Postel aphyllactique	de Gall Mercator conforme	Lambert conforme Albers équivalente
		Forme du réseau de coordonnées géographiques		
				
Aspect	transverse ou méridien		 tangente Universal Transverse Mercator  sécante	
		Exemples : Fournier-Lambert Lorgna équivalente		
Aspect	oblique			
		Exemple Lorgna oblique équivalente		

Figure 1.3 : Quelques projections usuelles



Projection cylindrique conforme directe (Mercator)



Projection équivalente elliptique d'Eckert



Projection conique conforme de Lambert

Projection stéréographique polaire



– *En aspect transverse* : le cylindre est tangent aux deux pôles. Ce système est très employé pour la cartographie à grande échelle, et la projection à retenir est celle de Gauss ou celle dite UTM (Universal Transverse Mercator) mise au point pour l'OTAN.

• *Les projections coniques*. La surface de référence se présente sous la forme d'un cône ou d'un tronc de cône tangent ou sécant à la sphère. On utilise essentiellement l'aspect direct, l'axe du cône est confondu avec l'axe des pôles. Lorsque l'on développe le cône, les méridiens sont des droites rayonnantes et les parallèles des arcs de cercles concentriques. On trouve dans ce système la projection d'Albers tronconique équivalente utilisée aux États-Unis ; la projection conique équivalente de Lambert, la projection conique conforme de Lambert utilisée en France.

De plus, il existe d'autres systèmes de projection qui ne se rattachent à aucun des trois types précédents. Au total, on dénombre quelque 350 projections différentes... En principe, toute carte publiée devrait comporter l'indication de sa projection. Dans la pratique, seuls les grands atlas fournissent cette précision.

Pour ceux qui pratiquent la navigation ou le vol sans visibilité, rappelons que deux types de courbes peuvent les aider à se repérer en se déplaçant :

– *La loxodromie* est une courbe qui, sur la carte, coupe les méridiens selon le même angle, c'est la route à cap constant, la plus facile à suivre pour les navigateurs. La carte de Mercator est une carte sur laquelle les loxodromies sont représentées par des droites (sur la sphère, les loxodromies décrivent des spirales).

– *L'orthodromie* est une ligne sur la carte qui correspond à un arc de grand cercle sur la sphère terrestre et qui représente le plus court chemin entre deux points. Suivre une orthodromie est plus économique mais implique de modifier le cap suivi en permanence, c'est pourquoi les navigateurs combinent loxodromie et orthodromie.

La connaissance des systèmes de projection et des paramètres qui les décrivent est aujourd'hui un élément essentiel de l'implémentation et de la manipulation de l'information géographique dans les systèmes d'information géographique (voir chapitre 2).

3. L'échelle de la carte

Toute carte doit obligatoirement indiquer son facteur de réduction appelé échelle. L'échelle d'une carte est le rapport d'une distance mesurée sur la carte à sa valeur réelle sur le terrain. C'est une caractéristique fondamentale de la carte.

Une échelle de 1/50 000 signifie que 1 cm sur la carte représente 50 000 cm, soit 500 mètres sur le terrain ; une distance de 3,8 cm sur la carte au 1/50 000 représente en km sur le terrain :

$$\text{puisque } 1 \text{ km} = 10^5 \text{ cm}$$
$$(3,8 \times 50\,000)/10^5 = 1,9 \text{ km}$$

Si une carte ne comporte pas d'échelle, on mesure l'écart en cm entre deux points connus et éloignés sur la carte. On trouve par exemple 11 cm entre deux points figurant Paris et Strasbourg. On cherche par ailleurs (par exemple, sur un atlas routier ou sur une autre carte d'échelle connue) la distance réelle entre ces deux points, soit 440 km ; 1 cm sur la carte représente donc $440/11 \text{ km} = 40 \text{ km}$ ou encore $40 \cdot 10^5 = 4\,000\,000 \text{ cm}$. L'échelle approximative de la carte est donc de 1/4 000 000.

On retient :

1/10 000	1 cm sur la carte représente	100 m sur le terrain
1/25 000	1 cm sur la carte représente	250 m sur le terrain
1/50 000	1 cm sur la carte représente	500 m sur le terrain
1/100 000	1 cm sur la carte représente	1 km sur le terrain
1/1 000 000	1 cm sur la carte représente	10 km sur le terrain
1/2 500 000	1 cm sur la carte représente	25 km sur le terrain

Il faut ajouter à cette définition simple deux précisions. Lors de la réalisation de la carte, les « distances réelles » mesurées entre deux lieux sur le terrain sont en fait corrigées : si les lieux sont à des altitudes différentes, la mesure est ramenée à celle d'une distance horizontale.

