SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET BASES DE DONNEES.

Marc Souris, ingenieur en informatique
DIVA, Infographie

Résumé : La première partie de cet article décrit les systèmes d'information géographique, depuis l'historique de ces systèmes jusqu'à la présentation des diverses possibilités et des contraintes d'utilisation, en passant par l'exposé des concepts théoriques liés à l'informatisation de données localisées.
Cet article présente ensuite l'extension possible aux données localisées des systèmes de gestion de bases de données relationnelles, afin d'étendre à l'information géographique la puissance de ces systèmes. Pour cela, des opérations algébriques nouvelles sont introduites, ainsi que les méthodes effectives de réalisation informatique de ces opérations. L'élaboration d'un système d'information géographique intégrant ces opérations est alors présentée: l'image n'est que l'expression de l'attribut multidimensionnel de localisation et devient aussi bien le moyen que le résultat de l'interrogation de données géographiques.

Mots clés : Système d'information géographique, système de gestion de base de données relationnelles, jointure géométrique, infographie, cartographie automatique.

Sommaire.

Introduction.

Première partie: Généralités sur les systèmes d'information géographique.

1. Terminologie.

2. Le contexte historique.
Le développement des SIG depuis 1960. Le contexte informatique. Les besoins, les perspectives actuelles.

3. Interprétation, représentation, structuration.
Définition de l'information géographique: données descriptives, données graphiques. La typologie et les différents modes de représentation et de structuration de l'information graphique. Les quadtrees.

4. Les possibilités des systèmes d'information géographique.
Les possibilités classiques des SIG. Les méthodes et matériels d'exploitation de données, les matériels de restitution, la cartographie automatique. Les développements récents, les manques actuels, les problèmes d'administration de données, de création et de maintenance d'un SIG. Le choix d'un système.

Deuxième partie : Base de données et information géographique : l'extension du modèle relationnel.

5. Notions classiques sur les SGBDR.
Définition du modèle relationnel. Les niveaux de structuration de données. Les opérations de l'algèbre relationnelle: sélection, jointure, projection. Les langages de définition de données, de manipulation de données.

6. L'approche SGBD de l'information géographique et les jointures spatiales.
L'intégration de données localisées dans le schéma relationnel. Les opérations algébriques étendues aux données graphiques. Les jointures géométriques et les algorithmes de résolution.

7. Présentation d'un système qui met en oeuvre les jointures spatiales.
Architecture du système. Gestion des vues. Structuration de l'information graphique. Les modules de traitement. L'intégration de l'imagerie satellite. Le matériel utilisé.

Systèmes d'information géographique et bases de données.

Introduction.

Système, information, géographie : le cadre est déjà bien posé. Information traitée par un système, voilà les systèmes de gestion de base de données. Que la géographie arrive et tout se complique : nous avions des données simples, sur des ensembles bien définis, ordonnés, et voilà qu'apparaissent maintenant des données plus complèxes, souvent incertaines, et dans un espace métrique de dimension au moins deux. Il va falloir intégrer la localisation dans l'espace comme une nouvelle information et surtout s'en servir comme des autres données : l'image, la carte devient le moyen ou le résultat d'une interrogation, elle vient compléter, sinon remplacer, le listing de résultat.

Pour arriver à intégrer efficacement l'information géographique dans le schéma des bases de données relationnelles, il faut étendre aux données multidimensionnelles des concepts et des techniques basées sur la dimension un. Ceci va compliquer les structures de stockage, et induire de nouvelles opérations algébriques, dont la réalisation technique découlera de méthodes géométriques et graphiques.

Un système d'information géographique comprenant des techniques évoluées de gestion de base de données localisées devient un outil très puissant pour l'analyse et la gestion de l'espace: c'est à la réalisation d'un tel outil que nous nous sommes attachés. L'objet de cet article est de présenter, après un bref historique sur la question, l'ensemble des possibilités actuelles des systèmes d'information géographique, les développements récents dans le domaine, les objectifs et les résultats de nos recherches actuelles.

Première partie : LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE.

1. Terminologie.

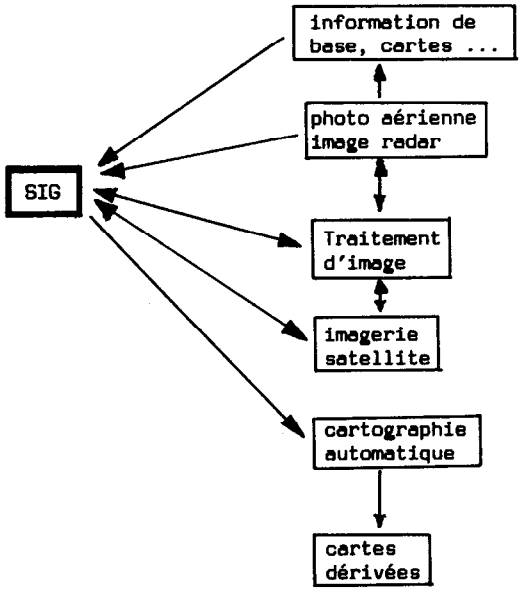
Système d'information géographique (SIG) : ensemble de méthodes et de techniques permettant la manipulation et le traitement de l'information géographique.

Cartographie automatique : ensemble de techniques et d'outils permettant d'automatiser la conception graphique et la production cartographique.

Système de gestion de base de données (SGBD) : Ensemble de méthodes et de techniques informatiques qui permettent de gérer des données logiquement distinctes et de déterminer les accès aux données sans intervention manuelle.

Base de données (BD) : ensemble de données reliées et gérées par un SGBD.

Traitement d'image : ensemble de méthodes et techniques informatiques de manipulation d'images numériques (nombre fini de points, appelés pixels, à chaque pixel étant affecté une valeur numérique).



2. Le contexte historique.

2.1 De la préhistoire à nos jours.

Les applications militaires et l'intérêt croissant des gouvernements pour la gestion des ressources sont à l'origine du développement des systèmes d'information géographique. Prenons par exemple le Canada, qui a développé l'un des premiers systèmes dans les années 60: pour la première fois, un état avait le sentiment que ses ressources naturelles n'étaient pas sans limites, et son gouvernement a perçu la nécessité d'intervenir au niveau de la planification et de l'utilisation des ressources. L'échelle utile pour une telle planification varie entre le 1:20000 et le 1:250000 : sur un pays de la taille du Canada , c'est entre 200 et 3000 coupures de carte qu'il fallait utiliser, pour chaque thème d'étude. Manuellement, le travail de lecture et d'analyse de l'information cartographique aurait pris au minimum trois ans et plus de cinq cent techniciens.

A l'époque, le concept même de SIG n'était pas développé et les méthodes de stockage et d'analyse d'un nombre important de cartes inexistantes. Les ordinateurs avaient de faibles mémoires et des vitesses de calcul dépassées par les plus petits micro-ordinateurs d'aujourd'hui. L'infographie en était à ses débuts (la société Benson n'avait pas encore inventé le mot), aussi bien sur le plan matériel que sur la théorie et les algorithmes. C'est entre 1960 et 1970 qu'ont été développés les premières tables à digitaliser, les raster-scanners, les tables traçantes, ainsi que les techniques de base de l'infographie: topologie informatique, séparation de l'information graphique et de l'information descriptive, traitement d'image et reconnaissance des formes...

L'interactivité est alors inexistante, et les possibilités de restitution graphique très limitées (un écran graphique coûte 10.000 dollars en 1967).

La plupart des systèmes développés pendant les années soixante sont basés sur des grilles arbitraires, maillage de l'espace qui ressemble à ce qu'un géographe peut faire manuellement sur une petite surface. C'est principalement le coût élevé des numérisateurs qui est à l'origine de ce choix, surtout dans les universités, où certains étudiants devaient remplir à la main les mailles en fonction de la carte d'origine... Ces systèmes sont: SYMAP, MIADS, GRID, MLMIS, GEOMAP... C'est également à la fin des années 60 que se développent les premiers systèmes d'information urbains (DIME, GADSR).

Les années qui suivent (70-80) verront apparaître deux phénomènes majeurs :
- la perception de plus en plus répandue de la nécessité d'une gestion générale des ressources et des potentialités, impliquant des moyens de traitement de l'information évolués,
-des progrès importants et rapides dans la technologie informatique et les possibilités d'interactivité.
Par contre, peu d'innovations verront le jour, alors que le nombre des systèmes en développement est important. Les universités sont désormais nombreuses à s'intéresser à ce domaine, et des sociétés commerciales

commencent à voir le jour alors qu'elles etaient inexistantes durant les années 60: ESRI, GIMMS, INTERGRAPH, COMPUTERVISION...

Le développement des matériels graphiques est dû essentiellement au marché CAO (conception assistée par ordinateur), en pleine expansion. Ce type de matériel reste néanmoins très coûteux.
Si le développement logiciel est important, très faible est en réalité le nombre des systèmes d'information géographique couvrant de larges territoires et capables non seulement d'archiver, mais aussi de gérer et de traiter un volume important d'informations localisées.

Le début des années 70 va également voir le développement rapide de la télédétection spatiale et des méthodes de traitement d'image (recherche médicale). Si ces technologies restent bien séparées des SIG, elles vont contribuer à favoriser l'essor général de l'infographie. Il faudra néanmoins attendre les années 80 pour voir s'esquisser un rapprochement entre la télédétection spatiale et les SIG, par une intégration réciproque d'information provenant de sources multiples. Les années 70 resteront donc une période de consolidation de l'acquit des années 60, plutôt qu'une période d'innovation.

2.2 L'avenir du futur antérieur.

Nous voici dans les années 80. La saisie et la gestion de très larges bases de données sont maintenant les principaux problèmes théoriques et pratiques du début et du milieu de la décennie. De nouveaux matériels et de nouvelles méthodes de saisie graphique et d'administration de données doivent être développés si l'on veut à la fois numériser l'ensemble des documents existants et suivre l'évolution des données. Les problèmes dus au volume des données sont souvent mal perçus ou même ignorés par les administrateurs: un système d'information contenant une dizaine de cartes n'aura rien à voir avec un système contenant 5000 coupures de carte ou plus. Voici quelques chiffres donnant une idée du volume de données de SIG potentiels:

Les 359 coupures de carte de l'United States Geological Survey (utilisation des sols) contiennent approximativement 68.000.000 paires de coordonnées.

Les cartes topographiques sont beaucoup plus riches: il existe 35000 à 40000 coupures de la carte topographique de l'USGS au 1:25000, ce qui représente à peu près 40.000.000.000 paires de coordonnées.

Actuellement, le plus grand des SIG contient environ 10.000 planches numérisées. Les systèmes à venir seront beaucoup plus importants. La saisie des 30.000 planches de l'inventaire forestier canadien est en projet, et le bureau américain de recensement, qui produit chaque décennies quelques 350.000 cartes de population, voudrait bien créer un SIG qui lui éviterait de refaire les cartes après chaque recensement.

Pour réaliser une telle ambition, il faudra développer des méthodes de gestion et d'organisation de données de plus en plus efficaces.
Le début des années 80 a vu une avancée importante dans les techniques de gestion de données : les systèmes de gestion de données à schéma relationnel sont plus performants, structurent l'information de façon

plus rigoureuse et améliorent les problèmes d'administration de données. Dans ces systèmes, les relations spatiales entre entités géographiques restent malheureusement mal définies, aussi bien sur le plan théorique que sur le plan pratique : la spatialisation n'est pas gérée en tant que telle, et les concepts théoriques ne sont pas adaptés aux données multidimensionnelles, si bien qu'il est difficile sinon impossible de les faire entrer dans le schéma des SGBD actuels.
Plusieurs questions se sont posées aux experts du début des années 80 :

- les développements récents des SGBD et des langages de manipulations associés conviennent-ils à la spécificité des données localisées ?

- les SGBD conviennent-ils pour modéliser les relations existant entre entités géographiques ?

- la difficulté d'intégrer les informations géographiques dans une base de données provient-elle de l'imprécision des données localisées ou l'inadéquation vient-elle de la technologie même des SGBD ?

- a-t-on besoin d'expliciter les relations existant entre entités géographiques, ou doit-on laisser l'utilisation d'un système graphique permettre l'observation humaine et la reconnaissance directe de ces relations, sans pouvoir les gérer ni les manipuler ?

La plupart des SIG actuels se sont développés sans trop de difficultés du fait du modeste volume de données traitées et de la spécificité de ces données. Souvent ces systèmes commencent tout juste à être adaptés au flux réel d'informations et aux problèmes d'administration de données. Les plus courants sont les systèmes d'information sur la propriété et la gestion du cadastre (ex: DBMS), les systèmes de fichiers géographiques de base (topographie, réseau d'équipements) comme le système DIME.

Aujourd'hui, c'est donc à la fois sur la quantité et sur la qualité de l'information que porte la réflexion. Que doit-on saisir, stocker ? Comment intégrer les phénomènes dynamiques propres aux données géographiques, tels que modifications de couverture forestière, migrations de population... Comment gérer une telle base et que doit-elle contenir pour permettre la simulation et constituer ce qui serait la base de faits d'un système expert géographique, créateur de scénari de développement grâce à des règles de modélisation ? Doit-on s'orienter vers les bases de données très spécifiques, ou bien vers des bases générales importantes mais peut-être inadéquates dans certains cas bien précis ?
Au-delà de l'aspect "administration de données et techniques de gestion", c'est au travail de conception, de recueil et d'utilisation de l'information qu'il faut réfléchir. Il est fondamental de savoir ce que l'on peut ignorer, ce que l'on doit conserver. Quelles sont les données nécessaires à l'aménagement, à la simulation, à la gestion d'un territoire ? C'est aux disciplines concernées, et en particulier à la géographie, de répondre à ces questions puisqu'elles sont munies de l'arsenal théorique développé autour de ces problèmes.

C'est bien là l'un des aspects fondamentaux du développement des SIG. Face aux possibilités offertes par ces systèmes, le thématicien doit maintenant s'adapter et tirer parti de l'ensemble des moyens mis à sa

disposition. C'est sans doute un renouvellement difficile, car il implique un changement non seulement dans le traitement de l'information mais aussi et surtout dans son recueil et son élaboration. Par exemple, est-il nécessaire de passer par une carte de zones pour saisir l'information, alors que ces zones peuvent être définies à partir de relevés ponctuels ? La carte est-elle indispensable en tant que support d'une information intermédiaire ?

A retenir, une formidable avancée de la technologie informatique qui permet grâce à des matériels et des logiciels en évolution constante d'aller plus loin dans la préhension de l'espace : l'outil nouveau n'apporte pas qu'une amélioration des performances, il induit par lui-même un changement qualitatif dans les méthodes de réflexion de son utilisateur.

Nous allons essayer de cerner maintenant l'ensemble des possibilités offertes par ces techniques : les types de données, les concepts associés à l'information localisée, les techniques de manipulation et de représentation graphique, les diverses fonctions disponibles dans les systèmes. Cet exposé a un caractère général et ne se limite pas à un seul système.

3. Interprétation, représentation, structuration.

Avant d'étudier en détail l'ensemble des fonctions disponibles dans les SIG, nous allons exposer les conceptions en matière d'information localisée et les techniques informatiques utilisées: types de données, représentation informatique, structuration et méthodes de stockages.

3.1 Données localisées : interprétation et espace de représentation.

Le terme **entité** utilisé dans la suite recouvre le concept d'ensemble d'objets d'un même type. Ces objets sont décrits, tels qu'ils existent dans le monde réel, par des variables élémentaires, appelées **attributs** de l'entité. Une entité géographique a la particularité d'associer une *localisation graphique et temporelle à l'ensemble des attributs qui* constituent la description non localisée de cette entité. La partie graphique est appelée **information graphique**, pour la distinguer de l'ensemble des autres attributs appelé **information descriptive**.

Il est important de noter qu'il n'y a pas de différence théorique entre information graphique et information descriptive, toutes deux constituent l'ensemble des attributs qui servent à décrire un objet de l'entité déterminée. Par contre, il existe toujours une dépendance fonctionnelle de l'une vers l'autre, qui motive cette distinction sémantique et qui se traduit dans les SIG par la séparation physique et conceptuelle du graphique et du descriptif. En effet, la localisation géographique et la donnée temporelle d'un élément de l'entité vont déterminer l'ensemble des valeurs des autres attributs de cet objet.

L'élément de base de l'espace réel est le point (au sens mathématique) de Rn*R (n=2 ou 3), et chaque objet d'une entité géographique devrait donc logiquement être un point de Rn*R. Toute entité géographique aurait alors un nombre infini d'éléments, impossibles à traiter

matériellement et informatiquement. Il est donc nécessaire de représenter un nombre infini d'éléments par un nombre fini d'objets, de nature différente, c'est-à-dire de changer l'espace de représentation: ce passage est bien sûr à la base des problèmes de validité et des difficultés de traitement de l'information localisée. En fait, la description de l'entité, si ce n'est même sa définition, va être en partie déterminée par les méthodes de représentation utilisées, une même entité pouvant donner lieu à plusieurs descriptions en fonction du choix de l'espace de représentation et de l'opération de codage : c'est le cas d'une ville, qui peut être représentée par un **point** de l'espace à une certaine échelle et par une **aire** à une autre échelle, les attributs descriptifs étant alors également différents; nous aurons alors deux entités distinctes en fonction de l'échelle de description. Comme dans tout problème informatique, le choix de l'espace de représentation et le codage des données influence de manière déterminante la nature même de l'information représentée et donc l'utilisation qui en sera faite. La donnée n'existe pas, en fait, avant que soit défini quel sera l'espace de représentation utilisé pour la coder.

Tout le problème est donc de trouver un nouvel espace de représentation qui permette de réduire la description de l'espace à un nombre fini d'éléments : il faut passer des éléments de l'espace géographique (les points) à des sous-ensembles de cet espace et décrire la localisation de ces sous-ensembles avec un nombre fini de paramètres. Les entités auront alors comme objets non plus des points, mais des ensembles de points, et les valeurs des attributs descriptifs se rapporteront à ces ensembles. Dans ces conditions, il est évident que la méthode de définition de ces sous-ensembles va influencer, sinon déterminer, la définition des attributs descriptifs. Nous appelerons **entité dérivée** l'ensemble des objets décrits par ces attributs.

