

LES SYSTÈMES D'INFORMATIONS GÉOGRAPHIQUES

CLASSIFICATION DES ELEMENTS DES LOGICIELS UTILISES HABITUELLEMENT DANS LES SYSTÈMES D'INFORMATIONS GÉOGRAPHIQUES

Par Jack DANGERMOND, Directeur
Environmental Systems Research Institute
Redlands, California 92373

I - Introduction

L'objet de cet exposé est de fournir un cadre général de référence pour les diverses parties des logiciels utilisés habituellement pour les systèmes d'informations géographiques (SIG). Les diverses fonctions analytiques et de traitement des données accomplies par ces systèmes sont décrites sous forme graphique et avec des commentaires. Ces fonctions ont un caractère général, elles ne se limitent pas à un seul système.

L'exposé explique d'abord pourquoi ces systèmes ont évolué, les types de données de base qu'ils contiennent, une série de concepts associés à un langage d'informations spatiales. Ensuite sont décrites les techniques des SIG : automatisation de la cartographie, création des données de base, techniques analytiques de manipulation et techniques graphiques de manipulation. Enfin figure un résumé des applications réelles de cette technologie.

II - Origine

De nombreuses professions, au cours des 20 dernières années, ont mis au point des outils automatiques pour stocker, analyser et présenter des données géographiques de manière efficace. Ces efforts ont, semble-t-il, répondu à des exigences accrues, de la part des utilisateurs qui veulent disposer de données et d'informations localisées. Cette technique en rapide évolution a pris le nom de Systèmes d'informations géographiques, avec des applications variées qui recourent virtuellement toutes les professions. Ceci est bien illustré par la figure 1 qui, sous forme de matrice, indique les relations entre une série de tâches qui mettent normalement en jeu l'utilisation de données géographiques et des fonctions qui se rapportent à des tâches basées sur des systèmes d'informations géographiques (c'est-à-dire : l'entretien d'archives géographiques, des visualisations graphiques, des rapports statistiques, des aménagements, des documents de gestion et de prise de décision). Les tâches énumérées du haut en bas du tableau correspondent en gros aux diverses activités d'aménagement qui se retrouvent au niveau d'une région, d'un état ou de la nation.

Les graphiques, et plus particulièrement les cartes, ont constitué une base pour la plupart des discipli-

nes qui ont à utiliser des analyses spatiales. Au cours des 4 000 dernières années, des civilisations diverses ont utilisé des systèmes de symboles graphiques pour représenter des phénomènes distribués dans l'espace. Les graphiques, sous forme de cartes, nous ont, tout au long de l'histoire, fourni un moyen commode pour archiver des documents, concevoir des idées, analyser des concepts, prédire l'avenir, élaborer des décisions de caractère géographique et finalement communiquer à d'autres des notions à caractère spatial.

De nos jours, les systèmes d'informations géographiques et l'infographie fournissent un cadre analogue pour réaliser des analyses spatiales. Il existe pourtant des lacunes considérables entre les niveaux techniques à la disposition de l'analyse géographique et graphique et les divers individus et organismes qui ont besoin de s'en servir. Pour faire passer ces techniques dans le domaine des applications, il faut mettre sur pied une information claire et concise sur les systèmes SIG et les nombreuses techniques de manipulation qu'ils permettent.

En mettant au point cette information, il est utile de garder à l'esprit les procédés antérieurs de cartographie manuelle, comme référence et cadre de mise au point d'un langage d'information spatiale. C'est pourquoi cet exposé décrira de temps à autre des fonctions exécutées par des techniques automatisées sous forme de leur équivalent manuel.

III - Pourquoi un système automatisé ?

Les partisans de la technique des systèmes géographiques automatisés soulignent toute une série d'avantages qu'on trouve énumérés ci-après :

- les données sont gardées sous une forme physique ramassée (support magnétique)
- les données peuvent être stockées et extraites à un faible coût unitaire
- l'accès aux données est beaucoup plus rapide
- divers moyens automatisés permettent des manipulations variées telles que : mesures sur les cartes, superposition, transformation, conception graphique, manipulation des données de base
- des données graphiques et non-graphiques (c'est-à-

(Présenté à l'Américan Cartographie Association Conférence, Denver, Colorado, 15-3-1982).

0 = important
+ = secondaire

		FONCTIONS DE CARACTERE GENERAL ASSUMES PAR LES S.I.G.						
TÂCHES	Exemples de données	Tenue à jour de Fichiers Géographiques	données sur les opérations et les inventaires	Visualisation graphiques (dessin)	Rapports statistiques	Aménagement	Gestion	Prise de décision
Maîtrise administrative	Levés de limites	0	0					
Exploitation des ressources naturelles	Géophysique, Topo Géologie, Végétation, Sols	0	+			0		
Suivi de la fiscalité et de la propriété	Levés cadastraux Enregistrement	0	0		+			
Utilisation du sol	Autorisations Servitudes					0		
Zonage de l'utilisation du sol	Documents de zonage	0	+			0		
Utilisation du sol Conception des infrastructures Construction	Levés de Génie Civil Données			0		+		
Construction Documents sur les réseaux	Documents d'état des lieux des réseaux Bâtiments etc...	0	0			+		
Améliorations Topométrie	Levés d'utilisation du sol	+	+		0	+	0	0
Inventaires Statistiques	Population Logement Données sanitaires et économiques			+	0	0		0
Surveillance des risques	Statistiques Incendie			+	+	+	0	0
Gestion des ressources naturelles	Données en cours sur les forêts	0	0			0	0	
Surveillance de l'Environnement	Gibier Végétation Air, Sols etc...	0	+		0	0		0

Fig. 1
Relations particulières entre tâches et applications des S.I.G.

dire des informations complémentaires) peuvent être fusionnées et manipulées de manière "reliée"

— des tests analytiques de modèles à caractère géographique peuvent être réalisés et répétés facilement (c'est-à-dire potentialité, aptitude des terrains). Cela facilite l'évaluation rapide des critères à la fois scientifiques et décisionnels sur de grandes zones

— l'étude des changements intervenus entre deux ou plusieurs dates peut être facilement réalisée

— la conception graphique interactive et les traceurs automatisés peuvent être utilisés pour la conception et la production cartographique

— certaines formes d'analyse peuvent être réalisés à bas prix — ce qui n'aurait pas été possible manuellement — (analyse numérique du terrain, calculs des pentes, ensoleillement, écoulements, analyse de superposition d'ensembles multiples de feuilles limitées par des polygones, etc.)

— il en résulte une tendance à intégrer les processus de recueil des données, d'analyse spatiale et de prise de décision dans un flux commun d'informations. Cela présente de grands avantages pour l'efficacité et les coûts.

De plus, à côté de ces avantages existent des inconvénients qui doivent être évalués soigneusement, avant que l'utilisateur investisse dans la mise au point ou l'acquisition d'un tel système, entre autres :

- le coût et les problèmes techniques posés par la conversion des archives géographiques actuelles en un fichier automatisé (c'est-à-dire la numérisation ou la conversion des données)
- les frais généraux importants et les investissements techniques nécessaires à la gestion des fichiers informatisés (ordinateur, techniciens spécialisés, logiciels, etc.)
- le coût élevé d'acquisition des systèmes
- le caractère marginal des bénéfices dans certains domaines d'application.

IV - Types de systèmes actuels

Au cours des cinq dernières années, des SIG ont vu le jour qui servent vraiment à aider à résoudre des problèmes géographiques variés. Ces systèmes commencent tout juste à être adaptés aux flux réels d'informations et à leur traitement, au sein d'organismes publics ou privés. Jusqu'à présent il est difficile d'y voir très clair : des investissements variés et importants ont été faits, et on commence seulement à pouvoir disposer de renseignements sur les applications réussies qui se dégagent.