La seconde précision a des conséquences plus importantes. L'échelle d'une carte est donnée avec exactitude seulement au voisinage du centre de projection. Lorsqu'on s'en éloigne, elle prend des valeurs différentes. Ces variations sont négligeables pour des cartes à grande échelle (1/25 000 ou 1/50 000) car le « champ » de la projection, c'est-à-dire l'emprise utilisable a été volontairement limitée à la zone ayant une altération linéaire très faible, mais très significatives sur les planisphères : il est impossible d'utiliser l'échelle indiquée pour

faire des mesures de distance n'importe où sur la carte. Celle-ci devrait porter en légende l'indication du lieu où l'échelle est valable, par exemple, à proximité de l'équateur pour une projection de Mercator. Les distances réelles entre des points éloignés de la surface terrestre ne se déterminent pas à partir de la carte mais se calculent, à partir des coordonnées géographiques, selon une formule qui permet de déterminer la distance sphérique.

L'échelle d'une carte peut s'exprimer de deux façons différentes (figure 1.4) :

– *L'échelle numérique* est une fraction qui comporte généralement 1 au numérateur et un nombre rond au dénominateur. 1 : 25 000 ou 1/25 000 se lit un vingt-cinq millième.

– *L'échelle graphique* est un segment gradué matérialisant sur la carte l'échelle numérique. C'est un abaque qui établit directement la correspondance entre la longueur d'un segment porté sur la carte et une distance horizontale sur le terrain par un nombre suivi d'une unité de longueur (m ou km le plus souvent). Quand on a la valeur d'un cm, on peut calculer facilement l'échelle numérique de la carte.

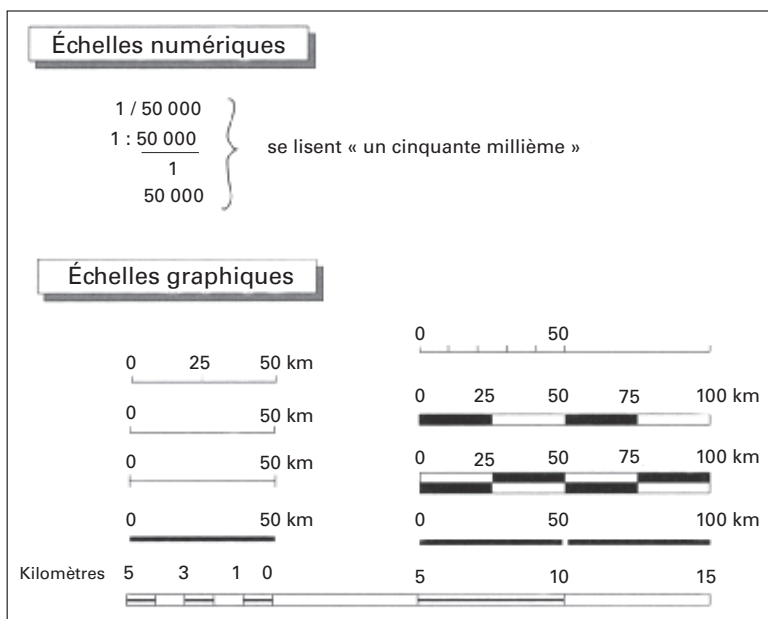
Cette échelle graphique, qui figure aussi sur les cartes topographiques, est la forme qu'il est préférable de retenir pour des documents susceptibles de subir une réduction photographique (même par simple photocopie). En effet, la réduction (ou l'agrandissement) s'applique alors uniformément à toutes les distances sur la carte, y compris au segment de l'échelle graphique, tandis que l'indication de l'échelle numérique ne serait pas modifiée et deviendrait donc fausse.

Selon la terminologie en usage à l'Institut géographique national, on classe les cartes en trois catégories :

- cartes à moyenne échelle : de 1/25 000 à 1/100 000 inclus ;
- cartes à petite échelle : de 1/100 000 à 1/500 000 inclus ;
- cartes à très petite échelle : inférieure ou égale au 1/1 000 000.

Les cartes à très grande échelle sont souvent désignées sous le nom de plans (par exemple, les plans cadastraux).

Figure 1.4 : Les échelles cartographiques



Attention ! L'échelle est un rapport : une grande échelle correspond à un petit nombre au dénominateur, une petite échelle à un grand nombre. Une carte à grande échelle représente une petite portion de la surface de la Terre (240 km² soit une vingtaine de communes, pour une carte topographique française au 1/25 000) mais avec beaucoup de détails, tandis qu'une carte à petite échelle englobe un territoire plus vaste mais au prix d'une grande simplification de ce qui est représenté.

