

NATURE ET QUALITÉS DE LA SPATIOCARTE

Jean-Paul DONNAY

I. DU MONDE RÉEL À LA CARTE

La carte est une représentation conventionnelle, généralement plane, en positions relatives, de phénomènes concrets et abstraits localisables dans l'espace. Entre le monde réel et la carte, il existe une série d'étapes intermédiaires, qui, toutes, sont réductrices, mais qui doivent former une séquence cohérente (Fig. 1).

A. La filière cartographique

De façon générale, le monde réel ne peut être appréhendé dans toute sa complexité et de manière exhaustive. Une série de filtres sont inévitablement présents qui ramènent l'espace réel à un espace perçu. Lorsque la perception du monde réel peut être effectuée sur le terrain, on peut considérer que l'effet de filtre est restreint, sans être inexistant. C'est ainsi que seul le monde concret, matérialisé sur le terrain, est accessible. Mais au moins chaque élément du monde réel concret est-il perceptible en vraie grandeur, sans la contrainte d'une réduction d'échelle. Ce n'est pas le cas des substituts du terrain, constituant autant de mondes perçus distincts, tels que : une photographie, au sol ou aérienne, une image satellitaire ou... une carte. Dans ces conditions, les filtres existant entre le monde réel et le monde perçu ont un effet simplificateur considérable, notamment par le fait de l'existence d'une réduction d'échelle a priori.

L'espace perçu sur le terrain ou sur une photographie ou une image, est lui-même trop complexe pour faire l'objet d'une représentation exhaustive. À ce niveau de la démarche, intervient une réduction volontaire de la réalité perçue : la définition d'un modèle conceptuel. Ce modèle procède d'une simplification de la réalité perçue sur la base d'un jeu de spécifications. Ces dernières portent plus particulièrement sur la sélection et la classification des éléments de la réalité perçue, soit l'établissement de nomenclatures, et sur la définition des contraintes entre ces éléments.

Le modèle n'est pas neutre car il s'efforce de répondre à un objectif ou une gamme limitée d'objectifs. Les éléments et les relations conservés et identifiés sont là pour permettre les traitements ultérieurs propres à l'application pressentie. À un même monde perçu,

peuvent bien sûr correspondre plusieurs modèles conceptuels.

Il n'est pas rare qu'un modèle soit lié à une gamme d'échelles d'utilisation, fixant ipso facto des seuils de tolérance en termes de position et éventuellement de forme. Notons cependant qu'en théorie, cette liaison du modèle à l'échelle n'est pas inéluctable, mais qu'elle s'impose dès que le monde perçu diffère du terrain naturel. C'est le modèle, et non le monde réel ou perçu, qui va constituer la référence pour l'ensemble des opérations intervenant dans l'élaboration d'une banque de données géographiques et, in fine, dans l'établissement de la carte. Cette référence est couramment qualifiée de *terrain nominal*.

Le modèle étant fixé, c'est sous le contrôle de ses spécifications que vont être effectuées les opérations d'acquisition de données, d'enregistrement et de traitement. Dans une filière numérique, c'est l'étape de la constitution et de l'enrichissement de la base de données géographiques. On notera qu'il n'est pas encore question de faire intervenir les caractéristiques propres à la représentation de ces données, c'est-à-dire les attributs graphiques. Il n'est question ici que de caractéristiques de position et d'attributs thématiques.

Les informations conservées dans une base de données géographiques **peuvent faire l'objet d'une** représentation cartographique à la condition qu'elles soient soumises aux contraintes de l'échelle finale de représentation et à celles des moyens graphiques utilisés. L'échelle de la carte, via les règles de généralisation cartographique telles que sélection, schématisation et harmonisation, constitue une nouvelle source d'altérations vis-à-vis du modèle. Il en va de même de la symbolisation, largement dictée par l'adaptation aux moyens graphiques (impression ou visualisation sur écran ; usage, ou non, de la couleur ; etc.).

Une fois cartographiés, c'est-à-dire simplifiés par la généralisation et caractérisés par leurs attributs graphiques, les éléments peuvent faire l'objet d'une base de données cartographiques, distincte de la base de données géographiques dont elle est issue.