Pour le moment on dispose de plusieurs sortes de techniques d'information associées à des systèmes d'équipements ou logiciels développés par des firmes commerciales ou des organismes publics. Elles appartiennent en général aux catégories ci-après :

- les systèmes cartographiques destinés aux travaux de génie civil (exemple : mini-ordinateur CAD/CAM pour des applications comme la photogrammétrie, les cartes topographiques de base, les travaux routiers, les systèmes de distribution, la gestion des installations, les informations cadastrales et fiscales, les données géodésiques, etc.)
- les systèmes d'information sur la propriété ou les parcelles (exemple : système DBMS qui gère les différents éléments propres et associés à une parcelle)
- les systèmes de cartographie thématique et statistique généralisés (sur des ordinateurs, à la fois mini et puissants, pour la gestion des ressources, les inventaires forestiers, la végétation, la géologie, les sols, la cartographie d'inventaire, la gestion et l'évaluation de l'environnement, etc.)
- les systèmes bibliographiques qui réalisent des catalogues des diverses données relatives aux documents géographiques
- les systèmes de fichiers géographiques de base associés aux réseaux de rues, et les éléments topographiques au sol qu'elles définissent (le plus répandu de ces systèmes est DIME, mis au point par le U.S. Census Bureau)
- les systèmes de traitement d'images spécialement adaptés au traitement des données Landsat et autres images de satellites).

Toutes ces techniques s'appliquent à des flux d'informations et à des systèmes très spécifiques. L'objet de cet exposé n'est pas d'entrer dans le détail de ces systèmes, mais plutôt d'en extraire le type général de techniques utilisées habituellement pour le stockage, le traite-

ment et la visualisation des données qu'ils contiennent.

Il faut noter et souligner fortement que la précision des données diffère beaucoup parmi ces systèmes d'information variés. Par exemple : elle est très grande dans les systèmes d'information "Cartes de base" destinés au génie civil qui demandent beaucoup plus de données généralisées. Mais ils sont moins pratiques pour certaines autres applications. De plus les commerciaux qui livrent les systèmes utilisent divers procédés de gestion des données, d'identification, de localisation et de visualisation des informations. On n'a pas essayé de distinguer ces diverses approches techniques ; on a plutôt mis l'accent sur des sujets généraux, pour mieux faire comprendre au lecteur les relations et différences entre ces divers techniques et systèmes.

V - Les conceptions en matière d'informations localisées

A. Caractéristiques de base des données localisées et de leur gestion

Une information géographique est généralement considérée comme possédant deux caractéristiques principales :

1. le phénomène ou la caractéristique véritable, comme la variable, sa classification, sa valeur, son nom, etc.,
2. la position (c'est-à-dire sa position dans son espace géographique).

Pourtant, une troisième caractéristique est particulièrement intéressante pour les systèmes ISG, c'est le temps.

la figure 2 représente les relations entre ces trois éléments : données localisées, non-localisées (attributs) et temps. On peut en déduire que la gestion de données localisées peut devenir fort complexe car les données localisées et les attributs changent souvent indépendamment les uns des autres en fonction du temps.

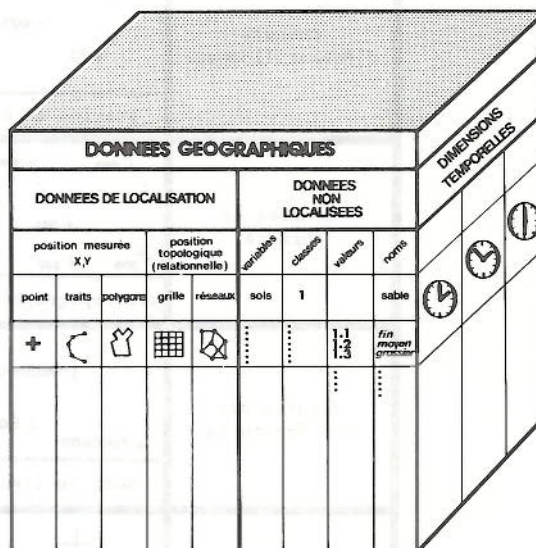


Fig. 2
Trois composants de base d'un système d'information géographique

C'est pourquoi la gestion véritable de données localisées exige que les données de localisation et les données d'autre nature soient des variables indépendantes. C'est-à-dire que les attributs peuvent changer de caractère en restant au même endroit, ou vice-versa.

Lors de la conception de la structure d'ensemble d'une base de données destinée au traitement de données géographiques il est utile de se rendre compte que la gestion des données peut concerner des données localisées aussi bien que des données non localisées. des logiciels et des architectures divers ont été réalisés pour traiter différemment ces deux types de phénomènes. Dans certains cas une donnée localisée est considérée comme un attribut supplémentaire associé aux caractéristiques géographiques. Dans d'autres cas, la localisation géographique est séparée du phénomène attribut réel associé à cette caractéristique. Cette dernière approche permet une

plus grande souplesse, en ce qui concerne les changements de données — particulièrement les changements dus au temps.

B. Types de données géographiques, et leur représentation spatiale dans les systèmes SIG.

Il y a en général trois procédés de base pour représenter la position des phénomènes géographiques : les points, les traits, les polygones.

La figure 3 représente un tableau de 7 procédés de représentation, comme il est dit ci-dessus :


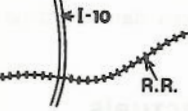
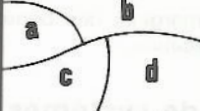
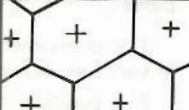
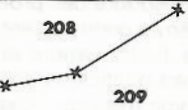
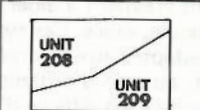
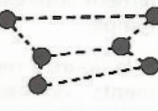
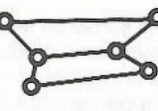
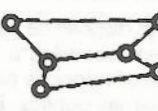
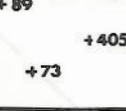

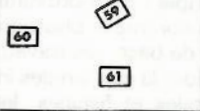
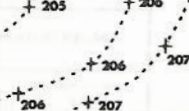
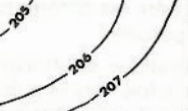
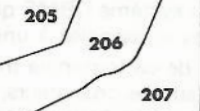
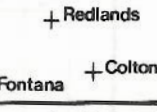
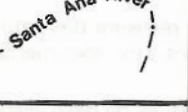
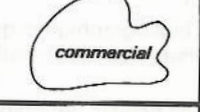
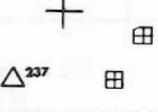

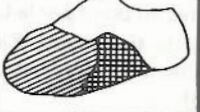
	points	traits	polygones
données sur les détails			
	détail ponctuel (site archéolog.)	détails linéaires (routes)	polygones homogènes (sols)
unités de surface			
	centroïdes de polygones	lim. administr. polygonales	unité de surface (unité d'invent.)
topologie des réseaux			
	noeuds (intersections)	arcs (rues)	polygones (blocs)
données d'échantillonnage			
	station météo	lignes de vol	placettes d'échantillon. s/terrain
données de surface			
	alt. topographiques	courbes de niveau	polyg. "proximaux"
données sur les écritures			
	noms de lieu	détail linéaire	nom de polygone
données sur les symboles graphiques			
	symb. ponctuels	symb. linéaires	estomp. de polyg.

Fig. 3 "Eclaté" des types de données géographiques et des procédés de représentation

1. données sur les détails
2. information sur l'unité de surface
3. données topologiques de réseaux
4. données d'échantillonnage
5. information de surface
6. information sur les écritures
7. données sur les symboles graphiques.

Les graphiques du tableau indiquent la manière dont ces 7 types de données sont représentés habituellement, à partir d'identifiants ponctuels, linéaires et en forme de polygones.

Les points, les traits et les polygones sont représentés habituellement sur les cartes grâce à des coordonnées cartésiennes, telles que la latitude et la longitude, basées sur la géométrie euclidienne. Ce système de coordonnées cartésiennes est l'instrument le plus habituel pour indiquer la position, effectuer des mesures, etc. La figure 4 indique la manière dont une carte typique, avec des éléments ponctuels, linéaires et en polygones est traduite en coordonnées cartésiennes, puis introduite dans un fichier SIG de coordonnées x, y.

