



HAL
open science

Spécial Environnement

Daniel Piquet-Pellorce, Anne Maury, Bertrand Galtier, Denis Priou,
Jean-Claude Deschamps, Daniel Gagnier, Pascal Chambon, Claude Boucher,
Guy Wöppelmann, Michel Kasser

► **To cite this version:**

Daniel Piquet-Pellorce, Anne Maury, Bertrand Galtier, Denis Priou, Jean-Claude Deschamps, et al.. Spécial Environnement. [Rapport de recherche] 66, Institut géographique national. 1997, 59 p. hal-02372927

HAL Id: hal-02372927

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02372927v1>

Submitted on 20 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

BI

INSTITUT
GÉOGRAPHIQUE
NATIONAL

BULLETIN D'INFORMATION DE L'IGN

*spécial
environnement*



66

Bulletin d'information de l'IGN

n° 66

Environnement

Spécial Environnement

01 Classement IGN-SR : 970003/R-LIV

02 Livre

03 Nom et adresse du directeur de la publication :

Jacques POULAIN

IGN

2-4 avenue Pasteur

F-94165 Saint-Mandé cedex

04 Rédacteurs en chef :

Bertrand GALTIER puis Jean DENÈGRE

IGN

2-4 avenue Pasteur

F-94165 Saint-Mandé cedex

05 Réalisé au Service de la Recherche de l'IGN

IGN

2-4 avenue Pasteur

F-94165 Saint-Mandé cedex

06 Titre : spécial Environnement

07 Date d'édition : 1997

13 Numéro 66

15 Nom de la collection : *Bulletin d'Information de l'IGN*

Résumé

Ce bulletin rassemble les contributions de l'IGN dans le domaine de l'environnement et de l'information géographique. Il dresse un bilan pluriannuel et aborde de nombreux thèmes de la géographie numérique : cartographie, images spatiales, système d'information géographique (SIG), géodésie... De façon transversale, les sujets environnementaux sont tout aussi variés : protection des paysages, hydrologie, risques technologiques majeurs, effet de serre

Mot-clé principal : Environnement

Mots-clés : SIG, cartographie, satellite, géodésie, protection des paysages, risques majeurs, hydrologie, niveau des mers.

Table des matières

1.	Préface	3
2.	La protection des paysages et l'information géographique	4
	Introduction	4
	La protection du paysage	4
	L'information géographique classique	5
	L'information géographique numérique	6
	Conclusions	7
3.	Les bases de données géographiques pour l'environnement	9
	Les bases de données, descriptions de l'espace	9
	Les bases de données, outils de gestion	11
	Les bases de données, bases de simulation	13
	Conclusion	14
	Bibliographie	14
4.	Utilité des iconocartes dans un SIG orienté-environnement	15
	Résumé	15
	L'iconocarte : un produit cartographique à base d'images numériques	15
	La décomposition en descripteurs du message cartographique	16
	L'iconocarte : donnée ou information géographique ?	16
	Quelles spécifications sémantiques pour un SIG orienté-environnement ?	17
	L'iconocarte : quelle utilisation pour l'environnement ?	18
	Intérêt d'un programme de couverture d'iconocartes	18
	Conclusion	19
	Annexe	20
5.	Imagerie et prise en compte du relief	25
	Introduction	25
	Le problème posé	25
	Méthodologie	26
	Réalisation technique des images	26
	Les résultats	27
	Autre cas exemplaire	28
	Conclusion	28
6.	Cartographie et SIG appliqués aux risques technologiques majeurs et au transport de matières dangereuses	29
	Cartographie TMD 76	29
	SIG-TMD-76	30
	Conclusion : impact des documents	34
7.	Utilisation de la BD TOPO® pour les études hydrologiques	36
	Hydrologie et topographie	36
	Le cas de l'Ouvèze	36
	Utilisation de la BD TOPO®	38
	Conclusion	39
8.	Apport de la géodésie à la surveillance du niveau des mers	43
	Résumé	43
9.	La mesure des mouvements du sol par méthodes géodésiques	51
	Introduction	51
	Les besoins actuels en mesure de déformations	51
	Les méthodes employées en mesure de déformations	52
	Ce qui manque à la panoplie actuelle	56
	Conclusion	57

1. Préface

Jacques FREMIOT
Directeur Général
Institut Géographique National
136, bis rue de Grenelle
75700 PARIS 07 SP

Le terme "environnement" a une connotation profondément spatiale : "ce qui est autour", c'est l'espace, le cadre qui met en relation tout un ensemble de phénomènes plus ou moins complexes coexistant en un même lieu. On ne s'étonnera donc pas du fait qu'une des missions principales de l'Institut Géographique National, qui est la description des lieux (topographie, au sens littéral) sur l'ensemble du territoire, se trouve en relation étroite avec l'environnement. Cartes topographiques et bases de données ont pour objectif de servir de référence de localisation et fournissent ainsi de premiers éléments d'informations sur l'environnement. De même, les techniques de cartographie, de traitement d'image, de métrologie géodésique ou photogrammétrique ainsi que les technologies liées aux systèmes d'information géographique (SIG) peuvent participer utilement à la résolution des problèmes environnementaux.

On notera également que les cartes topographiques, comme d'ailleurs les images aériennes et spatiales, traduisent a posteriori, et de manière synthétique, l'évolution du territoire dans leurs traits les plus apparents : urbanisation, mitage dû à l'habitat, déprise agricole, aménagements routiers ou touristiques, assèchement des zones humides etc.... Edition après édition, prise de vue après prise de vue, enregistrement après enregistrement, la cartographie et la télédétection témoignent de ces changements, positifs ou négatifs, de notre cadre de vie.

Ainsi, à la fois référence dans l'espace et témoin dans le temps, l'information géographique de base constitue un apport important à l'information sur l'environnement. Les systèmes d'information sur l'environnement intègrent naturellement la technologie des SIG, ce qui explique que l'IGN soit concerné. Il est significatif que les premiers services de l'administration à se doter de la BDCARTO® aient été les Agences de l'eau, établissements publics placés sous la tutelle du Ministère de l'Environnement. De même, une coopération s'est instaurée, dès sa création, entre l'Institut français de l'environnement (IFEN) et l'IGN. Elle s'est concrétisée, notamment, dans la participation française au programme européen CORINE Land Cover, dont les données sont collectées sous maîtrise d'œuvre de l'IFEN et distribuées par l'IGN.

Le propos du présent bulletin est de présenter ainsi quelques-unes des contributions les plus significatives des données et techniques de l'IGN dans les différents secteurs d'étude de l'environnement : protection des paysages, gestion de l'espace et simulation d'aménagements grâce aux fonctionnalités des systèmes d'information géographique, représentation cartographique sur fonds d'images (iconocartes), études spécifiques liées au relief, notamment en matière hydrologique et d'inondation, transport des matières dangereuses, prévention des risques technologiques majeurs et gestion de crises, surveillance du niveau des mers, mesure des mouvements de l'écorce terrestre, inventaire de l'occupation des terres (CORINE Land Cover, déjà cité).

A l'heure où l'IGN déploie un effort important en matière de production de données et de développement de techniques de pointe dans le secteur géographique, et où, parallèlement, des développements sont en cours en matière de SIG, tant au ministère de l'Environnement et à l'IFEN, qu'à l'Agence européenne de l'environnement, la coopération entre ces partenaires ne peut que se renforcer. Les enjeux croissants de l'environnement dans le monde contemporain justifient pleinement ces efforts conjoints.

2. La protection des paysages et l'information géographique

*Daniel PIQUET-PELLORCE
Institut Géographique National
2/4 avenue Pasteur
94165 SAINT-MANDÉ CEDEX*

Introduction

Dans le mot paysage, il y a "pays" et ceci donne, sans doute, toute sa pertinence au rapprochement fait dans ce bulletin de l'IGN, entre géographie et environnement. Bien sûr, il s'agit ici du pays du paysan, celui pour lequel on a parfois le mal du pays (qu'on peut d'ailleurs tenter de surmonter avec un petit vin de pays !), celui des terroirs et de la diversité.

Le mot paysage n'apparaît qu'au seizième siècle et la définition du Larousse : "étendue de pays qui présente une vue d'ensemble" est d'une extrême sécheresse. De la définition nous retiendrons pays et vue. Étendue de pays sent sa géographie à plein nez et demande la délimitation d'un territoire. Vue nous renvoie à la perception visuelle, à l'émotion ressentie, à l'homme qui foule cette terre, aux gens de terrain. Mais vue appelle aussi point de vue et c'est toute la notion d'échelle et de perspective; du petit coin découvert au détour d'un chemin ou d'une ruelle à la grande perspective des monuments, des châteaux, des grandes plaines et des visions superbes que l'on découvre de la crête. Il est évident que le paysage mérite bien mieux que la définition et va au-delà même de la perception visuelle. Résultant de la lente adaptation réciproque d'un lieu dans toutes ses composantes naturelles (relief, sol, climat, végétation) et des hommes qui y vivent, il est à la fois œuvre vivante et mémoire. Partie intégrante de la culture, il nous raconte la rencontre de la terre et de l'homme dans une histoire globale et dans l'infinie diversité des situations. Il est aujourd'hui écrin, réceptacle, scène de notre action présente, nous le façonnons, le forçons et par la même il est notre juge. Pour mieux saisir l'importance culturelle du paysage, on peut invoquer la littérature, les descriptions de Chateaubriand et les multiples récits de voyage qui nous font rêver. Mais c'est dans le domaine de la peinture que le phénomène est encore plus net. Déjà présente dans les fresques romaines, l'expression picturale du paysage nous vaut du quinzième siècle à nos jours une immense collection de chefs-d'œuvre, commençant peut-être par les Riches Heures du Duc de Berry et passant par les œuvres des plus grandes écoles de la peinture européenne, de Gozzoli à Bruegel, du Titien à Rubens, de Ruysdael à Poussin, de Gainsborough et Turner à Corot, du groupe de Barbizon aux impressionnistes, de Cézanne à Van Gogh, et de tant d'autres dont les innombrables peintres du dimanche !

