

Historique de la géomatique et des Systèmes d'Information Géographique (SIG)

■ Paul COURBON

Cet essai fait suite aux quatre articles parus dans les n°110 à 113 d'XYZ qui retraçaient cinquante ans d'évolution topographique. Comme l'a écrit Jean-Pierre Maillard, ils s'intègrent dans un devoir de mémoire. Ici, il ne s'agit plus de topographie pure, mais sans doute, de l'application majeure de la topographie. Bien que le développement des SIG soit déjà bien avancé, il fera encore l'objet de grands progrès dans les années à venir. En ce qui concerne la topographie pure, Michel Kasser laissait pressentir que nous étions arrivés près du sommet de la courbe de la révolution technique, ne laissant entrevoir que des améliorations ou perfectionnement des outils existants. Par contre avec les progrès incessants de l'informatique et de ses capacités de mémoires, les applications de la topographie vont certainement connaître encore des évolutions très importantes. En ce qui concerne les SIG, nous entrons aujourd'hui dans la phase de développement des troisièmes et quatrièmes dimensions, qui mérite un état des lieux "2008".

La géomatique

Pour Laurent Polidori, c'est "un terme récent qui regroupe un ensemble de techniques géographiques, souvent anciennes et développées séparément, auxquelles une mise en œuvre numérique permet de cohabiter dans un environnement informatisé".

D'une manière plus précise, la géomatique regroupe l'ensemble des outils et méthodes permettant de collecter, d'intégrer, de représenter et d'analyser des données localisées dans un cadre géographique. Elle collecte dans ce but des données graphiques et alphanumériques géoréférencées qu'elle traite pour les gérer et les lier entre elles d'une manière logique qui permettra de les analyser et de les exploiter au mieux. Elle les met ensuite en forme pour une bonne visualisation et étudie éventuellement comment les diffuser.

Le traitement de toutes ces données peut être effectué par un logiciel spécialisé appelé Système d'Information Géographique (SIG en Français, GIS en Anglais).

■ Récriminations d'un francophone

Le terme Géomatique m'amène à une réflexion qui sort peut-être du sujet, mais qu'il me tient à cœur d'exprimer. Il y eut une époque où la France était bien présente dans l'industrie informatique. Je renvoie les lecteurs à l'XYZ n°112 où l'on parle de Bull et où ils verront que le Micral, premier micro-ordinateur, fut imaginé par le Français Gernelle en 1973. Malheureusement, comme dans d'autres pays européens, les bons choix ne furent pas faits et la puissance novatrice et financière américaine submergea tout. Cependant, les théoriciens français s'étaient penchés sur cette discipline naissante pour créer une terminologie réfléchie et logique. C'est ainsi que l'on vit apparaître les mots "informatique, ordinateur, logiciel, géomatique, etc", beaucoup plus précis et, pour une fois, souvent plus concis que les termes anglais. Le terme anglais "computer", par exemple, manque de la précision donnée par le terme "ordinateur"; ne parlons pas du terme "informatique" et de sa traduction anglaise. Que penser de software dont la traduction littérale pourrait donner "quincaillerie douce" ou "ustensile doux", rien à voir avec la justesse de "logiciel"! On a parfois laissé les techniciens américains créer un jargon ayant plus de rapport avec le slang qu'avec leur langue qui, comme le français, sait faire appel aux racines grecques ou latines dès qu'elle veut exprimer un terme élaboré.

Aussi, je réagis mal quand dans un article écrit par un français dans une revue française, je vois apparaître des sigles ou mots américains alors que le terme français correspondant existe. Bien sûr, les échanges internationaux exigent maintenant une codification du langage, mais doit subsister un respect de notre langue, quitte à rappeler le mot anglais entre parenthèses.

Le début des Systèmes d'Information Géographiques (SIG)

Ce terme a été créé après que l'informatique ait accompli diverses étapes permettant l'arrivée des outils de gestion de bases de données et des outils de dessin assisté par ordinateur (DAO).

Pourtant, sans cette dénomination spécifique, le principe existait depuis longtemps. Sans faire appel à l'Antiquité, comme certains l'ont fait, je citerai simplement les répertoires géodésiques ou de nivellement de l'IGN des années 1950. Le répertoire comprenait une carte sur laquelle étaient représentés des points géodésiques ou des repères de nivellement. Plus loin, on retrouvait des fiches associées où figuraient toutes les données qui complétaient la représentation cartographique du point : matricule, coordonnées, altitude, description, croquis, année d'observation, itinéraire d'accès, etc. Il en est de même pour le cadastre qui constituait dès sa conception en 1807, une véritable base de données géographiques où la représentation graphique de la parcelle est complétée par des tables attributaires (matrice, état de section...). C'était déjà, mais sur support papier, ce qui, avec l'informatique, a généré le SIG !



Répertoire de nivellement sous sa forme actuelle, téléchargeable sur Internet. Malgré l'informatique, le principe est resté le même : une fiche sur le repère est associée à la carte où il est positionné.

■ Les prémices

La gestation des SIG dépendant de l'informatique, elle ne pouvait aller plus vite et ses progrès décisifs ne vinrent qu'avec ceux de cette dernière discipline. Je renvoie le lecteur au XYZ n°112 dans lequel je décrivais la naissance et l'évolution de l'informatique. Le premier prototype d'écran comme périphérique de sortie fut conçu en 1963, la première carte graphique couleur en 1973 avec le prototype Alto de Xeros. Mais la généralisation des logiciels graphiques interactifs n'arriva qu'avec l'éclosion et le développement des micro-ordinateurs début 1980, puis surtout avec l'apparition de l'Apple Macintosh en avril 1984 et de Microsoft Windows 1.0 en novembre 1985, tous deux utilisables avec une souris. Les logiciels de gestion de données standardisés arrivèrent à la même époque. Rappelons que le premier Macintosh sorti en 1984 valait 2500 dollars aux Etats-Unis, soit 25000 francs en France, 7500 € d'aujourd'hui en tenant compte de l'érosion monétaire !

On fait souvent référence aux Etats-Unis pour tout ce qui concerne les avancées technologiques modernes. S'il est vrai que dès 1965, le "Bureau of the budget" américain inventoriait des applications pour l'aménagement du territoire, en France dès 1969, le Ministère de l'Équipement commandait une réflexion pour la constitution d'un modèle de Banque de Données Urbaines (BDU).

La même année 1969, un chercheur de Harvard créait l'ESRI (Environmental System Research Institute), au départ association à but non lucratif engagée dans un conseil en environnement, mais qui aura plus tard un rôle important dans le développement des SIG. En 1970, puis en 1972, se déroulent à Ottawa les deux premières conférences abordant explicitement le thème de la gestion des données géographiques. Au début, faute de pouvoir exploiter une composante de visualisation graphique non encore au point, on s'orienta vers la constitution de banques de données. En France, dès 1971, la Direction Générale des Impôts (DGI) commence le fichier FINATO qui devient ensuite le répertoire informatique des voies et lieux-dits. En 1973, la même administration se lance dans la numérisation du plan parcellaire de Paris et du cadastre de plusieurs grandes villes. Il était prévu d'associer ces deux tâches à un répertoire géographique urbain (RGU) et des parcelles (RGP). Mis en œuvre par l'INSEE pour les recensements de 1974 et 1982, ils se montreront peu convainquants, grevés par leur aspect pionnier nécessitant de nombreuses améliorations et mises au point. Il faut dire qu'à cette époque de recherche, les logiciels, "faits maison" par des chercheurs isolés, ne correspondaient pas à un modèle général d'échange qui aurait facilité leur utilisation.

Il faut signaler, aussi, les BDU de Lille et Marseille entreprises dès 1971, la seconde avec la Société d'Economie Mixte ICOREM. Nous en reparlerons plus tard avec l'utilisation des SIG dans les communes françaises et verrons le rôle pionnier de la ville de Marseille.

Mais au départ, nous n'avions qu'une gestion descriptive d'objets, sous forme de lignes, faite par des Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGDB) propriétaires. Nous n'en étions pas encore à la liaison de tous ces attributs avec un objet géographique. De plus, durant cette période de recherche, il n'y avait pas encore de standardisations des données ni des systèmes d'exploitation, elles n'arrivèrent qu'au début des années 1980.

■ L'arrivée de la composante graphique en informatique

Nous avons vu que l'apparition du premier écran comme périphérique de sortie ne se fit qu'à la fin des années 1960 ; mais sur les photos d'ordinateurs de l'époque, on ne voit sur ces premiers écrans que des informations alphanumériques ! Petit à petit, apparaissent des programmes de dessin se limitant au début à des représentations simples : semis de points avec chiffrage, vecteurs, parcellaires, cotes des contours de la parcelle, profils. Autocad apparut sur MS/DOS en 1982-83, tout d'abord destiné au dessin industriel. Mais il fallut attendre 1985 et l'apparition de Windows avec interface graphique pour voir les logiciels de dessin exprimer toutes leurs possibilités.