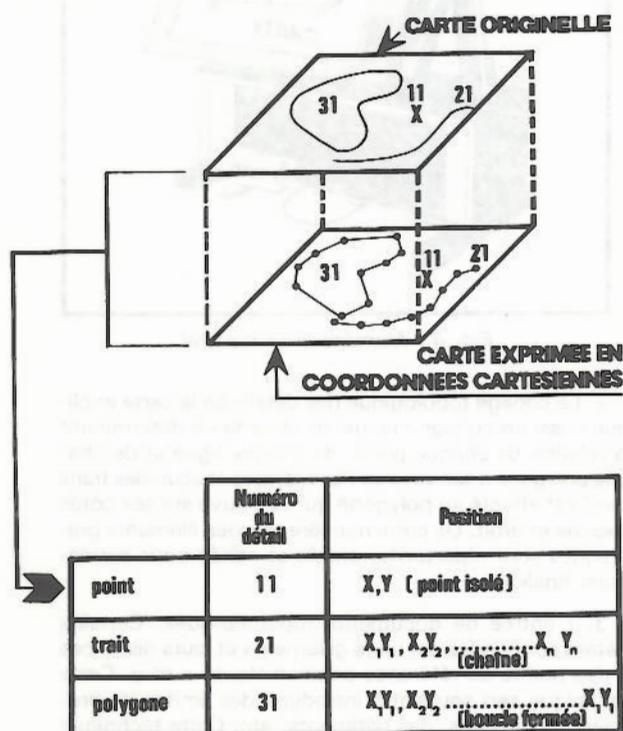


Fig. 4
Fichier des coordonnées X, Y

En vue d'exprimer des phénomènes géographiques, on peut aussi, en plus des coordonnées cartésiennes, utiliser les principes de la théorie des graphes, avec des relations topologiques, pour exprimer les positions relatives de divers éléments de la carte. Le système SIG utilisé le premier et le plus souvent est sans doute DIME (Dual Independent Mapping Encoding), mis au point par le U.S. Bureau of Census. DIME est en fait un système combiné de coordonnées x, y et de codes topologiques. Il est réalisé en structurant topologiquement les éléments des graphes d'une carte (c'est-à-dire les nœuds, les segments linéaires et les polygones). DIME permet aussi d'inclure les coordonnées x, y associées aux points nodaux ou aux intersections des segments linéaires bordant les

zones polygonales. La figure 5 montre comment une carte typique en polygones-réseaux peut être réduite à 7 nœuds, 11 arcs ou segments linéaires, délimitant 5 polygones de base. On peut en tirer un système de notation cartographique de base en numérotant ces arcs et en les associant à des nœuds et à des polygones à gauche et à droite. En ajoutant à chacun des nœuds un codage en coordonnées x, y on obtient un système dual pour identifier dans l'espace tous les éléments de la carte. Ceci ne facilite pas seulement l'analyse en coordonnées x, y mais permet aussi d'employer des procédés mathématiques associés à la théorie des graphes : réseaux, agrégation spatiale, etc.

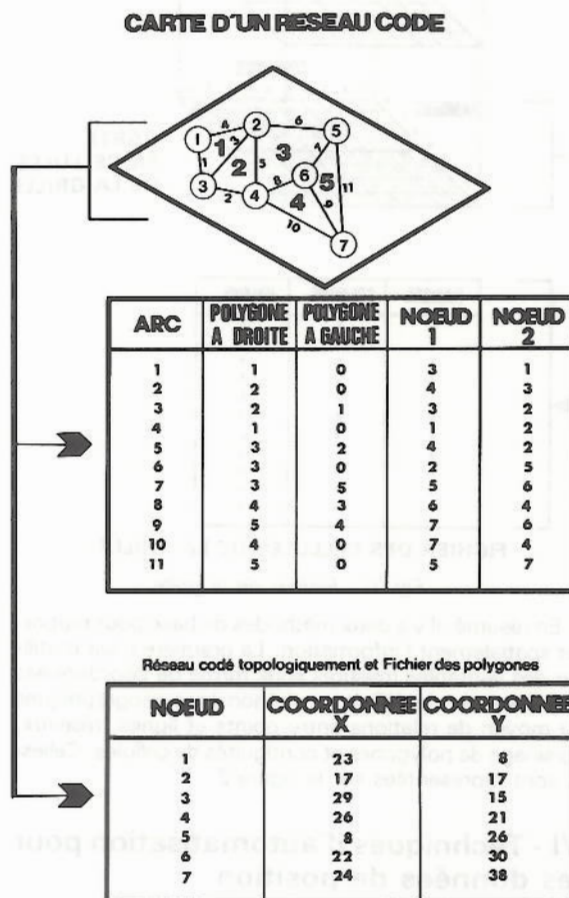


Fig. 5
Fichier des nœuds aux coordonnées X, Y

La notation topologique définit la position des phénomènes géographiques reliés à d'autres phénomènes, sans avoir besoin de se servir de la notion de distance.

C'est pourquoi il est tout à fait possible d'avoir une carte définissant des positions sans utiliser des coordonnées.

Une autre technique, utilisant certains des principes relationnels, s'appuie sur un maillage pour définir un cadre à polygones réguliers mais arbitraires qui servent de base aux données géographiques. La technique de la grille utilise fondamentalement l'association à un système de coordonnées, mais ne requiert pas nécessairement une association précise. La technique de la grille utilise une matrice en i, j pour représenter, en ordinateur,

les variables géographiques. La figure 6 représente un polygone original qui placé sur un carroyage peut être réduit à des valeurs en lignes et en colonnes traduisant des variations géographiques.

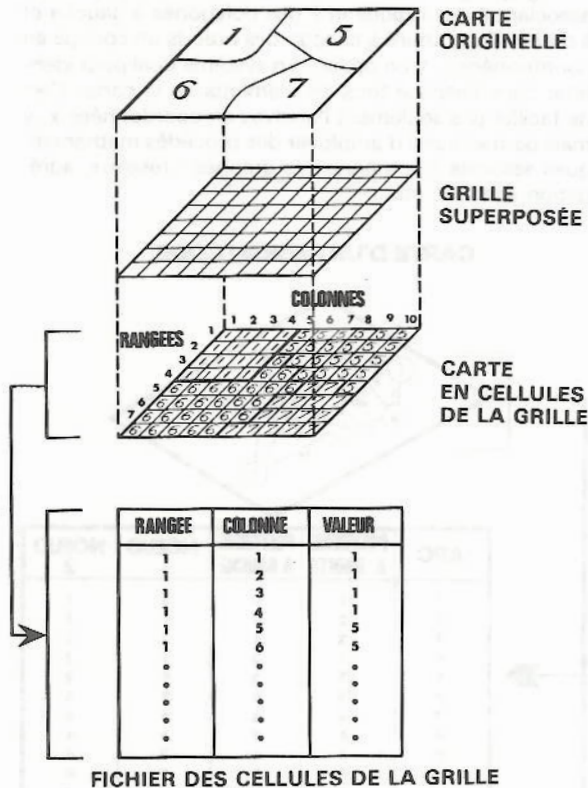


Fig. 6 - Fichier de la grille

En résumé, il y a deux méthodes de base pour rapporter spatialement l'information. La première c'est d'utiliser des véritables mesures sous forme de coordonnées x, y . La seconde définit les phénomènes géographiques au moyen de relations entre points et lignes, réseaux, voisinage de polygones et contiguités de cellules. Celles-ci sont représentées sur la figure 2.

VI - Techniques d'automatisation pour les données de position

Il y a 8 procédés de base pour identifier la position des données géographiques :

1. codage des données rapportées à des cellules
2. codage topologique des nœuds, des arcs, des polygones (système DIME)
3. entrée de documents topométriques
4. entrée manuelle de points, lignes et polygones, à partir de numériseurs manuels
5. entrée automatique au moment de la saisie des données
6. suivi automatique des traits
7. balayage optique

Ces techniques sont décrites ci-dessous :

1. Le codage des données par cellules est un procédé dans lequel chaque point, situé à l'intérieur d'une grille d'ensemble, est codé en observant le caractère principal d'une cellule particulière et introduit dans un fichier automatisé grâce à une technique de perforation (voir figure 7).

