

Cartographie d'aujourd'hui et de demain : rappels et perspectives

Isabelle Thomas^(*)

Résumé. Nous partons du fait que tout objet spatial i est caractérisé par des coordonnées en x (latitude), en y (longitude) ainsi qu'en z (traditionnellement l'altitude et que nous appellerons dans cet article troisième dimension). La discussion proposée ici s'articule autour de trois aspects : (1) les problèmes issus du passage de la troisième dimension (le volume de l'ellipsoïde terrestre) à la deuxième dimension (le plan de la carte) et les nombreuses erreurs et déformations qui en résultent seront d'abord évoqués. Ensuite, (2) quelques principes élémentaires de cartographie thématique sont rappelés afin de montrer l'importance de la nature de z dans la production d'une image cartographique, et enfin, (3) nous terminons par la discussion du problème de la représentation de cette troisième dimension par les techniques modernes de visualisation, issues des progrès de disciplines proches mais différentes de la cartographie.

Note : Cet article reprend l'essentiel de la leçon publique présentée le 26 mai 2000 en vue de l'obtention du titre d'Agrégée de l'Enseignement Supérieur. Conformément au règlement de l'Université catholique de Louvain, l'intitulé de la leçon a été imposé par le jury lors de la soutenance de la thèse principale (publiée : Thomas, 2002). Le titre initial de cette leçon était « La troisième dimension en cartographie ». Le texte proposé ici constitue un rappel des bases de cartographie et de nombreuses interrogations pour l'avenir. Il ne constitue en aucun cas un état des lieux exhaustif ni un apport sur un aspect pointu d'un problème particulier de cartographie. Le texte présenté ci-dessous constitue une version légèrement modifiée d'un article publié (Thomas, 2001).

1. Introduction

Pour rappel, la géographie est une science et, comme toute autre science, elle ne se distingue pas par l'objet qu'elle étudie, mais bien par le point de vue selon lequel elle l'étudie. Dans le cas de la géographie, il s'agit essentiellement de l'aspect spatial (Bailly et Beguin, 1998, p. 15-34). Un même objet peut dès lors être étudié par plusieurs disciplines. C'est ainsi par exemple que les vols par effraction dans les habitations seront étudiés tant par des criminologues, par des sociologues, par des juristes que par des géographes qui les localisent non seulement en longitude et en latitude, mais également en altitude permettant ainsi de définir des concentrations (ou « hot spots ») entre étages d'immeubles de banlieues, mais aussi au sein des banlieues (Rentgert, 1997 et 2000). Le géographe va donc essayer de comprendre les

(*) Maître de recherches au F.N.R.S. Département de géographie et C.O.R.E., Place Louis Pasteur 3, 1348-Louvain-la-Neuve. Tél. : 010-47 21 36. E-mail : Isabelle@geog.ucl.ac.be

concentrations spatiales observées, mais aussi de les expliquer et de suggérer des solutions pour une meilleure gestion du problème dans l'espace. Deux questions sont dès lors posées par le géographe : **où** et **pourquoi là** ? La carte sera dès lors un outil de prédilection pour représenter, modéliser et agir sur la réalité spatiale analysée.

La cartographie est, elle aussi, une science, par essence mathématique, et son objectif est la conception, la préparation et la réalisation de cartes. En d'autres termes, la cartographie vise à représenter le monde sous forme graphique et géométrique (voir, par exemple, Kraak et Ormeling, 1998 pour une définition plus détaillée). Comme bien d'autres sciences, elle est fortement tributaire des progrès des connaissances, des instruments, des méthodes d'observation, ou d'évaluation des phénomènes qu'elle a pour mission de présenter. La cartographie répond à un besoin ancien de l'humanité qui est de conserver la mémoire des lieux et des voies de communication ainsi que leur caractère utile ou hostile à l'activité des hommes. D'abord stricte représentation de la Terre, elle devient, à partir du XVII^e siècle, un instrument de connaissance et de puissance au service des états et un moyen de prévoir, planifier l'action de l'homme sur son environnement. Le rôle des cartes en communication de l'information spatiale n'est plus à faire (voir par exemple Brunet, 1987, Board, 1991, Wood, 1992, Monmonnier, 1993).

En cartographie et en géographie, un objet spatial peut être défini soit comme une observation (ex. : un vol dans une maison, localisée par son adresse), soit comme une collection d'objets (ex. : l'ensemble des vols commis sur le territoire d'une commune). Chaque objet spatial est dès lors caractérisé par une (voire plusieurs) coordonnées en latitude (x) et longitude (y), mais également par un ou plusieurs attributs tels l'altitude, la densité de population, le nombre de vols dans les maisons par km², etc. Ce sont ces attributs que nous sommes amenés à cartographier ; nous les appellerons z , et les assimilerons ici à la « troisième dimension ». Certes, nous le verrons, nous sommes souvent amenés à cartographier z en deux dimensions afin de rester pragmatiques, mais en faisant toutefois appel à des artifices graphiques. Les règles régissant l'usage de ces stimuli ont été largement analysées par Bertin (1967) et sont actuellement « redécouvertes » ou en tous cas intégrées dans les Systèmes d'Information Géographiques (S.I.G.) et les techniques de visualisation.

La carte est dès lors beaucoup plus qu'une simple image ; MacEachren (1995) résume cela très bien dans son cube (voir Figure 1) : selon le type de public auquel elle est destinée, selon le degré de relation entre les données et selon l'interaction entre le lecteur et le document cartographique, la carte servira respectivement (1) à explorer une nouvelle base de données spatiales (usage privé de l'auteur), (2) à analyser/comprendre un phénomène, (3) à synthétiser un ensemble d'observations et/ou de variables et (4) à présenter le résultat d'analyses fouillées par un document de synthèse (publication d'une carte claire au détriment souvent de la précision de l'information spatiale). Selon l'objectif recherché, d'autres règles de cartographie, de graphisme ou de visualisation seront adoptées afin de faire de la carte un outil scientifique et rigoureux d'analyse et d'aide à la décision.

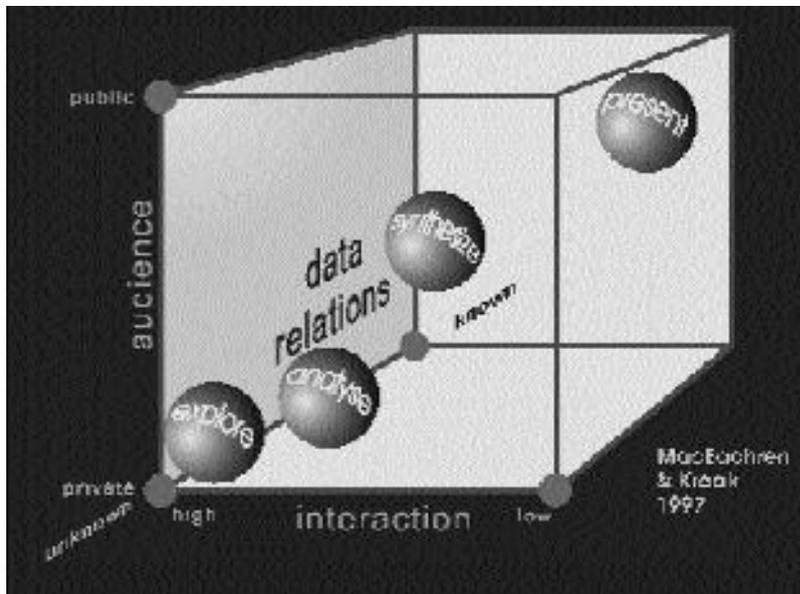


Figure 1 : Le cube de MacEachren (MacEachren et Kraak, 1997 ; Kraak et Ormeling, 1998).

Nous utiliserons ici à plusieurs reprises le terme dimension. Ce mot revêt dans le langage courant et technique diverses significations que nous n'aborderons pas ici (voir par exemple Banchoff, 1996, chapitre 1). Globalement, au substantif « dimension » est associée la définition suivante « nombre de paramètres indépendants – et souvent ces paramètres eux-mêmes – qui permettent de décrire un phénomène en mathématiques et en sciences expérimentales » (Webencyclo Atlas, 2000). En cartographie, la notion de dimension touchera tant les problèmes mathématiques des projections cartographiques que les problèmes de visualisation et de cartographie thématique. C'est autour de ces trois aspects que cet article sera donc articulé.

Puisque tout objet spatial est caractérisé par trois dimensions (x , y et z), la suite de cet exposé sera articulée autour de trois sections. La Section 2 rappelle les problèmes posés par le passage de la troisième dimension (le volume de l'ellipsoïde terrestre) à la deuxième dimension (le plan de la carte) et s'attache aux erreurs commises sur les coordonnées en x et en y . La Section 3 rappelle quelques principes élémentaires de cartographie afin de montrer l'importance de la nature de z en cartographie thématique. La Section 4, quant à elle, pose le problème de la représentation plus réaliste de la troisième dimension par les techniques modernes de visualisation, discipline proche mais différente de la cartographie. La Section 5 conclut l'article.