Entre-temps, ESRI a pris de l'importance, développant des outils d'application utilisables sur un environnement informatique et faisant de l'analyse d'informations géographiques pour la ville de Baltimore ou pour la compagnie Mobil Oil. Travaillant au début sur des données graphiques cellulaires, la société s'oriente sur les données vecteurs en 1975. En 1981



et 1982 la société tient ses premières conférences des usagers, lançant cette dernière année son premier logiciel appelé ArcInfo. Il combinait l’affichage d’images géographiques avec un outil de gestion de bases de données. Destiné à fonctionner sur micro-ordinateur, on peut le considérer comme le premier logiciel ouvrant la voie au développement des SIG. Nous quittons enfin le stade des recherches éparées et non coordonnées entre elles, pour trouver sur le marché un outil de travail. Ce premier outil allait en appeler d’autres et créer une émulation, sinon une concurrence, qui, conjuguée aux progrès incessants de l’informatique allait permettre une nette avancée des Systèmes d’Information Géographique. Il faut signaler le cas de la ville de Marseille et d’ICOREM, dont le logiciel CARINE fut opérationnel en 1981. Toujours à partir du début des années 1980, il est intéressant de signaler la mise en place, petit à petit, dans un certain nombre d’endroits (commune de Rennes par exemple) d’une amorce de SIG à partir de logiciels topo avec intelligence (Ascodes, Star).

La consolidation et la mise en place du système

N’étant pas un géomaticien, mon propos n’est pas de décrire dans le détail les améliorations incessantes qui ont accru le potentiel des SIG et rendu leur emploi plus accessible. Dans les années 1970, l’informatique était encore lourde et onéreuse, apanage des grosses structures ou des grosses collectivités. Le développement du micro-ordinateur, au début des années 1980, allait permettre l’accès de l’informatique à des structures légères, puis aux particuliers. Il fallait donc la rendre plus conviviale, plus facile d’emploi, créer des logiciels mieux adaptés à un usage par des non-informaticiens. Qui plus est, bien que ces logiciels demandent une longue étude et une longue mise au point, il fallait que leur prix reste accessible à un plus grand nombre d’usagers. Il fallait bousculer les mentalités, bousculer les usages, les méthodes de travail et la “mayonnaise informatique” mit du temps à prendre. Alors que les premiers micro-ordinateurs faisaient leur apparition sur le marché en 1977, fin 1981 on n’en comptait que 2 millions dans le monde entier. Aujourd’hui, il s’en vend presque autant en France chaque année et notre parc national frôle les 10 millions d’unités!

En ce qui concerne les SIG, dès qu’il est apparu que cette application de la topographie était une activité porteuse, elle a attiré, non seulement de nombreux chercheurs, mais aussi la création de plusieurs sociétés qui concurrencèrent ESRI. En Amérique on peut surtout citer Mapinfo en 1986, ou Intergraph, spécialisé au début dans les domaines de la sécurité, de l’offshore ou des administrations. En France, nous avons parlé précédemment d’Ascodes, devenu un Système d’Information Géographique tridimensionnel ouvert développé et commercialisé par JSInfo ; cette société créée en 1973, est également éditeur de TopStation. Il faut encore citer APIC, dès 1983, qui connut son développement grâce à son partenariat avec la ville de Metz et proposait des concepts novateurs. Geoconcept, quant à lui, apparut en 1990. Ce sont les plus connus dans l’Hexagone, mais il y en a d’autres.

Dans la mouvance de la généralisation et de la convivialité d’emploi des logiciels, on voit apparaître en avril 1987 la version 1.1 de Mapinfo qui se targue d’être le premier logiciel à donner latitude et longitude pour les détails d’une rue ou de pouvoir créer la carte thématique de cette rue ! En 1990, ESRI lance sa série Arcview, d’un prix abordable et d’un emploi convivial. Nous verrons ultérieurement la même démarche suivie par les logiciels de base de données Excel et Access. Les améliorations constantes vont suivre. J’avais eu à me servir du logiciel Arcview 3.2 paru vers 1995, quand j’ai assisté à une démonstration de la version ArcGIS 9 parue en mai 2004. Certains principes de base étaient restés les mêmes, mais il n’y avait plus rien à voir entre les applications et les possibilités des deux logiciels qui, comme l’informatique avaient évolué très vite.

■ Les types de logiciels de SIG

- Nous avons cité précédemment plusieurs logiciels SIG. Ces logiciels du marché ont adopté des configurations variées par leurs choix techniques, leur complexité et leurs performances. Certains ont développé des qualités propres sur certains points. Je citerai APIC l’un des pionniers de l’information temporelle ; Arcinfo qui offre une gestion élaborée de la topologie dans l’acquisition et la gestion des données ; Geoconcept qui propose une ergonomie conviviale avec des tables d’attribut bien organisées et agréables à regarder ; Geomédia qui a développé un concept d’interopérabilité. Cependant, tous ces logiciels restent généralistes en proposant des modules complémentaires.
- Le logiciel libre se distingue des “logiciels propriétaires” précédents, qui habituellement ne comportent que des droits d’usage ; il est en effet expressément interdit d’en modifier le code exécutable, de les redistribuer. Différemment, la licence du logiciel libre, gratuite, permet au bénéficiaire d’étudier le fonctionnement du logiciel, de modifier le logiciel pour un usage particulier et de faire connaître à la communauté des utilisateurs les modifications ou améliorations effectuées sur le logiciel. Nous verrons avec les communes françaises le type de problème posé par les SIG libres.

Rappel des composantes d’un SIG

Avant d’aller plus loin, il m’a paru nécessaire de faire quelques rappels qui nous permettront mieux de comprendre l’évolution des SIG. Comme nous l’avons vu, le SIG allie des données images avec des données alphanumériques, toutes les deux géoréférencées. Les progrès des logiciels ont permis petit à petit des transformations faciles qui permettent aisément de passer de coordonnées planes à des coordonnées géographiques. Ces dernières sont universelles et conviennent mieux à un SIG couvrant un pays à cheval sur plusieurs zones de projection UTM, par exemple. Mais, les logiciels de SIG ont mis du temps à bien assimiler ce problème, je renvoie à l’argument de Mapinfo en 1987.



■ Les données alphanumériques ou attributaires

Ce sont des données descriptives qui auront été modélisées et réunies dans une Base de Données (BD) ou un Système de Gestion des Bases de Données (SGBD). Par l'intermédiaire de tables associées à des couches graphiques, elles vont permettre de fournir toutes les informations relatives à un objet sélectionné sur le plan. Par exemple après sélection d'un compteur d'eau, va apparaître une table d'attributs donnant le nom de l'abonné, le numéro du compteur, sa marque, sa date d'installation, etc. (figures 1 et 2).

Mais cet exemple est une fonction simple. Le SIG doit permettre ce que l'on appelle une Requête (Query en anglais), par exemple *quelles sont les conduites d'eau en fonte installées avant 1980* ? Sur le plan, les conduites intéressées sont mises en surbrillance et un tableau correspondant va apparaître. Cependant, ce type de requête est simple. On peut imaginer la gestion des salles de cours d'une université, le problème devient plus complexe car il faut établir des relations entre l'emploi du temps des élèves, des professeurs et l'occupation des salles de cours, il faut donc établir des "bases de données relationnelles". Ces bases de données relationnelles peuvent être manipulées ou interrogées par un langage de requête tel le SQL (Structured Query Language), langage informatique normalisé.

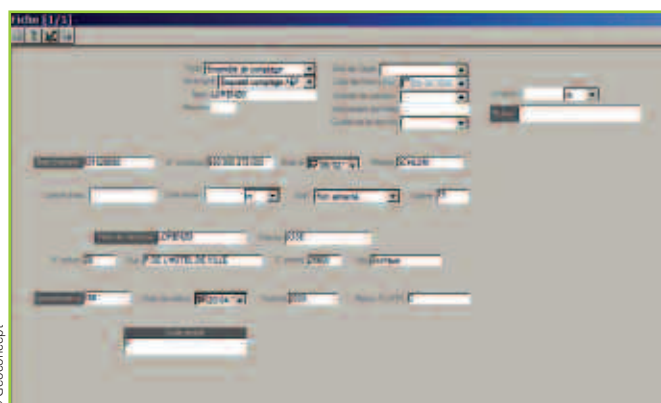


Figure 1. Type de fiches très conviviales qui apparaît quand on double-clique un objet. Ici, la fiche d'un compteur d'eau (objet ponctuel).

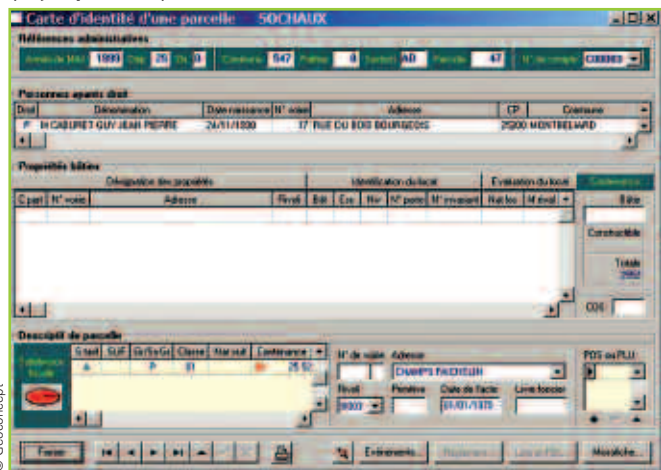


Figure 2. Toujours une fiche conviviale concernant une parcelle de terrain (objet polygonal).