Pour être digne de l'avenir, la construction présente et jamais achevée du paysage ne peut faire l'économie de la lecture de cette histoire patiemment inscrite sur notre sol : nécessaire et difficile décryptage ! On comprend qu'au moment où les techniques modernes, l'industrialisation et le béton armé apparaissent au siècle dernier et où le rythme des changements s'accélère, le paysage devienne un enjeu de société et un patrimoine à protéger par la loi.

La protection du paysage

Après une succession de textes divers et la loi de 1913 concernant la protection des monuments historiques, c'est la loi du 2 mai 1930 qui a pour objet de réorganiser la protection des monuments naturels et des sites de caractère artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque. Depuis lors, la défense du paysage va s'exprimer un peu partout dans le code de l'urbanisme et dans le code rural, dans la loi de protection de la nature (1976) avec l'institution des études d'impact, dans les lois dites "littoral" (1986) ou "montagne" (1985), et tout récemment dans la loi du 8 janvier 1993 sur la protection et la mise en valeur des paysages ou la loi du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, et en particulier l'article 30 sur l'inventaire départemental du patrimoine naturel.

Cette dernière touche à de multiples aspects concernant les Plans d'Occupation des Sols (POS), les Zones d'Aménagement Concerté (ZAC), les permis de construire, le remembrement, les Parcs Naturels Régionaux (PNR). Elle transforme les commissions des sites prévues par la loi de 1930 (tant au niveau national qu'au niveau départemental) en commissions des sites, perspectives et paysages, et les Zones de Protection du Patrimoine Architectural et Urbain (ZPPAU), sont étendues pour devenir des zones de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager. Enfin elle introduit la possibilité pour l'Etat de prendre des directives de protection et de mise en valeur des paysages sur des territoires remarquables par leur intérêt paysager, ces directives devant s'imposer à tout document d'urbanisme concernant ces territoires et pouvant être opposables aux tiers.

Le titre de la loi de 1930 nous renvoie bien à une conception large du paysage, intégratrice d'une culture. La loi de 1993 reste dans le même esprit mais n'oublie pas l'aspect visuel en rajoutant "perspectives et paysages" pour les commissions des sites, en demandant "des documents graphiques ou photographiques pour juger l'insertion dans l'environnement et l'impact visuel des bâtiments ainsi que le traitement de leur accès et de leurs abords" du projet architectural soumis à permis de construire. Pour tous les aspects évoqués, une analyse de l'état initial du paysage à protéger et à mettre en valeur, une mise en exergue des éléments caractéristiques constituant les structures du paysage sont demandées afin d'apprécier et d'orienter les actions en cause. Les orientations et les principes fondamentaux de protection et de mise en valeur énoncés par une directive peuvent porter notamment, en fonction de la localisation des espaces et des éléments de paysage concernés, sur :

- les conditions de la réalisation de certaines catégories de travaux ou d'aménagements tels que les carrières ou les installations classées,
- l'implantation, l'aspect extérieur, le volume ou la hauteur des constructions,
- les dispositions applicables en matière de camping, caravanage, clôtures, démolitions, défrichements, coupes et abattages, ainsi qu'en matière de publicité, d'enseignes et pré-enseignes. Les recommandations peuvent porter sur les modalités de restauration des espaces dégradés, de choix de certaines espèces végétales, d'entretien des éléments de paysage tels que haies, zones humides, chemins ou berges, arbres et plantations d'alignement, ou d'utilisation de certains matériaux de construction. Nous trouverons sensiblement les mêmes principes pour les chartes des PNR, pour l'élaboration des POS, ou des règlements de ZAC ou de ZPPAUP, et c'est bien le même esprit avec des modalités différentes qui préside à l'action en matière rurale, notamment pour les remembrements. Bien évidemment, à chaque fois il y a lieu de délimiter les territoires concernés.

Cette protection et cette mise en valeur du paysage demandent de sérieuses analyses et de larges concertations et nécessite pour cela de nombreux documents pour la plupart graphiques ou photographiques. Nous réfléchissons par la suite aux apports que l'on peut attendre de l'information géographique, d'abord dans ses formes classiques graphiques ou photographiques, puis dans ses formes numériques.

L'information géographique classique

S'il y a lieu de rappeler que le paysage est d'abord affaire d'œil et de terrain (le topographe arpentant le terrain ne saurait l'oublier !), s'adressant en chacun à ce qu'il a de poète et d'artiste, il parle aussi des hommes et de l'organisation sociale, il est aussi affaire d'historien, de sociologue, de géographe. Les caractéristiques d'un paysage, souvent liées à des constantes de sol, de climat, de groupes humains parfois vastes, peuvent dépasser l'étendue qu'embrasse le regard et il est alors nécessaire de prendre de la hauteur. C'est exactement ce que font les photos aériennes et les cartes. Pour ces dernières, je laisserai d'abord la parole à Jacques Lacarrière, écrivain de talent et grand randonneur devant l'Éternel :

«Au début, je me méfiais un peu des cartes d'Etat-Major. Je les regardais comme des compagnons indispensables mais austères. Toutes ces courbes, ces lignes, ces hachures, ces quadrillages n'évoquaient pour moi qu'un paysage abstrait, mathématique qu'il fallait résoudre ou déchiffrer comme une équation picturale. Les couleurs apportaient une note plus concrète. Les forêts y sont vertes et les rivières bleues, ce qui est conforme à la nature des choses. Les routes cantonales y sont blanches, ce qui est aussi conforme à la poussière qui souvent les recouvre. Mais les départementales y sont jaunes, les nationales rouges. La convention réapparaît. Il est vrai que, pour les nationales, ce choix devient prémonitoire vus les milliers d'animaux écrasés, de gens écrabouillés qu'on peut y rencontrer. Le reste est un désert blanc parcouru de lignes droites, brisées, courbes, lovées, désert ponctué de signes multiples que j'appris à connaître.»

«Car ces signes ne sont pas, comme pourrait le faire croire le mot état-major, les représentations codées de bataillons en marche, de cavaliers au trot ou d'intendances clandestines mais l'indication de tout ce qu'un paysage peut comporter d'accidents naturels : vaux et vallées, collines et montagnes, falaises, gouffres, carrières, marécages, voire sables et rochers recouverts à marée haute (et qu'il est bon de localiser si le marcheur ne veut s'y abîmer, s'engloutir, s'enliser) et aussi d'accidents artificiels dûs à la main ingénieuse de l'homme : ponts, barrages, écluses, réservoirs, châteaux d'eau, tours, ruines, moulins à vent, éoliennes, phares, pylônes, forts, églises, chapelles, calvaires, dolmens, menhirs, maisons isolées ou groupées, gares, ports, tunnels, mines, émetteurs radio, aérodromes et hydroaérodromes.»

«Oui, tout est signe dans ce monde à deux dimensions où la troisième est comme prisonnière, ligotée dans un réseau serré de hachures et de courbes : les accents circonflexes et noirs des conifères, les ronds verts des feuillus, les ceps miniatures des vignes, les touffes bleues des marécages, les rayures obliques des broussailles, les points rectilignes des vergers. A quoi il faut ajouter la croix des chapelles isolées, les étoiles des phares, l'oméga voûte des carrières souterraines, alphabet d'espace, de vent, de terre et d'eau qu'il suffit de savoir épeler pour voir venir à soi le paysage.»

Qu'on me pardonne cet emprunt fait à "Chemin faisant", mais il me semble qu'il illustre assez bien ce que le responsable d'étude du paysage peut attendre de la carte à échelle 1 : 25 000, carte qui n'est plus d'Etat-Major mais porte aujourd'hui les noms de Série bleue et Top25. D'abord analyser le terrain et les compartiments que forment relief et végétation, déterminer ce qui est à voir et où aller pour le voir. Ensuite, comprendre la traduction que donne la carte des caractéristiques aperçues sur le terrain, compléter et renseigner la carte pour pouvoir communiquer, débattre et se concerter avec tous les acteurs. Complément indispensable, les photographies aériennes apportent dans ce travail d'analyse, de fines nuances d'interprétation sur les sols, la végétation et le bâti, une vision homogène de l'espace à un instant donné, la couleur apporte un complément sur certains aspects des végétaux et sur les matériaux de construction, l'infrarouge traduit des rapports encore plus fins avec l'humidité des sols et l'état végétal. Les photos aériennes à moyenne échelle (tout le territoire est couvert en permanence à l'échelle 1 : 30 000 avec une fréquence de renouvellement inférieure à cinq ans en moyenne) permettent d'aborder des étendues d'environ 7 x 7 km pour un cliché, soit l'équivalent de la superficie moyenne de trois communes, et si nécessaire un assemblage photographique ou l'imagerie spatiale peuvent apporter une vue encore plus large (60 x 60 km pour SPOT). La carte de base, en couvrant environ 15 x 20 km, permet elle aussi d'aborder le paysage au niveau où se situent souvent son homogénéité et son unité. Le cas échéant, le contenu des cartes à plus petite échelle (1 : 50 000 et 1 : 100 000) autorise tout à fait l'analyse d'espaces plus vastes. Enfin, cartes et photos, parce qu'elles bénéficient d'une production assez homogène depuis plus de cinquante ans, peuvent apporter des éléments de toute première importance pour le suivi de l'évolution des paysages. Bien évidemment la carte est l'élément essentiel pour reporter les délimitations de territoires de façon pérenne, même si le paysage change.

L'information géographique numérique

D'autres articles dans ce Bulletin parlent de l'utilisation des bases de données géographiques, des iconocartes et de leur utilité dans un système d'information géographique orienté environnement, aussi ici ne sera rappelé que le point de vue "paysage". L'apport essentiel de la forme numérique de l'information géographique se situe, me semble-t-il, en premier lieu au niveau du relief. On évoquera par la suite ce qu'on pourrait peut-être attendre dans les autres domaines de l'information géographique.

Le relief et sa forme numérique

A priori, il n'y a pas plus d'information sous forme numérique que dans l'ensemble des courbes de niveau et des points cotés contenu dans la carte de base. Certes !, mais l'ordinateur peut grandement aider à interpréter, à expliciter l'information contenue dans la carte. C'est l'objet des cartes de pentes par plages de valeur ou par orientation et des cartes d'ensoleillement. C'est aussi l'objet des blocs diagrammes visualisant un modèle numérique de terrain ou, mieux encore, permettant la visualisation de la carte, d'une photographie aérienne ou d'une image spatiale suivant un point de vue déterminé. La liberté de pouvoir choisir le point de vue et la capacité de répétition de l'ordinateur permettent une réelle approche du paysage, une véritable concertation avec les divers acteurs élus ou associatifs, sans biais, avec un libre débat sur le choix des points d'observation. Le calcul des parties vues et des parties cachées par rapport à quelques points critiques est de nature à optimiser l'insertion dans le paysage ou la détermination de règles pour protéger celui-ci.