Deux méthodes différentes sont utilisées : définition à priori des sous-ensembles (par exemple maillage de l'espace), définition des sous-ensembles en fonction des objets de l'entité.

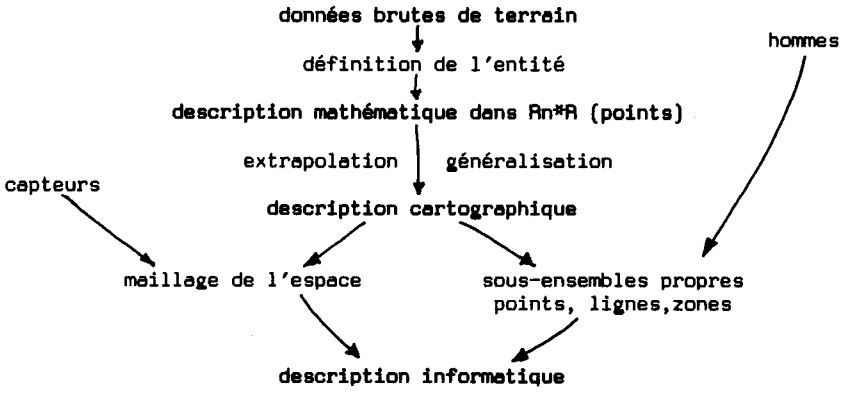
Avec la première méthode, la description de la localisation des sous-ensembles est très simple, car ils sont justement choisis pour faciliter représentation et description avec le moins de paramètres possible. Par contre, on perd une partie importante de l'information descriptive, les objets de l'entité dérivée n'étant plus définis par les valeurs descriptives des points mais uniquement par les paramètres de leur localisation dans l'espace. Par exemple, si l'on prend comme définition des sous-ensembles les cellules d'un maillage, cela revient à dire que tous les points d'une même cellule auront les mêmes valeurs descriptives (1).
Cette méthode utilise principalement le découpage de l'espace en polygones réguliers : carrés, triangles, hexagones... Ces polygones sont en général repérés dans l'espace par un système de coordonnées propre à leur définition (lignes, colonnes pour les carrés, etc).

---

(1) Ceci peut être le cas si la taille des cellules est inférieure à l'échelle géographique de validité des valeurs des attributs descriptifs, échelle qui dépend bien sur de la définition même de ces attributs et des objets à représenter.

La seconde méthode de description géographique utilisée est la définition des objets en fonction des valeurs descriptives de l'entité. On va ainsi créer des sous-ensembles que l'on classe habituellement en **zones, lignes, points**. Les sous-ensembles ainsi créés et qui ne sont pas des points peuvent être validés avec certitude (c'est le cas par exemple de zones administratives), ou être l'objet d'une certaine interprétation (zones définies à partir de relevés ponctuels,...). Cette interprétation est le plus souvent manuelle et représentée sur une carte avec plus ou moins de précision (interpolation).

En fait, le cheminement de l'information géographique est actuellement plus complexe que le passage direct point mathématique-description informatique. Aujourd'hui, l'information est rarement donnée directement en termes d'espace mathématique et de données brutes, mais après l'étape interprétation-extrapolation-cartographie: à partir de l'information brute de terrain, la donnée est interprétée et extrapolée manuellement puis représentée sur une carte qui, à son tour, est l'objet d'une représentation informatique. Ce qui signifie que l'on effectue manuellement une étape importante de la description géographique, avec tous les problèmes de validité sous-jacents. C'est seulement après cette étape qu'intervient la description informatique et le choix d'une méthode de représentation.



Si l'on veut néanmoins raisonner en terme de globalité géographique, il est nécessaire de revenir à un espace de référence qui ne peut être que l'espace mathématique. Autrement, on risque de comparer des objets géographiques qui n'ont pas la même échelle de validité. De plus, il est dangereux de vouloir raisonner exclusivement en termes de cartes : cela signifierait que l'on ne peut intervenir informatiquement qu'à partir de l'étape de mise en forme cartographique de l'information. Or c'est justement sur les traitements en amont qu'il faut actuellement faire un effort de réflexion : par exemple, le chercheur élabore souvent des "cartes zonales" à partir de données ponctuelles, de la connaissance du terrain et d'autres données, comme celles provenant de la photo-interprétation. Pourquoi ne pas essayer de faire effectuer interpolations et extrapolations par des systèmes utilisant des opérateurs de reconnaissance ou grâce à des règles d'expertise précises

et uniquement en fonction d'une grande masse de données toutes conservées par le système. Par ailleurs, la tendance actuelle est d'intégrer le processus de recueil à celui de l'élaboration et du traitement de l'information, ce qui est peu compatible avec une étape cartographique manuelle.

Reste qu'aujourd'hui, le plus souvent encore, les cartes et les tableaux de valeurs descriptives associés constituent la première étape de description et de représentation. C'est sur ces cartes que l'on trouve l'information nécessaire au codage et à la représentation informatique.

Avec la première méthode de représentation, l'attribution des valeurs descriptives au maillage prédéfini se fait en général par superposition d'une grille à une carte classique , ou par saisie automatique avec un pas déterminé grâce à un appareil à balayage (raster-scanner) (fig. 1).

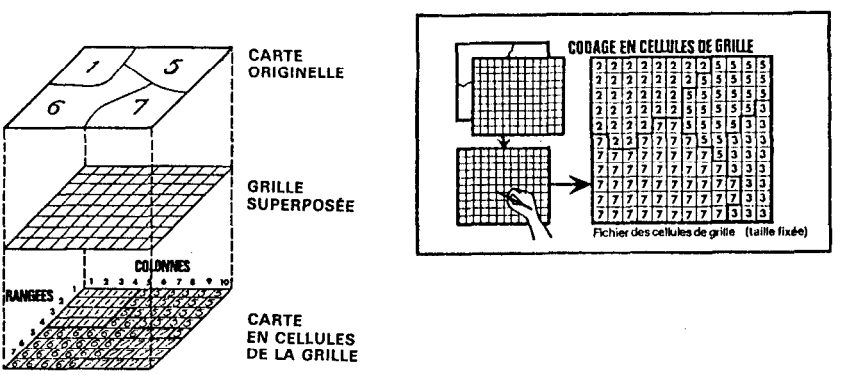


fig. 1: Le codage des cellules d'une grille à partir d'une carte.
(d'après Dangermond 1983)

Outre la facilité de description de la localisation, les avantages de cette méthode sont dûs essentiellement à la facilité de traitement graphique: les opérations ensemblistes se font sur des cellules fixées. De nombreux systèmes s'inspirant des techniques de traitement d'images, ou provenant de la télédétection spatiale, utilisent cette représentation. Les inconvénients sont par contre importants: perte d'information descriptive, fixation à priori de la taille des objets et donc de l'échelle de validité et de traitement, important volume de stockage des données. Il existe cependant des méthodes permettant de réduire ce volume, par compactage ou structure arborescente (voir 3.2).

Le principal inconvénient réside peut-être dans la difficulté d'évolution des systèmes qui utilisent ce mode de représentation : toutes les données doivent être rapportées à priori à des cellules identiques pour être traitées. Une cellule peut recevoir alors un nombre important d'attributs descriptifs, au risque de perdre la notion d'échelle de validité, différente suivant les attributs en fonction du travail préliminaire d'interprétation des données brutes de terrain.

Avec la seconde méthode de représentation, les sous-ensembles définis en fonction des objets de l'entité sont habituellement classés en zones, lignes, points, suivant la dimension des sous-espaces qui les contiennent. Les points sont décrits tout simplement par leurs coordonnées (cartésiennes, sphériques, cylindriques...) dans un système de référence choisi. Les coordonnées sphériques correspondent à la longitude, colatitude, et sont donc pratiques et souvent utilisées. La précision informatique des coordonnées est un facteur important du codage, car il peut influencer la validité des données graphiques.

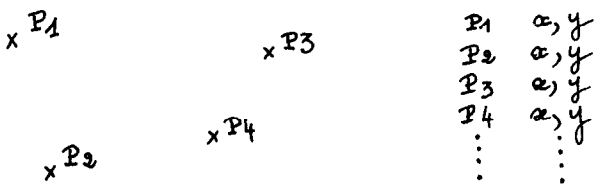


fig. 2: Représentation de points.

Les lignes sont décrites par un ensemble de points, appelés sommets : la ligne est alors représentée graphiquement par l'ensemble des segments définis par ces sommets (fig. 3). Bien sûr, il y a perte d'information entre la représentation mathématique de la courbe et sa représentation informatique. Ici, le nombre de sommets en fonction du rayon de courbure détermine la précision du codage: elle dépend à la fois de la méthode de saisie, des matériels utilisés et de l'opérateur s'il existe.

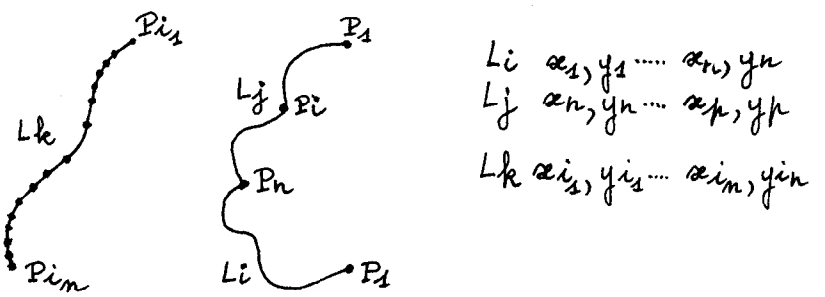


fig. 3: Représentation de lignes.

Les zones sont repérées par leur contour, qui est considéré soit comme

propre à chaque zone, soit comme un ensemble de frontières topologiques.

Dans le premier cas, la zone est décrite graphiquement par un ensemble de lignes fermées, appelées boucles. Si l'on conserve ces lignes telles quelles, il y a alors duplication d'une partie de l'information graphique, un contour étant en général commun à deux zones : globalement, ces lignes se retrouveront donc stockées deux fois.
Dans le second cas, les contours sont considérés comme un ensemble de frontières, chaque frontière étant décrite par une ligne. Les extrémités de chaque ligne sont alors appelées noeuds, les lignes elles-même étant nommées arcs. Chaque noeud appartient au moins à deux arcs, (fig. 4), et l'ensemble des arcs d'une zone doit constituer une courbe fermée.

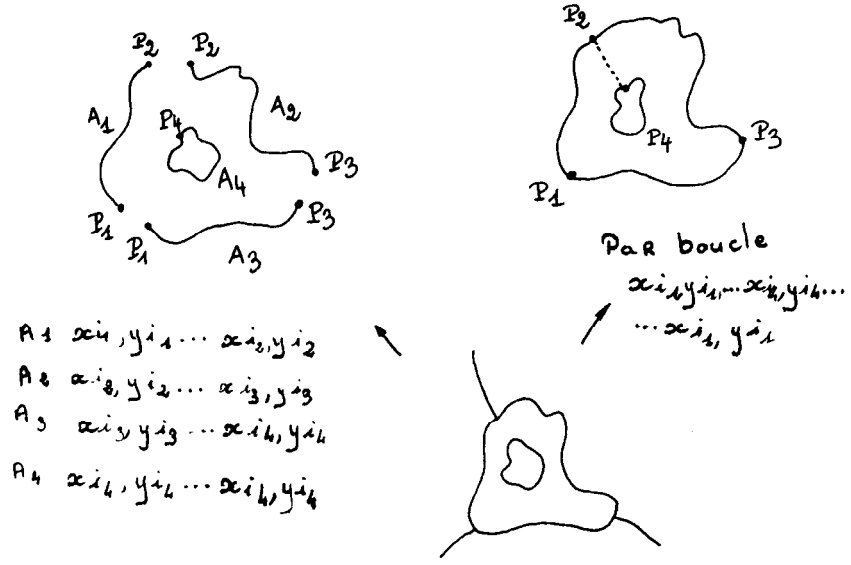


fig. 4: Représentation de zone.

Des entités plus complexes peuvent être définies à partir d'entités dont les éléments sont des points, lignes ou zones. Par exemple, on peut définir des entités dont les objets sont des couples d'éléments d'autres entités. La représentation de ces objets est donc un peu plus complexe, car elle fait appel non seulement à la description graphique des éléments, mais également à la description des relations qui définissent les objets. Prenons l'exemple le plus courant d'une relation dont les objets sont des couples ordonnés de points (description de flux, migrations, réseaux linéaires ...). La description de la relation peut s'apparenter à celle d'un graphe.

La saisie des coordonnées des points, noeuds, sommets se fait manuellement, semi-automatiquement ou automatiquement. Le procédé manuel utilise une table à numériser, appareil électromagnétique qui transmet directement à l'ordinateur les coordonnées d'un point repéré

par une loupe à réticule (fig. 5).

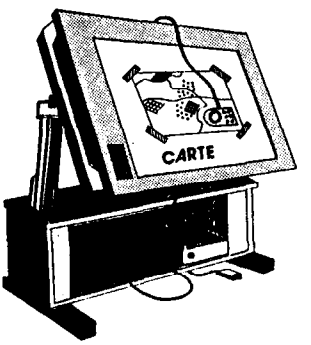


fig. 5 : Numérisateur manuel (d'après Dangermond 1983).

Le relevé peut être soit déclenché par l'opérateur, grâce à des touches sur la loupe (on dispose en général de 4 à 16 touches), soit automatique en fonction d'un incrément de temps ou de distance. Ce second mode sert à la saisie de ligne, et l'opérateur suit la courbe à numériser: si le relevé est fonction du temps, la vitesse de déplacement sur la courbe détermine la précision; si le relevé est fonction de la distance entre deux points, la précision dépend du rayon de courbure. En tout état de cause, les tables à numériser sont des instruments de précision, habituellement de l'ordre de dix microns.

Les opérations automatiques sont de deux types :

- le suivi automatique de trait, assuré en général par une diode ou une caméra laser. Le relevé des points est incrémental. On se sert essentiellement de cette méthode pour la saisie de lignes continues.

- les méthodes par balayage: le document est transformé en une grille de niveaux par balayage horizontal, ligne àprès ligne. La définition de lignes brisées ou de contours à partir de cette grille nécessite des algorithmes de passage d'une représentation maillée ("mode raster") à une représentation linéaire ("mode vecteur"). Les principaux problèmes de ces algorithmes sont topologiques (repérage des zones fermées connexes de genre 1, lien entre les zones et les lignes).
Il est à noter que les opérations automatiques conviennent mal à la saisie de points isolés (bruitage des documents initiaux).

La méthode de saisie est en principe indépendante du mode de représentation informatique adopté pour stocker les éléments graphiques; cependant, certaines méthodes sont mieux adaptées à un type de représentation, et ont en général été développées pour un objectif précis de manière à minimiser les traitements ultérieurs (du genre raster-vecteur).

3.2 Les structures de représentation de l'information localisée.

Le choix de la structure de représentation se pose pour tout type de donnée: il doit être effectué en fonction des besoins ultérieurs et leur être adapté. Pour la partie graphique de l'information géographique, cette structure est surtout fonction de trois critères: facilité des manipulations métriques et topologiques, compacité, structuration.
Plusieurs niveaux de représentation peuvent ainsi être nécessaires suivant les traitements à effectuer. Des procédures d'identification et de reconnaissance permettent de passer d'un niveau de représentation à un autre, suivant une hiérarchie d'opérateurs de reconnaissance (de l'ensemble de points au contour, de la courbe à la forme caractéristique, etc.), qui permettent également de passer d'un ensemble de représentation infini à un ensemble fini.

Le premier niveau de représentation que nous avons vu au paragraphe précédent correspond aux coordonnées des points de l'espace décrivant les objets (par exemple pour une ligne, l'ensemble des points qui permettent l'approximation des éléments graphiques à une précision donnée). A un niveau supérieur, la représentation des éléments fait appel à des relations entre ces éléments, relations qui doivent, en principe, donner l'ensemble de l'information nécessaire aux problèmes à résoudre ultérieurement. On distingue ainsi:

* des relations unaires, ou formes primitives, qui donnent le type de l'élément et ses paramètres (trait et longueur ou orientation, par exemple);
* des relations binaires, numériques (basées sur des indices de ressemblance ou de dissemblance), ou topologiques (basées sur les notions de voisinage, de position, etc.). La représentation est souvent donnée sous forme de graphe dont les sommets sont les éléments, et les arcs entre sommets créés si la relation est vraie . Dans le cas numérique, les arètes sont valuées par les distances entre les sommets. Si le nombre de formes primitives est faible, le nombre de relations binaires ou n-aires possibles pour décrire les éléments graphiques est très grand : tout le problème consiste alors à choisir les bonnes relations permettant une description minimum, en fonction du but poursuivi (Simon 1984). La description d'éléments à caractère géographique utilise de préférence des relations invariantes par transformations isométriques.

Nous avons vu qu'un SIG peut contenir une grande quantité d'informations graphiques. Il est donc important que la structure de représentation choisie permette de compacter cette information pour pouvoir la stocker sur le moins de place possible, sans néanmoins que l'opération de transformation n'altère les performances du système. Les méthodes de compactage sont évidemment fonction des méthodes de représentation de l'information graphique (maille, vecteur), et doivent si possible permettre dans la forme compactée des manipulations graphiques ou des calculs métriques élémentaires (Boursier 81, 82).

D'autre part, l'interrogation des données d'un SIG consiste essentiellement en une opération de recherche et de sélection sur la localisation: sélection d'éléments dans une fenêtre, dans le voisinage d'un objet, etc. Il est donc nécessaire d'organiser et de structurer

l'information par rapport à la localisation, de manière à ce que ces opérations soient exécutables en un temps acceptable par l'utilisateur.