2. Les projections cartographiques

Le problème de la représentation plane de la Terre se pose depuis les anciens Grecs, au départ pour des problèmes de navigation. À juste titre : il est impossible d'aplatir une sphère sans déchirure ni déformation ; autrement dit, il n'existe aucune

application d'une sphère sur un plan conservant à la fois les distances, les angles et les formes. Pelez une orange et essayez de reconstituer son écorce sur une surface plane !

On appelle **projection cartographique** le système de correspondance entre les coordonnées géographiques et les points du plan de projection. Les coordonnées géographiques (longitude, latitude) font appel à des calculs d'angles dans un espace à trois dimensions (le globe sphérique). Ceci implique des calculs de trigonométrie sphérique relativement complexes, d'où l'intérêt de travailler avec des coordonnées planes dans un système cartésien (coordonnées x, y dans le plan). La projection de la surface sphérique du globe sur un plan implique un certain nombre de transformations, lesquelles entraînent des déformations ou **altérations** : altération des angles, des rapports de distances, des rapports de superficies, des formes et des directions. On parlera alors de projection conforme lorsqu'elle conserve les angles (localement), équivalente lorsqu'elle conserve les rapports de superficies et équidistante lorsqu'elle conserve les rapports de distances. Pour rappel aucune projection ne peut conserver plus d'une de ces propriétés en même temps. Certaines projections ne possèdent aucune de ces propriétés en particulier, mais tendent à minimiser les distorsions ; elles sont dites aphyllactiques. Notons également que la Terre n'est pas parfaitement sphérique et lorsqu'on effectue une cartographie à grande échelle, on doit aussi tenir compte de l'aplatissement de la Terre aux pôles. Les coordonnées en longitude et en latitude d'un même lieu seront différentes selon qu'on les calcule par rapport à la sphère ou par rapport à une figure plus proche de la forme de la Terre, l'ellipsoïde. En projection, on veillera donc à ce que les distorsions soient minimales pour la surface montrée. L'amplitude de la distorsion dépend de l'échelle et sera d'autant plus grande que l'échelle est petite et que la surface étudiée est grande.

Pour rappel, les projections se distinguent selon la surface géométrique de projection (conique, cylindrique ou azimutale), la position de la surface de projection (tangente ou sécante), la perspective (polaire, équatoriale, transverse ou oblique) et le type de construction (orthographique, gnomique ou stéréographique) (voir par exemple Béguin et Pumain, 1996, p. 5-13 ; Dana, 1997 ; Furuti, 1997 ; Mulcahy, 1997). Il existe dès lors une multitude de cartes dont la nomenclature dépend principalement des propriétés géométriques de la carte ; citons – à titre d'exemples – les projections d'Albers (conique sécante), de Bonne (conique dérivée), de Lambert (azimutale transverse), de Mollweide, de Mercator (cylindrique), de Sanson-Flamsteed (pseudo-cylindrique interrompue), etc. Le choix d'une projection dépendra du but de la carte, de l'échelle et de l'étendue du territoire ainsi que de la latitude choisie. C'est ainsi, par exemple, que les directions doivent être respectées pour un problème de navigation, les distances pour des déplacements routiers, et les formes et grandeurs pour des cartes thématiques aréales ; de même, pour des raisons de moindre déformation, une projection cylindrique sera privilégiée pour des régions équatoriales, une projection conique pour des latitudes moyennes et une projection plane pour des régions polaires (voir, par exemple, le site Internet de l'Atlas national du Canada).

Avec l'avènement des S.I.G. le problème de l'exagération des déformations de certaines portions de l'espace en termes de forme, angle, surface ou distance est maîtrisé, en tous cas à grande échelle (c'est-à-dire pour des petites portions de surface de la Terre). Il suffit d'ailleurs de voir l'importance qu'occupent les projections dans les cours de cartographie, dans les atlas datant d'il y a 20 ou 30 ans par rapport à aujourd'hui. Nous supposons donc dans le reste de cet exposé que les coordonnées en x et en y sont connues. Notons simplement qu'aujourd'hui, deux types de problèmes préoccupent encore les utilisateurs de S.I.G. en termes de création de cartes : (1) le passage aisé d'un type de projection à un autre, et (2) l'ultra-précision des S.I.G. En effet, il s'avère que les systèmes d'information géographiques permettent une précision des données en x et en y supérieure à celle des données de départ (après mesure), problème qui peut s'avérer très important dans certaines cartes à très grande échelle (exemple : pour des localisations de puits de mines).

3. La nature de z

Intéressons-nous maintenant à la nature de z , qui peut, certes, être l'altitude mais qui peut aussi être toute autre caractéristique associée à un lieu i . Comment représenter z de telle sorte que les biais soient minimaux dans sa représentation cartographique ? En quoi la nature de z influence-t-elle le type de carte ? Il convient ici de rappeler quelques règles de base de cartographie thématique, car la carte est bien plus qu'une « simple image ». La carte n'est pas une œuvre d'art, sa construction répond à des règles strictes dont l'importance est d'autant plus justifiée que sa lecture implique des processus de perception. Il faut donc que le message soit clair, juste et impossible à mal interpréter (Unwin, 1981), car le document cartographique peut être à l'origine de prises de décisions stratégiques. L'utilisation de logiciels de cartographie et de dessin semble souvent avoir annihilé tout raisonnement logique face aux différentes étapes de l'élaboration d'une carte ; rappelons donc ici certaines contraintes de réalisation.

La matrice d'informations géographiques constitue la base de tout document cartographique ; traditionnellement, cette matrice croise des lieux et des attributs. Un lieu est souvent noté i et appelé « **contenant** » ; il est caractérisé par une/des coordonnées en latitude (x) et longitude (y). Le/les attributs sont notés z et appelés « **contenu** ». z est une mesure, c'est-à-dire un processus d'assignation d'une classe à un phénomène observé en i en suivant des règles. L'assignation se fait selon un ou des processus opérationnellement définis, donnant des résultats reproductibles. En géographie physique, ces mesures posent souvent peu de problèmes ; il s'agit de mesures d'altitude, de quantité de précipitations ou de pollution, etc. En géographie humaine, il y a fréquemment un décalage important entre la mesure et le phénomène que l'on souhaite étudier (voir par exemple Board et Taylor, 1985). Citons par exemple les notions de surpopulation, perception, comportement, potentiel, ...

On peut classer les cartes de plusieurs façons, selon différents critères tels que l'échelle, la projection ou le contenu. Néanmoins, dans le champ de la production cartographique, les cartes se rangent habituellement en deux catégories : les cartes de

base et les cartes thématiques. Les cartes de base représentent les renseignements à propos de la surface de la Terre (cartes d'inventaire) : formes de terrain, hydrographie, points de repère tels les voies de communication, les lieux habités, les noms ou centroïdes géographiques. Les cartes qui offrent seulement des renseignements bidimensionnels sont nommées **planimétriques** tandis que celles qui représentent aussi l'altitude sont appelées **topographiques**. On peut indiquer l'altitude sur les cartes topographiques de différentes manières ; la méthode la plus couramment utilisée consiste à tracer des courbes de niveau qui relient les points d'égale altitude positive ou négative (*isolignes*). On reconnaît l'intervalle des courbes à la différence entre les courbes de niveau. Une autre méthode qui permet de présenter la topographie est l'*estompage*, c'est-à-dire une impression artistique d'altitude par ombrage rendant compte de la troisième dimension. Le choix des teintes hypsométriques entre les courbes de niveau choisies sert à mettre en valeur l'altitude ou la profondeur (voir par exemple le site Internet de l'Atlas National du Canada).

Les **cartes thématiques** rendent compte de la distribution spatiale de renseignements qualitatifs et/ou quantitatifs agrégés par surfaces (voir Figure 2). Traditionnellement, les cartes thématiques dites qualitatives représentent la distribution de données nominales de base, soit des données classifiées sans hiérarchie ; ces variables sont aussi appelées différentielles (Blin et Bord, 1993). Les exemples de ce type de cartes sont nombreux : répartition de la végétation, des types de sols, des types de précipitations, etc. Les cartes thématiques quantitatives sont plus complexes, car elles touchent à la fois la localisation de données ordinales, d'intervalles et de ratios. Les données ordinales offrent à l'utilisateur des informations sur le rang et la hiérarchie (par exemple une carte indiquant les lieux habités qui sont classés en tant que ville, village ou hameau). La possibilité de classer ce type de données nous conduit ici à les ranger parmi les variables quantitatives, par opposition aux variables nominales sur lesquelles aucune opération n'est possible. Les données dites « cardinales » ou numériques (Slocum, 1999) ou quantitatives (Blin et Bord, 1993, p. 49) sont soit de rapport, soit d'intervalles. Il n'est plus question de rang ou d'ordre entre les valeurs, mais de distances exactes entre valeurs. Les données d'intervalles se réfèrent à un point zéro arbitraire, les données de rapport à un point zéro non arbitraire. Le fait que le zéro soit arbitraire signifie que le rapport entre deux valeurs ne peut être interprété correctement, l'exemple le plus fréquent étant les températures exprimées en degrés Celsius et Fahrenheit. Ce type de données est le plus fréquent ; elles offrent des renseignements précis. Elles emploient une échelle de données modifiées habituellement décrite dans une légende (exemple : une cartographie de la hauteur des précipitations qui indique le nombre de millimètres de pluie par année dans différents lieux par des combinaisons de couleurs illustrant les intervalles de données).