Il existe déjà sur l'ensemble du territoire métropolitain une base de données altimétrique, sous-ensemble de la Base de données cartographiques. On peut, dans ces conditions, aborder dès aujourd'hui les problèmes de paysage suffisamment lointain pour que les masques de la végétation et du bâti puissent être négligés. C'est le cas dans les phases amont des études d'impact lors de la recherche des meilleures implantations de grands ouvrages (grandes infrastructures linéaires routières, ferroviaires ou de transport d'énergie) où de telles techniques pourraient être mises en œuvre. Vraisemblablement, tout ceci pourrait participer à l'étude des directives de protection et de mise en valeur du paysage pour des sites remarquables de quelque ampleur comme les sites classés "grands sites", les PNR et d'autres lieux, voire pour certains POS en zones très sensibles. Pour tous ces sujets, l'utilisation de vidéo présentant un survol en relief des zones concernées, comme cela a été fait pour l'étude de l'autoroute A48 par le CETE de Lyon, peut se révéler un outil de communication et de concertation remarquable.

S'il est nécessaire d'utiliser des points de vue plus rapprochés et de prendre en compte les masques, en particulier en zone bâtie, alors la photogrammétrie permet de saisir les données et un logiciel tel que TRAPU permet de visualiser le paysage en trois dimensions à partir des points de vue souhaités. Le problème n'est pas aussi trivial qu'il en a l'air, car la définition du paysage par un volume polyédrique peut nécessiter un nombre d'arêtes très important (Dans ce cas, le coût de la saisie des données peut s'avérer non négligeable, et il faut savoir que beaucoup de logiciels du commerce sont trop limités sur le nombre d'arêtes qu'ils peuvent traiter). L'article de Denis Priou concernant la Carrière-sous-Roussillon illustre bien ce qui peut être fait en analyse d'insertion paysagère d'un aménagement important pour des vues proches ou lointaines. L'ensemble Base de Données altimétriques et saisie photogrammétrique du relief fin et des masques, accompagné des logiciels classiques de manipulation des Modèles Numériques de Terrain et de logiciels tels que TRAPU, permet réellement de prendre en compte les aspects de perspectives dans l'analyse paysagère tant lointaine que rapprochée.

Les thématiques et la forme numérique

On pourrait penser que la forme numérique n'apporte pas grand chose pour l'analyse du paysage hormis la prise en compte du relief évoqué ci-dessus. Pourtant il est évident que la manipulation d'un système d'information géographique (SIG) apporte au moins de pouvoir faire la carte "à la carte", de choisir précisément les thèmes et les informations utiles pour la représentation graphique la plus adéquate pour la compréhension et le débat. La concertation en matière d'environnement pêche et achoppe souvent par le manque de qualité graphique et d'adéquation des documents proposés. Les SIG devraient permettre assez rapidement de dépasser ce type d'obstacle pour peu que l'essentiel des données soit disponible, ce à quoi s'attache l'IGN. Par ailleurs la disponibilité à relativement court terme de données générales concernant l'occupation du sol dans le cadre de la Base de Données Cartographiques (BDCARTO®) et du programme CORINE - Land Cover, apporte de l'eau au moulin de l'interprétation paysagère de l'information géographique. Enfin, comme le montre l'article de Bertrand Galtier, les iconocartes intégrées dans un SIG permettent une combinaison puissante entre la richesse des images à interpréter, la rigueur de localisation, et le croisement des informations géographiques déjà interprétées. En additionnant toutes les ressources d'un SIG, du relief numérique et des images dont l'interprétation peut alors se faire en fonction de la problématique propre à un lieu donné, une telle solution permet d'imaginer des outils performants pour l'analyse paysagère et la production des dossiers de concertation et de communication souhaités.

En dernier lieu, je ferai une réflexion tout à fait iconoclaste sur la quantification du paysage. Je vois d'ici les bonds que feront certains au simple rapprochement des mots de quantification et de paysage. Bien que profondément conscient de tout ce qui s'attache comme subjectif, affectif et esthétique au mot paysage et si je ne crois pas à une analyse mathématique et encore moins automatique du paysage, pouvons nous affirmer que toute quantification est inutile ? Si nous connaissions dans une zone donnée la longueur de haies, la surface de bois, le nombre d'arbres isolés, le kilométrage de chemins empierrés, le nombre de bâtiments et la surface bâtie, la hauteur et l'orientation des constructions, les pourcentages pour tel type de végétation, les surfaces de zones humides, et encore sans doute bien d'autres paramètres, tout cela ne nous dirait pas le paysage mais, une fois celui-ci analysé sur le terrain, ne découvririons nous pas des formules caractéristiques, des modèles permettant, non un paysage modèle, mais la caractérisation d'un paysage afin de pouvoir en suivre l'évolution ?

Conclusions

La protection et la mise en valeur des paysages nécessitent une bonne connaissance du terrain et son parcours attentif par un oeil exercé, une étude de l'histoire des lieux concernant tant l'évolution des hommes que de la nature. Dans l'analyse, les cartes et les photographies aériennes peuvent nous apprendre déjà beaucoup et nous aider puissamment pour optimiser le parcours du terrain, délimiter les territoires, choisir les points de vue les plus significatifs, comprendre

les rapports intimes entre les différents compartiments de l'espace et les relations entre les objets qui le composent. Cartes et photos accroissent notre champ de vision et nous donnent le recul toujours nécessaire. Les études diachroniques permettent de comprendre et de suivre l'évolution. Ces documents sont des outils essentiels pour exprimer les résultats de l'analyse, communiquer et organiser le débat, et in fine consigner les décisions et prescriptions.

Le passage à la forme numérique et le recours aux systèmes d'information géographique permettent d'affiner grandement l'analyse du relief et des vues perspectives; ils permettent aussi d'améliorer sensiblement le nombre, la variété et la pertinence des documents de présentation et de concertation. Dans le domaine du relief tous les outils de base sont prêts, il n'y a plus qu'à apprendre à les utiliser et à les rôder. D'une façon générale les bases de travail sont posées, les données sont disponibles ou le seront à plus ou moins court terme, les méthodes d'acquisition sont aujourd'hui assez bien maîtrisées. Maintenant c'est aux applications de se définir et de faire les outils "à leur main". Le paysage, par les étendues qu'il embrasse et la complexité de la problématique chaque fois renouvelée, me paraît un champ d'application souhaitable et à notre portée si nous nous y mettons tous.

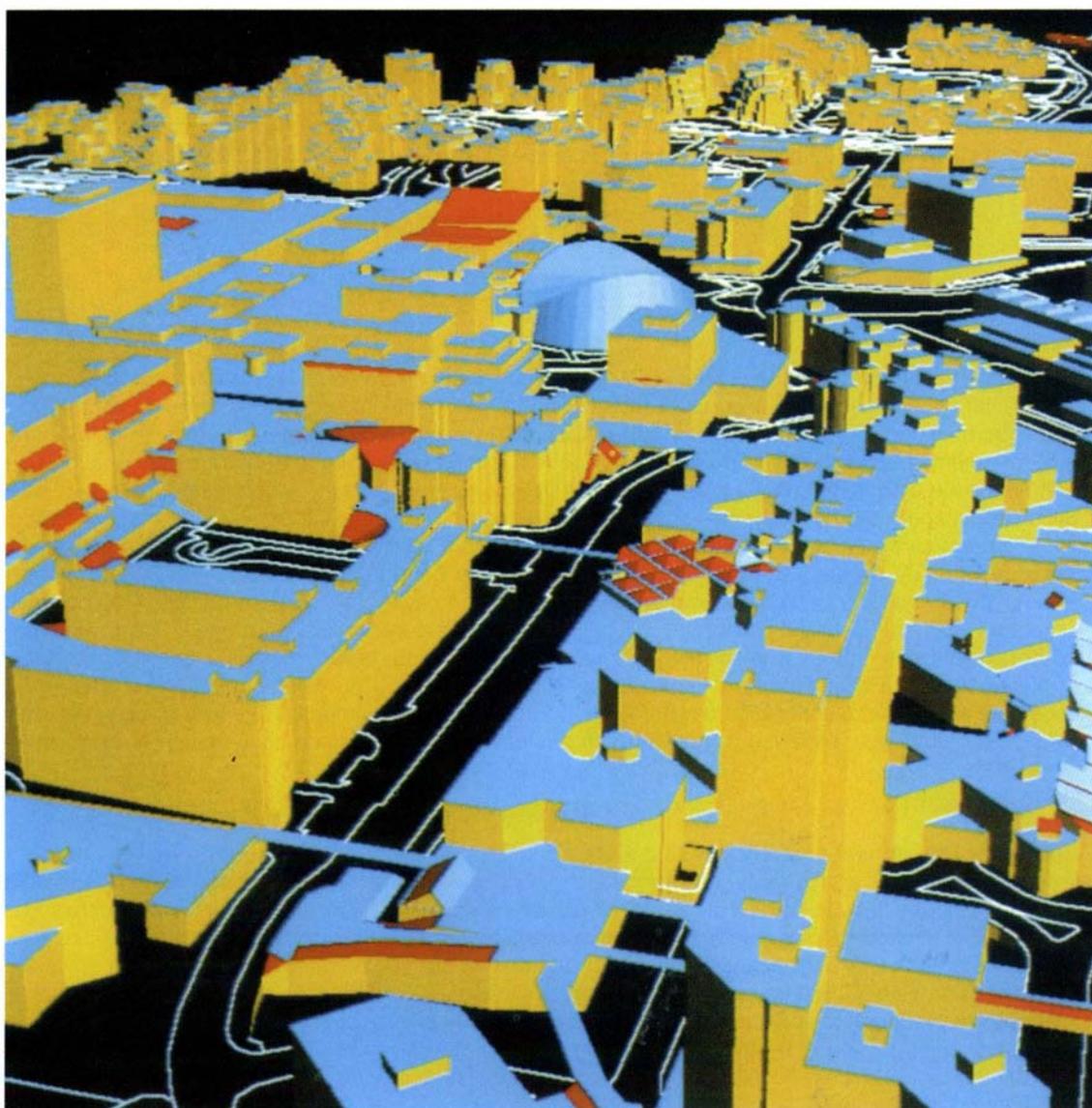


figure 2.1 : centre de la ville nouvelle d'Evry restitué par TRAPU

3. Les bases de données géographiques pour l'environnement

Anne MAURY
Institut Géographique National
4 avenue du Mail
F-35000 RENNES

Dans sa Lettre des programmes interdisciplinaires de recherche n° 6 [Géomètre 94], le Centre National de la Recherche Scientifique a proposé une définition de l'environnement :

«L'environnement est l'ensemble des milieux naturels et artificialisés de l'écosphère où l'Homme est installé, qu'il exploite, qu'il aménage et l'ensemble des autres milieux nécessaires à sa survie. Ces milieux sont caractérisés : d'un côté par leur géométrie, leurs composants physiques, chimiques, biologiques et humains et la distribution spatiale de ces composants ; d'un autre côté par les processus de transformations, d'actions ou d'interactions, impliquant ces composants et les faisant changer dans l'espace et le temps.»