Ce sont donc ces trois critères : facilité de manipulation graphique, compacité, structuration qui vont guider le choix des méthodes de représentation des éléments graphiques.

Dans la représentation des données géographiques en points, lignes, zones, nous avons vu que, si les points ne posent pas de problèmes particuliers (leurs coordonnées sont conservées directement), les éléments graphiques à prendre en compte sont des courbes habituellement représentées par des suites de points dont on connait les coordonnées. Les méthodes de compactage consistent à réduire l'espace mémoire nécessaire au stockage direct des coordonnées de l'ensemble des points. Dans certains cas, le stockage direct sans compactage est néanmoins une solution satisfaisante.

Les méthodes de compactage de représentation de courbes sont pour la plupart basées sur un codage incrémental, appelé encore codage en chaine: les courbes sont approchées par un ensemble de points où chaque point est déduit du précédent par la donnée d'un paramètre (angle, distance, courbure,...).
Le plus connu de ce type de codage est celui de Freeman, basé sur un ensemble de huit vecteurs (i,j orthogonaux de même norme, i+j,-i+j,-i,-i-j,-j,i-j) codés de 0 à 7 (fig. 6). Chaque point est déduit du précédent par translation d'un de ces huit vecteurs (1). Le codage d'une courbe comprend donc les coordonnées du premier point puis la suite des codes de Freeman pour la meilleure approximation (fig. 7). Des algorithmes très usités ont été développés pour calculer ces approximations (par exemple l'algorithme de Bresenham pour les lignes droites).

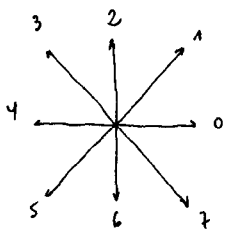


fig. 6 : code de Freeman

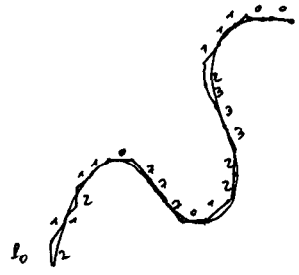


fig. 7 : codage d'une courbe

---

(1) la valeur optimale de la norme de i ou j pour une précision de codage donnée peut être obtenue à partir de la fréquence spectrale de la courbe donnée par sa transformée de Fourier, dans le cas d'une courbe décrite par son équation.

Le codage de 0 à 7 permet de représenter chaque point par seulement trois bits, alors qu'un codage direct des coordonnées réelles nécessite au minimum 20 bits par points. Le gain de place de stockage est donc important si le codage ne génère pas un nombre de points beaucoup plus grand que celui qu'exigé la définition de la courbe, comme c'est le cas notamment pour les lignes droites, ou le codage se révèle peu efficace. Si la courbe est représentée par des points saisis manuellement et avec attention (bonne relation entre le rayon de courbure et le nombre de points) le stockage direct reste plus efficace. Un autre inconvénient du codage de Freeman provient de l'utilisation de vecteurs de normes différentes ($\|i\|$ et $\|i\|\sqrt{2}/2$).

D'autres codages en chaine sont également employés : codage à quatre directions, par incrément de courbures , ou par vecteurs de types Freeman mais de norme variable (ce dernier codage se révèle être le plus efficace en terme de compacité). Ces codes induisent des grammaires qui peuvent servir à la génération et la manipulation des éléments codés (Simon 1984).

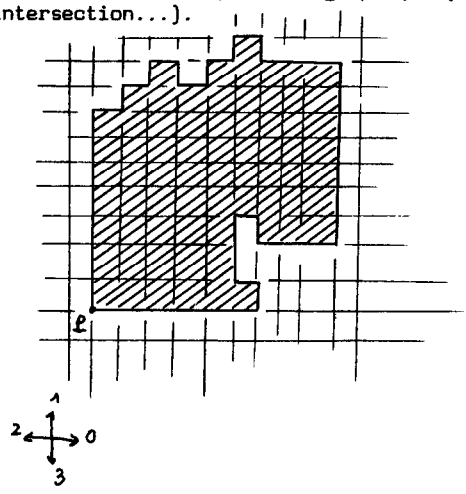
Le principal inconvénient du codage en chaine provient de son caractère relatif: les coordonnées d'un point doivent être calculées à partir du début de la chaine. Ceci complique ou rend impossible à priori les manipulations graphiques sur les éléments codés (intersection, inclusion, calculs topologiques et métriques, ect.). Pour remédier à cette difficulté, on rajoute des informations, notamment sur les caractéristiques topologiques, le plus souvent sous forme de relations binaires entre primitives graphiques (la courbe est frontière de telles zones, deux zones sont connexes, etc.). Ainsi, dans le cas des courbes fermées, on peut indiquer par pointeur les relations entre arcs, ou représenter les inclusions de zones par un graphe, (Morse 68), ainsi que chainer les arcs pour retrouver rapidement la structure de courbe fermée (Cook 1967). Le système DIME est l'un des premiers à avoir incorporé des structures topologiques (Peucker 1975).

Dans le cas des courbes fermées, d'autres méthodes ont été développées, consistant à ne conserver que l'intersection du contour avec un balayage horizontal: les opérations graphiques sont rendues plus simples avec cette représentation (Merrill 1973).

La représentation de l'espace géographique par un découpage arbitraire, utilisée comme nous l'avons vu dans de nombreux systèmes, produit un important volume d'information vu le nombre des cellules crées par cette méthode, dès que l'espace d'étude devient significatif. A moins de disposer de moyens de stockage importants et rapides (gros disques durs avec accès rapides), cette représentation ne peut être mémorisée telle quelle.
Le compactage consiste ici à essayer de regrouper les cellules de même valeurs : ces méthodes ne sont donc valables que si une valeur unique peut être attribuée à chaque cellule, c'est-à-dire que l'ensemble des valeurs des attributs de l'entité doit être fini.
La méthode élémentaire de compactage d'une grille de cellules est de balayer cette grille ligne par ligne, et pour chaque ligne de ne conserver que les séquences de cellules de même valeurs. La méthode peut être améliorée en testant plusieurs orientations de balayage, car les données peuvent être agencées suivant une direction privilégiée qui produira alors un compactage beaucoup plus performant (Amidon and Atkin

1971). La qualité du compactage dépend bien sûr de la complexité de l'information graphique, à savoir le nombre de composantes connexes. Ces méthodes sont faciles à mettre en oeuvre mais empêchent toute structuration des cellules entre elles et toutes opérations géométriques sous la forme compactée.

La seconde méthode de compactage consiste à changer de représentation en conservant les zones homogènes décrites par la suite des mailles formant le contour (fig. 8): les méthodes de représentation de contours sont alors les même que celles vues pour les courbes quelconques (codage en chaine, codage topologique). Cette représentation, très compacte par rapport au volume de données initiales, peut être obtenue directement à partir d'une numérisation des contours (manuelle ou automatique), ou par extraction des contours par des opérateurs de reconnaissances, notamment si l'image est fournie en pixels par un procédé automatique (caméra de télévision, raster-scanner, capteur à balayage). Le compactage est très efficace par rapport au volume initial des données, et la représentation s'apparente aux méthodes vues précédemment pour les données vectorielles. Malheureusement, on perd ainsi le principal intérêt de la représentation en cellules, à savoir la facilité de manipulation graphique (comparaison de cellules, union, intersection...).

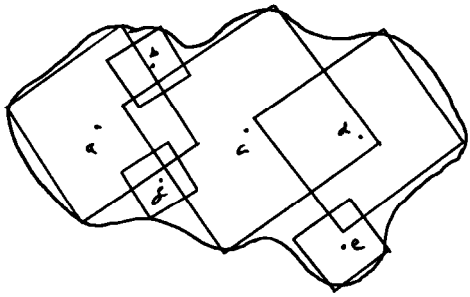


P → 1.1.1.1.1.1.1.0.1.
0.1.0.3.0.1.0.1.0.3.
0.0.0.3.3.3.3.3.3.3.
2.2.2.1.2.3.3.0.3.
2.2.2.2.2.2.

codage en chaine du contour des mailles.

fig. 8: représentation de mailles par contour.

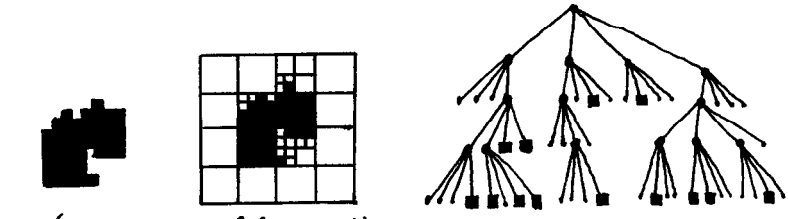
Pour conserver l'intérêt de ce type de représentation (la structuration en cellules identiques) et réduire le volume nécessaire au stockage, des méthodes de structuration ensembliste ont été développées, de manière à ne pas perdre les relations de voisinage des cellules entre elles. L'une de ces méthodes consiste à rechercher les blocs maximaux contenus dans une région homogène (codage en squelette, fig. 9, Pfaltz and Rosenfeld 1967). La région et son contour est complètement décrite par les centres et les rayons des blocs maximaux qu'elle contient, pour la distance du taxi à Manhattan (d(P,Q)=/x1-x2/+/y1-y2/). Les opérations graphiques d'union et d'intersection sont très simples à partir de cette représentation.



les carrés sont représentés par leur centre et la longueur de leur diagonale

fig. 9 : codage en squelette.

Une autre approche plus récente est basée sur des représentations arborescentes par subdivision successive de l'espace, supposé être ici un ensemble de 2n sur 2n cellules (Rosenfeld and Samet 1980). Si la région homogène à représenter ne couvre pas l'ensemble de l'espace, on subdivise cet espace en quatre carrés de 2n-1*2n-1 cellules, en recommençant ainsi pour chaque carré aussi souvent que nécessaire jusqu'à ce que l'on obtienne des blocs homogènes (qui peuvent être de simples cellules) entièrement inclus dans la région ou disjoints d'elle (fig. 10). Cette décomposition peut être représentée par un arbre 4-aire (**quadtree**) : la racine représente l'espace tout entier, les quatre fils d'un noeud représentent les quatre carrés issus de la division, et les feuilles les blocs pour lesquels aucune division ultérieure n'est nécessaire (fig. 11). Comme pour le codage en squelette, la région homogène est représentée par l'union de blocs maximaux, mais ici les blocs doivent avoir une taille et une position prédéterminée (puissance de 2 cellules). Un espace correspondant à un ensemble de 2n*2n cellules nécessitera donc un arbre de hauteur maximum n. Il existe de nombreux algorithmes pour la construction et la manipulation des quadtrees (Samet 1984).



1. région

2. Décomposition en blocs de la région.

3. Représentation des blocs par un quadtree

fig. 10,11 : représentation par quadtrees.

Cette représentation est assez compacte et bien adaptée aux opérations graphiques et aux calculs des propriétés géométriques. Son principal intérêt est d'être de résolution variable, car un détail est représenté par une précision suffisante sans que les grandes régions homogènes ne nécessitent beaucoup de mémoire, tout en conservant une structure entre régions qui facilite les calculs graphiques.

3.3 La structuration et l'indexation de données multidimensionnelles.

La structuration des données géographiques en vue d'améliorer les opérations de recherche en mémoire de stockage est un problème plus général qui concerne l'ensemble des données graphiques de la base, quels que soient les modes de représentation choisis. Il s'agit ici des méthodes de partage ou d'indexation des objets, méthodes basées sur leur localisation absolue au niveau de l'espace initial de représentation (R2 ou R3). La nécessité d'une telle structuration est évidente car l'interrogation d'une base de données localisées va faire intervenir en priorité la localisation; une interrogation classique, dans un SIG, sera en effet du type: retrouver dans telle zone tous les objets de tel type qui répondent à telles conditions. Cette interrogation se décompose d'une manière optimale en:

-retrouver tous les objets dans une fenêtre contenant la zone d'étude.
-sélectionner les objets qui répondent aux critères de sélection.

La première opération, la sélection spatiale, est de loin le critère le plus contraignant, car il repose sur un attribut multidimensionnel (n=2 ou 3), face aux opérations de sélection sur les attributs monodimensionnels. Devant s'effectuer en priorité pour optimiser ces temps de recherche, elle nécessite l'accès possible à l'ensemble des données de la base sur les mémoires de stockage et représente l'opération la plus coûteuse en temps d'exécution. L'organisation des données sur les disques doit donc être conçue par rapport à l'attribut de localisation.

Les méthodes classiques de gestion de données ont pour objet de réduire le nombre des opérations d'accès aux mémoires de stockage. Elles sont basées sur des techniques d'indexation d'attributs monodimensionnels ordonnés (accès aléatoire, séquentiel indéxé) et ne sont pas applicables directement à l'attribut de localisation, qui est par nature multidimensionnel sans relation d'ordre compatible avec la structure euclidienne (Knuth 1973, Lee 1980) : on peut certes organiser l'indéxation d'un ensemble d'objets par leurs noms, grâce à l'ordre lexicographique par exemple, les regrouper en paquets grâce à la relation d'ordre, et stocker les objets de chaque paquet sur un secteur contigu des disques magnétiques, de manière à pouvoir accéder au paquet en une opération d'accès mémoire; en revanche, il n'est pas possible, pour le cas le plus simple de données ponctuelles, de structurer ces points de la même manière, avec un ordre sur les abscisses ou sur les ordonnées, indépendamment l'un de l'autre, sans perdre toute relation de voisinage entre deux points (il n'existe pas de relation d'ordre total dans les espaces euclidiens de dimension supérieure à 1). Une telle structuration est donc très inéfficace dans le cas qui nous intéresse, à savoir retrouver rapidement tous les objets d'une même fenêtre ou tous les objets proches d'un objet donné : ceci impose donc

un rapprochement logique (ou mieux physique sur les mémoires de stockage) des objets basé sur leur localisation. Il est nécessaire de développer pour cela des méthodes de gestion adaptées aux données localisées, ou plus généralement multidimensionnelles, méthodes bâties sur une structuration basée sur la notion de voisinage et de sous-ensemble borné pour la métrique choisie dans l'espace de représentation.

L'idée la plus simple, calquée sur les techniques du séquentiel indéxé (Gardarin 1983), est de décomposer l'espace en sous-ensembles bornés, appelés feuilles, d'indexer les objets par rapport à ces feuilles et d'effectuer les recherches séquentiellement dans les feuilles sélectionnées pour la fenêtre géographique d'étude.
Pour optimiser le temps d'accès à la mémoire de stockage, la taille d'une feuille sera choisie de manière à être lue en une seule opération d'entrée sortie, ce qui impose un stockage de tous les objets de la feuille sur un secteur contigu de la mémoire de masse. Le nombre des objets pouvant être très variable d'un endroit à l'autre de l'espace géographique, cette taille ne peut être fixée à priori sans perdre une place importante de la mémoire (les feuilles se trouvant dans des zones de faibles densité d'objets seraient alors presque vides). La taille d'une feuille doit donc être variable en fonction de la densité d'objet: si le nombre des objets d'une feuille dépasse le maximum, fonction de la taille de la page mémoire, cette feuille sera divisée en sous-feuilles, et chaque objet réaffecté à l'une de ces sous-feuilles. Cette division peut se faire de manière à faciliter le choix de la sous-feuille, pour une localisation donnée, et donc naturellement par dichotomie: la feuille est alors divisée en 4m (pour n=2) ou 8m (pour n=3) sous-feuille, où m n'est pas trop élevé pour ne pas créer un grand nombre de feuilles presques vides, et donc une importante place perdue sur les disques (le cas fréquent est m=1, fig. 12).

L'éclatement d'une feuille en sous-feuilles est une opération complexe, qui impose également la réorganisation des index basés sur les numéros de feuilles.
L'organisation des feuilles et les différents niveaux d'éclatement peuvent être représentés par un **m-quadtree** (**m-octree** pour n=3). Chaque noeud non terminal contient la description de la division et pointe vers ses fils, et chaque noeud terminal contient l'adresse de la feuille dans la mémoire de stockage (fig. 13). Un tel quadtree est appelé **"région quadtree"**, par opposition aux quadtrees vus plus haut, servant à représenter directement un espace découpé en cellules.

La recherche sur la localisation (sélection géographique) se fait donc par descente dans l'arbre: à chaque niveau sera choisi le fils qui contient la feuille cherchée, jusqu'au noeud terminal qui donne l'adresse de la feuille. Si m est choisi de manière à ce que la lecture d'un noeud nécessite qu'une entrée-sortie (la recherche du fils se faisant en mémoire centrale), l'adresse de la feuille est déterminée en quelques entrées-sorties (E/S). Par exemple, pour m=3, l'adresse d'une feuille parmi 16.106 se fera en 4 E/S, soit environ 0.2 secondes: sur un espace géographique de la taille du Brésil (625 degrés carrés), la recherche d'une feuille de 30 mètres de coté nécessiterait moins d'une demi-seconde. Pour m=1, ce temps est au maximum d'une seconde. La recherche des feuilles voisines fait appel à des cheminements dans le

quadtree, et ne demande donc elle aussi que quelques opérations d'E/S (Samet 1984).

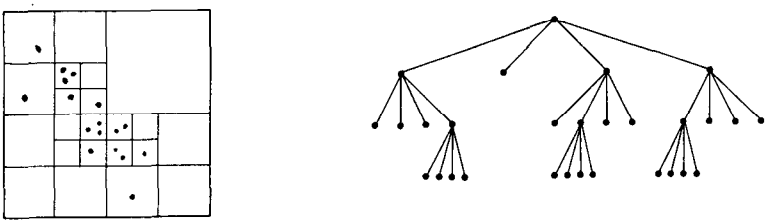


fig. 12,13 : hiérarchie en feuilles et "**region quadtree**" associé.