- Dans les années 1970, les utilisateurs partaient de zéro, sans outils spécifiques et sans standardisation des données. Il fallut attendre 1979 pour voir apparaître sur le marché le Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) relationnelles ORACLE, développé par la société américaine Relational Software. Ce système ne permettait pas encore les transactions, mais il implémentait les fonctions SQL basiques de requêtes et de jointures. En 1983, apparaissait la version suivante réécrite en langage de programmation C et permettant les transactions. On peut citer aussi la société américaine Ashton-Tate qui, au début des années 1980 édite dBase, SGBD destiné à faire partager un fichier de données à plusieurs utilisateurs ; à la fin des années 1980, dBase III devient un véritable gestionnaire de bases de données relationnelles. En 1991, la société est rachetée par Borland. D'autres concurrents ne tarderont pas à suivre. A Marseille, ICOREM avait créé le système Carine qui fut abandonné en 1997.

- Comme nous l'avons dit, au départ les SIG étaient l'apanage de grosses structures. Mais avec le développement des micro-ordinateurs et la démocratisation des logiciels, il fallait créer des bases de données plus simples :

En 1985, Microsoft met au point Excel. Au début, il ne s'agissait que d'un tableur destiné à effectuer des calculs répétitifs dans un tableau de type comptabilité composé de cellules groupées en lignes et colonnes. Ses capacités de pseudo-base de données, fonctionnant avec des tables – comme des tableaux – ne sont apparues que plus tard. Utilisable seulement sur Macintosh il était destiné à concurrencer Lotus 1-2-3. En 1987, Microsoft sort sa version 2 pour Windows ; en 2007, nous en sommes à la version 11 ! Jusqu'à la version 2007, ce logiciel pouvait créer des tableaux comptant jusqu'à 256 colonnes et 65.536 lignes. Excel permet d'établir des calculs dans les colonnes. De plus, on peut établir des relations en créant une colonne commune qui permet de lier deux tableaux différents.

En 1992, Microsoft commercialise Access, base de données relationnelles (SGBD), beaucoup plus adaptée aux SIG qu'Excel lequel s'apparente plus à un tableur. Un fichier Excel peut être importé dans Access. Cependant Access est limité en nombre d'utilisateurs et en 2007 sa capacité était limitée à 2 Go. Les grosses structures préfèrent donc utiliser des logiciels comme ORACLE.

De nombreuses autres bases de données existent aujourd'hui, il serait fastidieux de toutes les citer. Je me limiterai à File maker pro, produit par Claris Corporation, destiné aux petites structures et PME. On peut aussi mentionner l'essor important des bases de données libres telles MySQL, ou encore mieux dans le domaine des SIG PostgreSQL/PostGIS qui sont aujourd'hui de véritables solutions alternatives – PostgreSQL/PostGIS est une BD spatiale avec des opérateurs spatiaux apportés par la composante PostGIS.

- On ne peut passer sous silence l'apparition des métadonnées en 1995, liées au développement des échanges de données. Qualifiées aussi de données sur les données (données décrivant un lot de données géographiques), elles

aident à exploiter et échanger les données multisources en gérant leur structure, leur contenu et même des niveaux différents de qualité. (figure 3)

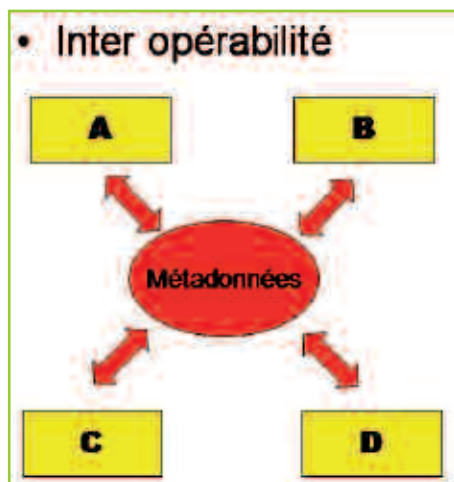


Figure 3. Les métadonnées permettent de gérer les différentes sources de données.

■ Les données graphiques (ou images)

Elles peuvent être composées de données raster ou matricielles. Ce sera une carte scannée ou un orthophotoplan. Nous avons vu qu'au début, Esri travaillait sur des données cellulaires avant de se tourner, en 1975, sur des données vectorisées. Au début, l'usage de données raster était limité car on ne peut y sélectionner que des points constitués par des pixels indépendants les uns des autres. La télédétection et les orthophotoplans leur ont apporté l'utilité qu'elles n'avaient pas. Un orthophotoplan joint à un parcellaire vectorisé, lui apporte de nombreuses informations et le rend plus facile à lire. Bien que la production des orthophotoplans ait été possible dans les années 1980, leur utilisation courante permise par les progrès de l'informatique et des procédés techniques moins onéreux n'arriva que beaucoup plus tard. Nous rappelons que l'IGN ne se lança dans sa BDortho qu'en 1998. C'était hier !

Les progrès de la télédétection sont eux aussi liés à ceux de l'informatique. Il faut citer le logiciel IDRISI développé à partir de 1987 par le département de géographie de l'Université Clark (USA) et qui travaille sur une base graphique raster. Le traitement des images par un certain nombre de fonctions mathématiques et statistiques permet d'étudier l'occupation du sol.

Il faut quand même préciser que l'on peut vider, à partir d'une base de données ou d'un GPS, tout un semis d'objets points sur un plan raster. Les outils de dessin du SIG permettent de les faire apparaître avec un signe conventionnel approprié. Ces outils de dessin permettent aussi de dessiner manuellement des lignes ou et des objets ponctuels, mais cette dernière possibilité reste d'un intérêt limité si on doit rajouter beaucoup de détails.

- Une donnée graphique peut être encore vectorielle : ce sera une carte vectorisée ou un plan issu d'un logiciel de DAO

dans un format compatible (dxf semble le format prépondérant). Cela permet de sélectionner des objets ponctuels, linéaires, ou polygonaux. Avec la modélisation 3D apparaîtront les objets volumiques. La vectorisation permettra, par exemple, de travailler sur un réseau, ce que ne permet pas un plan raster. C'est sur ce type d'objets que travaillent les logiciels courants. Il faut cependant préciser que le SIG pose des contraintes à l'image graphique 2D, il n'admet pas une superposition d'objets telle celle qui résulte des signes conventionnels des cartes. Certaines techniques seront mises au point, tel le buffer, pour pouvoir adapter des images non conformes à un bon emploi.

- Comme pour les bases de données alphanumériques, d'autres systèmes sont nécessaires pour la gestion des bases graphiques. La plus connue en France, APIC créée par des chercheurs français et distribuée aujourd'hui par STAR APIC permet l'exploitation des bases de données géographiques relationnelles à travers la consultation, la mise à jour, l'analyse et l'édition cartographique.

■ La structuration des SIG

- Un élément fondamental des SIG est la structuration des données, qui permettra de définir un groupe de couches pour chaque thématique, puis de couches comportant un seul type de géométrie (points, lignes, parcelles). A chacune de ces couches graphiques sera associée une table de données attributaires (alphanumériques). Cela signifie que les données devront être parfaitement pensées et organisées au moment de la conception d'un Système d'Information Géographique. En particulier, si un demandeur d'ordre commande un plan destiné à un SIG, il devra veiller à ce que les couches de DAO correspondent à celles qui sont gérées ou doivent être gérées par le SIG. (figures 4 et 5).

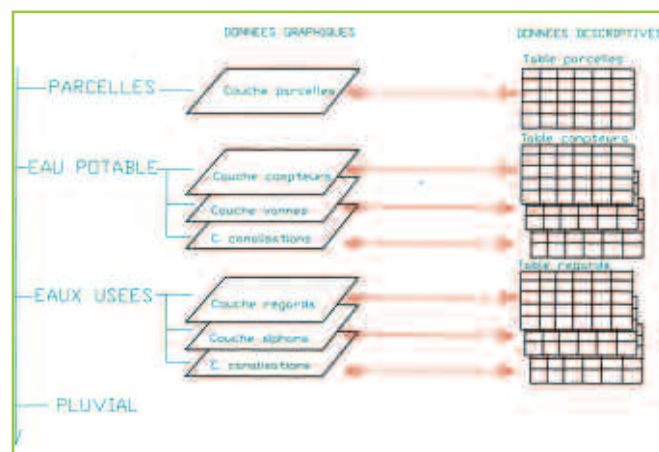


Figure 4. La constitution d'un SIG doit être précédée d'une longue réflexion sur l'organisation des données en fonction des besoins de l'utilisateur. A chaque couche graphique va correspondre une table de données descriptives (attributs). Le double clic sur un objet de l'écran fera apparaître une fiche issue des données de la table. Les tables permettent de faire des requêtes, des relations entre les tables permettent des requêtes plus complexes (SQL). A ces fonctions de base s'ajoutent d'autres applications ou modules.



Figure 5. Sur la couche du plan parcellaire de Montbéliard apparaissent les couches d'eau potable et des compteurs. En bas de l'écran, les onglets permettent de choisir un thème.



Figure 6. On voit ici l'arborescence qui montre l'organisation de l'adduction d'eau potable (AEP). Dans l'appareillage, différentes couches correspondent aux différents types d'objets.