Chacune des sciences liées à l'étude de l'environnement aborde plus précisément un aspect de ces milieux... et toutes nécessitent de quantifier, de mesurer, d'identifier, de connaître l'espace pour mieux le gérer et pour anticiper son évolution.

L'acquisition de données géographiques est une phase préalable nécessaire aux études environnementales. Avec l'apparition des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG), le recueil de ces informations se fait désormais sous forme numérique.

L'Institut Géographique National (IGN), dans le cadre de ses missions statutaires de constitution de l'équipement cartographique de base du territoire national, produit plusieurs bases de données géographiques, de précision et de contenu différents adaptés à chaque échelle d'appréhension des espaces.

L'utilisation première de ces bases de données géographiques est la description géométrique des paysages : limites communales, limites parcellaires, occupation du sol et toutes formes de constructions. Sur cette référence, un deuxième niveau d'intervention ajoute des données thématiques ou statistiques correspondant aux entités géographiques décrites. Enfin, grâce à l'utilisation maximale des capacités offertes par les SIG, il est possible d'expérimenter, de simuler, d'anticiper les effets d'aménagements ou du développement de phénomènes naturels : les SIG sont des outils d'aide à la prévision et à la décision, des outils de maîtrise de l'environnement d'aujourd'hui et de demain.

Les bases de données, descriptions de l'espace

De par leur origine et leur essence même, les bases de données géographiques constituent une description de l'espace, et sont donc utilisées en tant que telles comme partie essentielle et même intégrante des SIG.

Le contenu et la précision de la base de données sélectionnée doit être défini en fonction de la surface concernée par l'étude et de l'ensemble des données thématiques complémentaires qui lui seront associées. Il faut en effet assurer d'une part une précision cohérente des informations entre elles et avec le but recherché, d'autre part une lisibilité immédiate des éléments importants.

Les modes d'utilisation des bases de données géographiques dans un but uniquement descriptif sont nombreux ; d'une manière générale on peut distinguer deux grandes familles : d'une part des BD assurant une description la plus fine et la plus exhaustive du paysage, d'autre part des BD qui donnent une approche plus synthétique, plus thématique, plus statistique d'un élément environnemental.

La Base de Données Topographiques (BD TOPO®) appartient à la première famille. Son contenu intègre celui de la carte existante à l'échelle du 1 : 25 000 (voir figure 3.1).

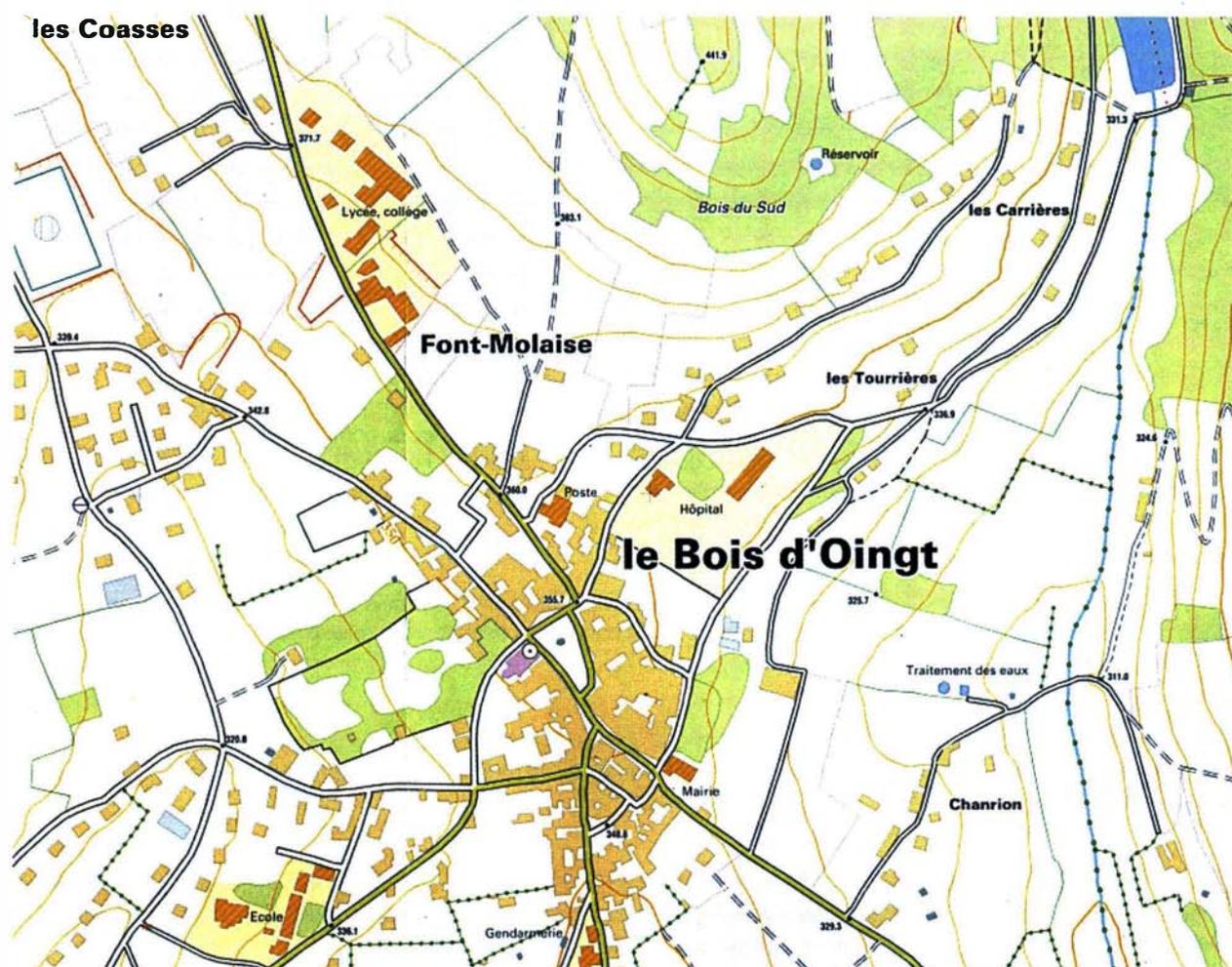


figure 3.1 : extrait de la BD TOPO® sur la feuille d'Amplepuis
Agrandissement d'un plan à l'échelle 1 : 5000

Le processus de confection de la BD TOPO® consiste à numériser en trois dimensions l'ensemble des éléments visibles sur les photographies aériennes. Cette restitution permet, grâce à l'utilisation de processus numériques tout au long de la chaîne de production, de compléter les données planimétriques "traditionnelles" par la hauteur des éléments du sursol. En effet, dans la BD TOPO®, les bâtiments, les masses boisées possèdent un attribut qui donne l'altitude de leur sommet, l'altitude de leur base étant fournie par la couche orographique représentée classiquement en courbes de niveau. En termes d'environnement, cette donnée est primordiale pour toutes les études d'impact.

Par ailleurs, la fourniture d'informations géographiques sous forme de fichiers numériques permet d'intégrer des informations connues du cartographe mais jusque là difficilement représentables. Ainsi la mise en évidence de zones industrielles : dans la cartographie traditionnelle à l'échelle du 1 : 25 000, seules les infrastructures routières et les bâtiments figurent sur la carte ainsi que le nom des sites, et l'œil du lecteur doit associer les uns aux autres en entités. Dans la BD TOPO®, sont regroupés dans une entité "zone industrielle" identifiée en tant que telle, et rattachés par elle au nom du site, les bâtiments, les voies d'accès mais aussi les terrains vagues, les friches industrielles qui accompagnent ces zones d'activités.

Jusqu'à maintenant, les chargés d'études ne disposaient que de documents issus de la carte papier. Or celle-ci est plusieurs fois dessinée, modifiée avant d'être éditée, et la précision des informations qu'elle contient, notamment en zone urbanisée, est entachée des effets dus à l'emploi de signes conventionnels : largeur calibrée des voies, représentation des mairies, des églises, des réservoirs, provoquent le déplacement des objets eux-mêmes ou de leurs voisins. En recourant à un procédé de création numérique pour mettre à disposition un fichier, on s'affranchit de ces contraintes de représentation. La précision des informations géographiques de la BD TOPO® est donc de l'ordre du mètre, ce qui permet d'éditer des sorties graphiques à l'échelle du 1 : 5 000, échelle des levés d'études et de nombreux inventaires floristiques.

La BD TOPO® est la seule base de données géographiques actuelle qui décrit avec une légende unique le plus finement l'ensemble du territoire français. Sa constitution est en cours et son achèvement est prévu entre les années 2005 et 2010.