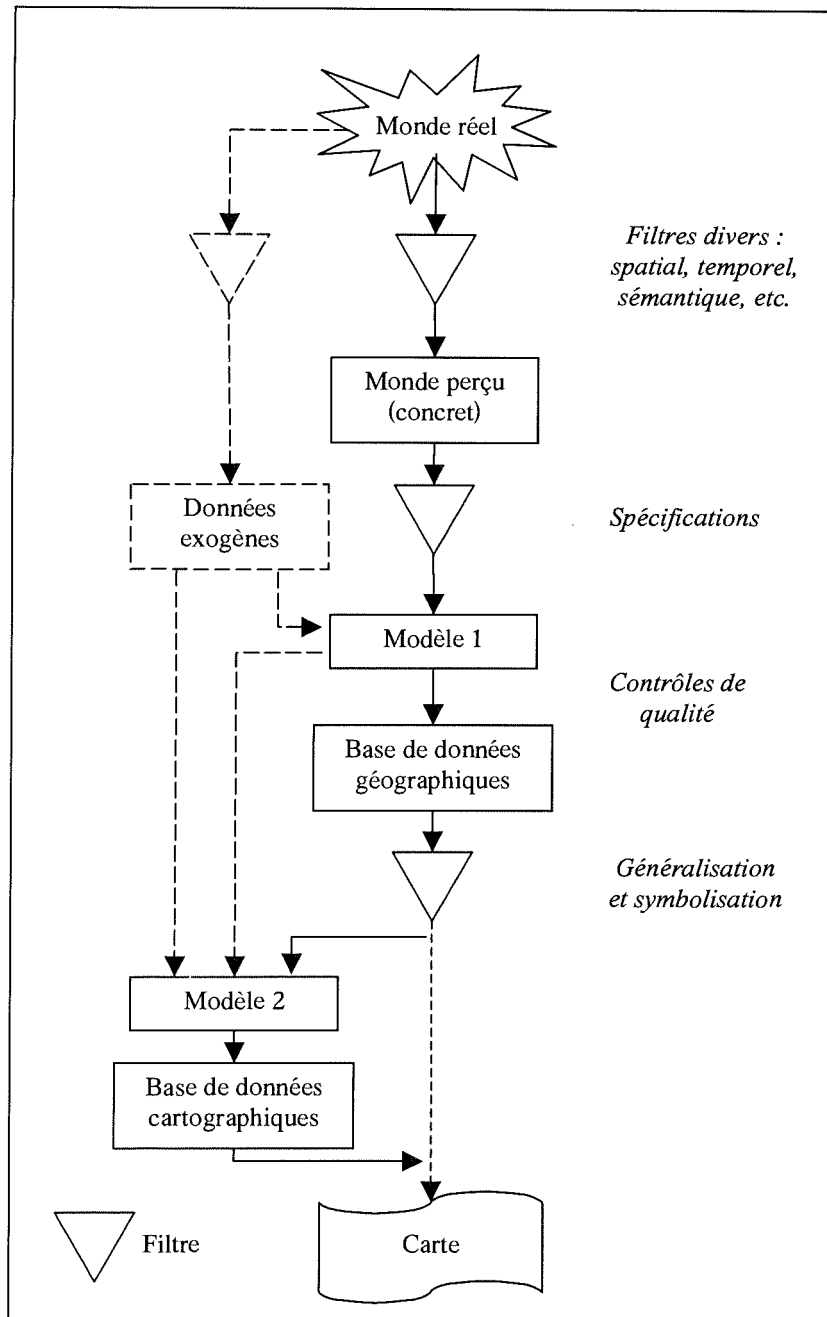


Figure 1. Filière d'élaboration de la carte : du monde réel à la carte

B. Ajouts et variantes de la filière cartographique

Le monde perçu sur le terrain, sur une photographie aérienne ou sur une image satellite, ne rend compte que des éléments concrets du territoire. Pour enrichir le modèle conceptuel de données géographiques, et par là étendre ses potentialités d'application, il est fréquent d'adjoindre à la réalité perçue un certain nombre d'éléments exogènes (Fig. 1). Aux premiers rangs de ceux-ci, on peut mentionner la toponymie et les éléments de la planimétrie abstraite, c'est-à-dire non matérialisés sur le terrain telles les limites

administratives. Mais l'adjonction d'éléments exogènes peut être beaucoup plus considérable. En particulier lorsque la source est constituée par une photographie aérienne ou une image satellite, quantité d'éléments issus d'une source cartographique conventionnelle viennent compléter, soit le modèle de données géographiques, soit la spatioscarte qui est élaborée sur la base de ce dernier.

Dans la pratique, la filière partant du monde perçu pour arriver à la carte est souvent simplifiée et/ou raccourcie. L'exemple le plus frappant est sans doute

celui de l'élaboration d'une carte dérivée. Dans une telle filière, le modèle de données ne peut être qu'un sous-ensemble généralisé de celui présidant à la carte de base utilisée comme « source » de la carte dérivée. D'autre part, lorsque les objectifs du modèle relèvent strictement de la cartographie, il n'est pas rare de confondre la base de données géographiques et la base de données cartographiques. Cette confusion est malheureusement trop souvent pratiquée dans d'autres contextes d'application, oubliant que les données cartographiques, contrairement aux données géographiques, sont liées à une échelle et à un type de visualisation, et altérées par le jeu de la généralisation et de la symbolisation.

Le cas de la photographie aérienne numérisée (scannée) et celui de l'image satellite déterminent aussi une variante de la filière traditionnelle, dans la mesure où la source du modèle de données géographiques — l'espace perçu — est déjà formée par une image numérique. Cela n'a rien d'incompatible avec les notions de bases de données géographiques ou cartographiques mais, dans la plupart des cas, cela en détermine la forme. Cette variante sera examinée en détails dans une section ultérieure de ce chapitre.

II.1.A QUALITÉ DES DONNÉES GÉOGRAPHIQUES ET CARTOGRAPHIQUES

Un produit ou un service est jugé de qualité lorsqu'il présente toutes les caractéristiques qui le rendent apte à satisfaire un besoin prédéterminé ou implicite (Brassel et al., 1995). La qualité est donc toujours une notion relative : un même produit peut donner lieu à des évaluations de qualité différentes selon des besoins distincts.

En ce qui concerne les données géographiques ou cartographiques, la solution idéale consisterait sans doute à procéder à l'acquisition de données selon les strictes spécifications du modèle élaboré par l'utilisateur pour son application. Mais le coût des données géographiques est tel que l'utilisateur ne peut procéder lui-même à leur acquisition. Celle-ci est réservée à des agences spécialisées qui s'efforcent de diffuser les données le plus largement possible. Déterminer la qualité des données géographiques ou cartographiques, constitue donc une double préoccupation ou, mieux, deux préoccupations complémentaires, d'une part dans le chef du producteur, et d'autre part du point de vue de l'utilisateur.

Si pour l'utilisateur, la qualité des données doit rendre compte de leur adéquation à une application précise (*fitness for use*), pour le producteur, au contraire, il serait souhaitable de pouvoir évaluer la qualité des données indépendamment de toute application.

A. Qualités des spécifications

Établir la qualité des données suppose avoir défini a priori une référence, à laquelle seront confrontées les données utilisables. Dans la filière présentée aux paragraphes précédents, la référence, ou terrain nominal, est fournie par le modèle de données. C'est par l'intermédiaire du modèle que le producteur décrit :

- le contenu sémantique du jeu de données : le *dictionnaire* de données ;
- les caractéristiques des données : les *métadonnées* ;
- les relations entre les données : dans un *modèle conceptuel formalisé*.

Parmi les métadonnées, les différents indicateurs de qualité fournis par le producteur font référence à des normes de qualité indépendantes d'une application précise. Tant en matière de normes de qualité, qu'en matière de métadonnées en général, des standards ont été proposés aux niveaux national et international (à titre d'exemples : CEN/TC/287, 1999 ; FGDC, 2000 ; ISO/TC 211, 2000).

Face aux spécifications du producteur, l'utilisateur doit s'assurer que le jeu de données est capable de s'intégrer, totalement ou partiellement, à son propre modèle et, par là, est adapté à son domaine d'application. Pour ce faire, il doit comprendre le contenu du jeu de données et, le cas échéant, vérifier les performances des données annoncées par le producteur. On est donc en présence de deux modèles de données :

- celui du producteur, propre à un jeu de données et (quasi) indépendant des applications ;
- et celui de l'utilisateur, portant sur un ou plusieurs jeux de données et dédié à une application ou un domaine d'application.

Ces modèles peuvent cependant être entachés d'erreurs ou d'imprécisions. En particulier, les spécifications du modèle du producteur peuvent s'avérer incomplètes (omission d'un type d'entité ou d'objet géographique, omission d'une catégorie ou d'une modalité d'attribut, etc.) ou ambiguës (définition non univoque d'une entité, ou des modalités d'un attribut). D'une manière générale, toute métadonnée incomplète ou erronée fourvoie l'utilisateur dans des applications non compatibles avec les données. Ces erreurs de spécification du modèle sont sans doute les plus difficiles à démasquer, mais, surtout, elles sont celles qui induisent les plus graves conséquences. Elles réclament qu'une attention toute particulière soit consentie lors de la phase conceptuelle d'élaboration d'une base de données géographiques (Pantazis et Donnay, 1996).

Le modèle étant considéré comme la référence, le jeu de données doit répondre à ses spécifications sémantiques, géométriques et de relations. Le contrôle de la performance ou test de qualité du jeu de données, qu'il soit le fait du producteur ou de l'utilisateur, est réalisé sur un échantillon de données et consiste à mesurer l'écart entre le modèle et les données de l'échantillon.