Si la classification nominale - ordinale - numérique (cardinale) est communément admise dans les manuels de cartographie, il convient cependant de s'interroger sur la notion de variable nominale (est-elle réellement qualitative ?) ainsi que sur la notion de variable ordinale (certains auteurs classent les données ordinales dans les données

qualitatives, d'autres dans les quantitatives, Slocum, 1999, p 22). Enfin, certains auteurs limitent l'usage de quantitative aux variables numériques (cardinales). Dans la Figure 2 les notions de qualitatif et quantitatif sont dès lors ombrées car elles peuvent être remises en question. Notre intention n'est pas ici de faire un débat à ce sujet.

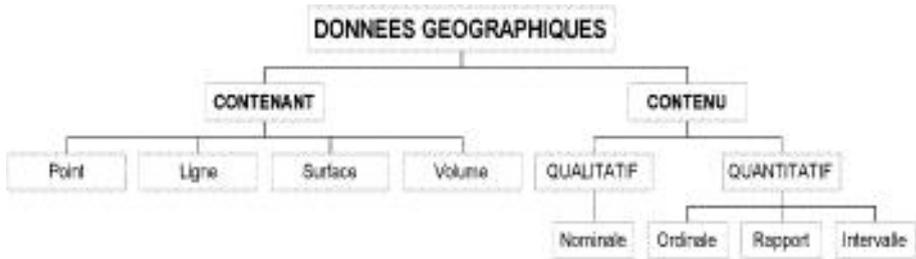


Figure 2 : Caractéristiques des données géographiques

Dans le cadre de cet article, **cinq règles de base** sont évoquées afin de résumer quelques principes élémentaires de cartographie thématique, mais également afin de montrer comment des choix faits par le cartographe influencent la perception de la structure spatiale de z , influencent le message rendu par la carte. Résumer en quelques lignes suppose ignorer de nombreux détails et de nombreuses variantes ; pour plus d'information, le lecteur se reportera à des ouvrages de référence tels ceux de Brunet (1985), Dent (1985), Brunet (1996), Béguin et Pumain (1996), Kraak et Ormeling (1998), ou Slocum (1999).

Règle de base n° 1 : la nature de la mesure détermine le type de carte.

Il convient d'abord de retenir que le type de carte est principalement déterminé par la nature de la mesure : une variable nominale conduira automatiquement à une carte **chorochromatique**, c'est-à-dire une carte sur laquelle les « couleurs » (couleurs, valeurs, grains) appliquées aux unités géographiques se côtoient selon le choix de l'auteur. Citons l'exemple des couvertures végétales ou des découpages administratifs. Une variable numérique se cartographie, en général, soit par une carte symbole, soit par une carte **choroplèthe** (voir règle n° 2). Cette dernière traduit par une gradation des grisés ou de trames la croissance ou la décroissance d'un phénomène spatial mesuré sur une échelle continue. Dans ce cas, une gradation judicieuse doit être appliquée ; le mélange des couleurs n'est pas fréquent et est limité à des cas très particuliers. Rappelons ici qu'en principe la variation de couleurs (tout comme la variation de l'orientation ou de la forme des symboles) est, en principe, réservée à l'illustration des variations qualitatives. Enfin, l'usage des couleurs est régi par des règles graphiques extrêmement strictes, par des modèles qu'il convient de respecter (voir par exemple Ormeling et Kraak, 1998, p. 113 ou Slocum, 1999, p. 163-164).

Une cartographie thématique d'une variable z doit donc préférablement être précédée d'une **analyse exploratoire descriptive des données** (voir par exemple Slocum, 1999 ou Fotheringham, Brunsdon et Charlton, 2000), c'est-à-dire d'une statistique

descriptive complète relative à z : moyenne, écart-type, histogramme de fréquences, etc. seront autant de statistiques descriptives utiles pour aider à construire une « image » intelligente et intelligible.

Règle de base n° 2 : le type de mesure détermine le type de carte.

Un second principe élémentaire de cartographie est de dire que les valeurs absolues et relatives ne se cartographient pas de la même manière. Lorsque z est exprimée en nombres absolus, il convient, en principe, d'utiliser la **carte symbole**, c'est-à-dire une carte représentant des symboles centrés sur les lieux (contenants), la surface de chaque symbole étant proportionnelle à la mesure z enregistrée soit directement soit par classes de valeurs (voir, par exemple, Kraak et Ormeling, 1998). Citons par exemple la cartographie du nombre de victimes tuées et grièvement blessées dans un accident de la route (voir Figure 3.A). Le choix du symbole s'est ici porté sur le cercle afin de mieux tenir compte des disparités observées ; un cercle est centré sur chaque arrondissement administratif (ou toute autre unité géographique) et la surface de ce cercle est proportionnelle au nombre d'habitants P (P est proportionnel à πR^2 , où R est le rayon du cercle). Notons que bien d'autres formes de symboles peuvent être utilisées ; leur choix dépend de la problématique étudiée, mais également de l'écart entre la plus petite et la plus grande valeur utilisée ou du public à qui la carte est adressée.



Figure 3A : Nombre de blessés graves et de tués dans un accident de la route en 1994, par arrondissement.

Si, par contre, la variable z est exprimée en nombres relatifs – tels une densité, un pourcentage ou un indice – elle se cartographie, en principe, à l'aide d'une carte **choroplèthe**, c'est-à-dire une carte sur laquelle la surface des objets élémentaires (les provinces, les communes, les secteurs statistiques, ...) est « coloriée » judicieusement (voir règle de base n° 3), à l'aide d'une gradation de valeurs de grisés ou d'une progression de trames.

Règle de base n°3 : la discrétisation des valeurs n'est pas le fruit du hasard.

Sur la base des résultats obtenus lors de l'analyse descriptive exploratoire des données spatiales (voir règle de base n° 1), l'auteur de la carte choroplèthe va ensuite définir la manière de discrétiser la variable étudiée. En effet, dresser une carte par exemple à l'échelle de la Belgique n'autorise pas, malgré les nombreux progrès techniques, d'utiliser 589 teintes de grisés différentes pour représenter les 589 valeurs communales : l'œil humain a ses limites. Il va donc falloir définir des classes de valeurs, c'est-à-dire définir un nombre de classes et les limites de ces classes (voir par exemple Cauvin et Reymond, 1987, Kraak et Ormeling, 1998, p. 140-149, Slocum, 1999).

Il existe de très nombreuses manières de discrétiser une variable mesurée sur un nombre important de lieux. Deux règles générales sont rappelées ici. Tout d'abord, le choix du **nombre de classes** est principalement guidé par (1) les limites visuelles et techniques qui conduisent généralement à retenir de 5 à 7 classes (maximum 9), et par (2) l'application de formules simples inspirées des techniques de construction des histogrammes de fréquences qui, pour la plupart, sont basées sur le principe de proportionnalité au logarithme du nombre de lieux (voir par exemple Evans (1977), Cauvin et Reymond (1986) ou Slocum (1999)). C'est ainsi que pour 43 arrondissements, cinq classes de valeurs sont conseillées.

Ensuite, les **limites de classes** seront définies selon des critères stricts en fonction de l'objectif de la carte, du public auquel la carte est destinée mais surtout et avant tout, à partir de la distribution statistique des données étudiées. Différentes catégories de méthodes sont mentionnées dans la littérature : intuitives, exogènes, mathématiques, statistiques, graphiques et expérimentales. Il est fortement conseillé d'utiliser des méthodes (1) compréhensibles par le public auquel la carte est destinée, et (2) reproductibles et rigoureuses. La carte est un outil statistique, dont l'interprétation doit se faire sans ambiguïté. L'histogramme des fréquences est souvent à la base du choix d'une méthode de discrétisation.