Toutes ces couches sont organisées en arborescence. Par exemple, dans la gestion des réseaux d'une ville, une branche concernera le réseau d'eau potable, laquelle va se diviser en appareillages et conduites ; la branche appareillage va elle-même se subdiviser en compteurs d'eau, en vannes, etc. A chacun de ces types d'objet sont associées une couche et la table d'attributs correspondante. Voir les figures 4 et 6 qui illustrent cette arborescence.

- Cette structuration réalisée, l'utilisation d'un SIG va bien au-delà du geste de cliquer un objet graphique pour obtenir ses données attributaires. Les progrès des ordinateurs, des logiciels, des bases de données et une plus grande expérience ont amené à poser des questions de plus en plus complexes et exigeantes, relevant souvent de l'analyse. Nous avons vu, précédemment, les bases de données relationnelles ; l'utilisateur devra créer lui-même les relations correspondant à ses besoins propres, ce que le logiciel ne fera pas à sa place. Ainsi, à la première requête spatiale simple "où sont ?" qui interroge une composante géométrique par sa composante sémantique, ont succédé des questions d'un niveau supérieur, telles que : "comment ?" nécessaire à la prise de décision, "Et si ?" nécessaire à la simulation.

La question "Quand ?", un peu négligée au tout début, a vu son importance croître avec l'avancée en âge et les mises à jour des bases de données. Là aussi, à la première question simple "Quand a été installé ce type de compteur ?" ont suivi des questions d'analyse beaucoup plus complexes.

- Un autre aspect doit être abordé : pour les objets linéaires, un outil de DAO tel Autocad, ne permet pas d'effectuer des calculs d'itinéraire ou de propagation. Il faudra alors introduire une topologie de réseau qui décrit une relation entre une polyligne et ses sommets. Cela va amener des relations

spatiales telles que la connexion ou l'intersection. On associe à chaque côté de la polyligne (ou arc), les identifiants de son sommet initial et de son sommet final, ce qui permet en outre d'orienter les arcs. On peut alors calculer une propagation le long d'un réseau, qu'il soit routier, électrique, d'eau potable, ou autres.

La théorie des graphes a permis cette gestion des réseaux dans les SIG. Comme vu dans la topologie évoquée précédemment, le graphe est constitué par un ensemble de points (sommets) et un ensemble de flèches (arcs) reliant deux points. Bien que son concept soit plus ancien, Claude Berge en pose les bases dans les années 1960 avec Graphes et hypergraphes. Depuis, François Bouillé a apporté une grande contribution aux applications de cette théorie. Dans de nombreux problèmes, la notion de graphes est restrictive car limitée à des relations binaires sur les ensembles. Apparaît alors la notion d'hypergraphes.

- Il faut aussi parler de la topologie de voisinage qui va gérer les relations entre les surfaces ou entre les surfaces et les arcs. Cette topologie est nécessaire quand on veut effectuer des analyses spatiales impliquant des relations de voisinage ; par exemple, si on modifie la superficie de la parcelle A, quelle sera la conséquence sur la parcelle B voisine ? Cette topologie permettra aussi, entre autres, de prévenir un no man's land entre deux parcelles, dû à un défaut de numérisation. Elle va aussi induire une information comportementale, telle que l'influence de la fermeture d'une vanne sur un réseau d'eau.

La 3D dans les SIG

Nous avons vu que ESRI avait lancé la première version d'ArcInfo en 1982. Au milieu des années 1980 était édité le premier module pour travailler en 3D sur ArcInfo. Ce module s'appelait TIN (pour Triangulated Irregular Network). Il travaillait à partir de semis de points ou de matrices d'altitudes, permettant de créer des modèles numériques de terrain et de réaliser des calculs de pente, des profils ou de déterminer des



zones d'exposition. Il préfigurait ce qui allait devenir les 3D actuels. Il a ensuite évolué pour devenir 3D Analyst associé à Arcview 3 en 1992. Objet de perfectionnements constants, 3D Analyst est toujours produit et distribué comme extension de la gamme ArcGIS : ArcGIS 8, sorti en 2000 aux Etats-Unis et 2001 en France, ArcGIS9 sorti en 2003 aux Etats-Unis et en mai 2004 en France. Mais ESRI n'est plus le seul producteur de logiciels 3D pour les SIG, on peut citer : Saphir+ logiciel d'analyse spatiale et de cartographie thématique édité par Geomedia, Stone Earth, STAR GIS, CARIS GIS, GeoMap GIS, AutoCad Map 3D... Cependant, bien que les premiers outils aient existé plus tôt, il a fallu attendre l'explosion des capacités mémoire et la constitution des données cartographiques 3D, au début des années 2000, pour que la composante 3D des SIG prenne son essor avec la modélisation généralisée du bâti urbain.

La troisième dimension, la 3D comme il est plus facile de l'appeler, est un concept qui a beaucoup de succès aujourd'hui. Réelle utilité ? Jeu d'informaticiens dans la même lignée que tous les jeux électroniques Nitendo et autres ? De plus, paradoxe amusant à relever : en informatique, les représentations 3D se sont faites longtemps sur un écran plat, lui-même en 2D ! Seule la photogrammétrie où l'on observe avec des lunettes polarisées un couple de photos monté sur l'écran permettait une véritable vision du relief... Mais, avec les améliorations incessantes, il existe aujourd'hui des visualiseurs qui permettent la visualisation des données 3D en anaglyphe, par exemple, ArcScene d'ESRI.

■ Pourquoi la 3D ?

Pour quelqu'un qui a été amené à rédiger une carte ou un plan altimétrique, ou qui a reçu une formation pour les lire, ces documents sont une mine d'informations qui, souvent, dispensent d'une représentation 3D. Mais, avec ses signes conventionnels destinés à faire ressortir les détails importants, sa représentation conventionnelle du relief par courbes de niveau, la carte n'est pas un document intuitif accessible à tout le monde. De plus, dans les zones urbaines où tout l'espace dessina-ble est occupé par le bâti, il est difficile de représenter les courbes de niveau. Il y a une vingtaine d'années, quand l'IGN avait décidé de se lancer dans une nouvelle politique de production et de commercialisation de ses cartes, puis de reprendre à son compte la diffusion des cartes routières abandonnée à Michelin, une étude avait été faite. On s'était aperçu que seulement 15% des Français étaient capables de lire correctement une carte. Et encore, je crois qu'il s'agissait simplement de cartes routières ! Il faut le reconnaître, la représentation 3D est bien plus facile à comprendre qu'un plan, surtout en ville ; comme l'image photo, elle est intuitive.

Or, dans les prises de décision par les municipalités ou les collectivités locales, les élus et les responsables administratifs n'ont pas toujours la formation pour lire correctement un plan. Une représentation 3D devient alors un meilleur outil de prise de décision. Il faut aussi ajouter que dans certains cas, l'option 3D est devenue un outil remarquable qui dépasse largement les possibilités de la 2D. Je pense en par-

ticulier à l'étude de l'impact d'un projet immobilier sur l'environnement paysager ou sur l'environnement architectural existant. Hors toute polémique, le Centre Beaubourg aurait-il été construit tel que nous le connaissons, si le Président Georges Pompidou avait pu voir en perspective 3D son impact sur l'architecture traditionnelle environnante ?

Modélisation des objets urbains

En D.A.O., les premières études de représentation 3D furent faites en 1967 à l'université de l'Utah. Mais il fallut attendre 1984-85 pour voir la 3D prendre son essor avec l'arrivée de Macintosh et Windows. C'est à ce moment qu'arriva le premier module 3D dans les SIG. En 1986, avant la fermeture des chantiers navals de la Seyne-sur-Mer, j'avais visité leur bureau d'études où sur les écrans d'ordinateurs apparaissaient une représentation 3D des réseaux électriques et divers qui, sur un navire, se croisent et se superposent dans un espace restreint. Quant aux architectes, ils savent depuis longtemps construire le modèle 3D d'un bâtiment.

Mais le grand développement de la 3D dans les SIG est arrivé avec son application aux villes. Quand il s'agit d'une ville comptant des dizaines ou centaines de milliers de bâtiments, il faut trouver une méthode de modélisation plus rapide et moins onéreuse. Le premier souci du 3D urbain fut donc la recherche d'une modélisation "industrielle". Bien que la composante 3D ait été envisagée dans les SIG dès 1985, avec le module TIN d'ESRI, dans le milieu des années 1990 la 3D exigeait des configurations informatiques spécifiques et coûteuses qui restreignaient son usage à quelques spécialistes. Il fallut attendre le début des années 2000 pour voir son explosion avec la modélisation des villes.

■ La modélisation 2D1/2

La prise en compte de la 3D n'est pas simple, ni en ce qui concerne l'acquisition des données, ni en ce qui concerne le logiciel qui va les utiliser. Il faut dépasser la solution la plus simple qui consiste à utiliser un modèle 2D avec un z en attribut. L'utilisation en est trop restreinte : à quelle profondeur est ce regard, à quelle hauteur est cette maison, on pourra aussi en déduire un profil. Mais elle sera inadaptée à l'étude de l'impact visuel sur l'environnement.