B. Qualités géométriques

La précision exprime le degré d'erreur d'une mesure. Dans son sens le plus simple, la précision d'une mesure isolée indique le nombre de chiffres significatifs, unités ou fractions d'unité, selon lequel la mesure est exprimée. Cependant, face à une série de mesures d'une même grandeur, la précision est un nombre caractérisant la dispersion de la série de mesures, exprimée par sa variance ou par son écart-type (Bergeron, 1993 ; CNIG, 1994).

L'exactitude quant à elle, mesure l'écart entre une ou plusieurs mesures d'une grandeur et la grandeur *réelle ou nominale* qui est mesurée. L'exactitude s'exprime généralement en termes d'erreur quadratique moyen (*eqm*). À titre d'exemple, un jeu de données sera réputé exact en position si l'*eqm* observée sur un échantillon est inférieure au seuil prévu par les spécifications du modèle.

Précision et exactitude s'appliquent directement à la position d'un point, tant en planimétrie qu'en altimétrie (Fig. 2). En première analyse, elles relèvent des capacités du matériel d'acquisition. Encore faut-il pouvoir établir la filière d'acquisition des données,

afin d'envisager une éventuelle propagation des erreurs. Exactitudes de position, de longueur, de superficie ou de volume, voire de forme, peuvent ainsi être évaluées par une analyse de variances (Drummond, 1995). Dans les cas plus complexes, tels que celui des données obtenues par interpolation, l'évaluation utilise préférentiellement des simulations de Monte-Carlo (Heuvelink, 1998).

C. Qualités sémantiques

La qualité des caractéristiques non géométriques, c'est-à-dire des attributs des données peut être évaluée à divers égards. Sous le terme de qualité sémantique, censée décrire l'écart sémantique entre le modèle et les données, Salgé (1995) inclut les notions de précision et d'exactitude des attributs, de complétude, d'actualisation et de cohérence sémantique.

Selon l'échelle qualitative ou quantitative des attributs, les notions de précision et d'exactitude diffèrent (Goodchild, 1995). Lorsque l'échelle de mesure de l'attribut est quantitative, la précision correspond au nombre de chiffres significatifs selon lequel est exprimée la valeur de l'attribut. L'exactitude correspond toujours à l'écart entre la valeur mesurée ou dénombrée et la valeur réelle de l'attribut.

D'autre part, un attribut sur une échelle qualitative est d'autant plus précis qu'il présente plus de modalités. Mais plus le nombre de modalités est grand, plus il y a de risques de commettre une erreur sur l'exactitude car les possibilités de confusion et d'omission augmentent (Tableau 1). On note cependant que ces

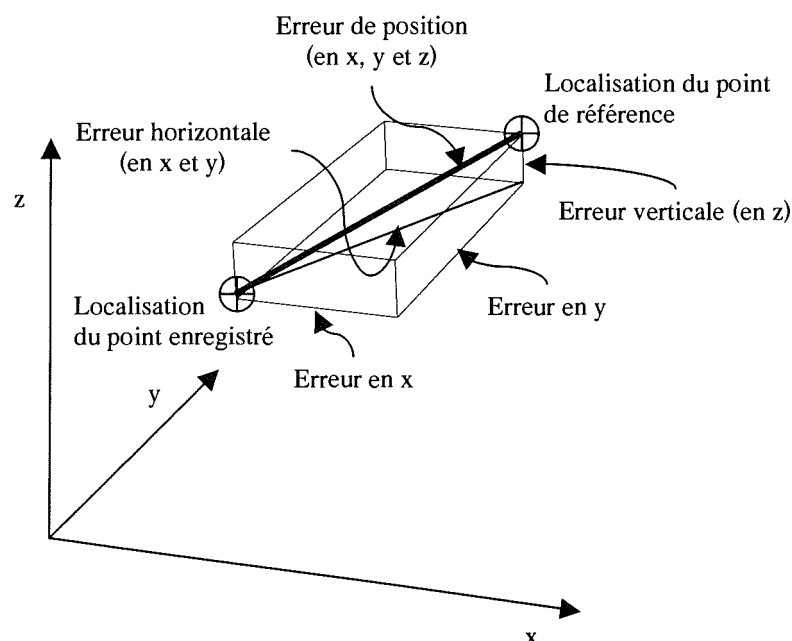


Figure 2. Erreurs de position sur un point (d'après Veregin 1998)

erreurs de confusion ne présentent pas nécessairement le même degré de sévérité selon les modalités de l'attribut mises en cause. De telles matrices de confusion, comparant le terrain nominal aux données à travers un échantillon de points, traduisent les deux types de risques d'erreur : celui du producteur et celui de l'utilisateur (Congalton et Mead, 1983 ; Story et Congalton, 1986). Divers indices de qualité sont construits sur cette base, tel que l'indice Kappa largement utilisé en télédétection (Hudson et Ramm, 1987).

Parmi les attributs qualitatifs, ceux dont la forme est strictement littérale peuvent présenter des inexactitudes logiques et de syntaxe (d'orthographe par exemple), susceptibles d'être identifiées de manière automatique ou semi-automatique. Par contre, les erreurs sémantiques (orthographe correcte, mais mot incorrect) réclament une procédure de vérification similaire à celle mise en place pour les autres attributs qualitatifs, procédant par recherche des omissions et des confusions.

Omissions et confusions sont aussi les responsables des erreurs de complétude. Cette notion peut porter sur plusieurs critères :

- les entités : vérification de la présence dans le jeu de données de toutes les instances des entités, telles que décrites par les spécifications ;
- sur les attributs : vérification de la présence de toutes les instances de telle catégorie ;

- sur les relations entre les entités : vérification de la présence de tous les types de relations entre entités (cf. paragraphe suivant).

Une erreur de complétude manifeste traduit souvent une erreur de spécification, par exemple une description incomplète ou ambiguë d'une donnée ou de ses attributs, ou encore la mauvaise compréhension de celles-ci par l'utilisateur.

L'actualisation des données est une qualité qui démontre bien la complémentarité des points de vue du producteur et de l'utilisateur. Pour le producteur, elle se traduit par l'analyse de la faisabilité et par l'élaboration d'un plan de mise à jour ou de révision des données. Pour l'utilisateur, il s'agit de mesurer l'écart entre les situations à la date d'acquisition et à la date d'utilisation des données, et de vérifier si cet écart est compatible, et moyennant quels compromis, avec l'application pressentie.

L'évaluation de la cohérence sémantique consiste à vérifier si les données satisfont les contraintes sémantiques, soit implicites, soit fixées par les spécifications. Ces contraintes portent notamment sur le domaine de validité de chaque attribut (binaire, entier ou réel ; comptage en entiers positifs ou nuls ; pourcentage ; ensemble ; etc.) et elles peuvent faire l'objet d'une vérification automatique de cohérence dans l'ensemble du jeu de données.