La Figure 3 illustre ces propos avec l'exemple de la cartographie des accidents de la route en Belgique, et plus particulièrement des victimes. La Figure 3.A rend compte de la répartition des nombres absolus de tués et de blessés graves en Belgique. Chaque cercle est centré sur le chef-lieu d'un arrondissement et la surface du cercle est proportionnelle au nombre de victimes tuées ou blessées grièvement. Nous ne rentrerons ici pas dans les problèmes liés à l'interprétation des résultats (voir par exemple Thomas, 1993), mais mentionnerons simplement la suprématie du Nord du Pays en termes de nombres. Les cartes choroplèthes (Figures 3.B à 3.D) représentent le même phénomène mais sous forme relative, c'est-à-dire le pourcentage de blessés graves et de tués dans le total des victimes de la route. Le même nombre de classes est utilisé pour chaque carte ; les différences observées entre les Figures 3.B, 3.C et 3.D sont dues uniquement au choix de la méthode de discrétisation. Parmi l'ensemble des méthodes offertes, trois sont appliquées ici. En 3.B, des **classes d'effectifs égaux** sont appliquées pour représenter les 43 valeurs relatives observées pour la Belgique. Par cette méthode, la longueur de chaque classe varie et est fortement liée à la

distribution de la variable. Les limites des classes constituées s'appellent quantiles (voir quartiles, quintiles, sextiles, etc. selon le nombre de classes). Les avantages de cette méthode sont multiples : elle ne nécessite pas la normalité de la distribution, elle élimine le poids des valeurs extrêmes et elle fait ressortir l'ordre des valeurs (carte équilibrée). Cette manière de discrétiser conduit cependant (1) à une perte de l'information relative à la forme statistique de la distribution, et (2) au fait qu'elle ne soit pas appropriée s'il y a de nombreux ex-æquo, s'il y a des discontinuités, s'il y a de grandes différences dans les surfaces des unités spatiales d'analyse.

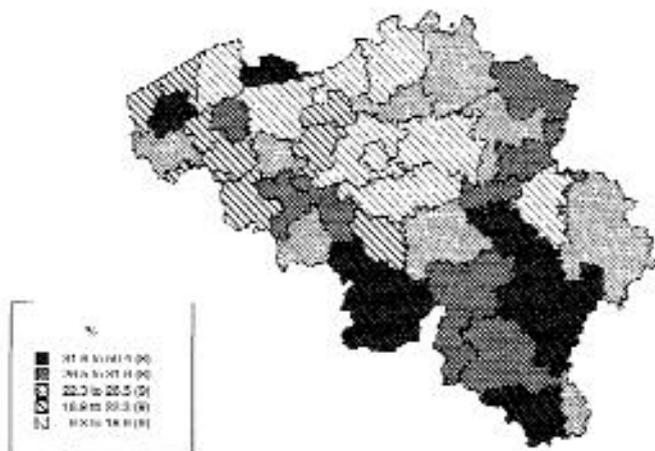


Figure 3B : Pourcentage de victimes de la route blessées grièvement ou tuées en 1994, par arrondissement. Mode de discrétisation : classes d'effectifs égaux (chiffres entre parenthèses : nombre de lieux dans chaque classe).

La carte 3.C rend compte de la même distribution spatiale, mais cette fois discrétisée selon la méthode des **seuils naturels** ou seuils observés. Cette méthode ancienne et très usuelle se base sur le diagramme des fréquences ; les ruptures observées dans la distribution constituent les limites des classes. Cette méthode produit des classes respectant assez bien la distribution des données, mais elle présente plusieurs inconvénients : aucune comparaison directe n'est possible avec d'autres cartes, une difficulté éventuelle de combiner les ruptures naturelles et le nombre de classes et la nécessité d'un nombre suffisant d'observations.

Enfin, la discrétisation reprise à la Figure 3.D respecte la règle de la **moyenne et de l'écart-type**. Celle-ci suppose une distribution gaussienne de la variable. Par définition, cette méthode requiert un nombre pair de classes. Dans notre cas, la première classe est vide, aucun lieu n'étant caractérisé par une valeur comprise entre $m - 3\sigma$ et $m - 2\sigma$ (car l'histogramme est légèrement asymétrique à droite (m est la moyenne, et σ l'écart-type)). Ce mode de discrétisation présente l'avantage d'avoir un fondement statistique connu et de permettre la comparaison avec d'autres cartographies faites selon la même méthode ; elle est cependant peu adaptée lorsque le nombre de classes est élevé. Elle s'adresse à un public averti et oblige de recourir à un nombre pair de classes. Si l'allure générale des trois cartes choroplèthes

reproduites à la Figure 3 est semblable (elle reflète la structure spatiale des données sous-jacentes), l'appartenance à une classe varie selon le mode de discrétisation. Les conséquences peuvent être beaucoup plus importantes qu'il n'y paraît, surtout lorsque la carte conduit à des prises de décision importantes en termes sociaux, budgétaires, etc. (distribution d'aides au logement, répartition de moyens supplémentaires, modulation spatiale d'actions spécifiques en matière de sécurité routière, etc.).

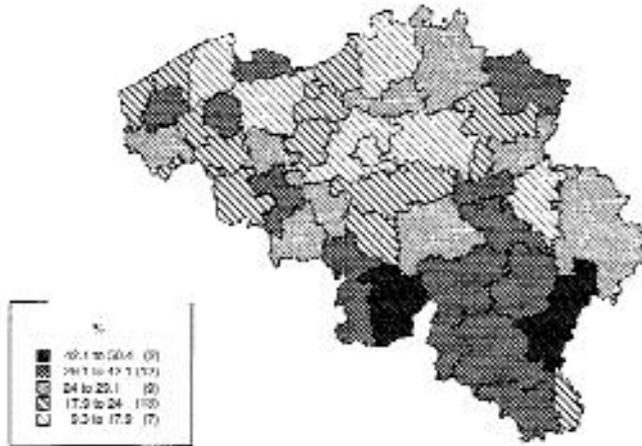


Figure 3C : Pourcentage de victimes de la route blessées grièvement ou tuées en 1994, par arrondissement. Mode de discrétisation : Seuils naturels (chiffres entre parenthèses : nombre de lieux dans chaque classe).

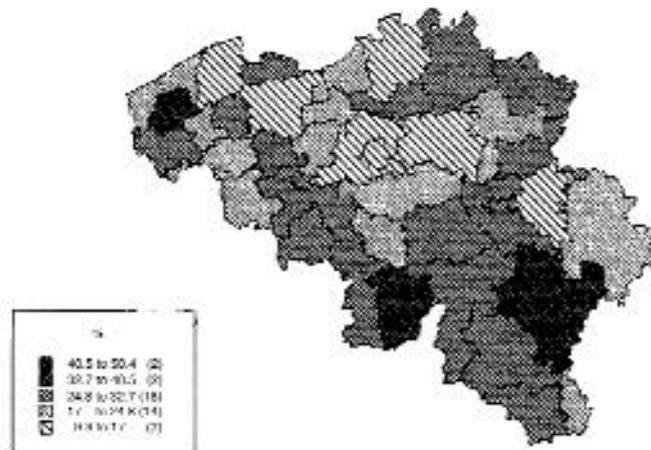


Figure 3D : Pourcentage de victimes de la route blessées grièvement ou tuées en 1994, par arrondissement. Mode de discrétisation : moyenne et écart-type (chiffres entre parenthèses : nombre de lieux dans chaque classe).

Ajoutons enfin que la distribution statistique des valeurs à cartographier peut éventuellement être normalisée par une **transformation** statistique appropriée (par exemple puissance ou logarithmique) ; ceci permet alors d'avoir recours à la discrétisation en fonction de la moyenne et de l'écart-type, très satisfaisante pour le statisticien. Dans ce dernier cas, il s'avère ensuite indispensable de retransformer les données dans la légende car un lecteur non averti ne comprendra pas des valeurs correspondant, par exemple, au logarithme du pourcentage de blessés graves et de tués parmi les victimes d'accidents de la route.

Le nombre de classes et les limites de classes influencent fortement l'image et la perception que le lecteur aura de la carte. Il convient que lecteurs comme auteurs de cartes en soient conscients et que la méthode de transformation soit mentionnée sur chaque carte afin d'en faciliter la lecture.

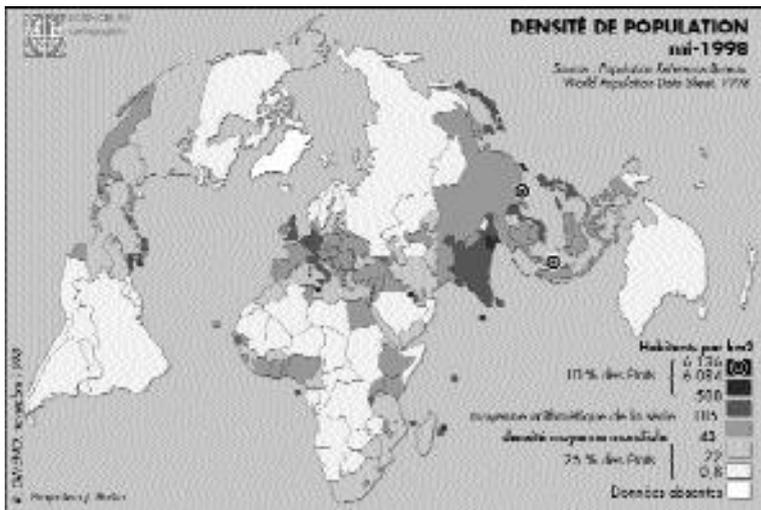


Figure 4 : Le cartographe joue à la fois avec le type de carte, le type de discrétisation et le type de projection. Exemple de carte choroplèthe.