L'inconvénient majeur de la partition en "région quadtree" est le côté arbitraire du découpage en quatre régions égales, ce qui peut provoquer un important déséquilibre de l'arbre si les données ne sont pas réparties de manière relativement homogène dans l'espace, et donc une baisse notable des performances du système. Pour remédier à ce problème, on peut utiliser un découpage récursif qui tient compte de la position des objets de manière à optimiser le nombre des objets présents dans chaque partie du découpage, à l'image des k-d tree (Matsuyama 1984). Bien sur, le découpage doit alors être mémorisé car il n'est plus implicite comme dans les "region quadtree"; la recherche des feuilles du k-d tree contenues dans la fenêtre d'étude se fait également par descente dans un arbre binaire, mais en consultant pour chaque noeud la manière dont l'espace a été découpé (fig. 14).

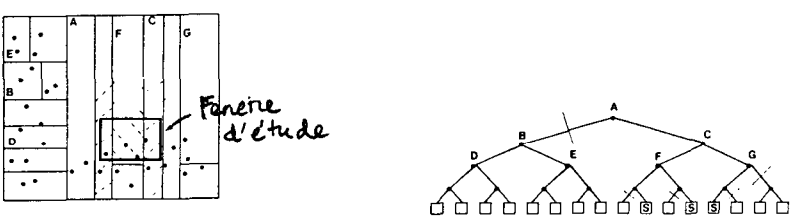


fig.14 : découpage en k-d tree et arbre binaire associé.

La recherche d'un objet doit pouvoir se faire également sur la valeur de l'une de ses clés, sans connaître la localisation: par exemple, un nom de ville doit permettre de retrouver rapidement l'adresse de la feuille qui la contient. Ce type de recherche nécessite la mémorisation pour chaque objet de l'adresse de la feuille auquel il appartient: ceci revient à créer pour la clé choisie un index dense, et d'organiser cet index de manière classique en arbre B+ ou en paquets: quelques opérations d'E/S suffiront à retrouver l'adresse de la feuille qui contient l'objet. Les objets voisins se trouveront alors dans la feuille sélectionnée ou dans les feuilles adjacentes, faciles à déterminer grâce à l'indexation principale sur la localisation en cheminant dans les arbres associés. Ces index, nécessairement denses, peuvent occuper une place importante.

Comme nous l'avons vu plus haut, l'éclatement et l'agrégation de feuilles imposent la réaffectation des objets dans les feuilles et donc la réorganisation des index. Toutes ces opérations sont relativement complexes à mettre en oeuvre.

L'affectation d'un objet dans une feuille est simple pour les données ponctuelles, car il n'existe jamais qu'une seule feuille qui contienne le point. Tout se complique lorsque ces objets sont des lignes ou des zones, car ils peuvent alors ne pas être contenus strictement (au sens de l'inclusion) dans la feuille et l'unicité du choix d'affectation n'est plus assurée. Diverses solutions peuvent être apportées à ce problème. La plus simple consiste à affecter un centroïde à chaque objet et à stocker l'objet dans la feuille qui contient le centroïde. Une telle solution a l'inconvénient majeur d'éliminer d'une feuille tous les objets qui n'y ont pas leur centroïde, même s'ils ont une partie importante incluse dans la feuille. Une autre alternative serait de diviser les objets en sous-objets en introduisant le bord de la feuille, mais cette méthode complique beaucoup les manipulations nécessaires au stockage et à l'extraction des données. Matsuyama propose de conserver avec chaque feuille le numéro des enregistrements de tous les objets totalement ou partiellement contenus dans la feuille: la sélection d'une feuille par descente dans le k-d tree ou le "region quadtree" permet de déterminer l'ensemble des feuilles à consulter ainsi que le numéro des objets dans chaque feuille (Matsuyama 1984).

Le problème peut etre résolu d'une manière différente, en conservant une feuille à chaque niveau de la structure arborescente, où ne seront stockés que les objets qui ne peuvent être contenus entièrement dans aucunes des feuilles des niveaux suivants. Evidemment, la gestion des données en est fortement compliquée, car ces feuilles ne peuvent être éclatées quand elles sont pleines, et doivent alors être chainées entre elles comme des paquets de débordement. Pour n=2, le nombre des objets possibles à un niveau est néanmoins limité par la surface de la feuille; les objets fortements convexes (surface/périmetre2 << 1/4*pi) ainsi que ceux de petite surface qui sont coupés par les premières divisions de l'espace sont les plus problématiques. Si l'on arrive à résoudre le problème de l'affectation de ces petits objets mal placés par rapport à la division de l'espace, cette structure multi-niveau introduit une hiérarchie dans l'encombrement des objets qui peut également constituer un critère de sélection intéressant (Frank 1981).

Notons pour conclure ce chapitre que très peu de systèmes mettent en oeuvre ces techniques de structuration, qui relèvent encore pour la plupart du domaine de la recherche et de l'expérimentation. De nombreux systèmes ne sont pas aptes à fournir des performances valables lorsque la taille de la base de données géographiques est importante, et n'offrent pas alors les possibilités d'interactivité qui semblent néanmoins nécessaires à un système performant.

4. Les possibilités classiques des SIG.

Comme il a été dit plus haut, les SIG offrent des possibilités d'archivage, de traitement et de restitution rapide de données géographiques. On peut ainsi mémoriser un grand nombre d'informations sur un territoire, définir une fenêtre d'étude, sélectionner des données sur cette fenêtre, croiser ces données, calculer des distances, des surfaces, modifier les projections... Les principaux domaines d'application des SIG sont :

- la maîtrise administrative d'un territoire.

- la description des ressources naturelles.

- la gestion des inventaires et l'exploitation des ressources.

- la gestion et le suivi de l'exploitation des sols, le zonage et l'aide à l'aménagement.

- la constitution et la gestion de l'infrastructure.

- la surveillance de l'environnement.

- l'exploitation des recensements et des ressources humaines.

- la gestion du milieu transformé.

- l'épidémiologie et les études sanitaires localisées.

Dans tous ces domaines, les SIG apportent une avancée quantitative et qualitative importante: rapidité d'accès à l'information, toutes manipulations de sélections, croisements, recherches thématiques, utilisation du facteur temps, aide à la visualisation de résultats, aide à la cartographie... Bien sur, la création d'un SIG impose également de lourdes contraintes: conception uniforme des données, coût de la saisie (pour les données graphiques notamment), automatisation et administration du processus de recueil des données, coût des matériels et des logiciels. Toutes ces contraintes sont à évaluer soigneusement avant d'investir dans le développement d'un SIG, sous peine de ne pouvoir utiliser toutes les possibilités envisagées.

4.1 Aujourd'hui: les possibilités d'un système idéal.

Avancée qualitative et quantitative, concrètement, cela représente des avantages et des possibilités nouvelles qui se résument grosso modo à:

* un support très compact de l'information, inaltérable, facilement

duplicable, et sans rapport avec le stockage de cartes classiques, souvent encombrantes sinon épuisées;

* des données maintenues et consultées à faible coût, assurant ainsi la pérénité et l'amortissement rapide du travail initial de saisie, et constituant un des interêts majeurs des SIG face au caractère temporel de certaines cartes classiques;

* la rapidité de consultation des données, qui sont souvent dispersées sous la forme cartographique, et souvent plus difficiles à manipuler;

* des possibilités variées de calculs rapides (mesures métriques, projections, perspectives, coupes et autres transformations géométriques) et d'analyses graphiques difficiles sinon impossibles à réaliser manuellement: modèle digital, calcul d'ombrage et de réflexion, calcul de concavité, extrapolation graphique...

* des possibilités de manipulation de données géographiques (sélections géographiques, agrégations, superpositions, etc) et de visualisation rapide permettant un travail interactif (choix de classes d'agrégation, des attributs à visualiser, extractions thématiques);

* un système de gestion de données descriptives permettant de relier données graphiques et données descriptives, par la manipulation et la mise en relation possible d'un volume important d'information, l'utilisation de techniques d'analyse de données, et la visualisation immédiate des résultats obtenus;

* la possibilité d'utiliser un volume important de données à des fins de simulation et de modélisation, et de visualiser les résultats (potentialités, simulations économiques, etc.);

* l'utilisation du facteur temps, afin d'assurer un suivi des données au niveau temporel;

* l'interactivité graphique et l'aide à la cartographie, dans la conception graphique et la production automatisée;

* la possibilité d'administrer des données provenant de sources diverses (données physiques, enquêtes, statistiques, télédétection, ect.) et d'intégrer dans un même flux le recueil, la gestion la manipulation de données géographiques jusqu'au processus de prise de décision;

Les systèmes existants ne présentent chacun qu'une partie (souvent petite) de ces possibilités, dont l'ensemble constitue un système "idéal" qui peut servir de référence à l'expression des besoins et l'évaluation des systèmes existants (Tomlinson 1976).

Nous allons étudier plus en détail les possibilités d'un tel système en les regroupant en trois sous-ensembles:

- l'acquisition, la saisie et le stockage des données.
- la gestion et l'analyse, les possibilités de calcul et de manipulation graphique.
- l'édition des résultats et la cartographie.

4.1.1 Acquisition, saisie et stockage.

L'acquisition des données dépend surtout du flux d'information et de son administration. Il y a une grande différence entre les petits systèmes, qui vont trouver l'information sur quelques documents existants disponibles, et les gros systèmes qui vont demander toute une infrastructure d'administration de données (récolte, homogénisation, validation, saisie, contrôle, correction, intégration) pour gérer un flux constant d'information provenant de sources diverses, à l'image de l'administration de bases de données classiques. La composante spatiale complique bien sûr ce processus d'administration à toutes les étapes, vu les différents modes de representation possibles pour la spatialisation.

La saisie graphique, comme nous l'avons vu en 3.1, s'effectue par les procédés suivants:

- saisie sur numériseur manuel,
- saisie par suivi automatique de trait,
- saisie par balayage (raster-scanner) ou par caméra à numériser.
- saisie manuelle par codage de cellules.

Nous ne reviendrons pas sur ces techniques. Juste quelques remarques pratiques sur les problèmes posés par les erreurs de saisie graphique.

Les problèmes de validité sont importants, et se situent aussi bien à l'étape de digitalisation elle-même, qu'à l'étape ultérieure d'intégration par rapport à d'autres feuilles. Surtout pour la saisie de zones, les erreurs sont à l'origine de problèmes ultérieurs sérieux pour tout ce qui est sensible à la topologie: par exemple, la fermeture des zones est nécessaire pour le passage en ligne, le coloriage, le calcul des surfaces, etc... De même, le raccord entre feuilles numérisées séparément les unes des autres est indispensable à tout traitement ultérieur faisant intervenir plusieurs feuilles. Tous les procédés de saisie (hormis le codage manuel, bien sûr) introduisent des erreurs de ce type (fermeture, simplicité, extra-simplicité) qui sont plus ou moins difficiles à détecter (erreurs dans les zones adjacentes, création de zones parasites, croisement d'arcs...).

Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients :

- la saisie sur table à numériser comporte des risques d'erreur importants si la méthode n'est pas contraignante et dirigiste pour l'opérateur. Elle peut également être performante car elle permet de prendre en compte immédiatement la topologie et donc d'effectuer des contrôles interactifs qui éliminent la plupart des erreurs délicates à corriger ultérieurement. Par contre, c'est une opération longue et donc couteuse (de l'ordre de trois à cinq jours/homme pour une carte zonale de moyenne complexité, c'est-à-dire cinq cents à huit cents zones).

- la saisie par balayage (raster-scanner) ne permet que difficilement un contrôle sur la topologie et exige des traitements ultérieurs si l'on veut que le document soit topologiquement correct. Le document ne doit comporter que l'information à saisir, à l'exclusion de toute autre information (nom, symbole, fond de carte...) sous peine de création d'éléments parasites. Le contrôle interactif est bien sûr impossible,

et les vérifications ou corrections peuvent être longues et difficiles. Si la saisie en elle-même est rapide, les performances peuvent être nettement dégradées par les problèmes de validation si l'on désire des résultats exempts d'erreurs topologiques.

- la saisie par suivi automatique de trait offre, entre la table à digitaliser et le raster scanner, un compromis qui peut être interessant dans certain cas. Comme dans tout procédé automatique, le document ne doit contenir que l'information graphique à numériser.

Les problèmes liés à la correction ou à la modification sont également nombreux. Il est nécessaire de disposer d'un éditeur graphique qui facilite les manipulations de l'information graphique (afficher une zone, retrouver un arc, une ligne, etc.), et de modules de modifications interactifs qui conservent l'intégrité des relations topologiques.

Des opérations cartographiques peuvent être nécessaires à ce stade :

- le raccordement de trait entre les différentes feuilles saisies pour les assembler et faire disparaître les traits dus aux bords des cartes et séparant des zones de mêmes caractéristiques.
- le filtrage des arcs de manière à éliminer des points superflus ou à lisser les courbes.
Ces opérations doivent conserver la cohérence topologiques des objets.

Il convient en fait de faire une différence entre les niveaux d'utilisation de l'information graphique, car, comme nous l'avons vu, certaines erreurs n'ont pas la même importance s'il s'agit de restituer les éléments graphiques pour du dessin ou de les utiliser pour des traitements faisant intervenir la topologie (surtout pour les zones). De nombreux systèmes n'effectuent en effet la numérisation de carte qu'à des fins de restitution du document, sans relation avec d'autres cartes et sans aucun traitement autre que graphique (les restituteurs analytiques informatisés, les systèmes de topographie, etc.). Cette numérisation utilise alors souvent un raster-scanner. Ces systèmes de cartographie automatique ne peuvent être considérés comme des SIG à part entière car ils n'intègrent que peu de données descriptives et ne permettent que la manipulation des données graphiques.

Certaines données se présentent par contre sous une forme déjà codées, comme les images satellitaires ou les images radar. Paradoxalement, elles ne sont encore que peu utilisées dans les SIG. Elles font l'objet de systèmes spécialisés d'archivage avec quelquefois classification sur des primitives obtenues par des opérateurs de reconnaissance des formes (Chang 1981). Reste à résoudre, pour intégrer ce type de données dans un SIG, tous les problèmes de recalage en coordonnées géographiques car ces images comportent des déformations globales et surtout locales dont la correction exige des traitements relativement lourds.

La saisie des données descriptives se fait d'une manière classique. Ces données sont associées aux données graphiques soit par repérage préalable (attribution aux zones d'un numéro et d'une clé des dèscripteurs), soit par la visualisation sur écran graphique des éléments graphiques saisis auparavant (on pointe avec un stylet sur l'objet et on saisit les descriptifs).

Le stockage des données se fait sur disque ou sur bande. Les techniques de stockage physique vont être bien sûr différentes suivant la taille du système et l'organisation utilisée : un petit système n'aura sur disque que quelques cartes, alors qu'un gros système va nécessiter la disponibilité simultanée d'une grande quantité d'information. Les accès disques restent néanmoins le goulot d'étranglement des systèmes, et les performances futures seront liées à l'évolution technologique dans ce domaine (disques optiques, etc.).
Il est difficile de citer la taille mémoire nécessaire au stockage d'une carte (pour l'information graphique), car cette taille dépend essentiellement de la complexité de la carte et de la précision de numérisation. Par exemple, pour quelques centaines de zones saisies à une précision de 0.5 mm, la taille varie de 100 à 500 Koctets.

4.1.2 La gestion et la manipulation des données.

Les principales fonctions de gestion de l'information sont, à l'image des systèmes classiques de gestion de données :

* l'extraction, la sélection, la mise en relation d'attributs descriptifs (par exemple, sélection de tous les départements ayant telle densité de population et impression du nombre de voix obtenues par un candidat);

* la manipulation des données descriptives par les fonctions classiques des systèmes de gestion de bases de données (structuration, archivage, recherche, mise à jour, modification);

* la création de nouvelles variables par calculs numériques ou logiques sur les valeurs descriptives, par calculs statistiques, par classification et techniques d'analyse de données;

* le tri et l'impression des résultats.

L'attribut de localisation fait l'objet de manipulations spécifiques liées à la métrique, qui sont soit des opérations nouvelles de gestion, soit des mesures graphiques :

* l'extraction et la sélection sur des attributs de localisation : sélection de feuilles, définition de fenêtres soit directement en coordonnées géographiques, soit par rapport à d'autre objets graphiques (tampon, couloir, zone d'influence, etc.);

* la mise en relation géographique : croisement de zones, de points et de zones, etc. On peut également créer de nouveaux objets graphiques ayant des valeurs descriptives provenant de plusieurs relations différentes, dénombrer des objets ponctuels se trouvant dans des zones présélectionnées, etc. (par exemple, faire la moyenne du pH de tel horizon des profils pédologiques se trouvant dans les zones de telle formation végétale ou de tel type de sol);

* l'agrégation graphique de zones résultant d'une classification sur les attributs descriptifs : les frontieres de zones adjacentes appartenant à une même classe sont supprimées;

* la création d'éléments par interpolation (centroïdes, zonage à partir

de points valués), courbes d'isovaleurs, modèles numériques de terrain;

* les mesures géométriques : distances entre deux points; distance d'un point à une ligne, à une zone, distance le long d'une ligne. Calculs de superficies et de périmètres;

* les calculs d'optimisation (plus court chemin), les calculs en dimension trois (visibilité, réflexion, écoulements, etc.);

Les calculs dépendent de la projection utilisée; les SIG présentent en général des possibilités de choix de la projection de travail et de restitution.

4.1.3 L'édition des résultats et la cartographie automatique.

Si l'impression des résultats descriptifs classiques ne pose pas de problèmes particuliers, l'impression de la localisation en deux dimensions est une opération cartographique plus complexe et réclamant surtout des matériels nettement plus coûteux. Les systèmes apportent en général la possibilité de choisir des paramètres de restitution :

- choix de la projection,
- choix de l'échelle,
- choix interactif des figurés, couleurs, trames, type de trait, symboles associés aux données descriptives.