	Minéral	Végétal	Eau	Total	Confusion %
Minéral	23	0	10	33	30,3
Végétal	0	49	0	49	0
Eau	7	3	24	34	29,4
Total	30	52	34	116	
Omission %	23,3	5,8	29,4		

	Bâti	Autre minéral	Culture Prairies	Feuillus	Conifères	Cours d'eau	Plans d'eau	Total	Confusion %
Bâti	9	3	0	0	0	2	4	18	50,0
Autre min.	3	8	0	0	0	1	3	15	46,7
Cultures	0	0	15	1	0	0	0	16	6,3
Feuillus	0	0	1	17	3	0	0	21	19,0
Conifères	0	0	0	3	9	0	0	12	25,0
Cours eau	2	2	0	0	0	7	4	15	53,3
Plans eau	2	1	1	0	2	2	11	19	42,1
Total	16	14	17	21	14	12	22	116	
Omission %	43,8	42,9	11,8	19,0	35,7	41,2	50,0		

Tableau 1. Précision et exactitude des attributs qualitatifs

Matrices de confusion d'une analyse des modes d'occupation du sol sur un échantillon de points.

En ligne : résultats de l'interprétation - En colonne : vérité terrain ou référence.

L'augmentation du nombre de modalités correspond à une augmentation de la précision de l'analyse mais elle augmente le risque d'inexactitude (confusion et omission par catégorie).

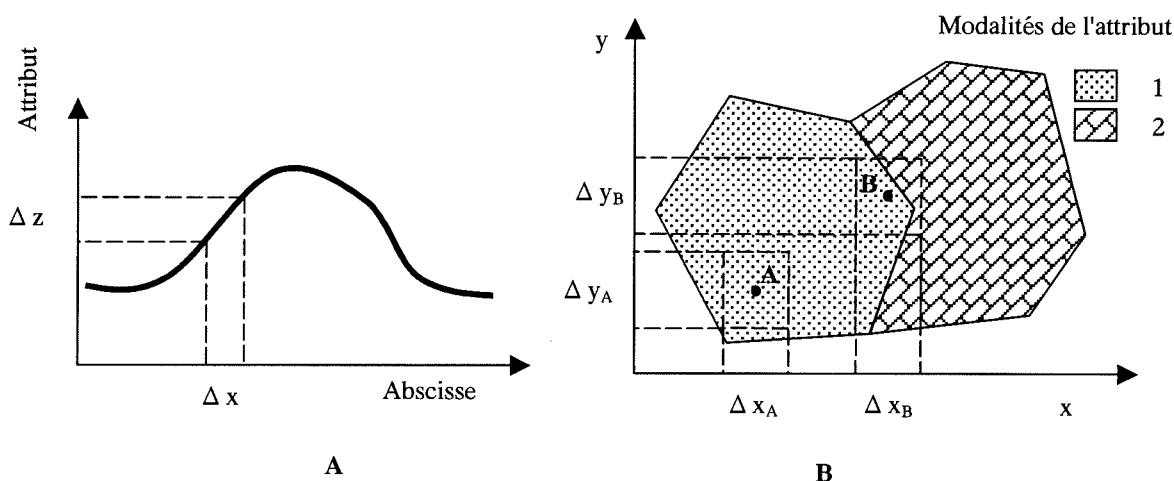


Figure 3. Influence de la qualité géométrique sur l'exactitude de l'attribut

A — Attribut quantitatif — B — Attribut qualitatif

Il apparaît manifestement que les erreurs sémantiques de différentes natures sont intimement liées. En outre, on doit constater que la qualité sémantique n'est pas indépendante de la qualité géométrique. Ainsi, l'exactitude de l'attribut n'est pas indépendante de l'erreur de position commise sur l'entité spatiale à laquelle l'attribut se rapporte. Ici encore, les échelles de mesure des attributs doivent être distinguées. Si la variation de l'attribut est spatialement continue, et que par conséquent l'échelle de l'attribut est quantitative, toute erreur planimétrique sur le point où l'on mesure l'attribut, engendre une erreur sur cet attribut (Fig. 3 A). Par contre, si l'entité spatiale sur laquelle porte l'attribut est spatialement discrète, quelle que soit l'échelle de mesure de l'attribut, une erreur de position n'entraîne une erreur sur l'attribut que dans certains cas (Fig. 3 B). Ceci provient du fait que la valeur d'un attribut est considérée constante ou homogène sur la totalité d'une entité discrète.

D. Qualités des relations

Les relations entretenues par les données géographiques, entre les entités ou entre les catégories des entités, sont de diverses natures : topologiques, logiques, de structure, de composition, etc. Le modèle de données doit avoir identifié toutes les relations existantes, avec leurs propriétés : cardinalité, caractère obligatoire, permis ou interdit, relations complètes ou partielles, etc. Sur base du modèle, il est alors permis d'imaginer une vérification automatique ou semi-automatique de l'ensemble de la base de données géographiques constituée. Il faut remarquer que ce contrôle ne porte que sur la cohérence, ou vraisemblance, des relations présentes.

S'il s'agit de vérifier l'exactitude des relations entre des entités particulières, il y a lieu de procéder, comme pour les autres critères de qualité, par

vérification d'un échantillon d'entités au sein duquel on relève les violations de contraintes et les écarts à la situation de référence.

Il faut de nouveau constater la dépendance entre les différents types d'erreurs. Il est évident que l'exactitude des relations topologiques, par exemple, en l'occurrence le voisinage et la superposition, dépend de la qualité géométrique des données, mais aussi de leur exactitude sémantique puisque ces données doivent d'abord être correctement identifiées.

E. Qualités des données cartographiques

Signalons tout d'abord que du point de vue du vocabulaire, on constate une évolution de la signification accordée aux termes de précision et d'exactitude d'une carte. La terminologie cartographique traditionnelle utilise en effet le terme de précision pour définir la qualité géométrique de position d'une carte, tandis que sa qualité sémantique est qualifiée d'exactitude. Selon cette terminologie, une carte précise et exacte est dite fidèle ou sincère (IGN, 1968). Pourtant, le sens des termes de précision et d'exactitude donné par la théorie des erreurs, et utilisé dans les paragraphes qui précèdent, est aujourd'hui largement accepté dans le domaine de la cartographie.

Si les données géographiques font l'objet d'une cartographie, les erreurs du jeu de données sont communiquées à la carte. Mais, de plus, le procédé cartographique introduit de nouvelles altérations par le biais de la généralisation et de la symbolisation, altérations d'autant plus grandes que l'échelle de la carte est petite. Cette double source d'altérations crée une distinction sensible entre la qualité attachée à une base de données géographiques et celle caractérisant une carte ou une base de données cartographiques

(Visvalingam, 1990). La nature des erreurs, et les moyens d'évaluation, restent cependant identiques, de même que subsiste la complémentarité des préoccupations du producteur et de l'utilisateur de la carte.

Les opérateurs de généralisation portent essentiellement sur la géométrie des données (simplification, exagération, déplacement) et les relations (fusion, caricature), mais elles peuvent aussi inférer sur la complétude (sélection) et sur la sémantique (reclassification) des données (McMaster et Shea 1992 ; Donnay, 1995). La symbolisation, dictée par les règles de lisibilité et par la sémiologie graphique, mais aussi par les moyens graphiques disponibles, interfère également sur la position, la longueur et la superficie des entités représentées.