On a eu recours en premier à la 2D1/2 qui s'appuie sur un modèle numérique de terrain, ce que les versions de logiciel SIG savaient faire depuis longtemps. Cela permet d'avoir une vision perspective du terrain naturel et de faire des simulations d'intervisibilité. Mais à chaque point (x,y) ne peut être associé qu'un z unique, incompatible avec la représentation d'un bâtiment.

Une variante plus évoluée permet d'associer deux z à tout point (x,y) : un z issu du MNT et un second z issu d'une autre source. En photogrammétrie classique, pour restituer les maisons d'une ville, le restituteur est obligé de suivre le contour des toits des maisons, le bas des maisons étant en partie occulté par la perspective. Cela permet d'avoir un Modèle Numérique d'Élévation (MNE), qui associé aux





Figure 7. Comparaison entre un modèle 3D élaboré (Versailles) et un modèle 2D D1/2

altitudes au sol du MNT donne les deux z nécessaires. Déjà, à la fin des années 1970, l'IGN avait proposé le logiciel TRAPU, le premier à obtenir par la restitution photogrammétrique la décomposition des bâtiments en polyèdres. On obtient alors une représentation urbaine 3D simplifiée, dont les bâtiments sont constitués de parallélépipèdes ou de figures géométriques simples. Cela permet d'obtenir différentes vues perspectives utiles à de nombreuses études. Cependant, une structure complexe, comme un échangeur autoroutier à trois niveaux, échappe à ce type de représentation.

Au début des années 2000, une question se posait en France : le passage à une représentation 3D véritable, avec toutes les études, mise au point de nouveaux outils, mesures nécessaires à la modélisation se justifiait-il ? Des pays comme l'Allemagne, l'Autriche ou la Suisse ne se posèrent pas ce type de question.

■ La modélisation 3D

Le premier souci pour l'utilisation de la 3D dans les SIG a été celui de la modélisation. Mais la modélisation posait un double problème : celui des mesures à effectuer pour pouvoir la créer et celui du rendu sur l'image. Le Modèle Numérique du terrain naturel (MNT) étant créé, il fallait savoir comment déterminer le Modèle Numérique d'Élévation (MNE) ; deux solutions se présentaient. On pouvait penser à une restitution photogrammétrique plus poussée que celle effectuée pour la réalisation d'une carte 2D et exploitée en 2D1/2. Cela nécessitait alors de restituer non seulement le contour des toits, mais aussi toutes les arêtes, de manière à ne pas obtenir de simples parallélépipèdes. On pouvait penser aussi à la technique nouvelle du laser LIDAR aéroporté avec un nuage de points assez dense pour rendre correctement les toitures. L'avantage du LIDAR était de fournir un nuage de points aussi autour des maisons, donc d'obtenir un MNT souvent meilleur que celui existant.

Autre souci, celui des façades des maisons. La solution la plus économique trouvée a été celle de prises de vues aériennes obliques. La Mairie de Montpellier, par exemple, a fait faire des prises de vues où le recouvrement des photos est de 66% de photo à photo et aussi de bande à bande, ce qui permet d'avoir huit points de vue différents d'un bâti-

ment. Ensuite, le problème est de trouver un algorithme pour caler automatiquement l'image d'une façade déformée par la perspective sur la véritable forme de la façade déduite des verticales à partir du toit (extrusion).

En fonction de ce que nous venons de voir, il existe plusieurs procédés de modélisation géométrique des objets 3D et il est certain que ces procédés vont conditionner l'utilisation que l'on va pouvoir en faire. On échappe à la facilité des images vectorielles nécessaire à la 2D. Il existe trois grands types de modélisation 3D géométrique (en ne faisant aucune référence à la topologie) : les modèles volumiques, les modèles surfaciques et la modélisation par balayage.

Modélisation par balayage : le principe de cette modélisation repose sur l'association d'une surface 2D et d'une trajectoire. Le déplacement de la surface 2D le long de la trajectoire permettant d'aboutir à une forme 3D.

Modélisations surfaciques : elles peuvent offrir une modélisation 3D à part entière. Les modèles surfaciques ne modélisent pas le volume d'un objet, ils modélisent le contour ou l'enveloppe de cet objet.

Modélisations volumiques : elles s'appuient sur des associations et des combinaisons de primitives de dimension trois (volumiques). Les objets ne sont plus représentés par leurs contours, ils sont représentés par leurs volumes.

Cependant, modéliser n'est pas tout, encore faut-il que les données issues de la modélisation soient stockées dans un format standardisé. En effet, le développement des technologies 3D a donné naissance à de nombreux logiciels, parfois incompatibles. Plusieurs formats se sont imposés qui constituent des standards, la transformation d'un format à l'autre étant possible. Le plus connu semble être le VRML (Virtual Reality Mark-up Language) paru en 1994 et dont le format X3D de Web 3D semble être le successeur, il serait fastidieux de tous les énumérer. Je cite seulement 3D Studio Max, Blender, Lightware 3D, etc.

En ce qui concerne la modélisation à partir d'image satellite à haute résolution, une norme ISPRS 3D pour les 3D City models, a été créée en 1995.

Outre-Rhin a été proposée en 2003 la norme CityGML dont l'objectif est de créer un format lisible pour stocker et représenter les villes en trois dimensions. Elle a été conçue par Geodata Infrastructure North-Rhine Westphalia qui regroupe chercheurs, entreprises et municipalités allemandes en vue du développement et de l'exploitation commerciale de modèles 3D interopérables. Quatre niveaux de détail du rendu des bâtiments ont été proposés. Une fois modélisée, la ville peut être visualisée avec des outils spécialisés : GML-tool, entre autres.

Il est d'ailleurs amusant de constater que cette visualisation avec navigation dans un espace 3D ne vient pas de recherches liées à des impératifs topographiques, mais de recherches liées aux jeux vidéo !

Actuellement, certains chercheurs envisagent de dépasser la modélisation de l'enveloppe extérieure des bâtiments pour s'intéresser aux pièces qui les composent (Modèle 4 de



CityGML en 2007). Mais, si cette modélisation est très séduisante pour un projet architectural limité, elle semble difficile à étendre à toute une ville.

D'autres modélisations sont en cours à partir des images satellitaires comme nous le verrons plus loin avec Google Earth et Virtual Earth. Elles avaient déjà été entrevues dans la seconde moitié des années 1990, sans aboutir.

■ *La gestion des données dans un SIG 3D*

La modélisation et la standardisation des données images 3D ne suffisent pas, il faut pouvoir gérer toutes les autres données sur le modèle 3D. Un SIG 3D doit présenter les mêmes caractéristiques et fonctionnalités qu'un SIG 2D mais en portant chacune d'elle (fonctionnalité) à un niveau supérieur, car la gestion d'objets spatiaux, y compris les volumiques doit se faire dans un référentiel 3D. Cela implique une gestion de la topologie 3D des objets, une analyse spatiale 3D (intersection de volumes, etc.) et une indexation spatiale 3D.

La gestion d'objets volumiques et des trois types d'objets vus dans les SIG 2D ne peut se faire simplement et il faut imaginer une autre logique de conception et de liaison entre les données descriptives (ou attributaires) et le modèle. L'intégration d'un système de gestion de l'information 3D à la modélisation de l'espace urbain nécessite encore des recherches complexes. La notion de modèle simple est dépassée. Il faut repenser entièrement le concept du SIG pour développer un meta modèle générique de l'information 3D urbaine. Quant à la navigation à travers les rues du modèle, comme on le ferait en voiture, elle allie la 3D au mouvement, lequel est fonction du temps. Certains en ont fait la 4D alors que les jeux vidéo, ou l'armée dans les simulateurs de vol l'utilisent depuis longtemps !

Début 2008, aucun logiciel de SIG ne peut être qualifié de 3D et n'est en mesure de proposer des outils d'analyse 3D comparable à ce qui existe en 2D. On a des SIG à deux composantes : un SIG classique pour tous les objets au sol (voirie, parcellaire, etc.) et des options 3D pour les simulations d'impact architectural et certaines études techniques liées à l'altitude. Il faut d'ailleurs se rappeler que par sa définition, la surface d'un terrain est mesurée sur le plan horizontal. On voit ici la complémentarité de fait qui existe entre la 3D et la 2D.

■ *Mise à jour d'un SIG urbain*

La mise à jour est l'un des impératifs d'un SIG : une ville évolue en permanence et sa gestion nécessite que cette évolution soit prise en compte sans tarder. Chaque nouveau projet immobilier fait l'objet de plans et de simulations qui sont transmis aux services urbains. Ces projets sont réalisés en DAO, Autocad ou Microstation, entre autres, permettant de les représenter en 3D, il faudra donc les intégrer dans un format compatible avec la mise à jour du SIG. Tout comme des photographies de façades devront pouvoir être introduites dans le SIG lors de projets de rénovation. Les prises de vues aériennes doivent elles aussi être suffisamment fréquentes. Le plan parcellaire pose l'un des gros problèmes de la mise à jour, le cadastre ayant souvent du retard dans toutes les modifications de ses plans suivant un partage ou une rectification.