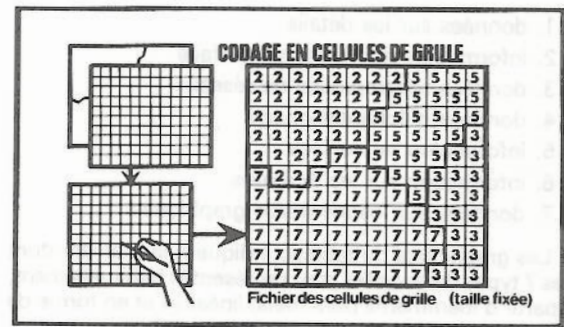


Fig. 7 - Codage manuel des cellules

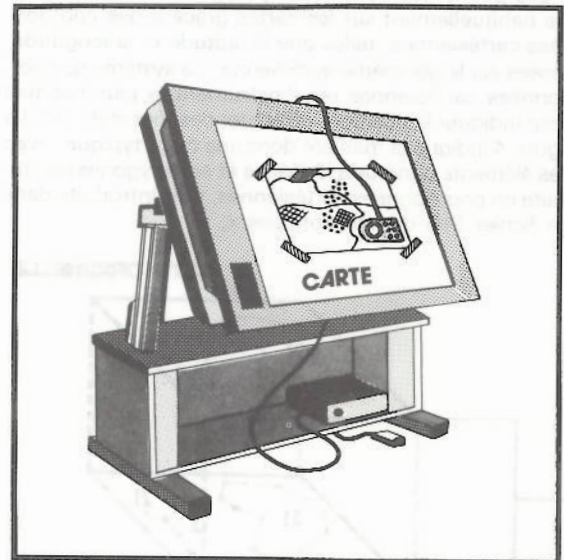


Fig. 8 - Numériseur manuel

2. Le codage topologique des détails de la carte implique aussi un codage manuel de la carte en déterminant la relation de chaque point, de chaque ligne et de chaque polygone à ses voisins. Par exemple chacun des traits (arc) est affecté au polygone qui se trouve sur ses côtés gauche et droit. De cette manière tous les éléments graphiques sont répertoriés, entrés et édités pour corrections finales.

3. L'entrée de documents topométriques. Certains détails sont codés par leurs gisements et leurs distances à des points de référence positionnés en x et y . Cette technique sert souvent à introduire des limites de propriété, des routes, des bâtiments, etc. Cette technique fait appel à des procédés basés sur la géométrie métrique. Ils ont été développés pour introduire les résultats des documents issus de mesures topométriques et générer automatiquement des coordonnées cartésiennes.

4. Numérisation manuelle. Cette technique utilise un numériseur, instrument électromagnétique ou électrostatique, qui convertit les déplacements d'un curseur, en positions repérées électriquement et lues directement par l'ordinateur. Les numériseurs sont conçus habituellement pour être très précis, ils peuvent être programmés, à l'aide d'un miniordinateur, pour saisir des données sous des formes diverses, points, traits et polygones. Le numériseur peut enregistrer la position de chacun des points, des traits ou des polygones, soit point par point, soit sous forme incrémentale, à partir de l'intervalle de temps ou de distance qui sépare deux positions successives du curseur. La figure 8 représente un numériseur manuel de type habituel.

5. Les systèmes d'entrée automatiques. Cette technique se rapporte en fait à divers procédés et instruments qui saisissent directement et automatiquement la position au moment de l'enregistrement d'autres données géographiques. Celles-ci vont des satellites du type Landsat avec leurs traitements d'images, aux traceurs numérisés, aux équipements géométriques et aux appareils autoenregistreurs qui saisissent les coordonnées en parcourant le terrain.

6. Suivi automatique des traits. Plusieurs constructeurs d'équipements ont sorti des matériels à pilotage laser qui assurent le suivi automatique des traits ; on s'en sert pour des rubans continus de coordonnées associés à des traits de la carte. Bien que ces systèmes soient utiles, il n'est pas prouvé maintenant, que leur utilisation soit justifiée d'un point de vue économique.

7. Balayage. La technique du balayage automatique utilise un maillage sous forme de positions binaires (oui/non) pour représenter les points, les traits, les polygones et les écritures de la carte.

Succédant à ce balayage en mode-trame, un programme de transformation trame-vecteur convertit l'information binaire en information sous forme topologiquement correcte de vecteur. Pour le moment la technologie, dans ce domaine, est nouvelle et employée assez rarement.

VII - Techniques de traitement/édition des données localisées

Toutes les techniques automatisées décrites dans la section précédente impliquent un volume important de traitement et d'édition, après la saisie initiale des données. Comme les procédés et leurs diverses phases dépendent beaucoup du système et des techniques, qui varient considérablement, on ne présente qu'une esquisse des phases principales des procédés :

- tracé ou impression de données numérisées ou codées, pour une édition visuelle
- contrôle topologique des données numérisées pour s'assurer de la correction de l'ensemble des données
- effaçage des "bâtards" quand plus d'un trait a été saisi pour représenter le même vecteur de la carte.
- traitement des polygones du type "beignet"
- transformation en polygones de l'information sur les arcs
- édition des données relatives aux coordonnées x, y (à la fois en mode interactif ou par lots)
- analyse des raccords

Au cas où des données d'arc sont introduites, l'édition et le traitement peuvent comporter des travaux comme la création de structures à topologie correcte, y compris l'étiquetage automatique, à droite et à gauche, des arcs, basé sur les codes attribués aux centroïdes associés aux fichiers relatifs aux polygones.

VIII - Techniques de manipulation

Cette section décrit les diverses fonctions analytiques et les fonctions de traitement des données qui peuvent être accomplies sur les données numérisées localisées. La fonction véritable est décrite et rapportée à une représentation imagée des notions qui concernent l'exécution de chaque fonction. Le détail de ces fonctions n'est pas décrit, car divers systèmes de logiciels arrivent à la solution à partir de types d'algorithmes différents. En revanche, on s'attache à définir la vraie fonction accomplie.

Il faut dire que ces descriptions sont destinées à être représentatives et certains exemples ne seront pas traités.

A. Accès aux données

Ces techniques concernent l'extraction de base, l'interrogation, la manipulation booléenne des informations contenues dans un système d'information géographique organisé. La figure 9 décrit les fonctions suivantes pour accéder aux données :

1. *Browsing* ("broutage" ou feuilletage). Cette technique consiste, en utilisant un tube cathodique, à chercher les informations, parmi les fichiers des données graphiques et non graphiques associés des diverses cartes et ensembles de cartes.

2. *Windowing* ("découpage en lucarne"). Cette fonction est destinée à permettre à l'utilisateur de spécifier des fenêtres particulières (à partir de coordonnées x, y ou à partir d'informations sous forme de texte). La gestion des données localisées implique une organisation relationnelle des feuilles de la carte qui donne à l'utilisateur l'illusion d'avoir une carte continue à l'intérieur de l'ordinateur.

3. *Génération dans une fenêtre d'interrogation*. Cette fonction comprend la capacité de générer des points, des polygones à forme irrégulière, des carrés, des cercles, des couloirs pour les superposer en mode interactif à des "plans de données" figurant dans le fichier géographique. Ces fenêtres servent surtout à retrouver la position de points, de traits de polygones à partir de diverses "strates" cartographiques qui coïncident dans l'espace avec ces fenêtres d'interrogation. Trois techniques sont utilisées pour cela :

- a) analyse de proximité (c'est-à-dire sélection de points particuliers reliés à un point donné)
- b) accès par point et polygone (c'est-à-dire sélection de tous les points, des traits et des polygones situés entièrement ou partiellement à l'intérieur de la fenêtre d'interrogation)
- c) superposition de polygone (c'est-à-dire sélection des seules parties des éléments géographiques situés à l'intérieur des limites du polygone fenêtre d'interrogation). Dans ce cas, les traits et les parties des polygones à l'extérieur de la fenêtre d'interrogation sont supprimés, en se servant du procédé de routine "superposition de polygone".

Ces fenêtres servent par exemple à poser des questions comme "Donnez-moi tous les polygones des arbres prêts à être abattus à l'intérieur de la fenêtre "A" (polygone spécifié par un utilisateur).

4. *Enquête de localisation sur une série de cartes en plusieurs feuilles*. Dans ce cas, évoqué plus haut, le logiciel d'accès doit pouvoir créer un polygone qui déborde les limites d'une feuille, extraire les parties de la feuille concernées par la fenêtre d'interrogation, organiser les éléments de la carte en une seule fenêtre continue. Ceci est réalisé, en une ou plusieurs étapes, sur les modules actuels de logiciels disponibles.

5. *Accès aux attributs booléens et Résumé statistique*. Cette fonction permet de spécifier divers critères booléens pour extraire des informations basées sur des données d'attributs non graphiques. Exemple : "donnez-moi tous les polygones d'un certain type de sol de surface supérieure à 25 hectares, et sortez un résumé statistique des surfaces et des périmètres des polygones, avec leur total".