Un indicateur synthétique de l'erreur de position engendrée lors du processus d'élaboration de la carte est l'erreur graphique (Cuenin, 1972). Elle résulte du cumul des erreurs, depuis l'acquisition, jusqu'à la rédaction et à la reproduction de la carte, en considérant que toutes ces opérations sont réalisées dans les meilleures conditions possibles. Son estimation, sur la carte, est comprise entre 0,1 et 0,2 mm, ce qui correspond aussi à l'erreur commise lors de la lecture de la position d'un point quelconque sur une carte rédigée sur un support stable.

Pratiquement, il s'avère très difficile de garantir une si faible erreur en tout point du champ de la carte. C'est pourquoi les producteurs de cartes ont coutume de définir des seuils de tolérance qui expriment une précision relative ou une probabilité d'erreur, comme l'illustrent le tableau 2 et la figure 4.

USGS Planimétrie (< 1/20.000)	90% des points testés à mieux que 1/50 de pouce (0,5 mm) de leur position exacte
IGNF Planimétrie	99% des points testés à mieux que 0,8 mm de leur position exacte
USGS Orographie	90% des points testés à mieux que 50% de l'équidistance

Tableau 2. Exemples de normes de qualité cartographique (Sources : USGS, 1999 ; Denègre, 1994)

On notera que de telles normes ne peuvent être pratiquement rencontrées que lors de l'élaboration de cartes topographiques de base, c'est-à-dire élaborées directement au départ des levés topographiques et phototopographiques, établies à grande échelle et à champ restreint. En outre, ces normes portent sur des éléments ponctuels et concrets, la position des phénomènes abstraits non matérialisés étant souvent sujette à caution.

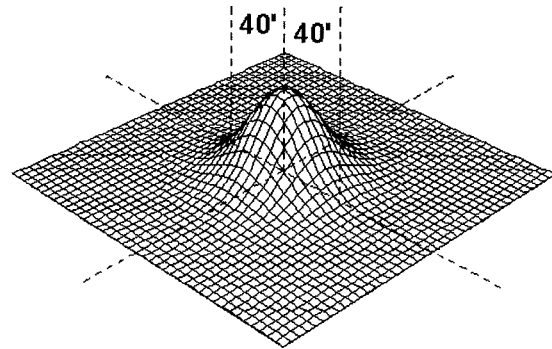


Figure 4. Distribution de probabilité de la position d'un point

Sur une carte à 1/24.000, il y a 90% de chance pour que le point soit situé à moins de 40' de la position choisie (norme USGS, d'après Foote et Huebner, 1997)

Si les données cartographiées sont mémorisées et gérées au sein d'une base de données spécifique, celle-ci doit reposer sur un modèle qui lui est propre. Le modèle cartographique héritera de plusieurs éléments issus du modèle géographique d'où il est issu, mais il portera sur les données généralisées et symbolisées, avec leurs attributs graphiques, et il comportera un rapport de qualité établi en conséquence.

III. LA FILIÈRE DE LA SPATIOCARTE

Bien qu'elle présente plusieurs traits originaux, l'élaboration d'une spatiocarte passe par les différentes étapes de la filière cartographique imaginée dans la première section de ce chapitre.

Le monde perçu est constitué par les images brutes enregistrées par le ou les capteurs embarqués par le ou les satellites. Soit dit en passant, nous ne considérons ici que des images numériques, en posant pour hypothèse que si des photographies satellite entrent dans l'élaboration d'une spatiocarte, elles ont fait l'objet d'un scannage préalable. Mais la spatiocarte incorpore également des données exogènes dont les origines peuvent être multiples : bases de données géographiques ou cartographiques, cartes, photographies aériennes, terrain.

A. Le monde perçu par l'image satellite

Le filtre introduit entre le monde réel et le mode perçu, à travers une ou plusieurs images satellite, est assez sévère. Une image correspond à une vue instantanée du monde concret accessible au capteur. La perception est limitée à une ou plusieurs bandes spectrales précises, celles situées en dehors de la partie visible du spectre (proche et moyen infrarouge et infrarouge thermique, ondes radar, etc.) constituant l'originalité la plus intéressante de ce mode de perception. Encore faut-il noter qu'au sein de chaque bande ou canal, le nombre de niveaux de perception n'est pas infini. Dans l'absolu, il est limité à un

nombre entier de paliers, variable selon les capteurs. De plus, dans la pratique, cet intervalle est rarement exploité dans sa totalité au sein d'une seule image. Enfin, selon les caractéristiques spectrales et radiométriques du capteur, le monde perçu est susceptible d'être altéré, voire annihilé, par les conditions du milieu : ombres propres et ombres portées, couverture nuageuse, brume et pollution atmosphérique, etc..

Outre cette perception réduite dans le domaine de la radiométrie, l'image satellite introduit un autre filtre du point de vue spatial. Deux aspects doivent être distingués. D'une part, les dimensions du champ instantané de prise de vue du capteur déterminent la résolution spatiale ou géométrique de l'image. Mais les cellules d'une l'image brute, ou pixels, ne correspondent pas à des surfaces identiques au niveau du sol. Les dimensions du champ, au sol, correspondant à un pixel de l'image varient selon la position de ce pixel dans la ligne de l'image, perpendiculairement à la trace de l'orbite du satellite, et selon l'orientation de l'axe de visée (Baudot, 1997).

Quoi qu'il en soit, la résolution spatiale de l'image agit comme un facteur de généralisation implicite à la fois :

- sur le plan des attributs radiométriques des pixels : le capteur intègre l'énergie réfléchie (ou éventuellement émise) par la totalité des objets situés à l'intérieur du champ, et même légèrement à l'extérieur puisque le champ présente une forme plus proche de l'ellipse que du rectangle ;
- et sur le plan de la géométrie : la taille des plus petits objets discernables, d'une part, et l'exactitude géométrique des données géographiques, d'autre part, seront en première analyse du même ordre de grandeur que la taille du champ de prise de vue. Il est clair que cette dernière considération influence directement l'échelle de la spatio-carte issue du traitement de

Le champ couvert par la totalité de l'image constitue un second facteur limitant d'ordre spatial ou géométrique. Si pour couvrir le territoire étudié, il est nécessaire d'avoir recours à plusieurs images contiguës, les différentes portions du territoire seront perçues distinctement. Dans ce cas, en effet, les images sont enregistrées depuis des orbites voisines, ce qui a des conséquences sur la géométrie si, par exemple, les angles de vue sont distincts. En outre, les enregistrements ne sont pas simultanés, ce qui engendre des distorsions de la radiométrie à cause de conditions climatiques différentes, d'éventuels écarts phénologiques, de variations des ombres portées et de l'ensoleillement.

La perception du monde réel est donc fonction des caractéristiques du capteur, mais aussi du temps, et

des conditions du milieu. Enfin, si l'on souhaite utiliser plusieurs capteurs différents pour réaliser l'étude en comptant sur certaines caractéristiques complémentaires, il faudra se résoudre aussi à cumuler leurs facteurs limitants.