Cette cartographie fait appel aux objets graphiques conservés et manipulés par le système. La plupart des systèmes présentent également des possibilités de cartographie automatique basées sur des techniques de dessin assisté par ordinateur : des fichiers graphiques sont créés par des opérateurs qui ont à leur disposition un grand nombre de types de traits, de symboles, de polices de caractères, etc. Ces fichiers ont pour objet d'être restitués (avec toujours le choix de la projection et de l'échelle) sans possibilités de gestion autre que graphique.

Les systèmes de cartographie automatique ont pour objet l'automatisation du processus de production cartographique, à l'image des systèmes de CFAO pour l'industrie. Ces systèmes ne sont pas à classer comme systèmes d'information et, faisant souvent appel à du matériel lourd, leur utilisation est réservée aux services de production cartographique pouvant assurer leur amortissement. Leur étude sort du cadre de cet article.

On trouve une grande diversité dans les matériels de restitutions utilisés dans les SIG, suivant l'importance du système et la qualité requise pour les sorties graphiques :

- la qualité peut être très médiocre : c'est le cas d'un grand nombre de petits systèmes qui utilisent une imprimante matricielle classique ;
- de petits traceurs à plumes (huits plumes en général) offrent, dans un format A3, le meilleur rendement pour des systèmes basés sur micro-ordinateur ;
- une qualité moyenne ou bonne peut être obtenue par l'utilisation de traceur à plume (format A0) ou à jet d'encre (format A3) ;
- le développement de traceurs électrostatiques couleur et l'abaissement des coûts, actuellement surévalués pour ce type de

matériel, devrait permettre à des systèmes moyens d'atteindre une bonne qualité dans des formats A1 ou A0.
- les grands SIG ainsi que les systèmes spécialisés de cartographie automatique utilisent des traceurs à plat, munis d'outils de gravure, ou des techniques d'impression photographique directe de grandes matrices de points de très bonne définition par procédé laser.

L'évolution des matériels de restitution devrait favoriser les technologies jet d'encre et électrostatique, le traceur à plumes devant perdre petit à petit l'importance qu'il a actuellement. La fiabilité et la rapidité du tracé électrostatique confère à cette technologie un atout important face aux autres matériels.

4.2 Choix, mise en place et exploitation d'un système.

Comme pour tout système d'information, la mise en place d'un SIG important est une opération délicate qui demande une approche rigoureuse et l'évaluation précise des besoins et des moyens disponibles. L'analyse générale décrite ci-dessous doit aboutir à la décision de faisabilité et au calendrier de mise en place (Tomlinson 1976). Elle se compose de trois étapes principales (fig. 15) :

- la rédaction d'un cahier des charges décrivant les objectifs et les besoins de l'application, l'évaluation des données nécessaires au fonctionnement ainsi que les flux d'acquisition ;

- l'évaluation des spécifications du système et de ses objectifs, en fonction du cahier des charges, puis l'étude des systèmes existants sur le marché ; cette étape doit déboucher sur une évaluation de la faisabilité de l'opération et des coûts qu'elle implique (matériel, fonctionnement) ;

- l'évaluation finale des différents choix possibles en termes de bénéfice et de coûts, en prenant en compte l'ensemble des conclusions des deux premières étapes.

A partir des décisions d'acquisition, l'organisation logique de la mise en place et de l'exploitation sera décomposée en sous-systèmes suivant une analyse organique précise (fig. 16) :

- Un organe de mise en place et d'administration générale du système, qui aura la charge de répondre aux besoins humains et financiers tout au long de la période de développement et de mise en place, d'établir les plans de formation et d'assistance aux utilisateurs, de gérer l'évolution future du système en fonction des résultats d'exploitation. Il aura également la charge de rassembler et gérer la documentation technique de l'ensemble des sous-systèmes.

- Un organe d'acquisition de données qui va permettre de gérer les divers flux d'informations. Les flux peuvent être réguliers ou propres à une application précise. Il aura la charge d'évaluer et décrire les sources d'information, les modalités d'accès et les procédures d'acquisition.
Cet organe est des plus important pour le fonctionnement régulier d'un système d'information. Il devra également guider et renseigner les utilisateurs en insistant sur les contraintes imposées par un système

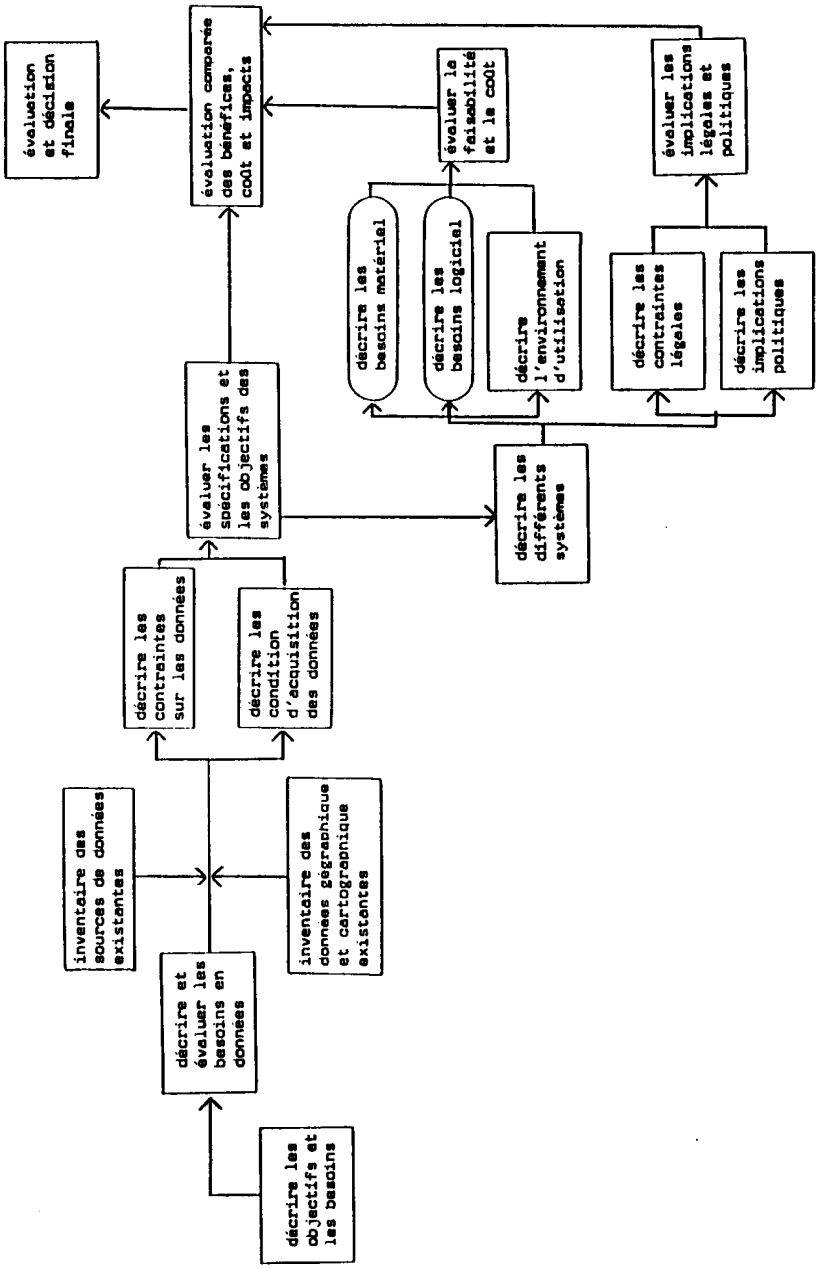


fig 15 : les étapes de la décision.

d'information géographique : conception uniforme des données, coût de la saisie, coût de l'exploitation, etc.

- Un organe de saisie et d'intégration des données : structuration, homogénéïsation, validation, codage, saisie, contrôle, correction et intégration des données suivant les techniques requises par le système d'information et de manière à produire des informations directement exploitables. Les différents problèmes de la saisie graphique seront traités par cet organe.

- Un organe d'exploitation et d'analyse des données assurant la réponse aux demandes des utilisateurs. Cet organe pourra être conçu de manière à faire participer les usagers à l'utilisation interactive en fournissant assistance, conseils et documentation. Il pourra également être conçu comme un bureau d'étude et fournir des réponses aux questions posées en se chargeant de l'ensemble de la procédure d'exploitation et de mise en forme définitive des données.

Futurs gestionnaires et administrateurs de systèmes d'information géographiques, la tâche est difficile ! Et si les apports et possibilités d'un système bien géré sont très importants, les contraintes d'utilisation sont également nombreuses. Pour peu qu'une mauvaise analyse initiale ait de plus oublié de spécifier tous les moyens nécessaires à une bonne mise en place, notamment en ce qui concerne les flux de données, alors commencent retards et difficultés d'exploitation qui peuvent facilement mener à des bilans financiers désastreux.

4.3 Madame Soleil.

L'effort de recherche et de développement actuel dans le domaine des systèmes d'information géographiques s'oriente principalement dans trois directions :

- La prise en compte, la mise en relation et la gestion évoluée de données localisées en appliquant les techniques des SGBD les plus récents. Ainsi, on évolue vers des systèmes qui intègrent aussi bien des données statistiques que des images satellitaires ou des photographies aériennes, et qui permettent de manipuler et d'éditer avec souplesse l'ensemble de l'information disponible.

- La réflexion sur les structures de modélisation et de prise en compte de la donnée géographique : suppression de la notion de limite, caractère probabiliste de l'information, langages de description et primitives de localisation mieux adaptés au caractère continu de l'espace, aux différentes échelles géographiques utilisées.

- L'apport de l'intelligence artificielle pour l'exploitation de données géographiques ou d'images satellitaires : recherche de regles d'expertise, aide à l'interprétation des images et à l'extraction de primitives graphiques et descriptives.

Nous sommes maintenant à un tournant décisif : l'informatique doit permettre de concrétiser et réaliser certaines réflexions sur les méthodes de la géographie, sur la manière d'appréhender et de représenter l'espace sous toutes ses formes. C'est un peu la même chose

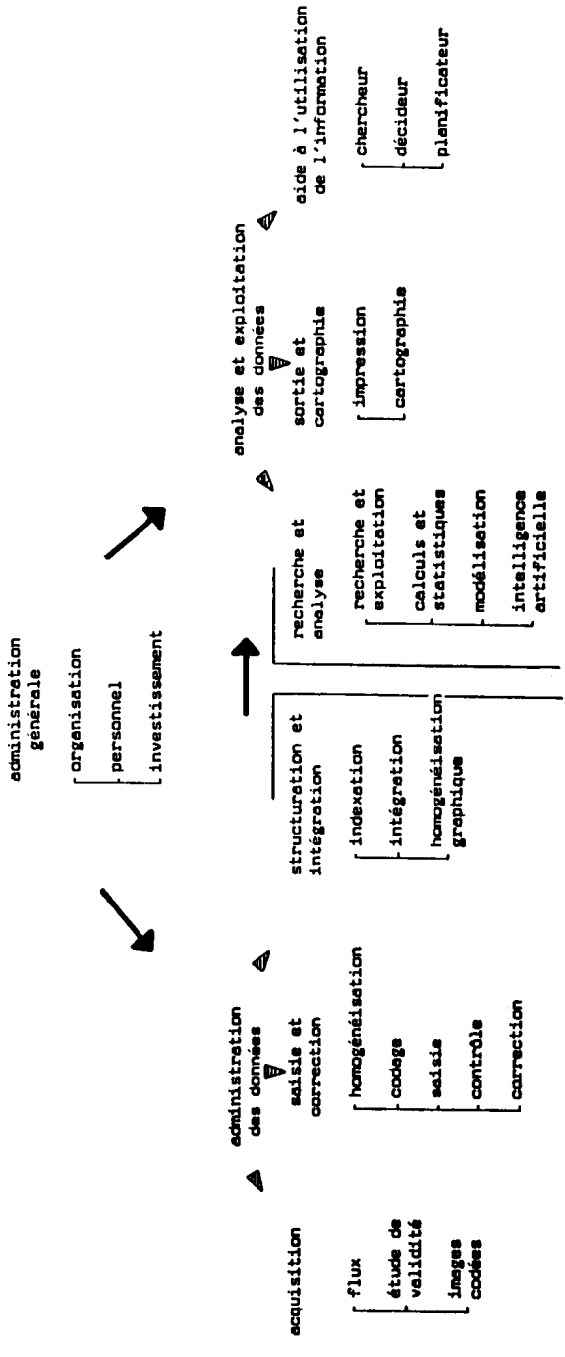


fig. 16 : organisation et exploitation optimale d'un système.

chaque fois que l'on introduit l'informatique dans un domaine de réflexion : il ne s'agit pas seulement d'automatiser ou d'améliorer les méthodes existantes, il faut en profiter pour revoir en même temps toutes les contraintes qui les ont introduites et souvent justifiées. L'appui de machines potentiellement plus puissantes que l'on ne veut encore souvent l'admettre, peut permettre de s'affranchir de certaines de ces contraintes. Alors, ici comme ailleurs, pas d'alternatives : le chercheur, le thématicien devra apprendre les grandes possibilités de l'informatique et les intégrer à son imagination, avec les restrictions scientifiques que seul il saura définir, et l'infologue devra essayer de provoquer cette reflexion et la guider dans les limites de la réalisation technique. Conjonction de Reclus et de Turing dans la constellation du futur : perspectives encourageantes.

Deuxième partie : L'EXTENSION DU MODELE RELATIONNEL.

La conception relationnelle des données permet de définir des méthodes et des techniques de gestion et de manipulation très puissantes. Etendre cette conception aux données localisées représente une avancée importante quant aux possibilités offertes par la manipulation de ces données pour la gestion et la compréhension de l'espace. Les données localisées, ce sont avant tout des cartes et des légendes associées : c'est du moins ainsi qu'elles sont perçues par la plupart. Pour raisonner en terme de gestion de données, il va être nécessaire d'inverser cette approche, et de considérer les données géographiques localisées comme des collections d'éléments décrits par un certain nombre de paramètres dont la localisation est un entre tous. C'est, en quelque sorte, remettre la carte à sa place comme l'expression d'un paramètre, comme la visualisation d'un attribut au même titre qu'une liste de valeurs numériques sur une imprimante. Nous allons donc, dans un premier temps, rappeler des notions fondamentales sur les systèmes de gestion des bases de données relationnelles.

5. Notions classiques sur les SGBD.

5.1 Objectifs et organisation.

Un SGBD, c'est avant tout un interface entre l'usager et les mémoires de stockage lui donnant l'illusion d'avoir des données stockées et assemblées comme il le souhaite et d'être le seul à les utiliser. C'est également et surtout un outil de gestion permettant de rechercher, modifier, insérer efficacement des données dans une grande masse d'informations, partagée par tous les usagers suivant leurs droits d'accès, chacun travaillant sur sa vision et sa propre structuration de l'information.

Ainsi, à l'inverse des systèmes de gestion de fichiers (SGF), les SGBD permettent la description des données (définition des noms, formats, caractéristiques) de manière indépendante de leur utilisation (recherche, mise à jour). Ils se composent grossièrement de trois couches successives de fonctions, depuis les mémoires de stockage jusqu'à l'usager (fig. 17) :

- le premier niveau (SGF) assure la gestion des fichiers et relie organisation physique (sur les disques) et organisation logique (fichiers). Ce niveau est inaccessible à l'usager ;

- le second niveau assure la gestion des données stockées, le placement, l'assemblage, les liens entre les données (pointeurs), et les structures permettant de les retrouver rapidement (schémas) : c'est le système d'accès aux données (SGBD interne) ;

- le troisième niveau est chargé de la présentation des données aux applications et aux usagers, de l'analyse, de l'interprétation et de l'optimisation des requêtes, et de la mise en forme des données à échanger avec le monde extérieur (SGBD externe).

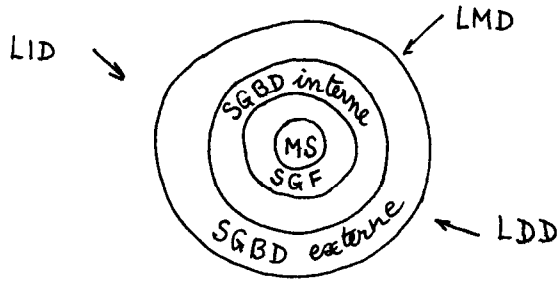


fig. 17 : les trois couches d'un SGBD.

Chaque niveau utilise des langages adaptés : langage de description de données (LDD), langage d'interrogation (LID), langage de manipulation (LMD).

Comme nous l'avons dit, l'objet principal des SGBD est l'utilisation partagée d'un même ensemble de données par plusieurs utilisateurs n'ayant ni la même vision, ni les mêmes applications. Un SGBD doit donc assurer la non redondance, la sécurité, la cohérence des données stockées. Ces objectifs impliquent :

- l'indépendance physique entre structure de donnée et structure de stockage.
- l'indépendance logique entre structure de donnée modélisant le monde réel et structure de donnée d'une application.

Il est nécessaire de mettre en place plusieurs niveaux de description pour les données (fig. 18) :

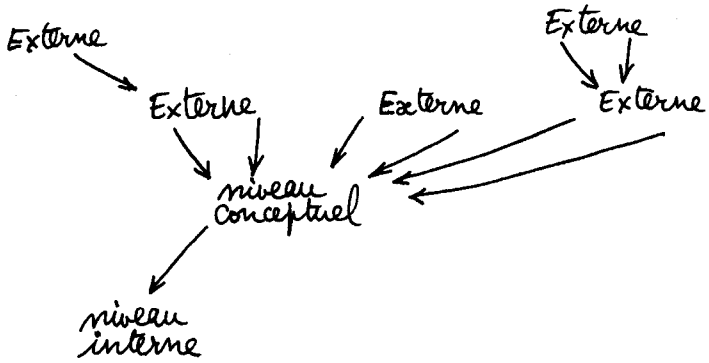


fig. 18 : les différents niveaux de descriptions.