Il faut noter que tous les utilisateurs disposant de ce type d'accès sont très contents de pouvoir extraire des données à partir à la fois de la fenêtre d'interrogation et de la question par attribut. Exemple : "donnez-moi tous les polygones, à l'intérieur d'une certaine fenêtre, d'un certain type de végétation et ayant plus d'une surface donnée". Le résultat d'une recherche de ce type est normalement visualisé graphiquement sur un écran, imprimé sous forme alphanumérique sur un tirage et, si nécessaire, sorti par une table traçante.

B. Généralisation cartographique

La figure 10 représente 4 types de généralisation fondamentaux. Ces équipements de généralisation sont surtout employés à l'occasion de changements d'échelle des cartes. Ils sont décrits ci-après :

1. "Amincissement" des coordonnées, pour les traits. C'est une technique de réduction du nombre des coordonnées définissant un trait donné.

2. Suppression de trait ("dropline"). Cette technique consiste à supprimer certains segments de traits qui constituent les limites des polygones séparés, de caractéristiques semblables, pour constituer une nouvelle unité polygonale dont la surface est la réunion des surfaces séparées initiales.

Cette technique est souvent utilisée dans le procédé ITUM (Integrated terrain unit mapping), où des attributs multiples sont donnés à chaque polygone et où des cartes uniques sont demandées à partir de la base de données. Cette fonction est remplie à partir d'un contrôle des caractéristiques à gauche et à droite de chacun des segments constituant les limites de polygones pour trouver les segments à supprimer.

3. Raccordement. Ce procédé consiste en une série de procédures pour assembler de nombreuses feuilles de manière à constituer une seule carte continue. Les problèmes à résoudre sont les suivants : réunir des traits et des polygones appartenant à des cartes contiguës, adapter les limites entre les cartes, supprimer les traits séparant des polygones ayant les mêmes caractéristiques, etc. Il faut garder présent à l'esprit que les techniques automatisées peuvent être utiles, mais que des erreurs commises à l'introduction des données sont fréquemment sources d'ennuis.

4. "Amincissement" des polygones. C'est un exercice analogue au 1 ci-dessus, mais un peu plus complexe car les sommets supprimés pour un polygone doivent être en accord avec ceux supprimés sur les polygones adjacents ; autrement les traits communs auraient des bavures, des manques, des recouvrements dus à un choix irréflecti des sommets à supprimer. L'amincissement des arcs de polygone, au lieu de l'amincissement de l'ensemble des éléments du polygone, peut résoudre ce problème.

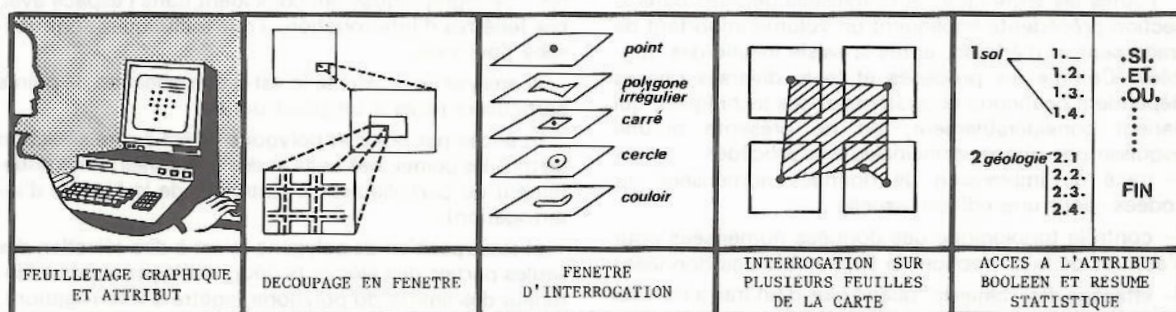


Fig. 9
Accès aux données

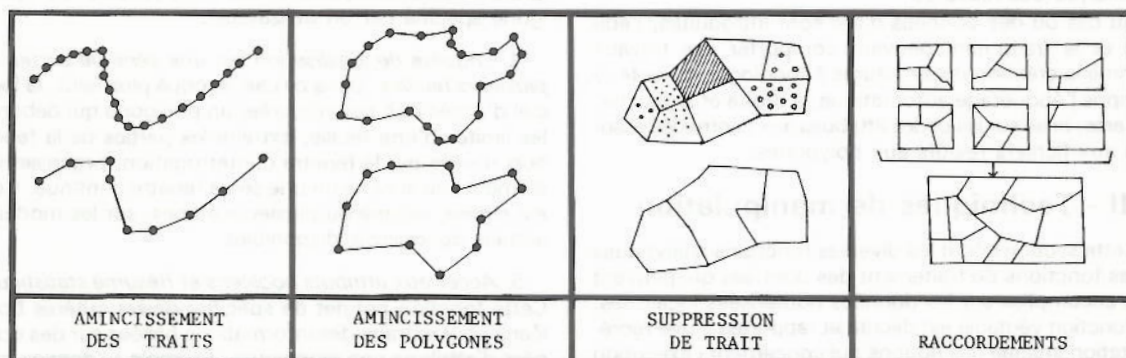


Fig. 10
Généralisation cartographique

C. Abstraction cartographique

L'abstraction cartographique est associée étroitement à la généralisation cartographique mais elle concerne cinq formes différentes de techniques. Elles sont illustrées graphiquement dans la figure 11 et décrites ci-après :

1. calcul des centroïdes,
2. tracé automatique de courbes de niveau à partir de données à distances irrégulières,
3. cartographie des proximités (polygones théosiens)
4. reclassification des polygones
5. conversion des données de positionnement en coordonnées x, y dans une grille régulière uniforme.

D. Manipulation des feuilles d'une carte

La figure 12 montre une série de techniques qui manipulent les coordonnées x, y pour une feuille déterminée.

Elles comprennent :

1. Le changement d'échelle. Cela implique souvent l'emploi des outils de généralisation montrés dans la figure 10, en même temps qu'un vrai changement d'échelle.
2. Elimination des déformations. Cela est réalisé par des techniques de feuille en caoutchouc et par des transformations linéaires.
3. Changements de projection. Des progrès récents réalisés par l'USGS et par d'autres ont abouti à des logiciels qui peuvent réaliser pratiquement tout type de changement de coordonnées géographiques et de projection.
4. Rotation et translation des coordonnées. Cette fonction met en jeu la transformation d'ensembles de coordonnées, soit par rotation, soit par déplacement, de manière à accorder comme il faut des recouvrements ou des ensembles de coordonnées adjacentes (y compris des points de base de référence).