4. La généralisation

La généralisation est l'opération qui, par sélection, schématisation et harmonisation reconstitue sur une carte la réalité de la surface représentée dans ses traits essentiels en fonction du but de la carte, de son thème, de son échelle et des particularités de la région cartographiée.

Aucune carte ne pouvant être dessinée à l'échelle 1/1, toute représentation cartographique est en effet une réduction de la réalité, donc une

généralisation. Elle s'exerce tant pour la réalisation du fond de carte que pour le traitement de l'information.

La généralisation combine simultanément les opérations de sélection, de schématisation et d'harmonisation dont les rôles respectifs varient selon le type de carte (carte topographique, carte thématique), le but de la carte (carte de vulgarisation, carte scientifique, carte didactique) et l'échelle de publication (format) qui conditionne l'ensemble du processus.

4.1. Qu'entend-on par sélection ?

La sélection, c'est le choix des éléments topographiques, administratifs et de données géographiques nécessaires à la constitution du fond de carte compte tenu de l'échelle de publication. Elle est d'ordre qualitatif ou quantitatif, elle procède le plus souvent des deux à la fois sur un fond de carte :

- décider de représenter le réseau hydrographique sur une carte qui va représenter la population des villes car les fleuves et les rivières sont un facteur de localisation et de repérage important, c'est opérer une sélection qualitative

- ne représenter que les grands fleuves ou les rivières principales dans l'ensemble du réseau hydrographique, c'est opérer une sélection quantitative.

La sélection permet avant tout de ne retenir que les éléments essentiels à la constitution du fond de carte et de s'assurer qu'ils sont appropriés au thème cartographié et que leur superposition est autorisée par l'échelle de la représentation cartographique.

4.2. Qu'entend-on par schématisation ?

La schématisation est une opération de simplification. Elle est de deux ordres : elle est dite structurale lorsqu'elle ne porte que sur les tracés ; elle est dite conceptuelle quand elle transforme le mode de représentation et l'implantation pour répondre à un nouveau concept, à un changement du niveau d'observation lié le plus souvent à une réduction d'échelle. Tout changement important de l'échelle d'une carte suppose que l'on en modifie le dessin des tracés (ligne de côte, tracés des rivières, contour administratif...). En effet, les identifications de détail qui sont utiles à grande échelle apparaissent à petite échelle sous une forme plus resserrée, très dense, qui parfois redouble ou triple le trait (bouchage), et

perturbe la lecture (effets de vibration d'une ligne très contournée). On peut observer très facilement de tels effets en réduisant par photocopie n'importe quel fond de carte. Il faut donc veiller à adapter le niveau de détail du tracé des contours à l'échelle à laquelle la carte devra être lue.

La schématisation structurale conduit nécessairement à une simplification et à une interprétation de la complexité des tracés. La simplification élimine les détails inutiles. L'interprétation, c'est-à-dire la suppression ou l'exagération des points structuraux (ceux qui servent au repérage et à l'identification : confluences, carrefours, caps...), dépend essentiellement du thème de la carte (figure 1.5). La schématisation structurale doit permettre jusqu'à sa forme la plus élaborée (la plus poussée) l'identification des objets représentés (par exemple, on peut simplifier le contour des départements mais sans aller jusqu'à perdre la possibilité d'en reconnaître la forme).

La schématisation structurale est la seule opération de généralisation qui peut être automatisée. Il existe aujourd'hui de très nombreux algorithmes (programmes informatiques) qui permettent, à partir d'un contour ou d'un tracé initial détaillé, d'en simplifier le dessin en conservant la forme générale pour une utilisation à plus petite échelle. Cela suppose que l'information initiale ait été enregistrée avec les coordonnées géographiques des points qui définissent les tracés. Certaines méthodes se contentent de sélectionner un nombre plus réduit de points, régulièrement ou au hasard, d'autres enregistrent seulement les changements de direction les plus importants en calculant les angles entre les segments de la ligne, d'autres encore éliminent les plus petits segments ; d'autres méthodes appliquent des propriétés plus complexes comme celles des fractales.

Tous ces programmes reviennent à réaliser ce qu'on appelle un lissage, une simplification qui ne retient les détails d'une courbe que s'ils sont vraiment perceptibles à une certaine échelle (figure 1.5). L'emploi de telles méthodes est cependant loin de donner toujours des résultats parfaits (il subsiste de nombreux problèmes techniques) et de satisfaire tous les besoins de la cartographie. En effet, la schématisation ne se réduit pas à une opération mécanique de changement d'échelle. Elle suppose que certains détails utiles au repérage (par exemple, un petit estuaire dans le tracé d'une côte) puissent être conservés, alors que l'algorithme les aurait éliminés. Ainsi, à l'IGN, les cartes dérivées sont réalisées à partir de bases de données issues de généralisations manuelles.