■ *Gestion des réseaux*

C'est sans doute l'un des aspects qui prendra le plus d'importance dans l'avenir. Mais, le positionnement des réseaux souterrains n'est pas aisé, car beaucoup de négligences ont été commises et beaucoup de réseaux anciens n'ont pas fait l'objet d'un plan précis lors de leur installation. Il est facile, lors d'un lever urbain de positionner les bouches à clef, les plaques d'égout, les bornes à incendie, mais dans de nombreux cas, leur jonction par les conduites enterrées n'a pas été relevée au moment des travaux et certaines communes sont très en retard dans la constitution d'un SIG fiable. Certaines sociétés telles EDF, GDF ou France Télécom ont été plus rigoureuses exigeant des entreprises un plan 1/200 lors des travaux d'installation de câbles ou de conduites enterrées. Mais, pour des questions de responsabilité, elles préfèrent ne pas diffuser les banques de données de leur réseau qui ne font l'objet que d'échanges d'informations très localisées avec les communes lors de travaux.

Cette gestion des réseaux, si elle veut être efficace, demande une précision meilleure que celle des objets externes. Elle devrait être de l'ordre de 10 cm et parfois centimétrique en Z (écoulement gravitaire de l'eau usée ou de l'eau pluviale en zone plate), ce qui n'est pas toujours le cas. Donnée trop négligée ou souvent estimée et non mesurée : la profondeur. Certaines communes (Rennes) préfèrent avoir une altitude, ce qui lève toute ambiguïté quand le sol au-dessus d'un réseau a fait l'objet de modifications (terrassement ou rechargement du revêtement d'une rue). Dans le cas d'un SIG 2D, cette altitude Z doit être un attribut du point XY concerné.

Les SIG dans les communes françaises

Nous avons vu qu'en 1973, avait commencé la numérisation du plan parcellaire de Paris et du cadastre de plusieurs grandes villes françaises.

La numérisation du parcellaire dans les villes fut donc le premier début de la constitution des banques de données qui allait permettre avec les progrès de l'informatisation graphique de donner naissance aux SIG urbains. Cependant, il faut avouer que le cadastre français, avant tout document fiscal, manquait de la rigueur quant à sa mise à jour et la précision graphique des limites de parcelles. Sa superposition à des documents plus précis posera des problèmes que nous verrons plus loin. Aujourd'hui, bien que le Plan Cadastral Informatisé (PCI) permette de constituer un SIG répondant aux principes modernes des bases de données géographiques relationnelles, il souffre d'un handicap majeur : le géoréférencement et la continuité géographique n'avaient pas été prévus dans sa conception initiale toujours en vigueur. Signalons que de très nombreux géomètres rédigent encore leurs documents de partage parcellaire sur support papier, avec l'assentiment du cadastre (figures 8 et 9).

En 2002, si 34 villes françaises de plus de 100 000 habitants étaient dotées d'un SIG, 6 ne l'étaient pas encore ! En ce qui concerne les 72 villes de 50 à 100 000 habitants, seules 55 avaient un SIG. Pour les petites communes, on tombait à 5 %





Figure 8. Discordance entre une feuille du cadastre (en jaune) et une autre (en bleu), le calage des constructions n'est pas parfait, une voie n'a pas été régularisée.



Figure 9. Cadastre mis en cohérence avec l'orthophotoplan.

des communes de 5 à 10 000 habitants disposant d'un SIG ; il est évident que ce pourcentage a beaucoup augmenté en 2008.

- Il faut parler de Virtuel City, société implantée dans le Doubs où elle participe à une SEM (Société d'Economie Mixte) avec certaines collectivités de Franche-Comté. Elle est partenaire de l'IGN sur certains projets et devrait avoir couvert 48 villes françaises en 3D, en mai 2008. Elle propose une haute et une moyenne définitions, un géoréférencement d'une précision de ± 15 cm en XYZ, une interopérabilité des SIG et des données fournies en formats 3DSM, KML, VRML, DXF, X3D.
- Les logiciels libres : nous en avons parlé précédemment, il s'agit de logiciels gratuits développés dans les universités. Des SIG libres existent qui présentent des fonctionnalités tout à fait satisfaisantes pour des petites structures (petite commune par exemple). Une action avait été développée pour leur utilisation par les collectivités territoriales, ce qui aurait dû leur permettre d'éviter le coût d'un logiciel. Mais, leur habillage, leur ergonomie, leur adaptation aux besoins de l'utilisateur imposent l'appel à un spécialiste, ce qui ne représente pas toujours une économie. Le plus connu de ces



Figure 10. Comparaison entre les orthophotoplans de résolution 50 cm et 20 cm.

logiciels est Grass, Microsoft a aussi développé Open Source et certaines petites structures informatiques ont amélioré ou développé ces logiciels libres pour les commercialiser !

- Nous traitons ci-après, le cas de sept grandes villes qui représentent bien l'évolution des SIG dans les communes françaises. Nous verrons aussi que la cohérence recherchée dans la précision des données graphiques amènera ces communes à reprendre la numérisation du cadastre et pour certaines à se doter d'autres orthophotoplans que ceux de la BDOrtho IGN.

■ Marseille

Avec la communauté urbaine de Lille, Marseille est la première ville française à s'être lancée dans la constitution de bases de données qui débouchèrent ensuite sur un SIG. Dès 1971 est constituée la société d'économie mixte ICOREM, chargée dans un premier temps d'analyser ce qui est possible. Une convention est aussitôt signée avec la DGI et la numérisation des 960 planches cadastrales de la ville est entreprise. Parallèlement est utilisée une photogrammétrie 1/1 000 pour bien cadrer ce cadastre et caler les bâtiments. Dans la zone urbaine, il en résultera un cadastre à l'échelle 1/500 de bonne facture, donnant l'appartenance des clôtures (mitoyenne ou privée). Parallèlement, ICOREM développe le logiciel CARINE qui va permettre non seulement de stocker les bases de données images et descriptives, mais aussi de les gérer. En 1981, le système devient opérationnel, alors qu'aucun logiciel de SIG n'a encore été mis sur le marché. Marseille, pionnière en SIG, devient un exemple visité par les représentants de nombreuses villes françaises ou étrangères. La même année, la ville transmet son savoir-faire à Toulouse. ICOREM sera absorbé par la ville en 1997. Au début des années 2000, le logiciel Geoconcept remplace CARINE qui sera tout de même utilisé pour la gestion des bases de données jusqu'en 2004. La ville ne gère pas les réseaux EDF, GDF et France Télécom. Marseille, qui s'étend sur une superficie de 240 km² et compte 800 000 habitants va s'intégrer à partir de 2001 dans la communauté d'agglomération MPM (Marseille Provence Métropole), 600 km² et 1 000 000 d'habitants. L'effort actuel est porté sur une mise en cohérence entre le cadastre et l'orthophotoplan avec une précision de 0,18 m. Début 2008, il n'y a pas encore de modélisation 3D de l'agglomération.

■ Nice

Nice est une des villes qui peut être citée en exemple dans sa rigueur de gestion d'un SIG. En 1994, commencent la numérisation du cadastre et le lever des corps de rue de la ville au 1/200. La ville ne tarde pas à mettre en place une station GPS fixe pour permettre aux géomètres de travailler dans un système de référence unique. Le SIG, géré par Arcview devient pleinement opérationnel en 2000. C'est l'une des rares villes à gérer tous ses réseaux : eau potable, eaux usées, eaux pluviales, éclairage public, électricité, gaz. Seuls les réseaux téléphoniques de France Télécom échappent à sa gestion. Une mise à jour continue par la cellule topographique est assurée par une liaison permanente avec les services chargés des travaux. La modélisation 3D est en cours depuis 2006.

■ Toulon

Un projet de SIG a été lancé en 1990 et il commença à être opérationnel en 1995. Le logiciel employé est un logiciel libre et non un logiciel propriétaire, ce qui laisse plus de liberté de choix et de méthode. Aujourd'hui, Toulon-Provence-Méditerranée (TPM), communauté d'agglomération de onze communes d'un total de 420 000 habitants supervise la structure toulonnaise, prenant à son compte l'occupation des sols (orthophoto), le parcellaire (cadastre) et l'altimétrie. L'action est mise sur la cohérence des différents documents graphiques pour obtenir partout une précision de 20 à 25 cm. La numérisation du cadastre des 33 communes de la région de Toulon est en cours, dans un format normalisé. Quant à la modélisation 3D, l'acquisition des données cartographiques a commencé en 2006 et 700 km² étaient livrés en 2007. Début 2008, 20 km² sont opérationnels. Cependant, chaque commune de l'agglomération garde ses gestions spécifiques (patrimoine, voirie, réseaux). (figure 11)



Figure 11. Schéma du SIG géré par l'agglomération de communes Toulon-Provence-Méditerranée. Chaque commune gère indépendamment son patrimoine et ses réseaux.

■ Le Havre

Le SIG de la ville a été envisagé dès 1990-91 et les premières acquisitions se sont faites en 1992, en particulier avec la DGI pour la numérisation normalisée du cadastre qui ne terminera ce travail qu'en 2002. Ce SIG commencera à devenir

opérationnel qu'en 1996. La modélisation 3D a été envisagée dès 1999 et les premières acquisitions sont faites à partir de 2001 lors de projets urbains, en particulier en 2002 lors de la rénovation de la partie historique de la ville. Le logiciel 3D studioMax compatible avec Autocad est alors utilisé pour être intégré au SIG ArcGIS. Soixante projets immobiliers seront ainsi inclus dans le SIG entre 2001 et 2007. Ces modèles 3D réalisés lors des projets urbains ont permis de mieux définir les spécifications techniques et le modèle 3D de la ville est opérationnel en 2006. En 2007, les 60 km² de territoire restitués comptent 65 661 bâtiments totalisant 360 000 facettes de toit ! La précision des points est de 0,4 m.