Règle de base n° 4 : le niveau et la nature de l'agrégation spatiale déterminent l'image produite.

Des cartographies thématiques relatent souvent des distributions spatiales par unités administratives. Or, à l'origine, les données sont récoltées par individus (personne, ménage, logement, etc.). Tout comme en analyse statistique, il importe de maîtriser le niveau d'agrégation spatiale, sachant que le choix de la manière d'agréger doit être pertinent par rapport aux questions posées mais va influencer la carte.

Reprenons l'exemple des accidents de la route. Ceux-ci peuvent être cartographiés individuellement sous forme de points le long d'axes de communication, un point correspondant à un accident, un événement (**carte par points**). Cette carte est alors un inventaire de la situation, et est souvent difficile à analyser, les localisations individuelles dépendant fortement du hasard. Ces mêmes accidents peuvent aussi être agrégés par tronçons de routes ; il convient alors de s'interroger sur la définition

du tronçon : longueur du tronçon, longueur fixe ou variable ? La carte reflète alors une structure réticulaire sur laquelle l'intensité du phénomène est relatée soit par une épaisseur proportionnelle, soit par un jeu de couleurs/teintes appropriées appliqué par tronçons préalablement définis (**carte par lignes**). Enfin, ces mêmes accidents peuvent aussi être agrégés par entités aréales tels les secteurs statistiques (îlots), les communes, les arrondissements ou les provinces (**cartes par surfaces**) ; sur chaque unité aréale peut être centré un symbole dont la taille est proportionnelle aux accidents enregistrés dans cette entité (cartes symboles), ou bien chaque unité peut être positionnée sur une échelle de valeurs selon l'intensité du phénomène recensé (cartes choroplèthes) (Thomas, 1993, 1996 ; Huguenin-Richard, 2000). L'image qui en découle et le message qui s'y rapporte sont fortement influencés par les choix des unités statistiques de base, des tailles et formes des « contenants » définis précédemment.

Traditionnellement, les caractéristiques du contenant (point, ligne, surface) sont souvent croisées avec celles de l'attribut z (nominal, ordinal, numérique). On obtient ainsi un tableau qui suggère les principales alternatives cartographiques qui peuvent exister pour une même réalité spatiale (voir Tableau 1). Une carte par points est une carte d'inventaire, un semis de points ou autres symboles de tailles identiques qui représentent une répartition spatiale d'événements exprimés de façon nominale (par exemple des villes, quelle que soit leur taille). Si la variable à cartographier est ordinale, le symbole variera selon des classes (exemple : un petit point pour une petite ville, un cercle plus grand pour une ville de taille moyenne et un gros cercle pour une grande ville). Enfin, on parlera de carte symbole lorsque le cercle centré sur chaque ville aura une surface proportionnelle au nombre d'habitants de cette ville. Pour les cartes par lignes, on peut simplement avoir des lignes représentant les routes, quelle que soit leur importance (variable nominale), ou faire varier le trait selon la catégorie de routes comme le font les cartes routières (variable ordinale) ou, enfin, faire varier le trait en fonction de l'importance du flux de trafic qui y est enregistré (variable numérique). En ce qui concerne les cartographies par surfaces, elles conduisent à des cartes chorochromatiques lorsqu'il s'agit d'une variable nominale voire ordinale, et aux cartes symboles et choroplèthes lorsqu'il s'agit de variables cardinales.

Il n'y a pas que le support agrégatif qui importe (point, ligne, surface) ; le choix de la **taille des entités agrégatives de base ou mailles** influence également l'image et son interprétation. Ce problème est communément appelé dans la littérature anglo-saxonne M.A.U.P. (Modifiable Areal Unit Problem) ; son importance n'est plus à démontrer en analyse statistique (voir par exemple Fotheringham, Brunson et Charlton, 2000) et ne peut être ignorée dans l'interprétation de l'image cartographique. C'est ainsi que la Figure 5 illustre le problème en partant d'un semis de points (A) ; cette information individuelle est peut être agrégée soit par mailles dont la forme et la taille sont décidées par l'auteur de la carte (quadrat), soit par entités administratives dont les formes et tailles sont indépendantes du chercheur. La Figure 5 illustre les différences obtenues dans l'image construite tant au niveau de la carte symbole que de la carte choroplèthe (Grasland, 1996).

Type de donnée	Type de carte			
	PROSODIQUE	LINÉAIRE	AREAL-DISCRET	AREAL-CONTINU
NOMINALE	Symboles picturaux Variant selon la forme, l'orientation ou la couleur	Symboles picturaux variant selon la forme ou la couleur	Plages variant selon l'orientation l'orientation	
	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)
	Carte par points (1)		Carte chromographique	
ORDINALE	Symboles picturaux Variant selon la couleur	Symboles picturaux variant selon la couleur	Plages variant selon la valeur	
	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)
	Carte par points (2)			Carte (1)
CARDINAL DISCRET	Symboles picturaux Variant selon la valeur	Symboles numériques variant selon la valeur	Plages variant selon la valeur	Cartes de 1 à 10
	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)
	Carte par points (3)			Isogues
CARDINAL DE RAPPORT	Symboles picturaux variant selon la taille ou la valeur	Symboles numériques variant selon la taille ou la valeur	Plages variant selon la valeur	Exemples de cartes proportionnelles
	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)	Exemple (1) Exemple (2) Exemple (3)
	Carte symbole		Carte chromoplethe	Isogues

Tableau 1 : Type de données, types de cartes : principes élémentaires (1), exemples (2) et nomenclature (3).

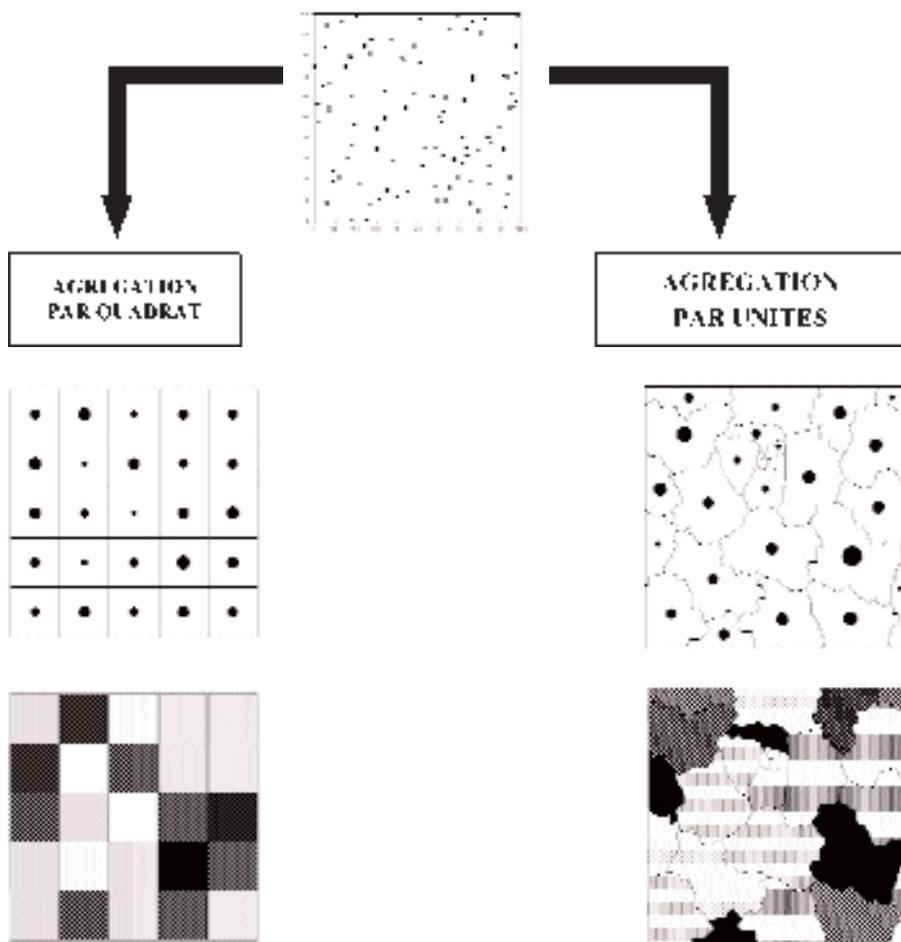


Figure 5 : Effets du choix de la forme de la maille sur la carte
(Source : d'après Grasland, 1996).

Règle de base n°5 : le respect des règles élémentaires de sémiologie graphique s'impose.