Le niveau conceptuel correspond à la structure canonique des données telles qu'elles apparaissent dans le monde réel. Plusieurs modèles peuvent être utilisés pour définir le schéma conceptuel. On utilise en général le modèle entité association qui permet de définir :

- les types de données élémentaires définissant les attributs des objets : nom de département, valeur de pH, type de sol, nombre de lits;
- les types de données composées correspondant aux objets ou entité du monde réel : département, horizon, pédologie, hôpital ;
- les types de données composées permettant de décrire les objets correspondant à des associations du monde réel. Ces types contiennent des attributs provenant d'autres entités : malade, décrit par des attributs nom de personne, nom d'hopital, date d'entrée, etc.

Le niveau conceptuel est complété de règles de cohérence entre les attributs d'une entité ou d'une association.

Le second niveau de description correspond aux données telles qu'elles sont percues par l'application ou l'usager : c'est le niveau externe. A ce niveau peuvent bien sûr coexister plusieurs schémas externes, chacun se rapportant à une application.
Le troisième niveau correspond à la structure de stockage (fichiers, chemins d'accès aux données).

C'est le SGBD qui va faire le lien entre les différents niveaux de description : il a besoin pour cela de toutes les descriptions de données et des règles de correspondance entre ces descriptions, qui sont conservées dans ce que l'on appèle le **dictionnaire des données**.

Prenons quelques exemples:

Considérons la gestion de données cadastrales. Nous avons un certain nombre d'entités : la parcelle, le propriétaire, la construction, le plan d'occupation des sols, le lotissement, les réseaux aériens et souterrains, le quartier ..., et des associations : le permis de construire, le certificat de conformité...
Chaque entité ou association possède des attributs : pour la parcelle, nous pourrions avoir le numéro de parcelle, le numero de section, le nom du propriétaire, le classement au P.O.S., le coefficient d'occupation, le prix au mètre carré; pour la construction, le numéro de la parcelle, la section, la surface habitable, le nombre d'étages, la fonction, le type, pour le permis, le numero de permis, le nom du propriétaire,le numéro de la parcelle,la section,la date de dépôt,etc.
Une gestion des parcelles n'aura pas besoin de l'ensemble de ces attributs. Le schéma externe présenté par le SGBD à l'application fera apparaître, par exemple, une structure contenant :
parcelle, avec numéro de parcelle, section, nom du propriétaire, permis demandés, permis obtenus, constructions sur la parcelle, fonction de la construction, type.

Autre exemple : une entité établissement scolaire, avec les attributs nom, type, nombre d'élèves, nombre de professeurs, nombre de classes de niveau i, une entité professeurs avec les attributs nom, age, sexe, niveau, nom de l'établissement, classes enseignées, matières enseignées, une entité département avec nom, nombre d'habitants, taux de croissance, taux de fécondité.

Différents niveaux externes peuvent être utilisés à partir de ce schéma. Une application à la gestion des professeurs en fonction des attributs de l'établissement aura une certaine vision des données : professeur, avec nom, age, sexe, matière, nom d'établissement, type, qui lui permettra par exemple d'étudier l'âge des professeurs de mathématiques dans les collèges.
Si une application veut étudier le nombre de classes de tel niveau dans les départements à tel taux de croissance ou de fécondité, le schéma externe pourrait être : département avec nom, taux de croissance, taux de fécondité, nom d'établissement, nombre de classe de niveau i.
Néanmoins, ce schéma externe exige que l'on puisse relier établissement et département, en donnant par exemple le nom du département pour chaque établissement.

La description des données va indiquer le type (qualitatif, quantitatif, nominal, ordinal, numérique), les formats, ainsi que des contraintes de validité et d'intégrité.

5.2 Le modèle relationnel.

Le modèle relationnel consiste à représenter les entités et associations du monde réel par des relations, ensembles de valeurs d'attributs qui décrivent les objets des entités ou associations, et de manipuler les relations pour répondre aux intérogations. C'est le système de gestion qui s'occupe de déterminer les chemins d'accès aux données en fonction de l'interrogation, alors que les autres modèles de base de données (hiérarchique, réseau) fixent ces chemins d'accès et donc limitent les possibilités d'interrogations.
Chaque relation est caractérisée par son schéma (ensemble d'attributs), porte un nom, et les éléments de la relation sont appelés des tuples. Par exemple, le modèle présenté plus haut peut donner lieu aux relations suivantes :

nom de relation	attributs			schéma		
établissement	nom	type	nb. d'élèves	nb. de prof.	nb. de term. C	nb de term. A
	Louis-Le-Grand	lycée	1859	156	4	2
tuple	Montaigne	lycée	2524	236	0	4
	....					

Une mauvaise perception du réel et une mauvaise conception des entités et associations engendrent des problèmes dans les relations qui leur correspondent. Par exemple, si l'on définit une relation canton avec les attributs nom de canton, nombre d'habitants, nom de département, taux de croissance du département, des informations vont être redondantes car les données sur le département seront répétées pour tous les cantons d'un même département. De même, dans l'exemple précédent, l'entité professeur ne doit pas donner une relation avec le même schéma, car si un professeur enseigne dans deux classes différentes, nous aurions deux tuples différents mais contenant tous deux les même informations sur le professeur (age, sexe, ...).

Il est nécessaire pour bien définir les relations d'étudier les propriétés sémantiques des données et de définir les dépendances entre attributs qui en résultent. Ces dépendances se classent en trois types:

a) Les dépendances fonctionnelles : un attribut B dépend fonctionnellement d'un attribut A si à toute valeur de A correspond une valeur unique de B, soit

A --> B <=> ((xy∈R et xy'∈R) => y=y')

Par exemple, le nom de professeur détermine son age et son sexe, le numéro de la parcelle et le nom de la section cadastrale déterminent de manière unique les autres éléments de la parcelle.
On peut introduire ici la notion fondamentale de clé d'une relation : c'est un ensemble minimal d'attributs qui détermine de manière unique tous les autres (tous les attributs sont en dépendance fonctionnelle de la clé) . Ainsi, nom d'établissement est une clé de la relation établissement, numéro de parcelle et nom de section est une clé de la relation parcelle.

b) Les dépendances multivaluées qui caractérisent l'indépendance de deux ensembles d'attributs corrélés à un même troisième : B dépend de A, si toute valeur de A détermine un ensemble de valeurs de B indépendamment des autres attributs de la relation, soit

A ->-> B <=> ((xyz∈R et xy'z'∈R) => (xy'z∈R et xyz'∈R))

Par exemple, dans la relation professeurs le nom de professeur multidétermine diplôme par rapport à classe enseignée : si les tuples DURAND, Capes, Terminale A3, et DURAND, Agreg., première B5, existent, alors les tuples DURAND, Capes, première B5, et DURAND, Agreg, Terminale A3 existent aussi.

c) les dépendances de jointures qui permettent de décrire les relations entre sous-ensembles d'attributs d'une relation.

A partir de l'ensemble des attributs et de leurs dépendances, des algorithmes pourront déterminer les entités et associations canoniques du réel et fournir des relations qui ne souffrent pas d'anomalies : cette opération se fera par décomposition successive jusqu'à l'obtention de relations normalisées (Gardarin 1983). Ces relations seront alors facilement manipulables grâce aux opérations de l'algèbre relationnelle, qui sont à la base des langages d'interrogation et de manipulation des SGBD relationnels :

- l'union de deux relations A et B de même schéma : la relation résultante est de même schéma que A et B et a pour tuples l'union des tuples de A et B ;

- le différence de deux relations A et B de même schéma : la relation résultante est de même schéma que A et B et a pour tuples la différence ensembliste des tuples de A et B ;

- le produit cartésien de deux relations de schémas quelconques : la relation résultante a pour schéma la concaténation des schémas de A et B et pour tuples le produit cartésien des deux ensembles de tuples de A

et B ; cette opération, comme on peut s'en douter, est des plus couteuses ;

- la projection d'une relation sur un certain nombre de ces attributs : la relation résultante a pour schéma les attributs sur lesquels la projection est faite, les tuples étant obtenus par élimination des valeurs des attributs n'appartenant pas au schéma résultant, ainsi que par élimination des tuples en double (par exemple, projection de la relation professeurs sur les attributs âge, matière) ;

- la restriction d'une relation A par une qualification Q : la relation résultante est de même schéma et a pour tuples les tuples de A qui satisfont la qualification Q (par exemple, restriction de la relation professeurs par la qualification matière = mathématiques) ;

- la jointure de deux relations A et B selon une qualification Q : la relation résultante est la restriction du produit cartesien de A et B par la qualification Q. Cette opération est fondamentale, car elle permet de relier deux relations sur un ou plusieurs de leurs attributs et de créer une troisième relation résultant du croisement. Par exemple, la relation de schéma numéro de parcelle, nom de section, nom de propriétaire, type de construction, classement au POS résulte de la projection d'une jointure entre la relation parcelle, de schéma numéro de parcelle, nom de section, nom de propriétaire, classement au POS..., et la relation construction, de schéma nombre d'étages, type, numero de parcelle, nom de section, ..., jointure selon la qualification nom de section = nom de section et numéro de parcelle = numéro de parcelle : si la relation parcelle contient les tuples

parcelle	numero de parcelle	nom de section	nom de propriétaire	P.O.S
	10	H	Durand	UC
	25	G	Leroy	Na
	110	F	Martin	Nb

et la relation construction les tuples

construction	nombre d'étages	type	numéro de parcelle	nom de section
	2	immeuble	12	H
	1	pavillon	10	H
	2	immeuble	10	H
	3	immeuble	110	P
	2	pavillon	25	G

la jointure indiquée aura pour tuples

numéro de parcelle	nom de section	nom de propriétaire	type de construction	classement au POS
10	H	Durand	pavillon	UC
10	H	Durand	immeuble	UC
25	G	Leroy	pavillon	Na

Il est important de noter que la jointure ne conserve pas la notion de clé : si A1 est clé de la relation R1 et A2 clé de la relation R2, A1 ne sera vraisemblablement plus clé de la relation R3 résultat d'une jointure entre R1 et R2. L'ensemble (A1,A2) sera une clé de la relation R3 s'il fait partie de cette nouvelle relation.

Les interrogations de la base de données peuvent être exprimées directement en terme d'opérations relationnelles (ex. SQL), ou grâce à des langages d'interrogation basés sur la vérification de formules dont les variables sont soit des tuples (ex. INGRES), soit des valeurs d'attributs (ex. QBE).

Ainsi, la question "imprimer les noms des propriétaires de parcelle contenant une construction de deux étages ou plus" sera décomposée séquentiellement en :

- une restriction de la relation construction sur la qualification (nombre d'étages >= 2),
- une projection de la relation construction sur les attributs numéro de parcelle et nom de section,
- une jointure entre les relations construction et parcelle comme dans l'exemple précédent,
- une projection de la relation résultante sur l'attribut nom de propriétaire.

6. L'intégration des données localisées.

6.1 Objectifs.

Intégrer la variable de localisation dans le schéma relationnel, c'est bénéficier sur cet attribut de toute la puissance du modèle, c'est simplifier les opérations de manipulation et les interrogations utilisant la localisation dans l'espace en mettant ces opérations au même niveau que les opérations sur les relations non localisées.

Nous allons donc compléter l'algèbre relationnelle par de nouvelles opérations algébriques liées au caractère multidimensionnel de l'attribut de localisation :

- la restriction spatiale, qui correspond à la sélection d'objets par rapport à la localisation,
- la jointure spatiale, qui correspond à la mise en relation de deux objets par rapport à leurs localisations respectives,
- la projection spatiale, qui correspond à l'opération d'impression de l'attribut de localisation et qui est une opération de cartographie.

Ces nouvelles opérations, et surtout les deux premières, vont permettre de manipuler la localisation grâce à des opérations algébriques et logiques : c'est dans ce sens que l'image, considérée habituellement comme un résultat final, va devenir également le résultat intermédiaire d'une séquence d'opérations de gestion et de manipulation de données qui peut très bien ne pas avoir de résultats finals graphiques.

D'autre part, et c'est fondamental, la localisation redevient un

attribut logique, c'est-à-dire non lié à telle ou telle entité : toute relation localisée pourra ainsi être mise en relation avec toute autre relation localisée par une opération de jointure spatiale, independamment du codage ou de la méthode de représentation de la localisation. Nous verrons néanmoins comment cette représentation influence cette opération.

L'intégration de la localisation dans le schéma relationnel est donc prometteur, aussi bien par la puissance de manipulation qu'elle apporte que par les contraintes et les problèmes de représentation et de validité de l'information localisée qu'elle met en évidence. Dans ce cadre, elle va permettre de réfléchir à de nouvelles approches de la représentation géographique.

6.2 Les opérations algébriques nouvelles.

6.2.1 Pourquoi de nouvelles opérations ?

Supposons que l'on ait par exemple des relevés pédologiques, des données de couverture végétale définies sur photographies aériennes, et un découpage administratif en départements. Questions : sélectionner les profils se trouvant dans tel ou tel département, établir une liste des départements avec pour chacun d'eux le pourcentage de la surface occupée par la forêt, etc.
Si chaque profil ne contient pas le nom du département auquel il se rapporte, les opérations classiques des SGBD relationnels ne pourront répondre à la première question. Si l'on veut de plus poser la même question par rapport aux types de couverture végétale, il faudrait indiquer pour chaque profil le type de couverture végétale, etc. La réponse à la seconde question sera impossible à réaliser, à moins que les zones de forêts ne constituent un sous-découpage des départements et ne contiennent chacunes le nom du département auquel elles se rattachent : ce découpage en zones de végétation serait quelque peu arbitraire et ne pourrait être conçu que par rapport au découpage administratif, ce qui n'est pas souvent le cas. En règle générale, toute liaison avec une information localisée non prévue au départ sera impossible.

Toutes les opérations que nous avons envisagées portent pourtant sur l'expression de la localisation dans l'espace, et donc intrinsèquement sur le même attribut. Si l'on dispose d'une référence unique pour l'attribut de localisation, et pour chaque relation de la description de la localisation des objets par rapport à cette référence, tout objet pourra être mis en relation avec n'importe quel autre objet ainsi localisé, indépendamment d'un système de référence attaché à telle ou telle entité.

Le système de référence unique est bien sûr l'espace mathématique euclidien : l'attribut de localisation est alors de dimension deux ou trois, sans relation d'ordre canonique (liée à la métrique définissant la structure de l'espace).
La qualification des opérations de restriction ou de jointure porte sur un attribut de dimension deux ou trois. Elle n'est plus liée à une structure d'ordre mais à la structure métrique de l'espace euclidien.
Quel que soit le type de représentation utilisée pour la localisation (zones, lignes, points, mailles,...), il va falloir formellement passer

de nouveau par l'espace euclidien pour mettre les objets en relation sur leur localisation : il s'agit maintenant de repasser de l'espace de représentation à l'espace euclidien, de l'entité dérivée à l'entité initiale, à l'inverse de la démarche exposée en 3.1.

L'attribut formel de localisation sera noté dans la suite loc, et sa valeur représente l'ensemble des points de l'espace euclidien attaché à un objet. Il est, de par son caractère formel, indépendant du type de représentation utilisée pour la localisation des objets dans la base (zones, lignes, points, cellules,...) et des méthodes effectives de réalisation des opérations algébriques. Comme nous l'avions déjà remarqué en 3.1, cet attribut formel, associé s'il y a lieu à un attribut temporel, détermine l'ensemble des attributs descriptifs de la relation : la localisation spatio-temporelle constitue alors une clé d'une relation localisée. Nous l'appelerons clé graphique.

6.2.2 La restriction spatiale.

C'est l'opération correspondant à la sélection des objets par rapport à un domaine défini de l'espace, noté D. Ce domaine peut être défini soit directement (fenêtre d'étude), soit par rapport aux objets d'une autre relation (1) : zone autour d'un point, le long d'une ligne,... Ainsi, la sélection des profils de sols dans tel département correspond à la restriction de la relation profils sur l'attribut loc dans le domaine défini par le département choisi.

Plusieurs types d'opérations de restriction spatiale peuvent être envisagées quand les objets sont des ensembles de points, en prenant une qualification ensembliste plutôt que métrique : si A désigne un objet et D le domaine de restriction :

$A \subset D$	l'objet A est inclus dans le domaine D
$A \cap D \neq \emptyset$	l'objet A intersecte le domaine D
$A \cap D = \emptyset$	restriction par exclusion, A et D sont disjoints
$a \in D$	le centroïde de A appartient à D.

Notons que la restriction spatiale, tout comme la restriction classique, ne modifie pas les objets et n'en crée pas de nouveaux. Il n'y a donc pas, pour cette opération, de problèmes liés au type de représentation utilisé. Seule la réalisation de l'opération de restriction elle-même sera fonction du type de représentation.

6.2.3 La jointure spatiale.

De toutes les opérations algébriques que nous avons vues en 5.2, la jointure est certes la plus importante en pratique, car, comme nous l'avons souligné, c'est elle qui permet la mise en relation de deux tuples par le biais d'un attribut commun, en créant ainsi un nouvel objet ayant les caractéristiques des deux objets répondant à la qualification de jointure, et correspondant dans la nouvelle relation à un tuple formé des valeurs d'attributs des deux tuples mis en relation.

---

(1) comme nous le verrons plus tard , cette opération s'apparente en fait à une semi-jointure, puisque l'ensemble D des valeurs de l'attribut de qualification est connu.

La jointure spatiale est donc l'opération de jointure portant sur l'attribut de localisation loc. La qualification de jointure s'exprime par rapport à la distance :

a1 <= d(loc1,loc2) <= a2

Par exemple, a2 = 0 signifie que deux points de l'espace sont mis en relation s'ils ont la même localisation.