■ Montpellier

Montpellier est sans doute la grande ville française qui a la plus forte expansion démographique. Paradoxalement, c'est l'une de celles qui est restée le plus à la traîne pour les SIG. La numérisation normalisée du cadastre par la DGI ne commença que vers 1996. Au début des années 2000, l'arrivée de M. Perdrizet qui venait de lancer la modélisation 3D du Havre, allait permettre de passer directement à la constitution d'un SIG avec modélisation 3D. Dès 2003, des prises de vues aériennes étaient prises en vue d'une restitution détaillée de la ville étalée sur trois ans avec une précision des pointés de 0,1 m. 57 km² de territoire étaient couverts.

Différemment de la ville neuve du Havre, la vieille ville de Montpellier comporte beaucoup de rues étroites interdisant les prises de vues aisées des façades. Méthode innovante, les prises de vues aériennes comportent un recouvrement de 66 % dans les deux sens, ce qui permet de voir un bâtiment de huit points de vue différents. Opérationnel depuis 2007, le SIG placé sur intranet permet une visualisation par les différents services de la commune et il sera visible sur Internet fin 2008 - début 2009. Une prise de vue aérienne annuelle est prévue pour une mise à jour.

■ Saint-Quentin-en-Yvelines

Regroupe une communauté d'agglomération de sept communes d'un total de 150 000 habitants et couvrant 72 km². Le SIG a été mis en place à partir de 1990 avec le logiciel STAR APIC qui gère aussi les documents graphiques et Oracle pour les données alphanumériques. Ce qui semble une première en France, il a été disponible sur Internet à partir de 1998. La modélisation 3D initiée en 2002 commence à être opérationnelle en 2004, elle touche 35 000 bâtiments et 35 000 arbres. Elle s'est faite à partir de points lidar (4 par m²) et de photogrammétrie. Elle est complétée au fur et à mesure par les modèles plus élaborés issus des nouveaux projets. Zone d'urbanisation récente, l'installation des nouveaux réseaux en tranchées permet à la communauté d'avoir tous les réseaux, y compris ceux de l'EDF-GDF et France Télécom, différemment de nombreuses autres communes ou agglomérations.

■ Rennes

Rennes compte parmi les villes pionnières en matière de SIG. Dès le début des années 1980, une collecte des informations

► géographiques était faite sur Ascodes de JS Info. En 1991 ESRI (ArcGIS, ArcInfo 6-7) est adopté pour gérer les éléments de moyenne précision (0,5m) tels que le plan cadastral (PCM), l'urbanisme (PLU), les plans généraux. Ascodes est conservé pour gérer les données fines issues des levés de voirie 1/200 et des levés de réseaux faits au cours des travaux avec leur composante altitude. On peut estimer que 50% des réseaux de la ville entrent dans cette base de données. Son domaine public, 450 km de voies urbaines mais aussi les écoles, espaces verts, cimetières, etc. est totalement décrit dans une base de données unique de la précision des levés 1/200 (terminés en 1999) et réactualisé en temps réel. Choix politique délicat, car coûteux au moment de son déploiement, le SIG a prouvé depuis son efficacité. Il sert en interne aux services gestionnaires du patrimoine de la ville de Rennes, mais aussi à des partenaires externes (services de police, SDIS, etc.) et surtout aux gestionnaires de réseaux partenaires (FranceTélécom, EDF, Veolia, etc.) qui participent à l'enrichissement de la base de données. Dans le cadre actuel du projet de construction d'une nouvelle ligne de métro de 12 km, cet outil sert aux études préalables pour dévier les réseaux situés dans l'emprise de l'ouvrage. Le SIG 3D en cours croise une topologie des toits sur Ascodes avec les plans généraux et le MNT.

Les bases de données IGN

Regroupées sous le Référentiel à Grande Echelle (RGE), l'IGN a constitué les bases de données suivantes :

La BD Topo

Dans le cadre de la mise en place du référentiel à grande échelle (RGE), l'IGN se lance dans la BD TOPO en 1988, base topographique informatisée de précision métrique, inspirée par la volonté d'en déduire la carte 1/25000 par voie logicielle. En 1998, seuls 27 % du territoire ont été couverts, on entreprend alors la recherche de méthodes plus rapides et moins onéreuses, la France est couverte en 2005. L'utilisation de la composante BD Alti permet d'obtenir la perception du relief. Toutes les bordures de toit ont été numérisées, qui associées au MNT permettront d'avoir des perspectives urbaines 3D sur Géoportail. La DB TOPO est utilisable sur les SIG Geoconcept, Arcview et Mapinfo, tandis que Edigeo doit permettre des échanges avec d'autres SIG.

La BD Ortho

La numérisation des photos, les progrès techniques concernant l'industrialisation des orthophotos permettent à l'IGN de se lancer dans la BD ORTHO en 1998. La couverture de la France est terminée début 2004, date à laquelle les caméras argentiques sont remplacées par des numériques. Dans les zones urbaines, la précision est de l'ordre de 0,5 m et de 0,25m dans une dizaine de villes. Ailleurs, elle est métrique avec une fourchette de 1,5 à 3 m en montagne. Cela explique que certaines communes aient fait faire leurs propres orthophotoplans.

La BD Adresse

En 2001, l'IGN entreprend en collaboration avec la Poste une BD ADRESSE géoréférencée, associée à la base de GEOROUTE.

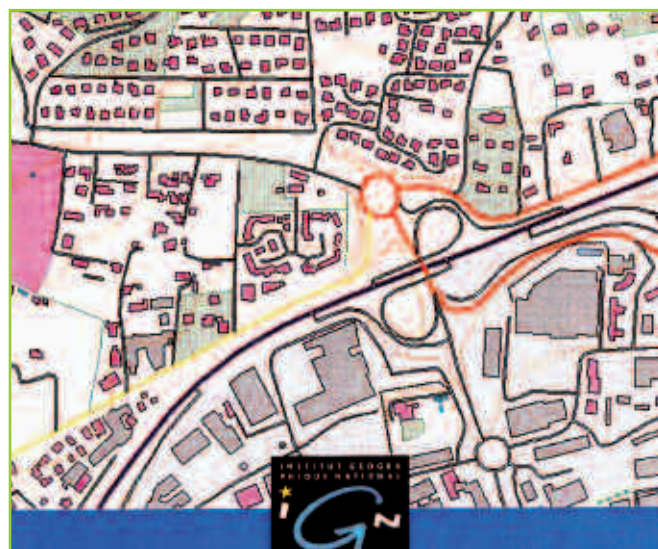


Figure 12. La BD topo telle qu'elle apparaît après avoir ouvert plusieurs couches qui se superposent. En cliquant l'un des objets (segment de route, maison) on peut faire apparaître une table attributaire que l'on peut compléter ou corriger en fonction de ses besoins.

La BD Parcellaire

En 2001, est signée une convention de coopération entre l'IGN et la DGI pour la constitution de la BD parcellaire. La DGI fournit les plans vectorisés ou scannés à l'IGN qui les rattache au système de coordonnées national quand ils ne le sont pas, qui réalise la meilleure continuité possible entre ces données et qui assure la cohérence de ces données avec les composantes topographiques et orthophotographiques. Cette composante parcellaire est terminée en 2007. Mais, elle ne correspond pas toujours à ce qu'en attendaient certaines communes visant une meilleure précision et un emploi plus souple. Le programme 2008-2011 de l'IGN prévoit d'achever la vectorisation de cette BD parcellaire et la mise en œuvre de la convergence entre le plan cadastral informatisé (PCI) de la DGI et la base de données parcellaire de l'IGN, ce ne sera pas facile.

GEOROUTE

La version 2 de cette base a été lancée en 1999 et décrit le réseau routier ouvert à la circulation en milieu urbain avec une précision métrique. Elle s'appuie sur la BD topo.

GEOPORTAIL

Géoportail est un site destiné à être consulté librement sur Internet, il couvre toute la France métropolitaine ainsi que les départements et territoires outre-mer. Il a été décidé par décret le 22 novembre 2004. Mais déjà, depuis 2002, on pouvait consulter gratuitement le site IGN donnant les points géodésiques et les répertoires de nivellement de la France. Lancé en 2005, le site est entièrement opérationnel en décembre 2007 avec la composante 3D qui permet de voir les villes en perspective. Cette vision 3D peut être obtenue par le chargement gratuit du logiciel Terra Explorer.

Géoportail comporte des couches qui peuvent être superposées, telle la carte IGN, le plan parcellaire ou l'orthophoto-



Figure 13. Géoportail tel qu'il apparaît sur l'écran PC après qu'on ait choisi l'option "carte". Un catalogue de 24 couches permet de rajouter d'autres couches à cette couche de base. On peut en régler l'opacité pour une meilleure lisibilité.

plan. Quant à la carte géologique de base du BRGM, elle peut être consultée par géocatalogue.