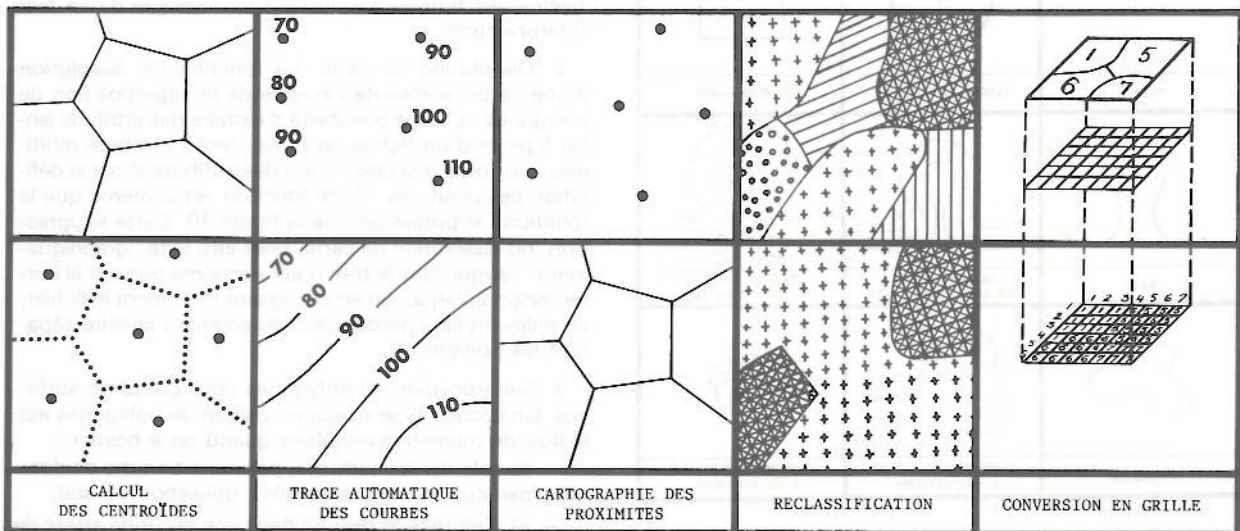


Fig. 11
Abstraction cartographique

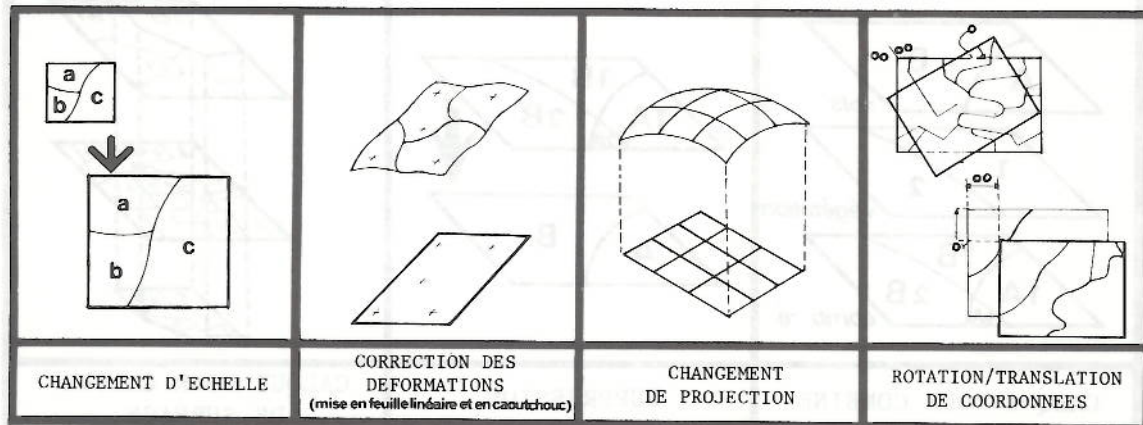


Fig. 12
Transformation des feuilles

E. Génération des tampons

La génération de tampons implique la création de nouveaux polygones à partir de détails ponctuels, linéaires et polygonaux appartenant à la banque de données (voir figure 13). A partir d'un point ou d'une série de points, des tampons circulaires ou carrés peuvent être calculés. De même, à partir d'une bande de points (c'est-à-dire un trait) peuvent être calculés des tampons étroits ou larges et, au cas où ces tampons linéaires se recouvrent, de nouveaux polygones peuvent être formés.

Les polygones peuvent être engendrés soit autour du périmètre extérieur d'un polygone existant, soit à l'intérieur d'un polygone, ce qui produit un double ensemble de polygones traduisant les relations de distances horizontales à un élément géographique donné.

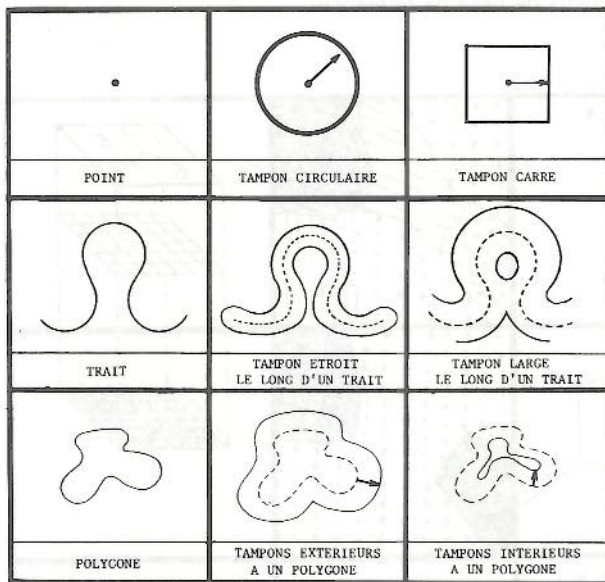


Fig. 13
Génération des tampons

F. Superposition et suppression de polygones

Les techniques de superposition et de suppression de polygones concernent la mise en commun (intégration) ou l'extraction (désintégration) de cartes (deux ou plus) pour créer un nouvel ensemble de données. Elles sont indiquées dans la figure 14 et décrites ci-après :

1. Superposition de polygones pour créer de nouveaux fichiers. Dans le cas de superposition de polygones, un nouvel ensemble de données est créé ; il contient de nouveaux polygones créés à partir de l'intersection des frontières des polygones contenus dans les ensembles superposés. En plus de la création de nouveaux polygones à partir de la superposition de couches, ces polygones ont des attributs multiples (c'est-à-dire les attributs qui avaient été donnés à chacun des calques avant qu'on en réalise la composition). La superposition mathématique de ces cartes est réalisée pour faire des mesures de surface et pour faire des modélisations à attributs multiples. Cela nécessite une pondération de paramètres variés et leur sous-classification pour créer des "interprétations sur modèles" ; les estimations des aptitudes et potentialités des terrains fournissent un exemple d'une telle interprétation.

2. Dissolution de carte. La fonction de dissolution d'une carte représente l'inverse de la superposition de polygones : c'est la possibilité d'extraire des attributs isolés à partir d'un fichier de polygones à attributs multiples, à la fois par la description des attributs et par la définition des positions. Cette fonction est la même que la fonction "suppression" de la figure 10. Cette suppression, ou dissolution de carte, peut-être faite "graphiquement" (auquel cas le trait n'est supprimé que sur la sortie cartographique) ou en changeant réellement le fichier, en enlevant les coordonnées du segment linéaire séparant les polygones.

3. Superposition de polygones pour calcul de surfaces. Un second type de superposition de polygones est réalisé de manière exemplaire quand on a besoin :

- de calculer les surfaces, pour une tranche de données particulières (par exemple : utilisation du sol)
- et d'en faire le résumé dans une seconde strate de polygones, (comme les aires d'échantillonnage pour les inventaires). La sortie résultante est un résumé de statistiques, (c'est-à-dire zones d'utilisation du sol à partir des zones d'échantillonnage).

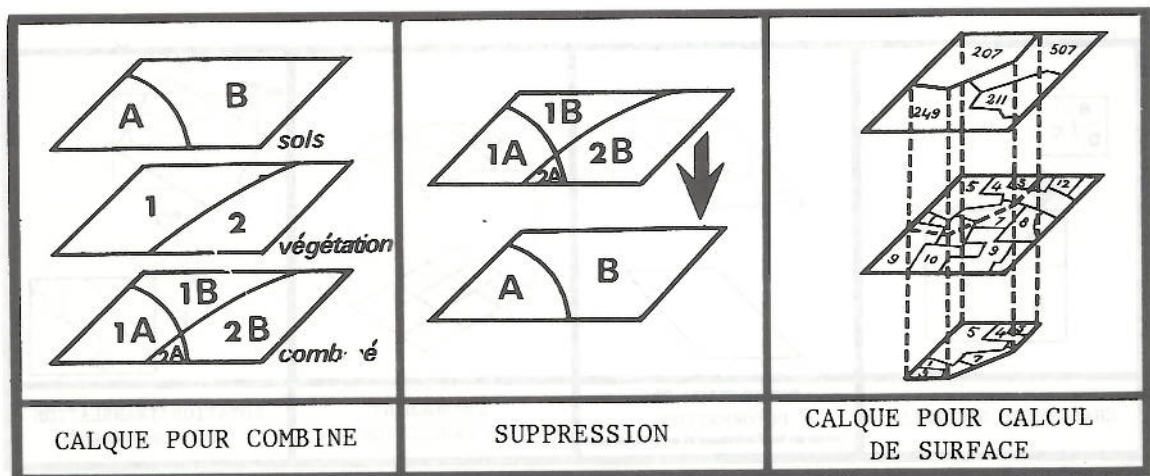


Fig. 14
Superposition - Suppression par polygones

G. Mesures

Les quatre types de mesures les plus habituels concernent les points, les traits, les polygones et les volumes. Ils sont indiqués sur la figure 15 et esquissés ci-dessous :

1. Points. Les deux activités typiques de mesure sont le dénombrement du total de points, et le dénombrement de points tombant dans les polygones. Cette dernière technique fait appel à un procédé de routine "point dans polygone" qui dénombre les divers types de points tombant dans des types de polygones choisis (par exemple, délits à l'intérieur de districts patrouillés par la police).