La description du paysage ainsi fournie par les bases de données peut être de nature uniquement topographique :

- inventaire des carrières,
- inventaire des bâtiments d'élevage,
- carte du parcellaire apparent,
- etc...

afin d'identifier le linéaire de haies à sauvegarder à l'occasion d'un remembrement ou d'une nouvelle étude de plan d'occupation des sols (POS). Pour reprendre l'exemple du POS, la BD TOPO® permet d'évaluer l'impact à moyen et long termes de la destination industrielle d'une parcelle sur son proche voisinage.

La Base de Données Altimétriques (BD ALTI®) donne une approche thématique d'un élément primordial de l'environnement, car il structure le paysage avant que ne l'habille la végétation : le relief. Cette base de données numériques est constituée de l'ensemble des courbes de niveau de la carte au 1 : 25 000 et modélise le terrain en facettes de 3" d'arc (75 mètres environ).

La définition de l'environnement donnée par le CNRS met en évidence la notion d'espace qu'il recouvre ; les cartes papier, document graphique, n'ont pu donner jusqu'à ce jour qu'une version en deux dimensions de l'espace, ou 2 D 1/2 si l'on considère l'apport des courbes de niveau et des points cotés. L'utilisation de la BD ALTI et surtout de ses produits dérivés, les Modèles Numériques de Terrain (MNT), permet de "voir" en trois dimensions le site d'implantation d'un barrage avant la mise en eau, le survol est possible depuis différents angles pour mieux appréhender les paysages à sauvegarder et les "points de vues" remarquables ; l'identification du bassin versant est plus rapide et le calcul de sa surface est immédiat. Outil d'ingénieur à l'évidence, mais aussi outil de l'aménageur et du paysagiste, outil de communication : avant le début de la construction, on simule l'aspect que prendra le paysage grâce aux techniques de synthèse d'image et d'animation dynamique. L'outil de description débouche inéluctablement sur l'outil de simulation.

L'utilisation des bases de données semblerait toutefois faible si elle se limitait à la fonction de description géographique. Et leur utilité serait alors limitée à la production de sorties graphiques esthétiques, thématiques ou géographiques à une échelle donnée. Un bel outil, sans plus. Mais nous avons déjà ouvert la porte à d'autres domaines.

Les bases de données, outils de gestion

La première partie a montré ce qu'une base de données pouvait apporter en propre, en termes d'information géographique pure. Mais le principe même de son utilisation réside dans son nom : base de données, son but est d'être le lieu d'inventaire, de regroupement d'informations et de données extérieures non géographiques mais repérables sur une carte, localisables dans l'espace géographique.

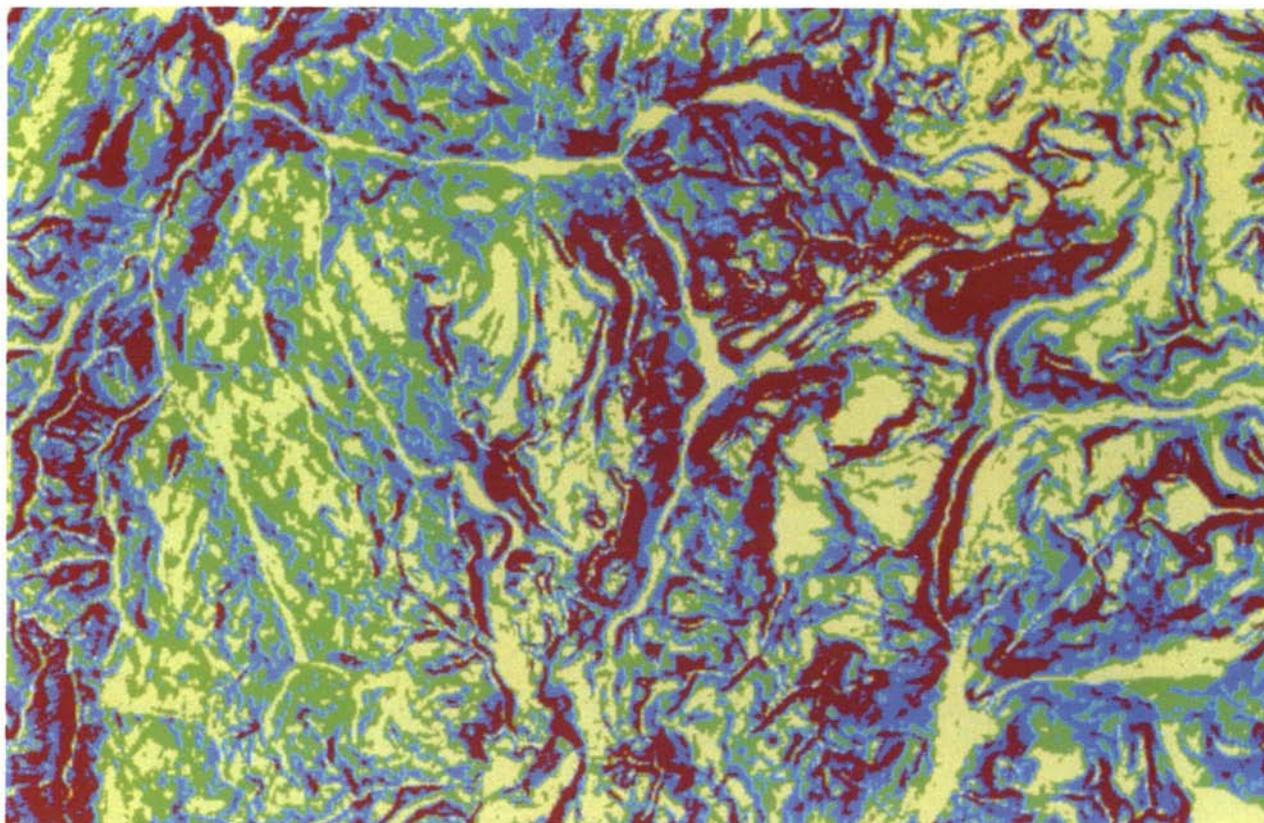


figure 3.2 : Carte de pentes. Massif de la Vanoise.

Sur l'exemple du bassin versant, la BD ALTI® donne, sans apport extérieur, les lignes de crêtes et les talwegs ainsi que la valeur des pentes du terrain ; elle permet ainsi d'identifier les terrains non épanchables.

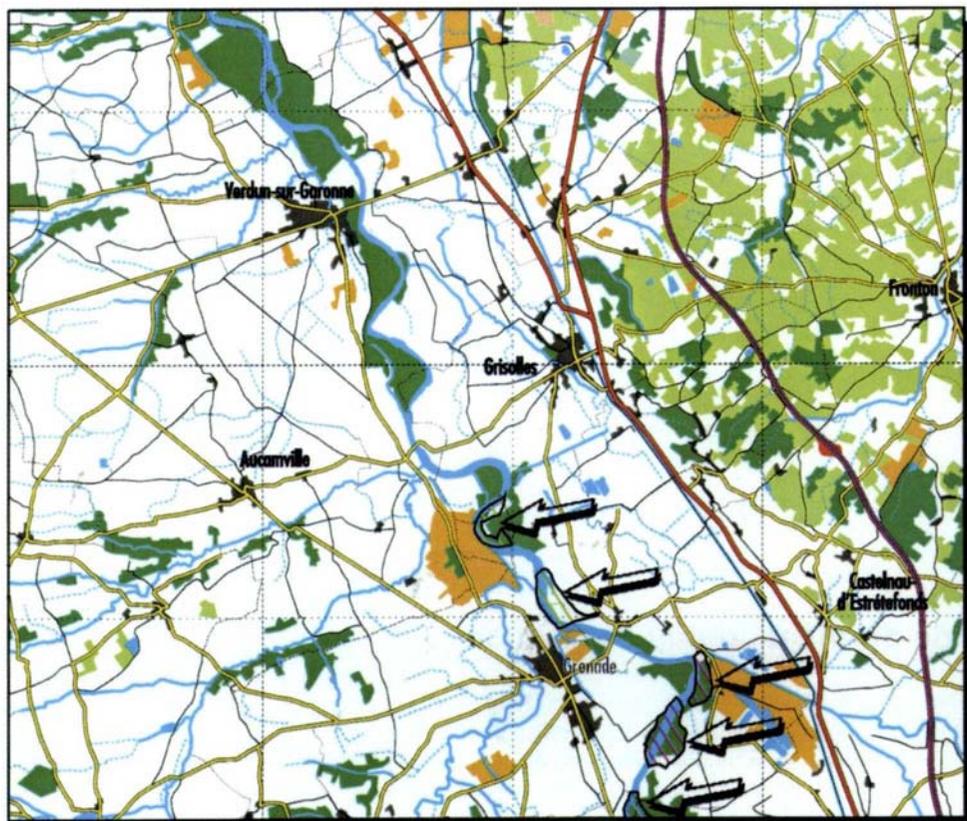


figure 3.3 : Maquette SIGMIP.

La base de données devient outil de gestion si l'on ajoute à l'information purement descriptive (bâtiments, cours d'eau, etc...) des données alphanumériques telles celles de l'organisme chargé de la surveillance sanitaire des exploitations : à chaque bâtiment d'élevage porcin, on associe le nombre de porcs, la destination de l'élevage (reproducteur ou viande), et d'autres caractéristiques. Sur chaque bassin versant, on positionne l'ensemble des captages d'eau et des rejets. On prépare ainsi une combinatoire d'informations environnementales.

Là encore, la distinction ou le choix d'une base de données s'opère en fonction de l'échelle géographique de la surface et des thèmes concernés. Une collectivité locale qui assure la gestion d'espaces naturels sensibles restreints n'aura pas besoin des mêmes données qu'un autre organisme qui protège l'ensemble des ZNIEFF (Zones Naturelles d'Intérêt Écologique, Floristique et Faunistique) à l'échelle d'une région. L'une a besoin de connaître exactement les limites d'un secteur, l'autre se contente d'une position relative mais d'une précision homogène sur une vaste étendue ; elle aura par exemple à connaître :

- la position des sites industriels sensibles (périmètre SEVESO),
- l'inventaire des ZNIEFF,
- les zones relevant de la loi "littoral" ou de la loi "montagne",
- les zones écologiques sensibles dans le cadre de la directive "habitat",
- les sites et les monuments classés ou inscrits,
- les secteurs sauvegardés,
- les réserves naturelles,
- les zones de protection des biotopes,
- les relevés de pollution de l'air,
- les zones de stockage de déchets,
- les installations industrielles classées.