Pour bien comprendre cette opération, il est nécessaire de revenir à l'espace de référence et de repasser du type de représentation des objets en zones, lignes, points aux objets élémentaires que sont les points de l'espace euclidien avec leur localisation intrinsèque.
l'opération de jointure spatiale s'éffectue, en théorie, en considérant que les seuls objets logiques sont les points de l'espace.
Le résultat de l'opération de jointure pourra à nouveau faire l'objet d'un changement de représentation du type passage entité principale entité dérivée. Le cheminement théorique d'une jointure spatiale est donc :

espace de représentation	--> espace euclidien	--> jointure sur les points de l'espace euclidien	--> espace de représentation (si nécessaire)

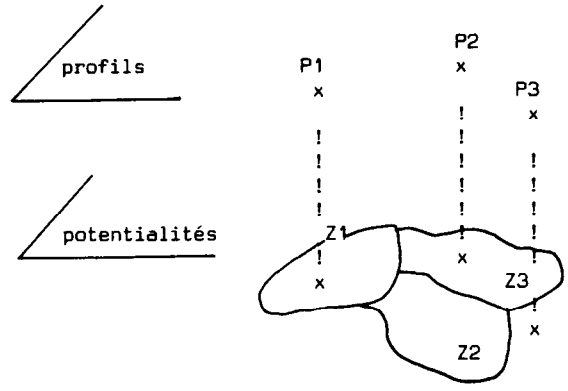
Ainsi, la jointure spatiale de la relation zonale potentialités (pente, pierrosité, salinité) et de la relation ponctuelle profils (couleur,pH) sur la qualification d(loc1,loc2)=0 aura pour résultat une relation nouvelle ayant pour attributs (pente, pierrosité, salinité, couleur, pH) et dont les objets sont l'ensemble des points appartenant à la fois à la relation potentialités et à la relation profils (fig. 20).

Si la qualification de jointure est d(loc1,loc2) < a, le résultat est plus complexe puisqu'il correspond à un ensemble d'objets pour lesquels la localisation ne constitue plus une clé : un point peut apparaître plusieurs fois avec des descripteurs différents s'il répond à la qualification de jointure pour plusieurs objets de chaque relation (fig.21). La notion de clé graphique n'est pas conservée par la jointure spatiale, comme c'est d'ailleurs le cas pour la jointure classique.

Des exemples de jointures entre relations de type zone sont donnés par les figures 19 et 20. La qualification d(loc1,loc2)=0 correspond à l'intersection des zones et conserve la localisation comme clé de la relation résultante. La qualification a < d(loc1,loc2) < b, avec a non nul, donne un résultat plus complexe et difficile à représenter graphiquement dans son intégralité, puisque la localisation n'est plus clé de la relation résultante.

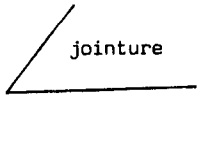
La jointure spatiale est une opération interessante dans la mesure où elle permet de comparer des objets sur leur localisation, sans avoir à spécifier et décrire cette localisation. Le résultat doit d'avantage être considéré au niveau de cette mise en relation qu'au niveau du

résultat graphique formé par les tuples de la nouvelle relation : ainsi, on met en relation parcelles (numéro, nom de propriétaire, nombre de constructions) et bornes d'incendie (numéro, débit) sur la qualification d(loc1,loc2) < 100 mètres surtout pour avoir la liste des numéros de parcelles et le nombre de contructions associés à une borne, plutôt qu'une carte des parcelles ou portions de parcelles et bornes résultant de la jointure. Comme nous l'avons déjà souligné, la représentation graphique d'un résultat de jointure spatiale peut être difficile car nous n'avons plus dépendance fonctionnelle des attributs descriptifs par rapport à la localisation : on peut avoir des tuples formés du même ensemble de points mais ayant des valeurs descriptives différentes.



	couleur	pH
P1	rouge	7.5
P2	jaune	5.8
P3	ocre	6.5

	pente	piérrosité	salinité
Z1	10-20	faible	faible
Z2	20-30	moyenne	trè faible
Z3	10-20	très faible	moyenne



Le résultat de la jointure est composé des points P'1 et P'2 :

	pente	pierrosité	salinité	couleur	pH
P'1	10-20	faible	faible	rouge	7.5
P'2	10-20	très faible	moyenne	jaune	5.8

fig. 19 : jointure entre zones et points sur la qualification d(loc1,loc2)=0

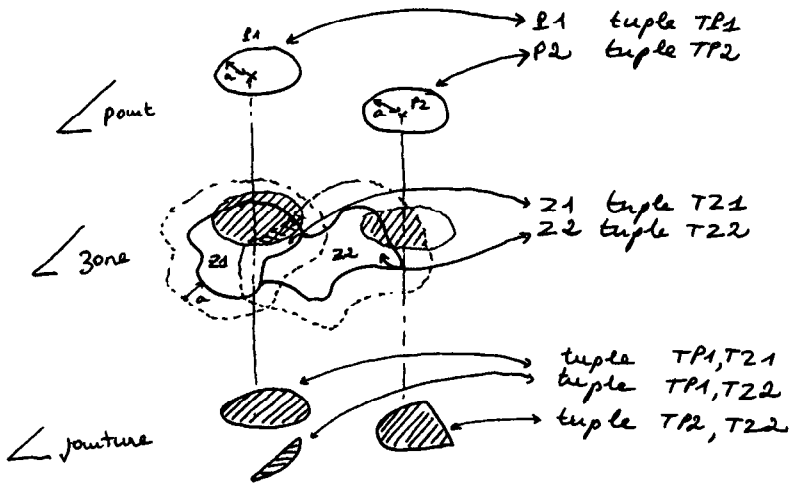


fig. 20 : jointure entre points et zones sur la qualification d(loc1,loc2) < a

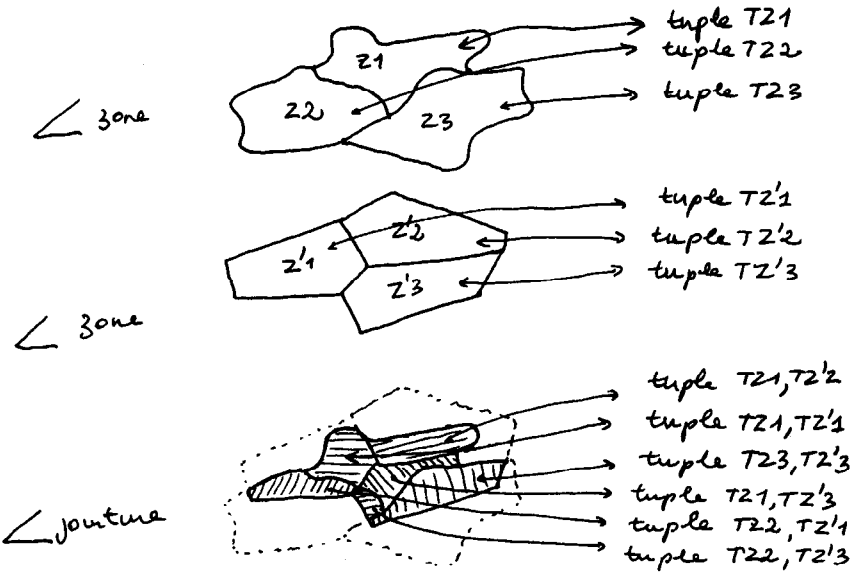


fig 21 : jointure entre zones sur la qualification d(loc1,loc2) = 0

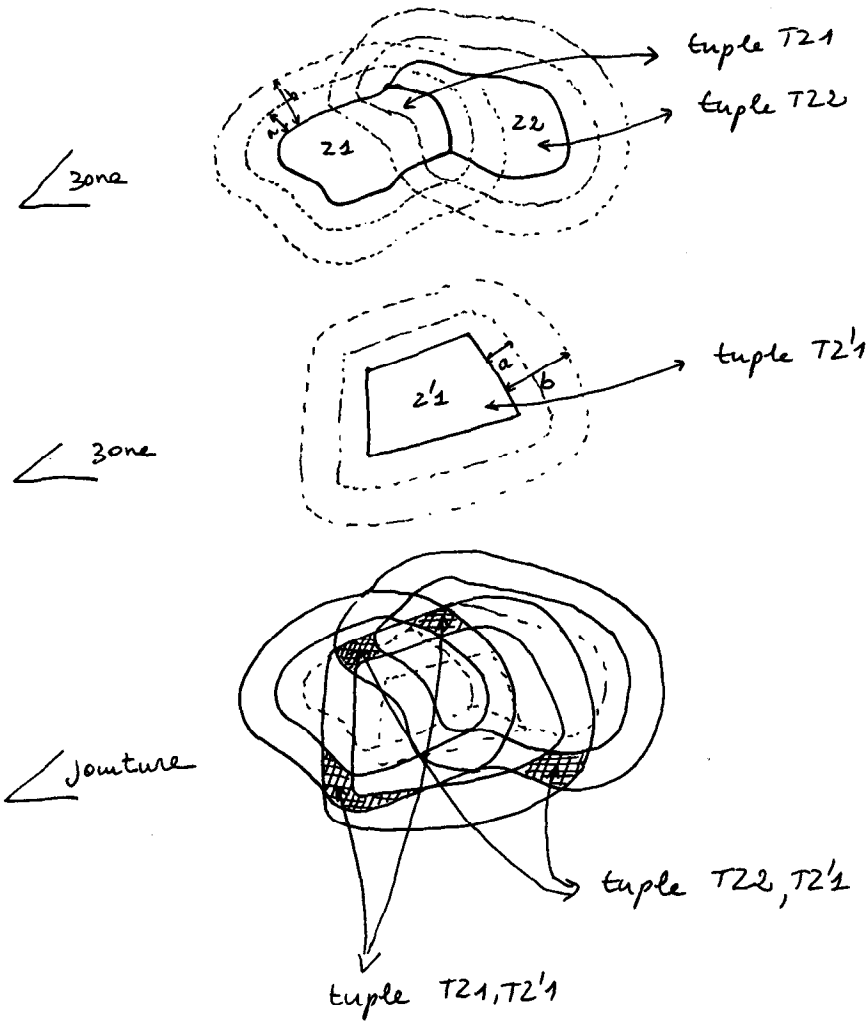
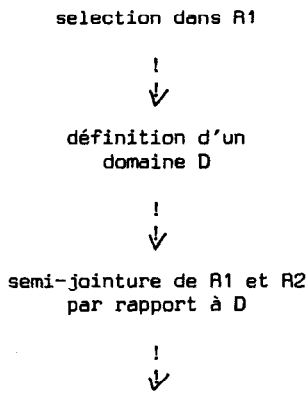


fig. 22 : jointure entre zones sur
la qualification a < d(loc1, loc2) <b

A la différence de l'opération de restriction, la jointure spatiale crée de nouveaux objets; la description de la localisation de ces objets pose les mêmes problèmes que la description de la localisation des objets initiaux : les nouveaux objets sont des points ou des ensembles de points de l'espace euclidien, qu'il est nécessaire de regrouper et de décrire d'une manière ensembliste avec les choix possibles que nous avons vu au paragraphe 3. Bien sur, les méthodes de réalisation de la jointure et de descriptions de la localisation des résultats seront fonction du type de description des objets initiaux.

La jointure spatiale est une opération dangereuse si les objets mis en relation n'ont pas la même echelle de validité, ou si la validité de la localisation par rapport aux données descriptives est trop faible pour permettre le passage de l'espace de représentation à l'espace euclidien (pour des données à caractère statistique par exemple, ou n'ayant qu'un intérêt de représentation graphique).

Certaines opérations que nous avons définis comme des opérations de restriction sont en fait des jointures : la restriction d'une relation sur la localisation d'une autre relation est en fait une semi-jointure avec qualification d(loc1,loc2)=0 : on connait à priori l'ensemble des valeurs de l'attribut de qualification, représenté par le domaine D. L'interêt de cette opération réside néanmoins plus souvent dans le résultat de la restriction apportée à l'une des relations que dans la mise en relation effective des attributs des deux relations. C'est pour cette raison que nous l'avons classée comme restriction spatiale :



7. La mise en oeuvre des concepts théoriques.

Le système TIGER, développé par l'unité d'infographie de l'Orstom, est un système d'information géographique organisé suivant le schéma des systèmes de gestion de bases de données relationnelles, et enrichi pour cela d'opérations algébriques nouvelles pour la manipulation relationnelle de la localisation. Il réunit ainsi les possibilités des systèmes de gestion de base de données et celles des systèmes d'information géographique, en mettant en oeuvre les concepts théoriques que nous avons exposés précédemment.

7.1 Architecture et structures de données.

L'architecture du système TIGER est celle d'un calculateur base de données simplifié : il possède un dictionnaire des données, indiquant les relations et attributs ainsi que leurs caractéristiques (types, définition du schéma interne associé), un dictionnaire des accès permettant de gérer les niveaux externes (par l'allocation de droits et la définition des accès aux données), un langage de commande permettant d'interroger et de manipuler les données. Chaque opération utilise ces trois structures pour accéder au niveau interne et au système de gestion de fichier (fig. 23).

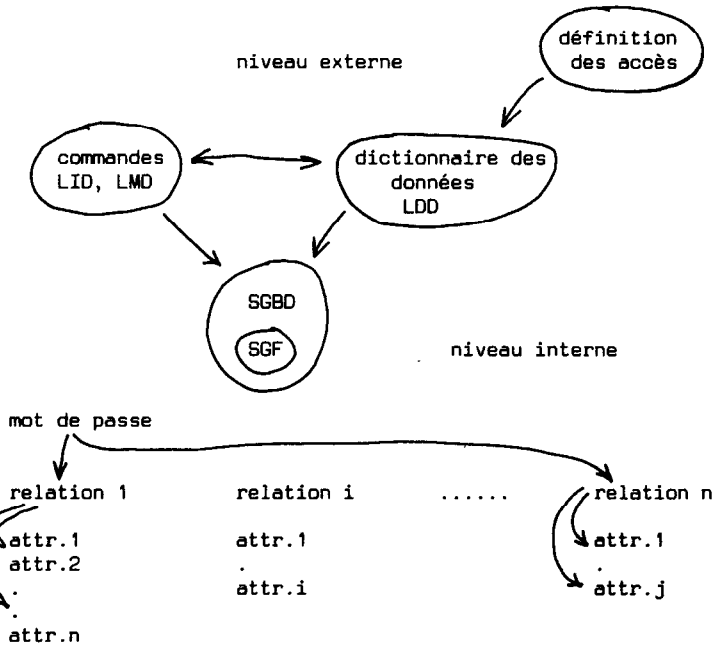


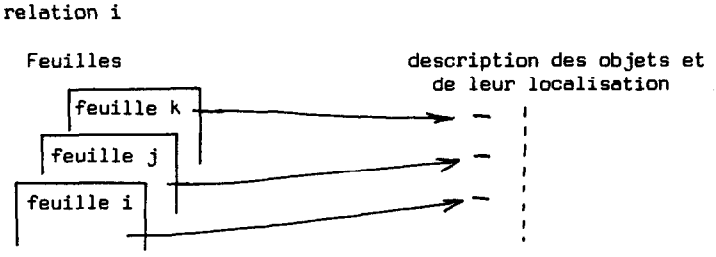
fig. 23 : architecture du système.

Les données sont structurées en relations correspondant aux entités du monde réel. Ces relations sont de plusieurs types : relations non localisées, relations localisées (ponctuelles, réseaux, zonales).

L'information graphique associée aux relations localisées est conservée sous forme ponctuelle ou vectorielle : coordonnées géographiques pour les points, ensemble d'arcs de points pour les réseaux et pour les zones. Tous les points sont décrits par leurs coordonnées géographiques (longitude, colatitude par rapport à un point de référence propre à la base), et donc toutes les localisations sont compatibles pour l'ensemble des objets des relations d'une même base.

Indexation des données dans le système :

Les relations localisées sont indexées sur la localisation par la notion naturelle de feuille, chaque feuille correspondant à une coupure et comprenant au plus 1500 objets. Toute recherche dans une relation localisée passe par recherche des feuilles concernées par le territoire d'étude, chaque feuille contenant la description de sa localisation et donnant l'adresse des objets qu'elle contient, permettant ainsi d'y accéder rapidement. Chaque relation localisée possède son propre ensemble de feuille, puisque cette indexation dépend essentiellement de la densité des objets propre à une relation donnée.



La structure interne des relations zonales :

L'information graphique associée aux relations zonales est constituée de l'ensemble des arcs décrivant les zones. Chaque arc est décrit par les numéros des zones dont il est frontière et par la suite des points qui le constitue.

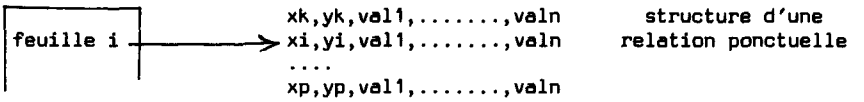
```
nz1    nz2   x1,y1,......., xn,yn
....
nzi    nzj   x1,y1,.....,xp,yp
....
```

L'information descriptive est conservée dans un fichier séparé, contenant pour chaque zone l'ensemble des descripteurs suivant le schéma donné dans le dictionnaire des données. Chaque feuille indique son point d'entrée dans ce fichier descriptif, ainsi que dans le fichier des arcs correspondant.