En cartographie, des symboles sont communément utilisés pour représenter la localisation, la direction, le mouvement, les processus et les corrélations. Ces éléments du monde réel sont abstraits et généralement représentés sur les cartes par des points, des lignes et des surfaces. Pratique et compétence s'avèrent dès lors indispensables pour une symbolisation correcte des phénomènes spatiaux (Bertin, 1967 et 1983 ; Brunet, 1987 ; Foote et Crum (site Internet non daté) ; Béguin et Pumain, 1996). Bertin (1967 et 1983) a inventorié ces ressources en utilisant des catégories : taille, forme, texture, couleur, valeur, texture-structure, grain et orientation des symboles. Celles-ci constituent un ensemble de stimuli

physiologiques et psychologiques combinés pour rendre compte de z , la troisième dimension. À chacun de ces aspects correspondent des règles strictes qui ne seront pas détaillées dans le cadre de cet article, mais que tout cartographe/géographe est censé maîtriser et respecter, chaque élément pouvant être utilisé soit individuellement, soit en combinaison (Figure 6).

À titre d'exemples, trois règles de base sont citées ici. La règle de spécificité a trait à la nature des phénomènes et impose des figurés de même nature pour des faits de même nature et des figurés différents pour des faits différents. En d'autres termes, chaque rubrique a donc un type de symbole qu'il convient de respecter dans le moindre détail. La règle de proportionnalité impose quant à elle un parallélisme strict entre la hiérarchie des faits et la hiérarchie des figurés. En d'autres termes, la taille, l'intensité des figurés doit être proportionnelle à la place que tiennent les faits dans la réalité. Enfin, la règle d'**universalité** a trait à la constance dans la représentation, et tout fait symbolisé doit l'être de manière complète.

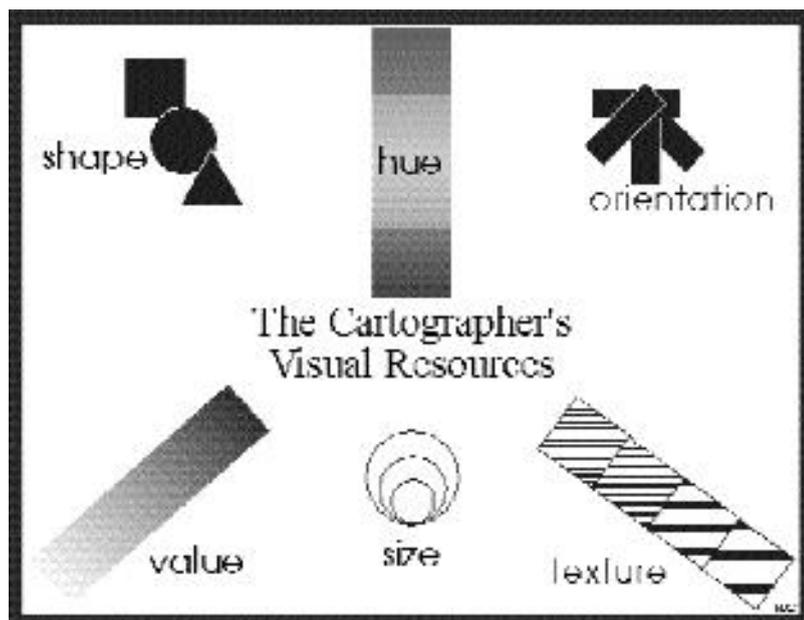


Figure 6 : Éléments de sémiologie graphique (Source : Foote et Crum)

En d'autres termes, la carte est loin d'être un document artistique, fruit de l'imagination du cartographe. Il convient de maîtriser les règles qui prévalent à sa construction, mais également d'être conscient des biais que l'on peut y introduire tant par le choix du type de carte, du nombre et des limites de classes de valeurs, des unités de base, du mode de discrétisation, de l'usage des règles de sémiologie graphique. De nos jours, les supports informatiques (*hardware*) permettent de manipuler des jeux de données de plus en plus grands, les logiciels de cartographie permettent de « faire » des cartes de plus en plus facilement (*softwares*), mais il

importe de connaître et de respecter la syntaxe, la grammaire, les règles de cartographie pour une interprétation correcte des documents cartographiques (*lifeware*). Enfin, la construction d'une carte relève des statistiques, et son interprétation touche à de nombreux problèmes de l'analyse des données tels le *modifiable areal unit problem* (M.A.U.P.), l' *erreur écologiste* et l'*erreur atomiste* (voir par exemple Fotheringham, Brunson et Charlton, 2000 ; Courgeau et Baïcaini, 1997). Il importe enfin de mentionner que seules les cartes thématiques « traditionnelles » ont été abordées ici ; il existe des formes plus récentes de cartographie qui rendent compte de façon « différente » de la troisième dimension ; citons l'exemple des anamorphoses qui déforment le contour des unités géographiques de base en fonction de l'importance du phénomène observé. Elles constituent autant d'alternatives graphiques offertes aux chercheurs et cartographes, et qu'il convient de maîtriser au niveau de la construction et de la lecture (voir Brunet (1987), Raper (1989) ou Slocum (1999)).

Cette section sera donc aisément résumée par la citation suivante : « *A bad map is like a bad book, giving the reader a distorted view of what its author intended, whereas a good map is like a good book with a clear message that is almost impossible to misinterpret* » (Unwin, 1981).

4. La visualisation

Avant l'avènement des Systèmes d'Information Géographiques (S.I.G.), la carte papier et les statistiques étaient les manières les plus courantes d'analyser les données spatiales. Les progrès récents ont particulièrement affecté les techniques de visualisation et ce, tant en cartographie qu'en imagerie médicale ou encore en chimie par la visualisation des structures moléculaires ou en architecture par la visualisation en 3D d'habitations ou de quartiers. C'est ainsi, aussi, qu'en géographie physique le bloc-diagramme a été remplacé par le **modèle** numérique de terrain (M.N.T.), rendant compte de façon réaliste du relief (voire du paysage), et offrant des fonctionnalités nouvelles telles les variations d'angle de vue, les calculs de pentes, les limites de crêtes, les perspectives en terme de visibilité, etc. Nous rentrons ici dans le domaine de la réalité virtuelle, domaine différent de la cartographie thématique évoquée à la Section 3.

Les progrès actuels en visualisation touchent certes les trois aspects de la cartographie (analyse, communication et formalisation), mais concernent plus particulièrement les documents cartographiques d'exploration, les cartes interactives, les générations d'hypothèses scientifiques, l'analyse des données et le support à la décision. La visualisation facilite l'analyse exploratoire des données spatiale mais n'affecte pas ou peu les techniques d'explication en géographie et en analyse spatiale. Ces techniques permettent de mettre en image d'immenses banques de données, de travailler très rapidement et de façon interactive tant l'image que les données spatiales sous-jacentes.

Ces nouvelles techniques résultant de recherches récentes et interdisciplinaires relatives aux systèmes hypermédia et à réalité virtuelle. Ces progrès ont fait naître le

terme de « visualisation cartographique » (Kraak et Ormeling, 1998, p. 198). Selon MacEachren et Taylor (1994) ou Hearnshaw et Unwin (1994), des liens étroits associent, d'une part, les domaines de la cartographie et des S.I.G. et, d'autre part, la visualisation scientifique. La visualisation scientifique est actuellement vue comme un processus en trois phases : filtrage et mise en forme des données, cartographie des données (au sens strict et mathématique) et création de l'image (Kraak et Ormeling, 1998, p. 198). Quoiqu'il en soit, ce champ d'études commence seulement à se définir par rapport à la cartographie dont il constitue une approche complémentaire : la cognition, la communication et le formalisme sont liés par la visualisation interactive (Figure 7).

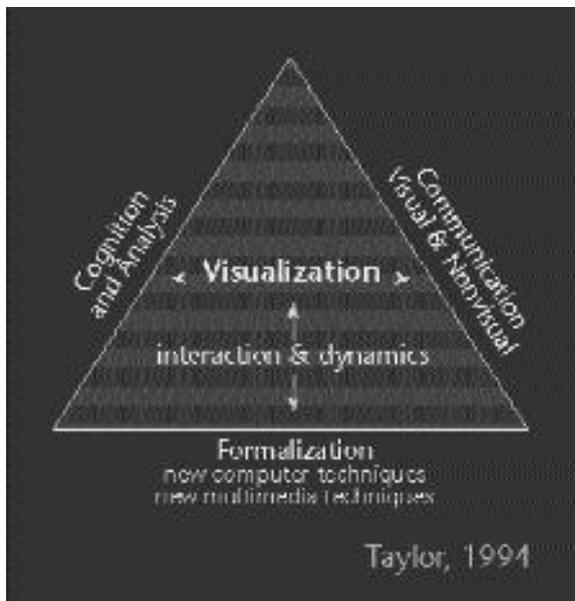


Figure 7 : Visualisation cartographique : le triangle de Taylor.