A cet effet, l'IGN a constitué la Base de Données Cartographiques (BDCARTO®), destinée typiquement aux applications départementales, régionales et nationales. Un exemple particulier d'utilisation de la BDCARTO® en tant qu'outil de gestion est celui des Agences de l'Eau. Les données hydrographiques régionales et nationales sont recueillies par les Agences de Bassin et le Ministère de l'Environnement au sein d'une base de données hydrographiques dénommée BD Carthage. Cette base de données hydrographiques s'appuie sur la structure et les données de la BDCARTO®.

La BDCARTO® est désormais reconnue comme la base pertinente de nombreux SIG dédiés à l'environnement, établis à l'échelle d'un département ou d'une région et dont la vocation première est de servir de support pour des recensements détaillés des sites inventoriés et protégés et de faciliter ainsi leur rapprochement (qualité d'un tronçon de rivière, position d'une zone humide protégée et proximité de décharges). Elle offre l'intérêt d'avoir une précision décimétrique, compatible avec l'imagerie des satellites SPOT.

Les bases de données, bases de simulation

Après avoir complété les données géographiques par ses propres informations thématiques, alphanumériques ou géographiques, l'utilisateur d'une base de données sur l'environnement possède tous les éléments pour analyser, modéliser, simuler, décider et communiquer. Le SIG est alors l'outil absolument nécessaire pour mener à bien toutes ces études. On a évoqué précédemment la simulation visuelle de la retenue d'eau qu'allait créer un barrage.

Pour aller plus loin dans les applications de modélisation et de simulation, il a fallu attendre que les systèmes d'information géographique se complexifient un peu et aient la capacité de traiter non des points et des lignes, mais des objets - les simples objets que l'on a l'habitude de désigner dans le paysage -, et les relations de voisinage entre ces objets. C'est chose faite, et les SIG "orientés objet" permettent de greffer des informations quantifiées sur des données descriptives organisées explicitement en un modèle du paysage. Par exemple, le débit d'une rivière enregistré sur ses "tronçons" successifs, ou les vitesses maximales sur les éléments du réseau routier.

La BD TOPO® et la BDCARTO® sont basées sur les structures topologiques qui alimentent ces SIG. Elles sont intrinsèquement très organisées tout en conservant une structure ouverte pour l'accueil d'informations externes. Ainsi leur réseau hydrographique est dès l'origine organisé en graphe, ce qui fait que le modèle logique d'écoulement, hors indications de débit, existe par construction, sans traitement particulier visant à relier un à un les bras de rivière pour constituer une arborescence.

Cette organisation se révèle extrêmement efficace. A la suite de l'inondation catastrophique de Vaison-la-Romaine, des études hydrauliques ont été entreprises sur le bassin de l'Ouvèze. Les données de base sont celles de la BD TOPO, enrichies ou complétées sur des zones particulières.

Prenons un autre exemple d'utilisation d'une base de données géographiques dans le domaine de la gestion d'un espace. Si la BD TOPO comporte le réseau hydrographique, l'habitat et les bâtiments d'élevage, on peut appréhender le risque de pollution par les nitrates en éditant un plan. On peut prolonger cette description par le calcul de l'augmentation du taux

de nitrates dans une rivière voisine compte tenu de l'implantation d'une nouvelle porcherie industrielle. En plus des informations recueillies pour la gestion de l'espace, la simulation nécessite de connaître et de faire intervenir des paramètres dénués de caractère géographique, comme la production journalière de lisier par tête de porc, la capacité de tel type de sol à absorber ou à dissoudre les nitrates etc...

Dans les applications de simulation et de modélisation, surtout dans le domaine de l'environnement, on est rapidement confronté au problème de l'intégration de données hétérogènes. Or la qualité du résultat ne saurait être supérieure à celle des composantes. Pour les données géographiques numériques, la formalisation des concepts de qualité commence à se dessiner, et les experts s'accordent sur la définition de six groupes de critères [GRELOT] :

- la généalogie, qui décrit l'origine des données,
- l'actualité de l'information,
- la précision géométrique, tant planimétrique qu'altimétrique,
- la précision des attributs, ou précision sémantique,
- l'exhaustivité de l'information, en référence à un modèle conceptuel du monde réel,
- la cohérence logique des données comportant leur cohérence topologique.

Une revue même rapide de l'utilisation des bases de données géographiques pour l'environnement serait incomplète si l'on n'abordait pas les aspects de transport, qu'il s'agisse du transport de matières dangereuses, de la collecte d'ordures ménagères ou encore de l'accessibilité des lieux soumis aux incendies de forêt. Dans les zones interurbaines, la BDCARTO® fournit les données nécessaires à ces applications en milieu interurbain.

Dans les agglomérations, GEOROUTE®, base de données routières, décrit le réseau routier ouvert à la circulation automobile, avec l'ensemble des informations utiles à la conduite et aux déplacements : restrictions de circulation, nom des voies... Son utilisation va de la planification et l'aide aux opérations pour l'acheminement des moyens (sapeurs-pompiers), à la détermination de circuits et plans de circulation (collecte d'ordures ménagères, transports de matières dangereuses). Les applications en matière d'environnement viennent immédiatement à l'esprit : réduction des nuisances et de la consommation d'énergie par optimisation des circuits et du trafic, optimisation de l'emplacement des bennes de ramassage du verre, du papier ou du plastique etc...

Conclusion

Cette présentation de l'utilisation des bases de données géographiques pour l'environnement est loin d'être exhaustive. La mise en place de SIG dans les différents services de l'Etat et des collectivités territoriales et locales chargées d'environnement débute, et il paraît dès maintenant évident que ces bases de données sont indispensables pour une meilleure gestion et protection de l'espace naturel et un meilleur cadre de vie dans les villes.

L'évolution des métiers liés à l'environnement, la volonté de prendre en compte le maximum d'informations connues et quantifiables, la nécessité d'agir en partenariat entre organismes et associations laisse envisager une utilisation accrue des bases de données et surtout de la cartographie issue des SIG, sortant du cercle restreint des spécialistes et des techniciens pour toucher de manière concrète et didactique le grand public : l'environnement, ce doit être l'affaire de tous.

Bibliographie

[Géomètre 94] Revue "Géomètre" Janvier 1994 - Dossier SIG et environnement.

[GRELOT] JPh. GRELOT - "Journées SIG et Télédétection, enjeux stratégiques de l'information géographique".

4. Utilité des iconocartes dans un SIG orienté-environnement

Bertrand GALTIER
IGN ESPACE
Parc technologique du canal
24 rue Hermès
F-31527 RAMONVILLE-ST-AGNES cedex

Résumé

L'iconocarte est un produit cartographique dont le fond est une mosaïque d'images aériennes ou spatiales. (On parle respectivement de photocrate et spatioocrate).

L'iconocarte permet, comme une carte ou un SIG, de localiser les objets qu'elle représente dans l'espace. Son message sémantique est par contre un intermédiaire entre une donnée et une information. Cette insuffisance apparente est en fait un atout pour les applications environnementales.

En effet, l'établissement de bases de données géographiques dédiées à l'environnement pose de nombreux problèmes de représentation de l'environnement. Les modèles conceptuels adoptés sont souvent réducteurs. Ils répondent mal à la diversité des applications et des particularismes régionaux. L'iconocarte, quant à elle, ne fait pas le choix d'une collection finie d'objets géographiques bien spécifiés. Elle n'est pas spécialisée a priori et reste ouverte à de multiples thématiques. Comme le montrent les illustrations jointes, la photocrate correspond à un niveau d'observation qui est celui de l'environnement immédiat de l'homme, alors que la spatioocrate permet d'appréhender les unités de paysages ainsi que la complexité des relations spatiales entre objets géographiques.

Comme couche d'un SIG, l'iconocarte est un investissement relativement modeste, et peut enrichir le contenu des autres couches d'informations.

L'iconocarte : un produit cartographique à base d'images numériques

L'iconocarte est un document cartographique qui résulte de la combinaison :

- d'un "fond image" constitué d'une mosaïque d'images numériques rectifiées géométriquement selon une projection cartographique donnée,
- de surcharges cartographiques, incluant obligatoirement un référentiel de coordonnées cartographiques, un habillage, un titre, une référence de localisation, des informations sur les données sources (capteur, date...) et incluant, en option, des éléments topographiques tels que la toponymie, des réseaux, des courbes de niveau, des symboles ponctuels, surfaciques ou linéaires.

Les séries d'iconocartes respectent généralement les normes des cartes régulières, comme l'échelle et le découpage. Le produit iconocarte peut être sous forme numérique et analogique. Sa standardisation progressive favorise à la fois l'automatisation de sa production, la diminution de son prix de revient et son marketing.

On s'intéressera tout particulièrement ici à deux types d'iconocartes qui répondent à deux grandes familles de besoins dans le domaine de l'environnement : les photocartes et les spatioocartes qui proviennent respectivement de capteurs aériens et spatiaux.

La décomposition en descripteurs du message cartographique

Pour mieux cerner l'intérêt de l'iconocarte dans le domaine de l'environnement, il importe d'abord d'analyser la nature de l'information qu'elle porte. C'est l'objet du paragraphe suivant. Cette information étant de nature géographique, nous présentons auparavant les composantes et les véhicules de l'information géographique.

L'information géographique est véhiculée par des supports d'information (cartes, SIG ...) qui peuvent se décomposer en "descripteurs cartographiques", porteurs chacun d'une partie de l'information géographique.

On distingue classiquement :

- les descripteurs géométriques (tels que le carroyage géocartographique). Ils indiquent la position et les limites spatiales des objets géographiques. Ils permettent de répondre à la question "où est cet objet ?".
- les descripteurs sémantiques (tels que la légende). Ils décrivent les objets géographiques. Lorsqu'ils sont explicites, ils se basent sur un modèle conceptuel qui assimile l'espace à une collection d'objets bien définis et "fermés" (au sens topologique du terme). Ils donnent une réponse à la question : "Etant donné une position, qu'y a-t-il à cet endroit là ?".
- les descripteurs topologiques. Ils traduisent les relations spatiales entre objets.
- les descripteurs graphiques. Dans le cas d'une représentation graphique de l'information, ils donnent la relation entre le code sémiologique et la nature de l'objet.