MAPPY - PAGES JAUNES

Il aurait été injuste de ne pas citer Mappy créé en 1987 et édité par la filiale de Wanadoo/France Télécom, tout d'abord disponible sur minitel. Il est aujourd'hui filiale des Pages Jaunes ; cela permet d'expliquer que l'on puisse cliquer la localisation d'un numéro de téléphone trouvé dans la consultation des Pages Jaunes. Mappy permet de prévoir et de calculer un



Figure 14. Plan Mappy obtenu sur le site et tel qu'il apparaît à l'écran. Outre l'adresse cherchée, marquée par un cercle violet, apparaît la photographie de l'immeuble concerné. D'autres fonctions ou services sont accessibles.

itinéraire routier avant un voyage ou encore de localiser graphiquement une adresse dans une localité. Grâce à une base de 6 000 000 de photos, la vue de nombreuses rues est associée à cette localisation. En 2006 un partenariat est signé avec l'IGN pour la couverture photo de la France entière. Au point de vue routier, Mappy couvre aujourd'hui 27 pays européens. Avec près de 6 000 000 de visiteurs uniques par mois, c'est l'un des sites français les plus fréquentés. Quel internaute ne l'a pas utilisé pour calculer un itinéraire avant de partir en vacances ou de se rendre à une adresse pour la première fois ?

Hors de France

Les pays pionniers dans la 3D et les SIG en Europe sont l'Allemagne et la Suisse. Ce sont justement ces pays, membres très actifs de l'ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) qui ont et continuent de développer et de proposer des structures 3D. Il faut aussi mentionner les Pays-Bas et l'Autriche également très actifs dans ce même registre et qui font partie des nations européennes les plus en avance. A titre d'exemple, je citerai ce qui s'est fait en Autriche.

A Vienne, la 3D et la modélisation de la ville ont commencé en 2004 pour être opérationnelles dans sa partie centrale (30 000 bâtiments en 2005). Aujourd'hui, 200 000 bâtiments sont modélisés ainsi que l'intégralité du métro, avec les normes CityGRID. Le modèle 3D de Vienne a été généré par une triangulation automatique des toits, puis par une extrusion des façades vers le sol. Le tout fonctionne avec ArcGIS. Le modèle 3D de la ville est utilisé en combinaison avec les éléments 2D du sol. Pour la visualisation en 3D, les éléments 2D sont adaptés au modèle de terrain.

A Klagenfurt, 30 000 bâtiments ont été modélisés aux normes CityGRID. La modélisation qui avait commencé en 2006 a été opérationnelle en 2007 pour le centre de la cité (15 000 bâtiments). Le SIG fonctionne sous Geomedia.

A Linz, la modélisation du centre historique de la ville (1 000 bâtiments) faite durant l'été 2007 aux normes CityGRID est maintenant terminée. Le modèle sera étendu prochainement aux 50 000 bâtiments de la ville. (d'après Gerald Forkert)

Google earth et virtual earth

Initialement connu sous le nom de Earth Viewer, le produit a été développé par la société Keyhole, Inc. qui a été rachetée par Google en 2004. Il a été renommé Google Earth en 2005 et est depuis disponible pour les ordinateurs personnels équipés de Microsoft Windows 2000 ou XP, Mac OS X 10.3.9 ou supérieur, Linux (depuis le 12 juin 2006), et FreeBSD. C'est un logiciel permettant une visualisation de la terre avec un assemblage de photographies aériennes ou satellitaires. Il permet à tout utilisateur de survoler la Terre et de zoomer sur un lieu de son choix. Payant dans sa version Keyhole, son usage est maintenant gratuit. Plusieurs grandes villes peuvent être observées avec une résolution suffisamment élevée

► pour pouvoir distinguer individuellement chaque immeuble, maison et même voiture. Dans certaines villes telles que Paris, Londres, Washington et Seattle, il est même possible de distinguer les gens dans la rue. La résolution d'observation maximale des lieux géographiques dépend de leur intérêt, cependant toute la surface de la Terre a été photographiée avec une résolution d'au moins 15 mètres.

En 2006, Microsoft rachète la société Vexcel spécialiste en photogrammétrie tridimensionnelle. C'est ainsi qu'est né le projet Virtual Earth qui, début 2008 couvre une quinzaine de grandes villes américaine tandis qu'une centaine d'autres sont en cours de saisie.

Conclusion

Aujourd'hui, les SIG ont acquis droit de cité et sont enseignés dans de nombreuses universités. En 2007, le Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) a créé sa chaire de géomatique. Cela ne pourra qu'accélérer les recherches et de nombreux développements sont à prévoir dans un avenir proche. Cela m'amène à deux conclusions.

La première est optimiste. Tous les exemples traités ci-dessus, se rapportent aux grosses structures, soit étatiques (IGN, DGI), soit à des grandes communautés urbaines, soit encore à une diffusion des données à grande échelle. Mais avec le développement et la démocratisation qui ont suivi la micro-informatique, les Systèmes d'Information Géographiques sont devenus accessibles à des petites structures, telle une PME qui veut répertorier et classer ses clients par adresse, ou même à des particuliers. Je citerai à titre d'exemple le fichier sur cédérom des cavités karstiques du Var, réalisé par des spéléologues et qui regroupe actuellement 2000 grottes et gouffres. Il est rédigé sur le logiciel de base de données File Maker Pro sous sa forme runtime, ce qui permet à l'utilisateur de le consulter sans logiciel spécifique. Il comprend une fiche de renseignement et une topographie pour chaque cavité. Le géoréférencement des cavités permet de les télécharger sur le 1/25 000 numérisé Cartoexplorer et le fichier sera bientôt consultable sur internet. Il concrétise l'importance que les SIG pourront prendre dans la société de demain. C'est pourquoi je le cite dans la bibliographie, afin de montrer les possibilités qu'offrent les applications informatiques d'aujourd'hui, même à un échelon modeste.

La seconde est pessimiste. Entre les chercheurs qui doivent justifier leur statut et la concurrence de plus en plus vive que se livrent les sociétés, les poussant à innover constamment pour prendre une avance sur les autres, ne sommes-nous pas engagés vers une fuite éperdue en avant ? Certaines innovations seront-elles guidées par une utilité réelle ou parce qu'elles sont techniquement possibles ? Je pense au malheureux exemple de l'avion supersonique Concorde. Aurons-nous des temps de pause suffisants pour assimiler les nouvelles techniques ou en amortir le coût ? Comme le sommeil, ces pauses sont nécessaires à l'équilibre humain. Attention à la névrose du "toujours nouveau" de notre société consumériste ! Malgré les bons côtés du progrès,

son emballement ne nous fait-il pas jouer les apprentis sorciers ? ●

Remerciements

MM. Jacques Gaubert (Marseille), Michel Bernard (Esri France), Marc Bernard (Spot Image), Rolland Billen (Université de Liège), Olivier Banaszak (Le Havre), Laurent Charrier (St-Quentin-en-Yvelines), Denis Delerba (Nice), Alain Dupé (Toulon-Provence-Méditerranée), Rani el Méouche (ESTP), Gerald Forkert (Geodata Autriche), Franck Perdrizet (Montpellier), Joseph Morel (Rennes), Mathieu Koehl (INSA Strasbourg) pour ses commentaires lors de la lecture de la première mouture de l'article, ainsi que Roger Serre et Patrice Gaubert pour leurs commentaires.

Bibliographie

DENEGRE Jean, SALGE François, 1996, *Les Systèmes d'Information Géographique*, PUF, coll. Que sais-je ?, Paris

PAPARODITIS Nicolas, 1998, *Reconstruction 3D de paysages péri-Urbain en Imagerie Stéréoscopique Satellitaire Haute Résolution*, thèse soutenue à Cagnes-sur-Mer.

BORDIN Patricia, 2002, *SIG concept outils et données*, Lavoisier, Paris

COURBON Paul, LUCOT Jean-Pierre, 2005, *Le fichier sur cédérom du Var*, Spelunca n°100.

COURBON Paul, 2007, *Cinquante ans d'évolution topographique, l'informatique et le traitement des données*, XYZ n°112, pp. 29 à 36.

XYZ n°114, 2008, dossier SIG : vers la généralisation de la 3D, avec les articles suivants :

LAURINI Robert, SERVIGNE Sylvie, *Panorama des potentialités SIG en 3 dimensions : vers un modèle 3D virtuel des villes*.

BOUILLE François, *Méthodologie d'un montage de SIG 3D par des étudiants*.

BILLEN Roland, LAPLANCHE François, ZLATANOVA Siyka, EMGARD Ludvig, *Vers la création d'un méta-modèle générique de l'information spatiale 3D urbaine*.

FORKERT Gerald, *Création, administration et utilisation d'un modèle urbain numérique en 3D*.

BANASZAK Olivier, KOEHL Mathieu, *SIG et 3D au service des collectivités territoriales : l'expérience de la ville du Havre*.

Contacts

Paul COURBON
paul.courbon@yahoo.fr

Cet essai s'inscrit dans un devoir de mémoire. Il souligne et rappelle les percées technologiques actuelles qui ont demandé de longs efforts, de longues réflexions et une longue mise au point. Il sera prochainement disponible sur le site Internet de l'A.F.T. Aussi, toute remarque, critique, ajouts et compléments de la part de spécialistes seront les bienvenus.