À partir du moment où nous disposons de données continues en x , en y et en z , la visualisation présente un avantage incontestable : elle permet de rendre compte d'une réalité tri- voir **pluri-dimensionnelle réelle** alors que l'image papier ou écran traditionnelle est limitée au « pseudo 3D ». C'est ainsi que trois modes de visualisation sont distingués en cartographie : par lignes, par surfaces ou par volumes (voir Figures 8 et 9) (Burrough et McDonnell, 1998).

La complexité de l'imagerie produite implique cependant que son usage soit réservé à un **public averti** : aussi attirante soit-elle, sa lecture peut être rendue très délicate, tout comme les résultats de l'imagerie médicale. Notons, enfin, que la création de ce type d'image n'est pas à la portée de chacun ; z – la variable à cartographier – est la plupart du temps mesurée de façon discrète mais représentée de façon continue. Il importe donc d'utiliser des **méthodes d'interpolation**. Celles-ci sont nombreuses et relèvent souvent de techniques complexes : linéaires, non-linéaires, pondérées,

surfaces de tendance, polynomiales, krigeage, etc. sont autant d'alternatives offertes (voir par exemple Lubos et Mitasova, 1998 ou Slocum, 1999, p. 137-152).

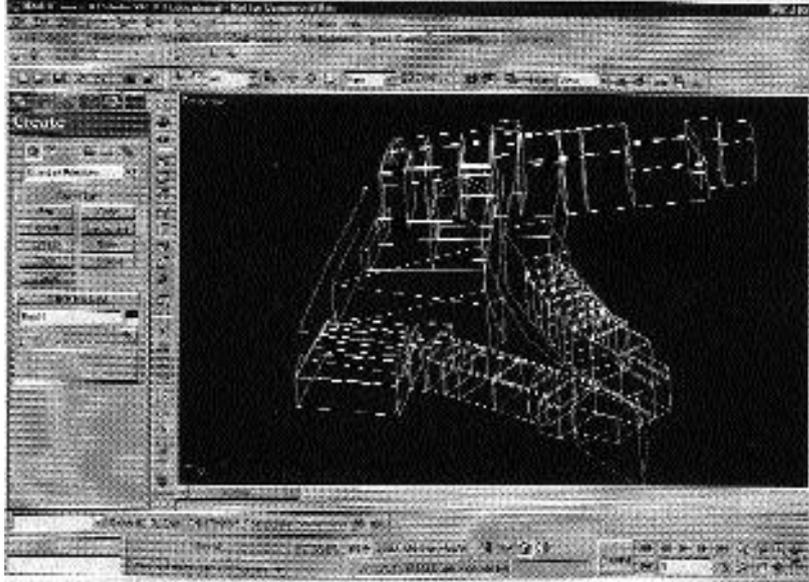


Figure 8 : Exemple de visualisation « wireframe » (Source : P. Demayer, RUGent, 2000)

Avec la visualisation, on touche ici à une discipline émergente où de nombreux problèmes subsistent encore, où les interrogations sont nombreuses. Quelles interpolations utiliser afin de rendre compte de la réalité ? Quels sont les biais introduits ? Les règles de cartographie thématique et de sémiologie graphique sont-elles encore respectées ? Existe-t-il des techniques géostatistiques spécifiques ? La complexité technique rend-elle l'image encore lisible et utilisable par un public non averti ? Les bases de données relatives à une image sont souvent de grande taille ; comment les stocker, comment lutter contre leur caractère volatile ? Comment maîtriser leur qualité ? La visualisation cartographique s'avère à l'heure actuelle être une technique d'exploration des données (Kraak et Ormeling, 1998, p 198) dont il importe de suivre les développements.

À titre d'exemple, la Figure 9 est obtenue par des techniques récentes de visualisation ; il s'agit de la modélisation en 3D des failles de chevauchement du Bassin Houiller de Charleroi. Comme pour tout bassin houiller, les géomètres des mines ont établi des coupes verticales Nord-Sud tous les 100 mètres. Pour chaque faille, nous disposons de coordonnées x , y et z en surface (tracés de surface de la carte géologique) et en profondeur. Une grille tridimensionnelle peut donc être obtenue par triangulation (T.I.N. : Triangulated Irregular Network). L'ensemble est alors modélisé par un logiciel spécifique qui permet de fixer l'angle de vue (...) tout comme en imagerie médicale. Ce sont d'ailleurs les mêmes logiciels graphiques qui sont utilisés. On se rend immédiatement compte ici de la difficulté de lecture aisée d'un tel document graphique.

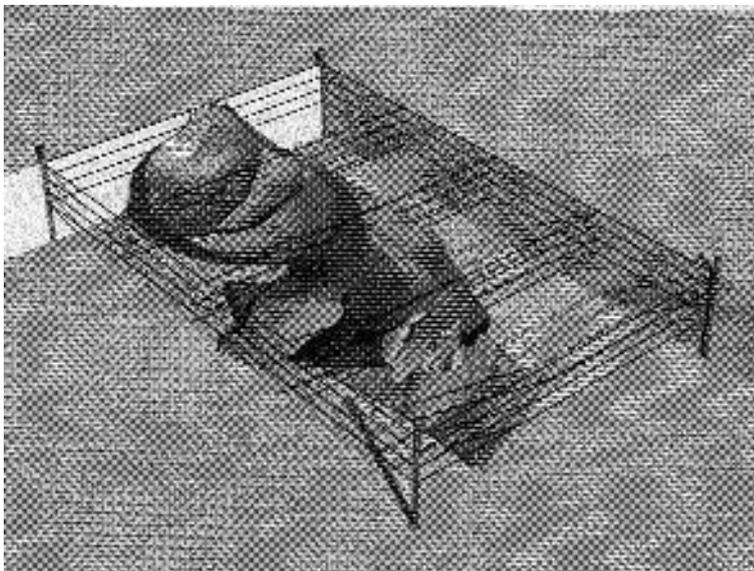


Figure 9 : Exemple de visualisation en géologie. Source : Delcambre et Pingot, 2000.

5. Conclusion

Cette leçon publique n'a pas la prétention de faire un relevé exhaustif de toutes les techniques de représentation des trois dimensions en cartographie. Pensons par exemple aux représentations réelles par les mappemondes ou les blocs diagrammes, ou aux représentations suggestives telles les couples stéréoscopiques, les anaglyphes ou les hologrammes que nous n'avons même pas évoqués. L'utilisation de l'une ou l'autre technique dépendra des capacités humaines du lecteur (tout le monde n'est pas capable de voir en stéréoscopie !), mais également des possibilités techniques (tout le monde ne dispose pas des logiciels ad hoc de visualisation !), voire de l'objectif du document produit et du public auquel il est destiné (tout le monde n'est pas capable d'interpréter une visualisation en 3D !). L'objectif est ici de livrer une réflexion générale sur la notion de dimension spatiale en géographie et en cartographie, et aussi de rappeler que la création d'une carte ne s'improvise pas. Cartographie et géographie sont des sciences dont il convient de connaître les fondements avant de les utiliser. Par sa nature, ce texte reste donc très général : de nombreux raccourcis ont été pris. Nous invitons le lecteur intéressé à se reporter aux nombreux ouvrages de référence existant dans le domaine.

Trois aspects ont été abordés/effleurés au cours de cet exposé : le passage du volume au papier dans la Section 2, la représentation de la troisième dimension en cartographie thématique dans la Section 3, et les essais de représentation plus « réaliste » de la troisième dimension grâce aux progrès récents dans les techniques de visualisation (Section 4). Le cartographe et le géographe sont confrontés à de nombreux choix méthodologiques et techniques. Ces choix déterminent la perception, la lecture et l'usage du document cartographique et, par conséquent, les prises de décision qui s'y rapportent.

En tant que géographe, trois questions me taraudent l'esprit à l'issue de ce rappel d'éléments de cartographie. Tout d'abord, en quoi les visualisations, les cartographies, aussi compliquées soient-elles, suffisent-elles pour révéler la causalité des phénomènes spatiaux ? En quoi suggèrent-elles une explication ou contribuent-elles à la modélisation des processus spatiaux ? Il convient ici de rappeler que la carte est un outil parmi d'autres dans un processus de réflexion scientifique plus vaste. Isolée de tout contexte, elle signifie peu. Elle contribue à expliquer, comparer, analyser et communiquer des informations, des résultats de modèles et analyses. La carte doit être une interface entre les données spatiales et les modèles (voir Kraak et Ormeling (1998), chapitre 10).

Une deuxième question concerne la finesse avec laquelle une illustration représente la réalité. À quel point la carte thématique ou le modèle numérique de terrain doivent-ils refléter parfaitement et très fidèlement la réalité spatiale ? La plus belle caractéristique de la carte n'est-elle pas – comme tout modèle – son niveau d'abstraction ... qu'il convient évidemment de maîtriser !