L'iconocarte : donnée ou information géographique ?

La comparaison des descripteurs des cartes, SIG et iconocartes conduit aux conclusions suivantes :

- les trois produits ont en commun leurs descripteurs géométriques. Ils ont recours aux mêmes types de référentiels pour localiser les points et objets dans un système de projection donné.
- les SIG et les cartes ont tout deux des descripteurs sémantiques explicites, matérialisés par les spécifications de la nomenclature ou de la légende. Sur le plan sémantique, l'iconocarte se présente plutôt comme un intermédiaire entre une donnée et une information. Elle laisse en effet à son utilisateur le soin de reconnaître les objets qui l'intéressent, grâce à l'interprétation du fond du document, sans référence à une liste d'objets préétablie.
- sur les cartes et iconocartes, la composante topologique de l'information est directement accessible par la lecture visuelle du document. Les descripteurs topologiques sont donc généralement implicites. A l'inverse, un SIG auquel son concepteur n'a pas su associer des descripteurs topologiques explicites est d'utilisation lourde et limitée.

Il n'est pas dans notre propos d'expliquer pourquoi, malgré ses apparentes faiblesses sémantiques, l'iconocarte est un produit dont le succès commercial est croissant. Signalons seulement qu'elle répond mieux que la carte classique à un créneau particulier du marché : celui de la cartographie bon marché, d'urgence ou de projets, dans les zones où l'équipement cartographique existant est pauvre.

Dans le domaine de l'environnement, elle est encore méconnue alors qu'elle présente, sur le plan sémantique, de nombreux avantages par rapport aux cartes classiques et même par rapport aux couches thématiques des bases de données systématiques orientées environnement. Pour bien cerner cet intérêt, il nous importe tout d'abord d'examiner les problèmes sémantiques que pose l'établissement d'une base de données géographiques dédiée à l'environnement et l'aménagement du territoire. C'est à cette question qu'est consacré le paragraphe qui suit.

Quelles spécifications sémantiques pour un SIG orienté-environnement ?

Des efforts importants sont accomplis pour établir des bases de données nationales ou internationales, représentant l'usage et l'occupation du sol, et destinées à fournir une connaissance géoréférencée, précise et à jour, de l'environnement. Citons, en particulier, les projets CORINE de l'Union européenne, et le projet BDCARTO® de l'IGN.

Ces bases de données sont composées de couches d'information, constituées d'objets géographiques ponctuels, linéaires ou surfaciques. Ces objets appartiennent à une nomenclature finie et spécifiée.

Il est difficile de concevoir des nomenclatures capables de rendre compte de la diversité, de la richesse de l'usage et de l'occupation du sol, tout en restant homogène et cohérent au niveau d'un pays ou d'un continent, et tout en proposant un niveau d'observation suffisamment fin :

Sur ce point, citons Myriam Armand [ARMAND 91] :

«La définition sémantique de l'information géographique que requiert un inventaire systématique de l'occupation du territoire dépasse largement le cadre de l'énumération des thèmes et des classes d'objet.»

Le découpage de l'espace est une opération de classement délicate qui suppose l'application de modèles conceptuels. En effet, le contenu des entités qui correspondent aux différents milieux, urbain, naturel et agricole, n'est pas connu a priori ; les recouvrements peuvent être nombreux. A quel domaine, intégrer les pelouses alpines pâturées, les prés-salés de l'Atlantique, le saltus méditerranéen plus ou moins abandonné, les pares feux des Landes plantés en maïs ? Chaque région a ses particularités géographiques. Des choix raisonnés et explicites s'imposent pour chaque poste de la nomenclature.

De plus, l'organisation du milieu géographique se traduit différemment selon l'échelle d'analyse. Au 1 : 100 000 (échelle retenue pour CORINE et la BDCARTO®), il est impossible de représenter le parcellaire agricole Limousin ou Provençal parce que les parcelles sont souvent inférieures à quatre hectares. En Beauce, au contraire, la plupart des parcelles sont cartographiables.

Un inventaire d'occupation des sols représentatif du milieu géographique doit gérer cette diversité. En effet, si l'échelle détermine les dimensions du plus petit espace à représenter : 4 ha, pour la BD CARTO®, (version 1) elle ne fixe pas l'unité de paysage élémentaire qui varie selon les milieux géographiques. Dans le cas du grand parcellaire céréalier de la plaine de Reims, l'unité de paysage que l'on pourra atteindre est la parcelle de culture, dans celui du petit parcellaire viticole de la côte de Champagne, ce sera le domaine d'extension du vignoble.

La disparition des haies, le regroupement des parcelles témoignent également de l'évolution de l'occupation des sols. Un inventaire ne peut se réduire à la saisie d'un contenu ; il doit aussi informer sur les formes de répartition spatiale (caractéristiques du contenant). C'est en outre l'un des apports majeurs de l'information géographique localisée par rapport aux inventaires strictement statistiques.

Une bonne nomenclature, pour être performante devra donc respecter des conditions contraignantes comme, en particulier :

- La séparabilité sémantique des thèmes à tous les niveaux hiérarchiques,
- l'exhaustivité de l'inventaire en termes de "couverture totale de l'entité territoriale" à chacun des niveaux de la hiérarchie,
- la signification géographique des regroupements hiérarchiques opérés en termes d'analyse spatiale (connaissance de l'environnement usuel d'un objet),
- la fourniture d'une information homogène pour un niveau donné, la nomenclature pouvant présenter des niveaux de détails supérieurs, si nécessaire dans certaines régions,
- la compatibilité de la nomenclature avec des échelles plus grandes qui suppose que soient définis des postes agrégés issus de l'union de taxons à plus grande échelle" [ARMAND 91]

L'iconocarte : quelle utilisation pour l'environnement ?

Par l'analyse qui précède, nous espérons avoir montré que l'établissement des bases de données systématiques, est difficile, et implique un modèle conceptuel qui simplifie l'espace au risque de mécontenter les acteurs de l'environnement. Pour des raisons économiques évidentes, il est par ailleurs exclu de multiplier les programmes d'inventaires systématiques.

C'est justement parce qu'elle ne va pas jusqu'à imposer un choix de modélisation, que l'iconocarte est capable de s'adapter aux multiples besoins environnementaux.

Elle reste en effet ouverte à tout type d'utilisation et d'interprétation, en fonction du problème posé. (Ce qui suppose bien sûr de la part de son utilisateur certaines compétences en interprétation d'images).

En annexe, on montre ce que la spatio-carte SPOT permet d'appréhender de l'environnement. Celle-ci offre une vision géoréférencée du paysage, qui est typiquement à l'échelle du 1 : 50 000 ou du 1 : 100 000. Elle ne permet pas toujours l'identification des objets élémentaires de la surface du terrestre. Elle montre par contre comment ceux-ci s'agencent et se composent pour structurer et modeler l'espace. Elle se situe au niveau de "l'unité de paysage", qui, parce qu'elle reflète de multiples interactions, est une référence essentielle pour l'écologue ou l'aménageur.

L'unité de paysage correspond à une zone relativement homogène pour plusieurs facteurs écologiques (sol, végétation, géomorphologie). Elle joue donc un grand rôle en écologie. Elle se repère sur l'image grâce à "l'organisation spécifique d'un certain nombre de thèmes d'occupation du sol" (Ed. Delavigne, in "Télé-détection et Urbanisme", CNES/STU, 1990), ou encore grâce à l'homogénéité des variables spectrales et texturales de l'image.

L'iconocarte permet aussi d'appréhender des phénomènes essentiels que l'on ne trouvera jamais pris en compte dans une base de données systématique, soit parce qu'ils sont trop spécifiques d'une région ou d'un problème, soit parce qu'ils sont précisément trop complexes sur le plan géographique pour être fidèlement traduits à travers un modèle conceptuel explicite nécessairement réducteur.

Il ne s'agit pas seulement des unités de paysages, évoquées précédemment ; celles-ci sont cartographiables, puisqu'elles se définissent par des critères d'homogénéité de certaines variables. Il s'agit surtout de ce que l'on n'a pas encore su conceptualiser, mais que la force du langage implicite de l'image est capable de nous transmettre :

Les zones de transition, les zones mixtes, et surtout la complexité des relations spatiales entre une multitude de petits et grands objets, bref, l'entrelacement de tous ces phénomènes qui, individuellement, sont d'importance secondaire, mais dont la conjonction turbulente est un axe moteur de compréhension de l'environnement.

Enfin l'iconocarte a des atouts dans le domaine de l'urgence et des risques. Ainsi la spatio-carte radar ERS de l'annexe 3, est sans doute l'un des seuls produits capable de montrer de façon synoptique et objective l'étendue d'une inondation dans des délais de réalisation très courts et dans toute situation météorologique (le radar "traversant" les nuages). L'imagerie radar a été utilisée par nos voisins européens au cours de la crise de janvier-février 1995. Toutefois sa précision géométrique et sémantique ainsi que sa résolution restent faibles en regard de fonds cadastraux (échelle supérieure à 1 : 5 000) et la rendent peu adaptée pour l'établissement des périmètres de protection réglementaires (PPR).

Intérêt d'un programme de couverture d'iconocartes

Sur le plan opérationnel, une couverture systématique d'iconocartes peut présenter des atouts incontestables. En comparaison d'une couche interprétée de SIG, le produit est en effet facile à élaborer. Sa production comporte essentiellement deux étapes :

- l'acquisition des images numériques,
- le traitement géométrique des images.

La première étape est indispensable à la constitution de toute base de données à jour : hors du domaine géodésique, les photographies aériennes et les images satellites constituent les principales données primaires desquelles sont dérivées les informations géographiques. (Dans le cas de photographies aériennes analogiques, l'étape d'acquisition comporte aussi une phase de numérisation).

Le traitement géométrique des images numériques est une opération qui tend à se banaliser, à se perfectionner et s'automatiser. La deuxième étape de production est donc de moins en moins coûteuse et de plus en plus rapide.

Dans un processus d'établissement de bases de données, c'est bien l'interprétation qui reste la phase non seulement la plus lourde, mais aussi la plus délicate et la plus controversée. Une couverture d'iconocartes est, par comparaison, avec des couches d'informations interprétées, légère à établir, puisque cette étape d'interprétation n'existe pas.