B. Les modèles de données géographiques en télédétection

Les traitements relevant de la télédétection ont pour but la transformation des images brutes en données géographiques. Différents modèles de données peuvent être envisagés, répondant à des besoins différents et faisant appel à des traitements plus ou moins spécifiques. Le tableau 3 reprend quelques modèles de données typiques qui sont discutés dans cette section.

Mais avant toute chose, pour être qualifiées de géographiques, les données doivent être localisées à la surface de la Terre. Les images brutes de télédétection sont entachées d'une série de déformations géométriques qui empêchent une localisation cohérente. Un traitement indispensable consiste donc à corriger la géométrie des images pour les ramener dans un système de coordonnées de référence. Le choix du système et la qualité de la correction sont dans une certaine mesure laissés à l'utilisateur, mais ils restent conditionnés par divers facteurs, tels que :

- les caractéristiques de prise de vue : altitude, attitude, angle de prise de vue, etc. ;
- les caractéristiques géométriques des images : résolution, champ, etc. ;
- les caractéristiques des données exogènes utilisées pour effectuer la correction géométrique ;
- la méthode de correction géométrique mise en œuvre.

On constate qu'avec l'avènement des images à très haute résolution spatiale, l'étape de correction géométrique prend une importance toujours plus grande. Les techniques s'approchent de celles pratiquées en photogrammétrie numérique et réclament des données exogènes toujours plus précises et coûteuses, telles que les modèles numériques de terrain et les données levées par GPS. Ce n'est qu'à ce prix que l'on peut espérer exploiter la précision des nouveaux capteurs, en garantissant une qualité géométrique des données de télédétection compatible avec des applications menées à grande échelle.

Au terme de la correction géométrique, les données répondent à un premier jeu de spécifications : les pixels de l'image sont localisés vis-à-vis d'un système de coordonnées de référence, avec une précision et une exactitude de position connues. Du point de vue sémantique, les pixels sont porteurs d'attributs radiométriques, variables en nombre et en qualité selon le type d'image traitée. Les comptes numériques

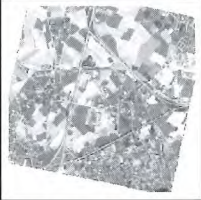
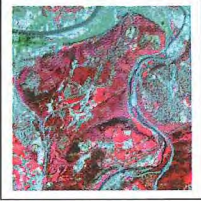
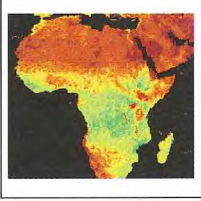
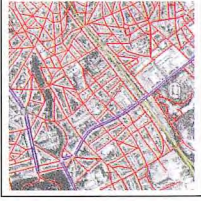

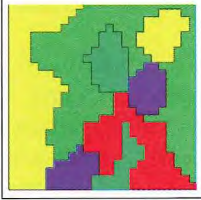
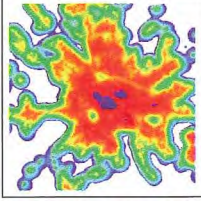
Type de modèle	Aspect géométrique	Aspect sémantique	Traitements spécifiques	Exemples de visualisation
1 Image	Image géoréférencée Précision et exactitude connues	Comptes numériques originaux	Corrections géométriques	 Orthoimage panchromatique
2 Image	Idem modèle 1	Réflectances	Corrections radiométriques	 Composition des radiométries
3 Image	Idem modèle 1	Combinaison algébrique des radiométries originales	Indices divers, traitements statistiques	 Indice normalisé de végétation
4 Vecteur	Basé sur le modèle 1 mais affecté d'altérations spécifiques	Identifiants et attributs d'objets géographiques	Extraction, segmentation, vectorisation	 Éléments du réseau de voirie
5 Image	Idem modèle 1	Modalités d'occupation du sol	Classification	 Modes d'occupation du sol
6 Vecteur	Basé sur le modèle 1 mais affectées d'altérations spécifiques	Identifiants de polygones et attributs sur l'affectation du sol	Filtrage, généralisation, vectorisation	 Parcelles d'occupation du sol
7 Image	Basé sur le modèle 1 Géométrie en 2,5 D Réduction d'échelle	Attribut quantitatif et spatialement continu	Interpolation, généralisation conceptuelle	 Champ de potentiel

Tableau 3. Quelques exemples de modèles de données géographiques en télédétection

de l'image brute originale ont d'ailleurs pu être altérés par la correction géométrique. Ces spécifications, correspondant à un premier modèle de données de télédétection, sont déjà suffisantes pour envisager des applications courantes, en ce compris des applications relevant de la spatio-cartographie (modèle 1 du tableau 3).

Un second modèle de données, conservant les qualités géométriques du précédent, s'attachera à améliorer la qualité sémantique en ayant recours à des traitements effectuant une correction radiométrique des données. Presque toutes les applications de télédétection devraient passer par là, y compris les simples compositions colorées illustrées au modèle 2 du tableau 3. Mais pour réaliser une correction précise, les données nécessaires sont difficiles à rassembler, et les méthodes sont délicates à mettre en oeuvre

Dans le même ordre d'idées, plusieurs traitements portant sur la radiométrie des canaux d'une image modifient la sémantique des données pour les rendre aptes à des applications particulières. Parmi ceux-ci, on peut mentionner la construction d'indices divers, tel l'indice normalisé de végétation. Les images ainsi traitées forment de véritables bases de données en mode image (à titre d'exemple, voir JRC, 2000), répondant à des modèles distincts par leurs qualités sémantiques (modèle 3 du tableau 3).

Un tout autre objectif consiste à extraire des images, des données géographiques discrètes en travaillant à la fois sur la disposition relative et sur la radiométrie des pixels. Plusieurs objets géographiques linéaires sont candidats à ce type d'extraction, tels que les linéaments géomorphologiques ou les différents types de réseaux de communication. Les traitements appliqués sont très variés, mais le modèle de données correspondant est généralement un modèle d'objets géographiques, décrit en mode vectoriel, et présentant des spécifications tant géométriques que sémantiques totalement distinctes de celles des modèles en mode image (modèle 4 du tableau 3).

Une des applications les plus importantes en télédétection optique consiste à effectuer une classification de l'image selon les modes d'occupation du sol. Les techniques de classification sont multiples et réclament une information exogène non négligeable afin d'assurer l'exactitude de l'identification. Le modèle de données est de nouveau original par sa sémantique puisque les pixels sont porteurs d'une information qualitative, pour laquelle des méthodes spécifiques de validation de qualité sont requises (modèle 5 du tableau 3).

Des traitements complémentaires à la classification, ou à toute autre technique de segmentation de l'image, permettent de développer plusieurs modèles de données géographiques très différents. Les plages de

pixels voisins présentant la même valeur qualitative peuvent être détournées pour former des objets polygonaux selon un modèle vectoriel classique mais de qualité géométrique particulière (modèle 6 du tableau 3). Inversement, il est aussi possible d'enrichir une base de données géographiques vectorielle exogène, par extraction des superficies couvertes par chaque mode d'occupation du sol. Enfin, moyennant le recours à des techniques d'interpolation et à d'éventuelles variables exogènes, l'image de l'occupation du sol peut être transformée en champs décrits par des modèles de données spatialement continus (modèle 7 du tableau 3).