Enfin, nous sommes émerveillés par la magie technique des outils actuels de visualisation, mais cette magie cache de nombreux choix méthodologiques et des développements mathématiques complexes qu'il convient aussi de maîtriser lors de l'interprétation du document. Le lecteur moyen en est-il capable ? L'ordinateur n'est qu'un outil, c'est au cartographe/géographe qu'il revient de faire preuve de discernement et de compétence.

Une note métaphysique et philosophique termine ce travail afin d'étendre quelque peu la notion de dimension. Je vous invite à lire Flatland de Edwin Abbott (1997). Cet ouvrage – dont la première édition date de 1884 – a été écrit par un homme d'église britannique en réaction à des phénomènes sociologiques qu'il observait. Ce livre raconte l'histoire peu banale d'un Carré. Un Carré qui habite un monde en deux dimensions. Dans la première partie du livre, l'auteur décrit la vie des habitants de Flatland : des Triangles, Carrés, Pentagones et autres Polygones. Par la suite, ce fameux Carré fait la rencontre d'une Sphère qui lui fait découvrir la troisième dimension. Il va donc raconter ce qu'il a vu à ses compagnons bidimensionnels. On le traite de fou et on l'emprisonne. Ce récit est peut-être invraisemblable, mais il pose des interrogations très intéressantes : comment réagirions-nous si quelqu'un venait nous dire qu'il a rencontré un individu quadri-dimensionnel et qu'il a visité la quatrième dimension ? Comment les techniques récentes de visualisation vont-elles gérer une dimension supplémentaire : le temps ? les dimensions fractales ?

S'il vous plaît : ne m'emprisonnez pas !

J'espère simplement par ces quelques paroles vous avoir convaincus : la géographie a besoin de mathématiques, et la multidisciplinarité est un gage de réussite pour l'avenir des sciences.

Remerciements. Un tout grand merci à Pierre ARNOLD, Hubert BEGUIN et Ann VERHETSEL pour la relecture minutieuse des premières versions de cet article.

Bibliographie et suggestions de lectures complémentaires

- Abbott, E. (1997), *Flatland*. Princeton Science Library.
- Bailly, A. & Beguin, H. (1996), *Introduction à la géographie humaine*. Paris, Armand Colin, 201 p.
- Banchoff, T. (1996), *Beyond the Third Dimension. Geometry, Computer Graphics, and Higher Dimensions*. The Mathematical Association of America, 210 p.
- Béguin, M. & Pumain, D. (1996). *La représentation des données géographiques*. Statistique et cartographie. Paris, Armand Colin, 192 p.
- Bertin, J. (1967), *La sémiologie graphique*. Paris, Gauthiers-Villars.
- Bertin, J. (1983), *Semiology of Graphics : diagrams, networks, maps*. The University of Wisconsin Press, Madison (translated by W. Berg).
- Blin E. & Bord J.-P. (1993). *Initiation géo-graphique ou comment visualiser son information*. Paris. Sedes, 284 p.
- Board, C. (1991), *Cartographic Communication*. *Cartographica*, 18 : 2.
- Board, C. & Taylor, R. (1985). *Perception and Maps : human factors in map design and interpretation*, *Transactions of the Institute of British Geographers New Series 2* : 19-36.
- Brunet, R. (1987), *La carte, mode d'emploi*. Paris, Fayard-Reclus.
- Burrough, P. & McDonnell, R. (1998), *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, 333p.
- Cauvin, C. & Reymond, H. (1986), *Nouvelles méthodes en cartographie*. Montpellier, Reclus.
- Cauvin, C., Reymond, H. & Serradj A. (1987), *Discrétisation et représentation cartographique*, Montpellier, Maison de la géographie.
- Courgeau D., Baccaïni B. (1997) *Analyse multi-niveaux en sciences sociales*. *Population*, 4, 831-864
- Dent, B. (1985), *Principles of Thematic Map Design*. Reading, Mass., Addison-Wesley Publishing Co.
- Delcambre B., & Pingot J.-L. (2000). *Fontaine-l'Evêque Charleroi. Carte géologique de Wallonie*. Ministère de la Région Wallonne. 114p. 3 planches.
- Evans, I. (1977), *The Selection of Class Intervals*. *Transactions of the Institute of British Geographers New Series 2* : 98-124.
- Fotheringham, A., Brunson, C. & Charlton M. (2000), *Quantitative Geography. Perspectives on Spatial Data Analysis*. London, Sage, 270.
- Hearnshaw, H. & Unwin, D. (1994), *Visualisation in Geographical Information Systems*. London : Wiley.
- Huguenin-Richard F. (1999) *Identifier les sites routiers dangereux. Application de méthodes d'analyse spatiale utilisant la localisation géographique des accidents*. *Revue internationale de géomatique*, 9:4.
- Kraak, M. & Ormeling, F. (1998), *Cartography - Visualization of Spatial Data*. Longman, 222 p.

- MacEachren, A. (1995), *How Maps Work. Representation, Visualization, and Design*. The Guilford Press.
- MacEachren, A. & Kraak M. (1997). *Exploratory Cartographic Visualization : advancing the agenda*. *Computers and Geosciences*, 23(4), 335-344.
- MacEachren, A. & Taylor, D. (1994). *Visualization in Modern Geography*. Oxford : Pergamon.
- Monmonnier, M. (1993), *Comment faire mentir les cartes ou du mauvais usage de la géographie*. Paris, Flammarion.
- Raper, J., ed. (1989), *Three dimensional Applications in Geographic Information Systems*, Philidelphia, PA : Taylor & Francis, Inc.
- Rentgert, G. (1997), *Suburban Burglary : a Time and a Place for Everything*. Springfield, Illinois : Charles Thomas.
- Rentgert, G. (2000). *Using a High Definition GIS to Enhance Community Policing on College Campuses*. Draft paper.
- Slocum, T. (1999), *Thematic Cartography and Visualization*. New Jersey, Prentice-Hall.
- Taylor D. (1994). *Cartographic Visualization and Spatial Data handling*. p. 16-28. In : Waugh T. (ed.) *Advances in GIS Research. Proceedings 6th International Symposium on Spatial Data Handling*. London, Taylor and Francis.
- Thomas, I. (1993), *Les difficultés de la cartographie des accidents de la route, dans Cartographie des accidents de la route : modes d'analyse et de représentation*. Berthoz, E., Brossard, T., Lassare, S. (eds.) INRETS, Paris, 41-49.
- Thomas, I. (1996), *Spatial Data Aggregation. Exploratory Analysis of Road Accidents. Accident Analysis and Prevention*, 28 : 2, 251-264.
- Thomas I. (2001), *Cartographie d'aujourd'hui et de demain : rappels et perspectives*. *Cybergéo (Revue Européenne de Géographie (accès gratuit sur Internet))*, article 189, 27-03-2001, 24 p.
- Thomas, I. (2002) *Transportation Network and the Optimal Location of Human Activities. A numerical geography approach*. Cheltenham, Edward Elgar Publishing ltd, 293 p.
- Unwin, D. (1981), *Introductory Spatial Analysis*. London and Paris, Methuen.
- Wood, D. (1992), *The Power of Maps*. New York, The Guilford Press.

Sites Internet intéressants

Atlas national du Canada

<http://atlas.gc.ca>

Editions Atlas.

<http://www.webencyclo.com>

Foote, K. & Crum, S. *Cartographic Communication*.

<http://www.texas.edu/depts/grg/gcraft/notes/cartocom/cartocom.html>.

Dana, P. (1997), *Map Projections. The Geographer's Craft Projeeject*. Dept. Of Geography, University of Texas at Austin, Austin.

<http://www.utexas.edu/depts/gcraft/notes/mapproj/mapproj.html>

Grasland, C. (1996), The Hypercard project. A smoothing method based on multiscalar neighbourhood functions of potential.

<http://www.parisgeo.cnrs.fr/cg/hyperc/wp1.html>

Lubos, M. & Mitasova, H. (1998). Multidimensional Spatial Interpolations.

<http://www2.gis.uiuc.edu:2280/modviz/viz/sinter.html>

Nelson L. Bits of Map Projection History.

<http://everest.hunter.cuny.edu/mp/mapintro.html>

Ollivier Y. Les projections cartographiques.

<http://www.eleves.ens.fr:8080/home/ollivier/carto/carto.html>

Mulcahy K. 1997. Map Proejction. <http://www.everest.hunter.edu/mp>

<http://www.ggr.ulaval.ca/Cours/CAO/Locaproj.html>

Swanson J. The Three Dimensional Visualization & Analuysis of Geographic Data.

http://maps.unomaha.edu/Peterson/gis/Final_Projects/1996/Swanson/GIS_Paper.html

Furuti C. 1997. Map Projections on

<http://www.ahand.unicamp.br/~furuti>

International Cartographic Association. Commission on Visualization.

<http://www.geog.psu.edu/ica/ICAviz.html>

Notion de visualisation et de cartographie

<http://kartoweb.itc.nl/webcartography/webbook/ch05/ch05.htm>