2. Mesure de lignes. Deux formes principales de la mesure des lignes sont : de point à point, et mesure le long d'une ligne courbe.

3. Mesure de surfaces. Les deux mesures de base sont : la surface d'un polygone, et le paramètre d'une zone polygonale.

4. La quatrième catégorie de mesures concerne la mesure des volumes, effectuée, soit à partir de coupes, soit par superposition de surfaces multiples (c'est-à-dire avant classement, après classement et calcul des différences).

H. Analyse des cellules d'une grille

La figure 16 illustre 5 exemples d'activités d'analyse fondamentale faites à partir de données attachées aux cellules d'une grille. Ces techniques sont analogues aux types d'analyse de cartes faites à partir d'une structure en coordonnées x, y mais leur résolution spatiale est plus généralisée. Il faut souligner que la technique des cellules de grille appliquée au traitement des cartes est beaucoup plus efficace, à la fois pour le stockage des données et pour l'exécution des tâches d'analyse. Les cinq types sont décrits plus loin :

1. Superposition des cellules de la grille. Cela implique le développement de calques du type booléen, pour

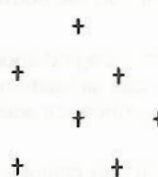

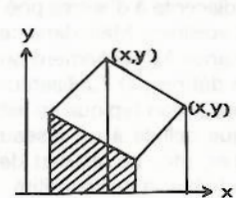
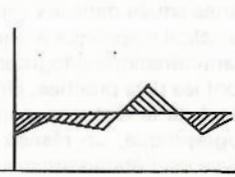
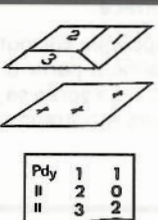

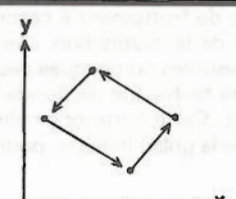
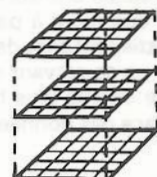
 <p>NOMBRE TOTAL</p>	 <p>RECTILIGNE</p>	 <p>SURFACE</p>	 <p>COUPE</p>
 <p>POLYGONE PAR POINTS</p>	 <p>COURBE</p>	 <p>PERIMETRE</p>	 <p>1 2</p> <p>SURFACE</p>
POINTS	DISTANCE	SURFACES	VOLUMES

Fig. 15 - Mesures

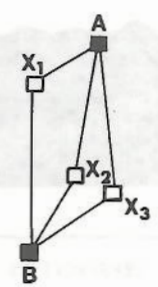
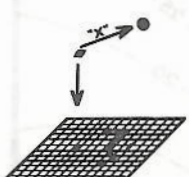
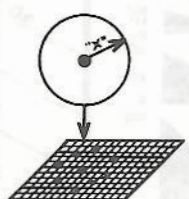
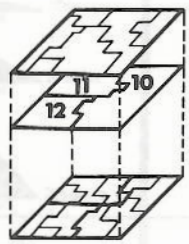



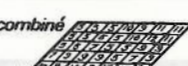
CHOIX DU COULOIR OPTIMAL	CALCUL DE DISTANCE (accès)	AGREGATIONS PAR RAYONS	CALQUE DE CALCUL DE SURFACES	CALQUE DE MODELE DE CARTE BOOLEEN
				<p>végétation</p>  <p>sois</p>  <p>géodésie</p>  <p>combiné</p> 

Fig. 16 - Technique des cellules de grille

créer des cartes composées. Il faut pour cela pondérer diverses classes pour des cartes à couches multiples, ce qui a pour résultat de donner une surface numérique de diverses données représentant l'interprétation des utilisateurs. Cette surface est alors visualisée à partir des procédés infographiques.

2. Calque de calcul des surfaces. C'est un type de calque de polygones semblable à celui de la figure 14, mais où une technique de grille remplace une technique de polygone.

3. Agrégation dans un rayon de recherche. Cette technique déplace un cercle de rayon donné sur une grille, cellule par cellule, en poursuivant la recherche pour chacune des cellules. Le procédé dénombre les événements, les activités ou les phénomènes géographiques qui se trouvent à l'intérieur du cercle et qui se rattachent à chaque cellule de la grille. Il garde la valeur trouvée dans une nouvelle répartition par grille. Le résultat d'un calcul de ce type est une surface de fréquence/accessibilité.

4. Calcul de distance. C'est un procédé systématique analogue au précédent : chaque cellule est examinée en fonction de son caractère d'être adjacente à d'autres phénomènes situés dans les cellules voisines. Mais dans ce cas le calcul s'applique à une distance à l'événement ou à la caractéristique géographique définis par l'utilisateur qui sont les plus proches. Une application typique en est le calcul de la distance de chaque cellule à un réseau hydrographique, un réseau routier, etc. Le résultat de l'analyse est l'établissement d'un fichier d'accessibilité.

5. Choix d'un corridor optimal. Cette analyse met en jeu le calcul d'un trajet au moindre coût entre deux points. Pour cela on calcule une surface de frottement à partir de l'origine et une autre à partir de la destination. Ces surfaces de frottement sont des résumés numériques des coûts calculés en se servant de la technique de pondération par grille décrite plus haut. Cette carte originale (en fait, la surface des données de la grille) indique, pour

chaque cellule, le coût pour s'y déplacer. Les coûts peuvent être : économiques, d'environnement, sociaux, etc. ; ils sont groupés par superposition à paramètres multiples. Après calcul des deux cartes de frottement (origine et destination) ou les superpose et la surface qui en résulte donne le choix du trajet optimal avec calculs du gradient de l'accroissement des coûts si on s'écarte de l'optimum.

I. Analyse numérique de terrain.

L'analyse numérique de terrain met en jeu le calcul d'un ensemble de sorties à partir d'un modèle numérique de terrain (voir figure 17). Aux diverses formes de modèles numériques de terrain correspondent différentes formes d'analyses qui peuvent en fait être réalisées. Ce qui suit en décrit les plus courantes :

1. Visualisation. Elle utilise surtout des coupes et des vues perspectives.

2. Interpolation/courbes de niveau. Il faut, à partir de données disposées régulièrement ou au hasard, créer une grille ou un autre cadre structuré pour réaliser un tracé automatique de courbes. A partir du modèle interpolé un programme calcule et ensuite sort les courbes sous forme de dessin.

3. Pente/aspect/ensoleillement. Il s'agit d'abord de calculer les pentes et, dans certains cas, la relation de cette disposition de la pente avec le rayonnement solaire, sous forme d'ensoleillement.

4. Calcul de bassins-versants. Il faut calculer des limites de bassin, des drainages, des creux et bosses de la topographie ; dans certains cas ces données servent à calculer des écoulements de surface.

5. Visibilité. Cette analyse s'applique surtout à déterminer ce qui peut être vu ou caché à partir d'un point donné par ses coordonnées x, y, z. La sortie se présente sous forme d'une grille de valeurs montrant ce qui est vu et non-vu.