C. Les modèles de spatio-cartes

Tous les modèles de données géographiques présentés à la section précédente peuvent faire l'objet d'une visualisation, et pour beaucoup d'entre eux, cette visualisation peut être poussée jusqu'à une véritable représentation cartographique. L'opération réclame pourtant que soient définies plusieurs spécifications complémentaires, rassemblées dans un modèle cartographique.

Le modèle cartographique est conçu selon les règles de la cartographie. Il est déterminé pour une échelle précise, ou une gamme limitée d'échelles, dont le choix est restreint par la qualité géométrique des données géographiques d'une part, et par les normes de qualité propres à un document cartographique d'autre part.

Le modèle cartographique est en outre fonction des moyens graphiques utilisés pour la visualisation, vis-à-vis desquels il y a lieu de distinguer :

- la console graphique ou l'écran d'ordinateur ;
- l'imprimante de bureau, qu'elle soit couleur ou noir et blanc, laser ou à jets d'encre ;
- la filière d'impression professionnelle, passant par la réalisation de typons en quadrichromie.

Les contraintes d'échelle et de support doivent être connues a priori et elles déterminent les caractéristiques du modèle de spatio-carte élaboré. Cela signifie qu'au départ d'un même modèle de données, relatif à un même thème ou à une même application, il est nécessaire d'envisager des modèles de spatio-cartes distincts selon l'échelle, la résolution, la nature et le format du support de diffusion (Fig. 5).

La réalisation de la spatio-carte va réclamer de nouveaux traitements du jeu de données, au premier rang desquels figurent les opérations inévitables de généralisation structurelle et conceptuelle menées en mode image. Certaines spatio-cartes demandent des prestations spécifiques, toujours réalisées en mode image mais relevant tantôt de la cartographie mathématique, tantôt de l'infographie. À titre d'exemples, les mosaïques couvrant une grande

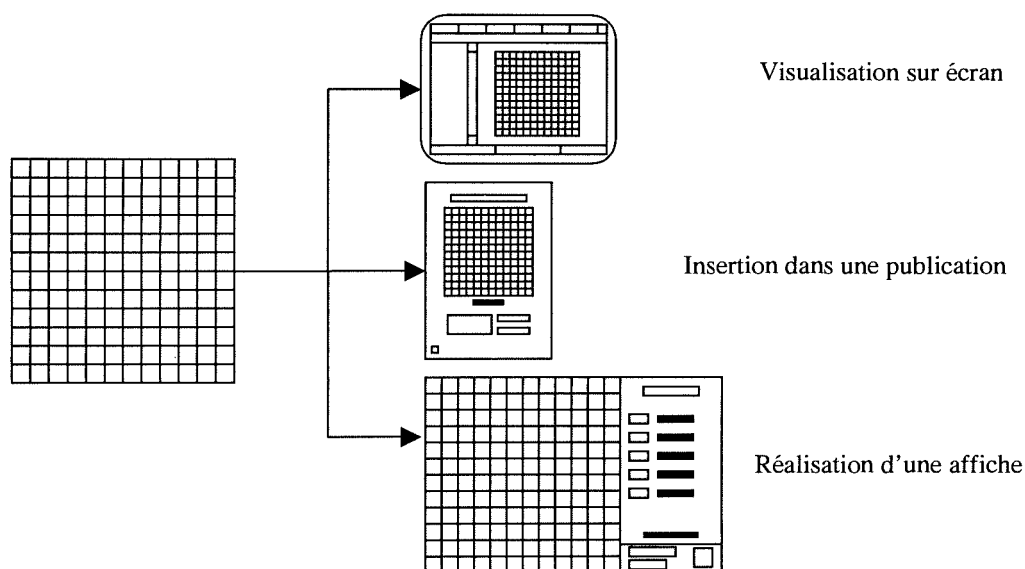


Figure 5. Un modèle de données géographiques ... plusieurs modèles de spatiocartes

portion de la surface terrestre requièrent des projections cartographiques adaptées, tandis que le drapement d'un modèle numérique de terrain fait appel aux techniques de visualisation en trois dimensions.

Au moment de construire la spatiocarte, il ne s'agit plus de visualiser grossièrement les résultats des traitements, comme le fait couramment tout chercheur au cours de son travail, mais il faut transmettre une information non ambiguë à destination d'un public varié. Les données de télédétection doivent donc être mises en forme et présentées selon les règles de la sémiologie graphique, quitte à simplifier les informations pour assurer un message clair. À cet égard, l'élaboration de la légende de la spatiocarte réclame un soin tout particulier étant donné la nature originale des données cartographiées.

De plus, la spatiocarte ne saurait jouer pleinement son rôle de communication si elle se contente de présenter les données de télédétection. Elle doit permettre de répondre aux questions élémentaires de localisation et de repérage, ce qui se traduit par un amendement plus ou moins important de données exogènes. Parmi celles-ci figurent des éléments de planimétrie reportée, concrète ou abstraite, et la toponymie. Ce complément d'informations est géré en mode vectoriel, comme d'ailleurs toutes les autres indications formant l'habillage de la spatiocarte et éclairant le lecteur sur le contexte de l'application et la fiabilité du document présenté. La manipulation conjointe de données en mode image et en mode vectoriel constitue une singularité de la démarche de spatiocartographie.

Si la plupart des modèles de données de télédétection peuvent être traduits en spatiocartes, il reste que deux modèles s'imposent, tant par leur richesse en informations que par leur analogie avec des formes

cartographiques traditionnelles. Il s'agit, d'une part, des spatiocartes en composition colorée et, d'autre part, des spatiocartes d'occupation du sol. Ce sont ces deux types de spatiocartes qui seront évoqués plus spécialement à travers le présent ouvrage.

La composition colorée apparaît comme le moyen le plus naturel de visualiser des images multispectrales et elle semble réclamer un minimum de traitements de données préalables. Pourtant, la réalisation d'une spatiocarte en composition colorée présente une foule d'options et les choix à opérer ne sont pas évidents. C'est que la composition colorée prétend constituer un support d'interprétation quasi universel. Aucun thème particulier n'est privilégié, mais un maximum de détails doivent pouvoir être identifiés par une très grande variété d'utilisateurs. Un certain nombre de difficultés techniques sont aussi spécifiques à ce type de spatiocarte. La facture d'une composition colorée peut être assimilée à celle d'un document en demi-teintes toujours délicat à réaliser et à imprimer. Le fait que, par construction, la composition colorée s'inscrit dans l'espace des couleurs additives, alors que les procédés d'impression exploitent les règles de soustraction des couleurs ajoute à la difficulté.