Structure interne des relations ponctuelles et réseaux :

Cette structure est plus simple que pour les relations zonales car les

fichiers descriptifs et graphiques n'ont pas besoin d'être séparés :



7.2 La réalisation des opérations spatiales.

La transformation vectoriel-matriciel :

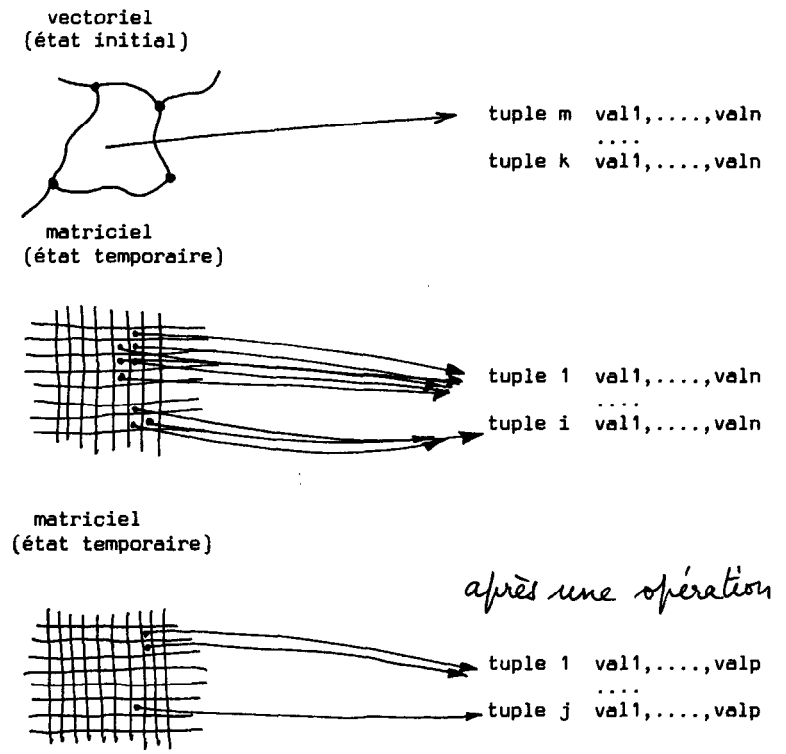
Si les données graphiques sont structurées et stockées dans la base sous forme vectorielle, le système va utiliser pour la réalisation de certaines opérations une structure matricielle sous forme d'une image numérique de pixels associée à un fichier descriptif. Chaque pixel est relié au fichier descriptif par sa valeur numérique qui permet de retrouver le tuple descriptif qui lui correspond.
La taille de la matrice de pixels est paramétrable jusqu'à 1200*1200; la résolution du pixel dépend alors de la fenêtre géographique utilisée. Elle est en général plus faible que l'échelle de validité de la description de la localisation : le pixel peut être alors considéré comme simulant le point de l'espace euclidien. Le passage en matriciel permet donc de mettre en oeuvre concretement les opérations spatiales, en apportant la facilité de manipulation propre à cette description tout en conservant la structure relationnelle des données. Les éléments vectoriels étant conservées en coordonnées géographiques, le passage en matriciel dans le plan se fait suivant une projection géographique donnée. Cette projection peut être choisie par l'utilisateur.
Le passage de vectoriel à matriciel est un des éléments importants du système; néanmoins, il reste au niveau interne et s'effectue d'une manière interactive lors de l'opération qui le requiert. Cette double structure (stockage vectoriel et manipulation matricielle), associée au paramétrage de la résolution matricielle, confère au système une souplesse importante dans la réalisation des différentes opérations de gestion et de manipulation de la localisation.

Ainsi, la description de la localisation va être transformée lors d'une session d'interrogation des données :

- état initial vectoriel ou ponctuel. Cet état n'est pas modifié par les opérations de manipulation des attributs descriptifs (indépendants du mode de représentation de la localisation), ainsi que par les opérations de restrictions spatiales ne s'apparentant pas à une semi-jointure : seuls les fichiers descriptifs sont alors modifiés.

- état temporaire matriciel. Cet état est automatique pour les opérations de projection et de jointure géométrique. Dans cet état, chaque pixel de la matrice est relié au(x) tuple(s) des valeurs d'attributs descriptifs qui lui correspond(ent) : la séparation du graphique et du descriptif est maintenue. Bien sur, on ne considère qu'un tuple de valeurs descriptives pour l'ensemble des pixels qui ont les mêmes valeurs descriptives. L'état matriciel de la localisation d'une relation sera conservée jusqu'à la fin de la session d'interrogation et l'impression des résultats. Il n'y a pas de

retransformation matriciel-vectoriel après chaque phase de l'interrogation.
Une nouvelle interrogation, ou tout changement de la fenêtre d'étude élimine tous les états temporaires matriciels, qui ne sont conservés par l'utilisateur qu'à des fins de stockage ou d'archivage d'un résultat hors du système de gestion.



La réalisation des opérations spatiales : la restriction

La restriction d'une relation par rapport à une fenêtre d'étude se fait simplement en sélectionnant les feuilles intersectant la fenêtre, et en sélectionnant dans chaque feuille les objets se trouvant dans la fenêtre : chaque ligne ou chaque zone possède dans le fichier de ses descriptifs la fenêtre qu'elle occupe, qui permet ainsi une sélection rapide sans avoir à consulter les arcs eux-mêmes.

La fenêtre d'étude peut être définie de plusieurs manières :

- directement en coordonnées géographiques, en indiquant son point bas gauche (point de colatitude maximum et de longitude minimum) et son point haut droit (point de colatitude minimum et de longitude maximum).

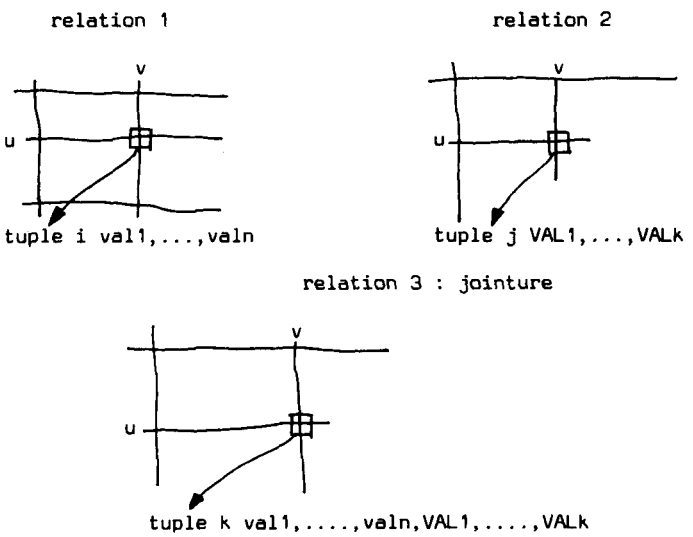
- en indiquant une feuille donnée d'une relation. La fenêtre correspondra alors au domaine géographique de la feuille.
- en indiquant le point bas gauche et la résolution du pixel en métres dans les images matricielles générées lors du passage vectoriel matriciel.
- en indiquant des valeurs d'attributs d'une relation. La fenêtre sera alors le domaine maximum comprenant l'ensemble des objets ayant ces valeurs.

Notons que le passage en matriciel se fait, quelque soit taille de la fenêtre, à la résolution donné : ainsi, réduire la fenêtre d'étude augmente la précision des objets dans la matrice, puisque la taille du pixel diminue (le fenestrage ne provoque alors pas seulement un effet de zoom comme c'est le cas pour les systèmes stockant leurs données graphiques en mailles).

La réalisation de la jointure spatiale :

La réalisation de la jointure spatiale consiste à comparer les images matricielles créées à partir de l'information graphique vectorielle et à créer les tuples descriptifs et l'image codée correspondant aux tuples résultant de la jointure. La jointure sur une qualification d(loc1,loc2)=0 est d'une réalisation simple car elle conserve la clé graphique de la relation :la relation image-tuple reste fonctionelle; la réalisation de la jointure se déroule alors en plusieurs phases :

1) création d'une nouvelle image par calcul pour chaque pixel d'un code résultant des valeurs du même pixel dans les images des deux relations,
2) création des tuples descriptifs correspondant aux combinaisons rencontrées dans la première phase (ce qui revient à éliminer les tuples en double),
3) établissement de la relation image-tuples.



7.3 L'intégration d'images numériques.

Les données localisées extérieures au système et codées sous forme d'images numériques (du type des images satellitaires), que nous appelerons **données images**, s'y intègre facilement grâce à la phase matricielle de description de la localisation des données de la base. Le seul problème technique pour pouvoir mettre en relation ces images et l'information gérée par le système TIGER consiste à faire coincider les paramètres des deux matrices de pixels : projection géographique, résolution du pixel, localisation dans le plan de projection. C'est bien sur au système de gestion de s'adapter aux différentes données images qui lui sont intégrées. Cette adaptation se fait naturellement par les choix de la projection géographique, de la résolution du pixel et de la fenêtre d'étude, choix rendus possibles par le passage temporaire de la structure vectorielle à la structure matricielle.

La mise en relation de données images et de données existantes structurées suivant un schéma conceptuel précis est bien sur la première phase d'un processus visant à extraire, à partir de ces données images, l'information nécessaire à la définition ou la caractérisation d' objets nouveaux associés à une entité et un schéma conceptuel donné. Cette phase ultérieure de création ou de modification de relations est l'objet même de l'intégration de données images dans le système d'information géographique, qui ne doit pas avoir pour objet la gestion d'un ensemble d'images.

Un de nos objectifs est par contre de formaliser la phase d'extraction d'information et d'intégration par rapport à un schéma conceptuel connu : la démarche expérimentale d'extraction d'information à partir de données images pourrait donner lieu à la détermination de règles de décision et permettre l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle dans ce dommaine. Nous pourrions alors envisager la construction d'un système expert basé sur de telles règles et possédant comme base de fait aussi bien le résultat d'opérateurs de reconnaissance de formes sur l'image que le résultat de l'interrogation des données existantes dans la base.

7.4 Description fonctionnelle du système TIGER.

Les modules de base du système TIGER sont:

a) un module de saisie graphique par digitaliseur :

La saisie de ces arcs est contrôlée de manière interactive pour éviter diverses erreurs :
-erreurs de manipulations, oublis.
-non fermeture des zones, problèmes topologiques et graphiques (connexité, simplicité, intersections d'arcs).
La saisie se fait sur une fenêtre déterminée par l'opérateur, la juxtaposition des fenêtres et la reprise en cours de manipulation étant gérée par le système.

b) un module de description et de saisie de l'information descriptive;

c) un module d'intégration des données dans la base :
recalage des données localisées en coordonnées géographiques, en

fonction de la projection du document digitalisé, intégration des données descriptives;

d) un module d'interrogation de la base de données :

- choix de la projection géographique de travail et de restitution (MAP) : cylindrique, azymutale, conique.

- restrictions géographiques par fenestrage (WIND) : sélection d'une coupure, sélection directe en coordonnées géographiques, sélection par la taille du pixel, etc.

- recherches thématiques (SELEC) : sélections sur les données descriptives.

- jointures classiques (JOINT) : croisements de données sur des critères algébriques.

- jointures géométriques (GJOINT) : croisements de données sur des critères spatiaux.

- projection et impression de résultats (PROJEC et LISTE).

Les résultats sont donnés sous forme de liste ou d'image, suivant les questions posées et le choix de l'utilisateur. Le dialogue avec le système se fait au moyen d'un langage de manipulation spécifique et de menus associés.

Des modules synthétiques regroupent un certain nombre d'opérations algébriques de base, en facilitant l'interrogation et en optimisant les traitements : THEM (classification, sélection, projection, création de l'image et impression des résultats, croisement de deux images thématiques, reclassification et agrégation de classes).

d) un module de cartographie automatique (CART) :
sélection de contours, de symboles, adjonctions de textes, etc. Ce module crée des segments graphiques indépendants des organes de sortie (écran ou traceur) et qui seront interprétés par les modules de visualisation propres à ces organes.

e) des modules de visualisation (GIXI, BENSON) :
La visualisation des images se fait de manière interactive sur écran graphique ou sur traceur. On peut ainsi déterminer l'échelle de tracé (pour les traceurs), de nouvelles agrégations (redéfinition des classes thématiques), choisir les couleurs, les symboles, les caractères ...
f) un module de calculs statistiques (STAT) :
statistiques univariées (moments, histogrammes), ou bivariées (corélations, régressions). Ces calculs peuvent se faire à tous moments de l'interrogation et permettent ainsi de modifier si besoin est le cours de l'interrogation (pour le choix des seuils de classifications per exemple).

g) un module de création d'attributs :
- par classification (CLAS) : passage de numérique à nominal, ou de nominal à nominal par regroupement de valeurs.
- par calcul numérique (sur les attributs numériques) ou par calcul

logique (sur les attributs nominaux) (CRIS).
- par jointure et statistique (COCA) : de nouveaux attributs sont créés par calcul statistique sur le résultat d'une jointure classique ou géométrique : il est ainsi possible d'affecter à une zone la moyenne d'un attribut de points se trouvant à une distance donnée de la zone, ou le pourcentage de sa surface occupée par la valeur d'un attribut propre à un autre découpage, etc.

h) un module d'intégration de données satellitaires (STAD) :
Ce module assure la mise en relation d'une image satellite recalée et de l'information de la base correspondante, ainsi que des comparaisons et des calculs graphiques entre ces deux informations (calculs statistiques sur les valeurs radiométriques par rapport aux classes thématiques, etc.).

i) un module de calcul géométrique sur écran (distance, périmètre, surface...)

7.5 Description matérielle.

L'ordinateur utilisé actuellement est un MINI 6-Bull; le système utilise trois terminaux, un disque dur de 80 Mo, une imprimante, un lecteur de bande magnétique. Le matériel graphique est composé de :

- une table à digitaliser BENSON 6301;
- un écran graphique couleur GIXI (Radiance 320): 256 couleurs affichables sur une palette de seize millions;
- une table traçante BENSON 1625, 8 plumes.

L'évolution des matériels rend cette configuration quelque peu obsolete. Les stations de travail, avec leurs possibilités graphiques couleurs de haute résolution, répondent actuellement d'une manière optimale, pour l'unité centrale et la manipulation sur écran, aux besoins du système TIGER.

Bibliographie.

Abel D.J., 1984 — A B+-tree structure for Quadtrees, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 27, no 1,p. 19-31

Aoki M., 1979 — Rectangular region coding for image data compression, Pattern Recognition, vol. 11, p. 297-312

Amidon E.L. and Atkin G.S., 1971 — Algorithmic selection of the best method for compressing map data string : Communications, ACM, vol. 14, no 12, p. 769-774.

Boursier P., 1981 — Représentation compacte des cartes dans les systèmes d'information géographique. These de 3eme cycle, Université Paris VI, 1981.

Boursier P. et M. Scholl, 1982 — Performance analysis of compaction techniques for map representation in geographic data cases. Computer and Graphics,6 (2),1982,p 73-81

Bresenham J.E., 1965 — Algorithm for computer control of a digital plotter, IBM system journal, vol. 14, no 1, p. 44-50

Capson D.W., 1984 — An improved algorithm for the sequential extraction of boundaries from a raster scan, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 28, no 1, p.109-125

Cook B.G., 1967 — A computer representation of plane region boundaries, Autralian Computer Journal, vol 1,no 1, p. 44-50

Dangermond J., 1981 — Some triends in the evolution of GIS technologie, Marble Ed., Kensington Workshop, p.25-57

Dangermond J., 1983 — Classification des éléments des logiciels utilisés habituellement dans les systèmes d'information géographique, fascicule no 96 du Comité Français de Cartographie, p. 7-20

DIME, 1970 — Technical description of the DIME System, U.S. Bureau of Census : Census use study, the DIME Geocoding System, Report no 4, Washington D.C., p. 25-30

Frank A., 1981 — Application of DBMS to Land information systems, CH 1701-2, IEEE 81, p.448-453

Freeman H., 1961 — On the encoding of arbitrary geometric configuration, Inst. Radio Engineers Trans. Elec. Computers, vol. EG 10, p. 260-268

Freeman H. and Franenknecht P.J., 1981 — An efficient computer representation scheme for linear map data, IEEE Conf. on Pattern Recognition and Image Proccessing, Las Vegas, p. 315-320

Gardarin G., 1983 — Bases de données : les systèmes et leurs langages, Ed. Eyrolles, Paris.

Klinger A., and Dyer C.R., 1976 — Experiments in picture representation using regular decomposition, Computer Graphic and Image Proc., vol. 5, p. 68-105

Knuth D.E., 1973 — The art of computer Programming, vol. 3, Sorting and Searching, Addison Westley ed.

Lee D.T. and Wong S.K., 1980 — Quintary trees : a file structure for multi-dimensional Database systems, ACM Transactions on DBMS, vol. 5, no 3, p. 339

Matsuyama T., Le Viet H., and Nagao M., 1984 — A file organisation for Géographic Information Systems based on Spatial Proximity, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 26, no 3, p. 303-318

Merrill R.D., 1973 — Representation of contours and regions for efficient computer search, Communications, ACM, vol. 16, no 2, p. 69-82

Morse S.P., 1968 — Computer storage of contour map data, Proc. 23rd ACM Nat. Conference, vol. 23, p. 45-51

Morse S.P., 1969 — Concepts of use in contour map proccessing, Communications, ACM, vol. 12, no 3, p. 147-152

Palmer J.A.B., 1975 — Computer science aspects of the mapping problem, from Davis and Mgc Cullagh, Display and analysis of spatial Data, New York, John Wiley and Sons, 1975

Peucker K. and Chrisman N., 1975 — Cartographic data structure, American Cartographer, vol2, 1, 1975

Pfaltz J.L. and Rosenfeld A., 1967 — Computer representation of planar region by thus skeletons, Communications, ACM, vol. 10, no 2, p. 119-122

Rosenfeld A. and Samet H., 1980 — Tree structure for region representation, Aangeenbrug, Autocarto 4, vol. 1, p.108-118

Samet H., 1980 — Region representation : quadtrees from boundary codes, Communication ACM, vol. 23, no 3, p. 163-170

Samet H, 1984 — The quadtree and related hierarchical data structures, ACM Computing surveys, 16 (2), juin 1984

Samet H. and Rosenfeld A., 1980 — Quadtree representation of binary images, 5th. International Conf. on Pattern Recognition, Miami, p. 815-818

Schamos M., 1978 — Computational Geometry, P.H.D., Yale University.

Simon J.C., 1984 — La reconnaissance des formes par algorithmes, Masson ed., Paris.

Tomlinson, Calkins and Marble, 1976 — Essential part of a geographic information system. Computer Handling of geographical Data, UNESCO Press, Paris 1976

Tomlinson F., 1981 — The state of development of systems for handlig natural ressources, Cartographica, 1981, vol. 184