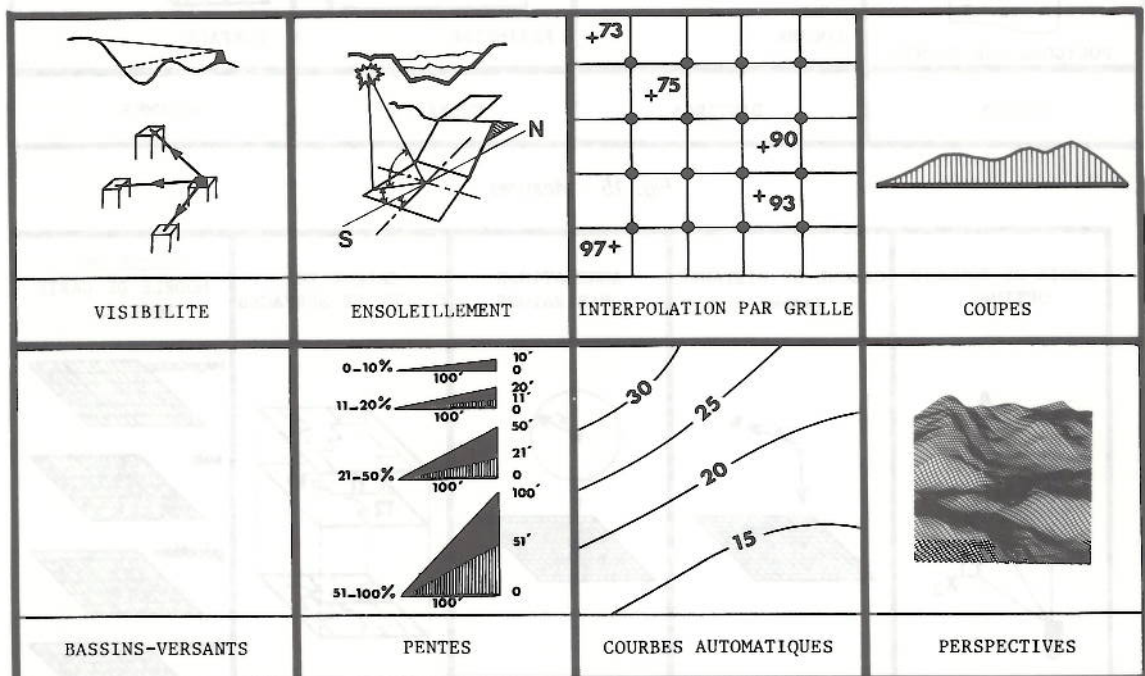


Fig. 17
Analyse numérique du terrain

J. Techniques de sorties.

La figure 18 illustre les quatre modalités de base de sortie d'un système SIG. Ce sont :

1. des cartes sur support papier
2. des tableaux statistiques
3. des visualisations sur écrans interactifs (à la fois graphiques et attributs)
4. des fichiers de données calculées, obtenus à partir de traitements variés sur les données géographiques.

IX. Techniques de manipulation des données de base pour les données localisées

Cette section passe en revue les techniques habituellement utilisées lors de la tenue à jour et de la manipulation de la base de données. Beaucoup des techniques appliquées aux logiciels de gestion des données de base sont les mêmes que celles qui servent à la numérisation initiale des données et à la manipulation analytique de la base de données. Elles s'appliquent seulement de manière différente pour des buts différents (par exemple, pour faire des compensations classiques des données de base). Ces fonctions sont énumérées ci-après :

- création et tenue à jour des fichiers de base
- gestion des fichiers
- recherche de base, sortie, listage/affichage
- recherche d'attributs sélectionnés
- recherche d'attributs sélectionnés par zone géographique
- manipulation sur les fenêtres
- raccordement de fichiers
- groupement de modules de plusieurs cartes pour effectuer des mesures ou des visualisations sur des zones de grande taille
- conversion en grille de coordonnées x, y et inversement.

En plus de ces fonctions de gestion des données spatiales ou localisées, les systèmes SIG doivent servir aussi de support aux fonctions DBMS rattachées aux attributs. Mais cela sort du cadre de cet exposé.

X. Techniques de manipulation graphique

Au cours des cinq dernières années, d'importants efforts ont été faits pour adapter à la cartographie les

techniques interactives de la CAO. Celles-ci, bien qu'elles utilisent beaucoup des mêmes données, ne sont pas classées dans le même système que les SIG, plus analytiques. Elles sont d'abord axées sur la création, le stockage, la manipulation et la visualisation de divers symboles graphiques et traitent en fait les éléments géographiques d'un système SIG comme des fichiers graphiques plutôt que comme des fichiers analytiques corrects topologiquement. Ces systèmes ont une grande utilité, surtout dans le domaine des cartes de base pour l'équipement et le génie civil et les cartes fiscales ou cadastrales associées. Ils sont également de plus en plus appréciés pour la photogrammétrie où les restituteurs ont des interfaces destinées aux activités cartographiques de base.

La figure 19 montre les étiquettes et textes typiques, de même que le vocabulaire graphique des signes conventionnels qui peuvent être utilisés sur à peu près tous ces systèmes graphiques interactifs.

Les fonctions comprennent :

- Des données sur le texte d'étiquettes. Ces systèmes ont différents "réservoirs" qui permettent des possibilités : taille des données, placement oblique, mise à l'échelle, rotation et, dans certains cas, disposition en biais le long d'une ligne courbe.

- Création d'une bibliothèque des signes conventionnels à partir d'un numériseur, association de symboles à un menu interactif.

- Mise en mémoire de menus de signes pour les rappeler et les visualiser sur des cartes et des graphes. Ces signes conventionnels sont associés en général à des points, mais ils comprennent aussi des signes conventionnels linéaires et des estompages dans des surfaces polygonales.

- Parmi les fonctions interactives de base, on trouve :

1. découpage en fenêtre, agrandissement, manipulation de symboles graphiques
2. édition d'éléments cartographiques (rotation, agrandissement, transformation, suppression)
3. réunion graphique de divers fichiers de calques graphiques
4. superposition d'une grille graphique de référence.

- Entrée interactive, en général à partir d'un écran à tube cathodique ou d'un numériseur de points, de traits, d'arcs, de lignes courbes et de polygones, sous diverses formes de visualisation graphique.

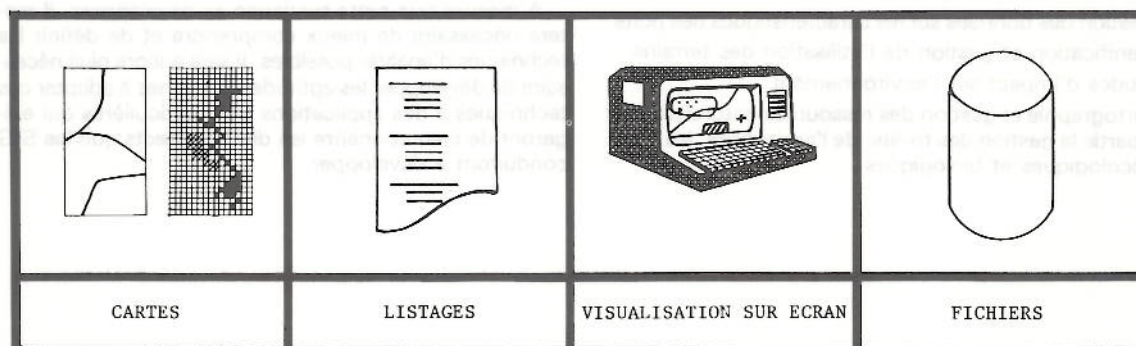


Fig. 18
Format de sortie

	POINTS	TRAITS	POLYGONES	SURFACES
TYPES DE DONNEES				
ECRITURES / TEXTES		<i>Santa Ana River</i>		
SIGNES CONVENTIONNELS				

Fig. 19
Signes conventionnels des cartes

XI. Applications habituelles

Bien que les systèmes d'informations géographiques commencent seulement à rendre des services dans la pratique, ils ont été adaptés à de nombreux domaines d'application. On en donne ci-après une liste résumée :

- cartographie pour le génie civil
- photogrammétrie automatisée
- conception des découpages (découpage/remplissage, disposition des rues, disposition des parcelles)
- plans fiscaux (plans cadastraux)
- plans routiers
- cartes et gestion des services de distribution
- levés géodésiques
- cartographie des risques (accident, délits, ruptures de canalisations, etc...)
- inventaires et cartographie statistique
- gestion des données sur les caractéristiques des puits
- planification et gestion de l'utilisation des terrains
- études d'impact sur l'environnement
- cartographie et gestion des ressources naturelles. En font partie la gestion des forêts, de l'agriculture, les études écologiques et biologiques

- itinéraires d'autobus et autres services analogues concernant des véhicules
- aménagement urbain et régional
- sélection des trajets des routes et des oléoducs

XII. Résumé

Il est clair que les phénomènes géographiques (c'est-à-dire les ressources naturelles, la distribution des populations, l'utilisation des terres, etc...) sont de mieux en mieux perçus et intéressent plus de monde. Cet intérêt pousse à mettre au point de meilleurs moyens d'enregistrer, de conserver, d'analyser, de gérer, de retrouver et de visualiser les informations géographiques. Les deux prochaines décennies verront une révolution dans l'intégration des techniques d'analyse, des équipements et des logiciels.

A mesure que cette tendance se développera, il restera nécessaire de mieux comprendre et de définir les techniques d'analyse possibles. Il sera encore plus nécessaire de développer les aptitudes humaines à adapter ces techniques à des applications très particulières qui exigeront de bien connaître les divers aspects que les SIG conduiront à développer.