Les spatiocartes d'occupation du sol reposent sur un modèle de données décrit précédemment (modèle 5 du tableau 3), mettant en oeuvre des traitements complexes comme le sont les différentes méthodes de classification des images. Ces méthodes, bien que très diversifiées, ne peuvent prétendre à une efficacité totale et elles laissent dans l'image classée des artefacts divers incompatibles avec les qualités sémantiques et esthétiques d'une carte. Par conséquent, la première tâche consiste à remédier aux carences et à gommer les effets parasites des traitements. Une fois classées et corrigées, les données

sont simples à visualiser. Elles forment une image en teintes plates, exploitant un nombre réduit de couleurs. Mais cette simplicité nuit à l'efficacité du message cartographique. Des cartes d'occupation du sol sont élaborées depuis longtemps par des moyens traditionnels, de sorte qu'il existe un modèle propre à ce type de cartes, modèle auquel la spatio-carte doit se conformer. Cette exigence induit toute une série de traitements complémentaires. Certains sont réalisés en mode image, en aval de la classification. Beaucoup d'autres sont effectués en mode vectoriel, en exploitant une information exogène d'autant plus riche que l'on souhaite doter la sémantique de la carte d'une notion d'usage, dépassant la seule notion d'occupation du sol.

CONCLUSION

Pour prétendre au statut de carte, la spatio-carte doit répondre à plusieurs exigences. Certaines sont strictement formelles, telles que la définition de l'habillage, tandis que d'autres portent sur le fond, à savoir la transformation des données géographiques en données cartographiques.

Avant d'entamer la réalisation d'une carte, la cartographie traditionnelle a toujours veillé à la définition précise d'un modèle, le *cahier des spécifications* reprenant les normes de qualité, et elle a préconisé, jusqu'à l'étape ultime de la reproduction, l'usage de formalismes, ou *organigrammes*, figurant à la fois les données et les traitements, avec leurs caractéristiques et leurs spécifications opératoires (van der Steen, 1995a, 1995b). Dans le contexte de la cartographie numérique, la spatio-carte doit s'inscrire mutatis mutandis dans la même démarche.

Dans le contexte de la télédétection, la disponibilité des données géographiques sous forme d'images, c'est-à-dire facilement visualisables, a sans doute tenté certains concepteurs à sauter des étapes. De plus, la confusion fréquente entre modèle de données géographiques d'une part, et modèle cartographique d'autre part, confusion alimentée par la banalisation des « systèmes d'information géographique », a pu conduire à la production de documents qui n'avaient de la carte que le nom.

L'identification des étapes de la démarche, la définition claire des spécifications, la maîtrise des traitements appropriés, le respect des normes, sont autant de conditions nécessaires à l'élaboration d'une spatio-carte de qualité.

BIBLIOGRAPHIE

BAUDOT Y., 1997. L'influence de la résolution effective des données télédéteectées sur les possibilités d'analyse des milieux urbains complexes. *Télédétection des milieux urbains et périurbains* (Dubois J.-P., Donnay J.-P., Ozer A.,

- Boivin F. & A. Lavoie, Éd(s), AUPELF-UREF, Montréal, 3-13.
- BERGERON M., 1993. Vocabulaire de la géomatique. *Cahiers de l'Office de la langue française*. Les publications du Québec, Québec.
- BRASSEL K., BUCHER F., STEPHAN E.-M. & VCKOVSKI A., 1995. Completeness. *Elements of Spatial Quality* (Guptill S.C. & J.L. Morrison, Éd(s)), op. cit., 81-108.
- CEN/TC/287, 1999. *The Geographic European Prestandards and CEN Reports*, <http://forum.afnor.fr/afnor/WORK/AFNOR/GPN2/Z13C/PUBLIC/WEB/ENGLISH/pren.htm>.
- CNIG, 1994. *Éléments d'un vocabulaire géomatique*. Conseil National de l'Information Géographique, Paris.
- CONGALTON R.G. & MEAD R.A., 1983. A Quantitative Method to Test for Consistency and Correctness in Photointerpretation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(1), 69-74
- CUENIN R., 1972. *Cartographie générale*. 2 tomes. Eyrolles, Paris.
- DONNAY J.-P., 1995. *Cartographie topographique*. Série SURFACES, 1, Université de Liège, Liège.
- DRUMMOND J., 1995. Positional accuracy. *Elements of Spatial Data Quality* (Guptill S.C. & J.L. Morrison, Éd(s)), op. cit., 31-58.
- FGDC, 2000. *Federal Geographic Data Committee Standards*. <http://www.fgdc.gov/standards/standards.html>.
- FOOTE K.E. & HUEBNER D.J., 1997. *Error, Accuracy and Precision*. The Geographer's Craft Project, Department of Geography, University of Texas at Austin, <http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/error/errorf.html>.
- GOODCHILD M.F., 1995. Attribute accuracy. *Elements of Spatial Data Quality* (Guptill S.C. & J.L. Morrison, Éd(s)), op. cit., 139-151.
- GUPTILL S.C. & MORRISON J.L. (Éds), 1995. *Elements of Spatial Data Quality*. International Cartographic Association, Pergamon, Oxford.
- HEUVELINK G.B.M., 1998. *Geographic Information Technologies in Society*. NCGIA Core Curriculum in GIScience, <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u098/u098.html>.
- HUDSON W.D. & C.W. RAMM, 1987. Correct formulation of the Kappa Coefficient of Agreement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(4), 421-422.
- IGN, 1968. *Éléments de cartographie*. 2 tomes. École Nationale des Sciences Géographiques, Institut Géographique National, Paris.
- ISO/TC 211, 2000. *Geographic Information / Geomatics*. <http://www.statkart.no/isotc211/>.
- JRC, 2000. *Global Vegetation Monitoring*. Joint Research Centre of the European Commission, <http://www.gvm.sai.jrc.it/>.
- Mc MASTER R.B. & SHEA K.S., 1992. *Generalization in Digital Cartography*.

- Association of American Geographers,
Washington.
- PANTAZIS D. & DONNAY J.-P., 1997. *Conception de SIG. Méthode et formalisme*. Collection Géomatique, Hermès, Paris.
- SALGÉ F., 1995. Semantic accuracy. *Elements of Spatial Data Quality* (Gupta' S.C. & J.L. Morrison, Éds), op. cit., 139-151.
- STORY M. & CONGALTON R.G., 1986. Accuracy Assessment : A User's Perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(3), 397-399.
- VAN DER STEEN S., 1995a. The use of flow diagrams for traditional map making. *Proceedings of the seminar on : Teaching conventional and digital map production Unes*, ICA Commission on Map Production, Enschede, 7-11.
- VAN DER STEEN S., 1995b. Desk top cartographie production: digital production flow diagrams, *Proceedings of the seminar on : Teaching conventional and digital map production lines*, ICA Commission on Map Production, Enschede, 53-63.
- VEREGIN H., 1998. *Data Quality Measurement and Assessment..Core* NCGIA Curriculum in GIScience, <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u100/u100.html>.
- VISVALINGAM M., 1990. Trends and Concerns in Digital Cartography. *Computer-Aided Design*, 22(3), 115-130.