Conclusion

L'iconocarte apparaît finalement comme un produit qui présente de nombreux avantages économiques et qui, sur les plans topologiques et géométriques, est comparable à la carte. Dans le domaine de l'environnement, elle est ouverte à de multiples utilisations, et possède une capacité de s'adapter aux questions non anticipées de l'utilisateur.

Elle met par ailleurs en évidence des phénomènes sur les paysages et l'environnement qu'une approche classique cartographique ou SIG peut difficilement traduire. En pratique, l'iconocarte peut être exploitée de façon optimale lorsqu'elle est utilisée en mode numérique comme une couche particulière d'un SIG. Elle intervient alors pour combler au mieux les insuffisances sémantiques des autres couches en présence.

Souhaitons donc que la filière industrielle de production d'iconocartes qu'a mise en place l'IGN puisse un jour servir les intérêts de l'environnement.

Bibliographie

[ARMAND 91] : M. Armand : Réflexions méthodologiques sur la nomenclature d'un inventaire d'occupation du sol, 1991.

Annexe

Cette spatiocarte à l'échelle du 1: 50 000, réduite au format A4 (figure 4.1), offre une vision globale et synoptique de l'agglomération toulousaine et de ses environs. A cette échelle, les informations environnementales contenues dans l'imagerie SPOT se rapportent principalement à l'influence de Toulouse sur son proche environnement paysager. Se remarque au premier regard, le grand nombre de gravières implantées dans le lit alluvial de la Garonne. Les réflectances plus ou moins bleues traduisent l'état de turbidité minérale de l'eau et donc le caractère récent ou non de l'extraction. Pour des raisons économiques évidentes, elles sont concentrées dans les alluvions récentes (moins de lavage mécanique).

La spatiocarte alliant la richesse thématique à la précision géométrique, il est possible de contrôler la localisation des gravières au regard des autorisations légales du Service des mines. Le nombre élevé de sites d'extraction témoigne des besoins importants de l'agglomération en matériaux pour alimenter les chantiers de constructions immobilières et de voies de communication (figure 4.2). On distingue par ailleurs des effets de turbidité dans le lit mineur de la Garonne. Le lit majeur quant à lui, souligne remarquablement bien la zone inondable du fleuve soit par des critères morphologiques (terrasses), de végétation, ou de substrat (gravières). Le tracé du fleuve, par lui-même, est caractéristique d'une tendance générale vers un débit moyen avec des formes surcalibrées par rapport au débit actuel. Se distinguent aussi très clairement les petites retenues collinaires disséminées dans les terrains agricoles à l'est et à l'ouest de Toulouse. L'organisation de ces terroirs fait apparaître un granit parcellaire où les sols à nus (labours en bleu) et les cultures sur pied (rouge, orange) s'équilibrent, ce qui dénote une politique d'assolement satisfaisante vis à vis de l'érosion des sols (figure 4.3).

Les espaces forestiers apparaissent sous deux formes :

- un grand massif forestier à l'ouest de Toulouse où les traces d'aménagement interne (coupes, parcellaires géométriques, structure linéaire) trahissent une gestion raisonnée et planifiée du milieu vraisemblablement de type publique (figure 4.4).

- un morcellement extrême sur le reste de la zone considérée. Il s'agit essentiellement de petits bois de feuillus, assez bien répartis et distribués sur les versants ou le long du chevelu hydrographique. Cette double répartition est intéressante à analyser en terme de biotopes potentiels car la taille et les relations sont des composantes essentielles pour l'habitat de certaines espèces (figure 4.3).

Pour ce qui concerne les territoires artificialisés, ont note la détection et la localisation aisée des grands chantiers urbains, immobiliers, d'infrastructure, et de zones en cours de lotissement (figure 4.3). Celles-ci sont très fréquentes à la limite du bâti. On distingue très bien, de ce point de vue, les lotissements récents (réflectance plus minérale) qui tendent à insérer l'habitat des villages anciens. On constate par ailleurs, dans ces zones de péri-urbanisation l'absence des petits bois préalablement mentionnés qui n'ont pas été conservés en zone bâtie. On repère également avec une grande facilité (figure 4.2) les zones industrielles qu'il serait possible, grâce aux qualités métriques de la spatiocarte, de passer au crible des règlements des zones d'activités conformes au POS. Du point de vue des infrastructures de communication, outre la perception des voies de communication (canaux, routes, autoroutes, voies ferrées) qui nous indique le pouvoir d'attraction exercé pour la métropole régionale ainsi que ses axes de développement majeurs, il importe de prendre en compte la fréquence des aéroports (au nombre de cinq) décelables très aisément sur la spatiocarte, qui montrent très clairement la vocation aéronautique et spatiale de la ville.



figure 4.1 : spatio-carte à l'échelle 1: 50 000 (réduite au format A4)



figure 4.2 : extrait de la figure 4.1, région de Muret (Haute-Garonne).



figure 4.3 : extrait de la figure 4.1, le Lauragais (Sud-Est aquitain)

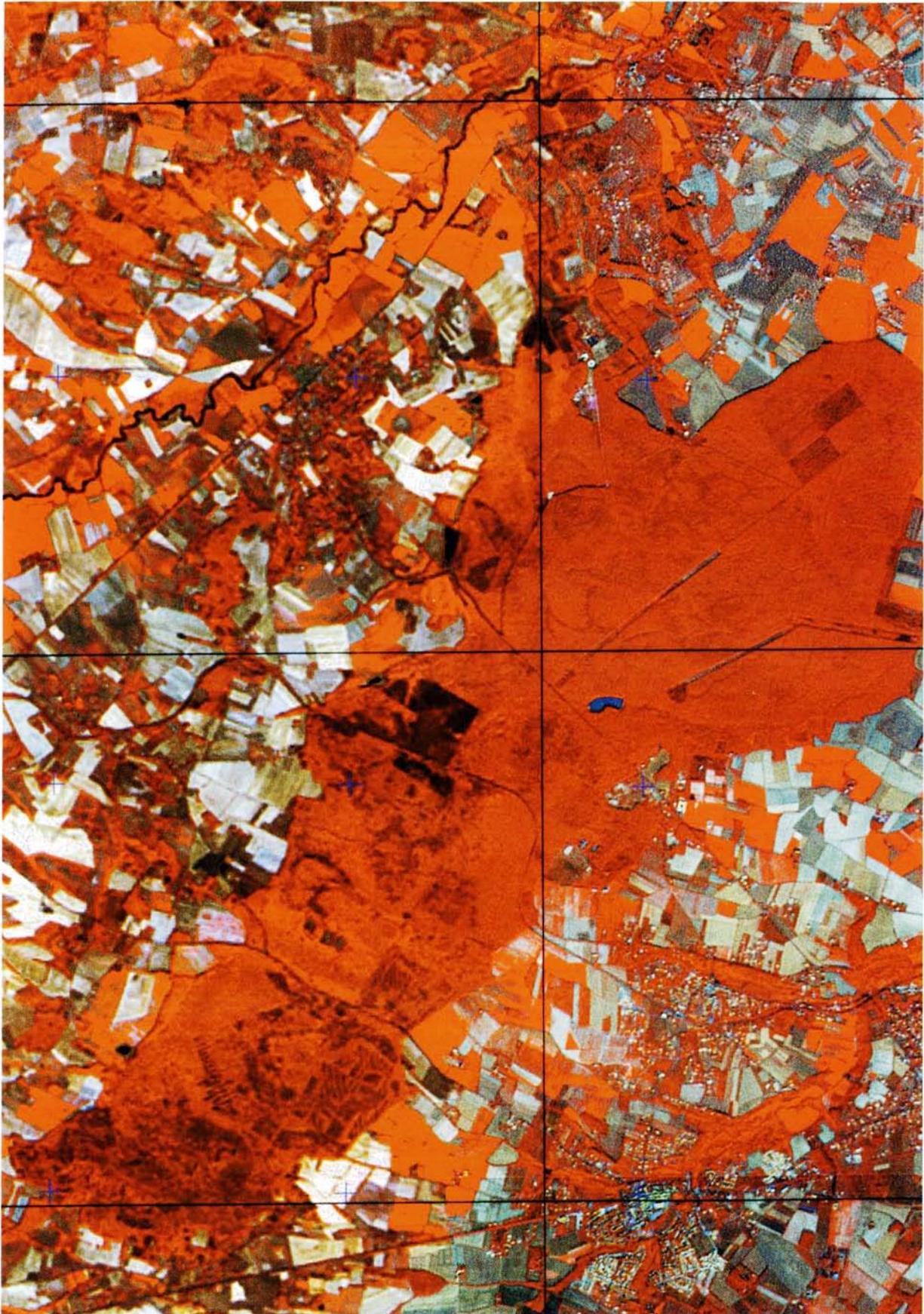


figure 4.4 : extrait de la figure 4.1, la forêt de Bouconne

5. Imagerie et prise en compte du relief

*Denis Priou et Jean-Claude Deschamps
Ecole Nationale des Sciences Géographiques
6 et 8, avenue Blaise Pascal - Cité Descartes - Champs-sur-Marne
77455 MARNE LA VALLÉE CEDEX 2*

Introduction

La préservation de l'environnement dans notre civilisation industrielle est un problème aigu. Trop souvent, l'exploitation industrielle du milieu naturel s'est traduite par une modification profonde et plus ou moins incontrôlée de l'environnement. Les excès du passé ont sensibilisé le grand public en général ainsi que les décideurs, et ont fait naître une nouvelle préoccupation : celle d'exploiter nos richesses naturelles en respectant l'environnement, et donc de faire en sorte que notre industrie vive non pas contre la nature, ou sans elle, mais en harmonie avec elle.

La mise en place de techniques permettant d'anticiper les effets de l'extension de certains sites industriels et équipements sur l'environnement est un élément clé de cette politique de maîtrise du milieu naturel. Ce texte présente une méthodologie développée dans le cadre de deux travaux ayant pour but d'apporter des éléments de réflexion et de décision. Le premier est un projet pluridisciplinaire mené à bien par des élèves ingénieurs à l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques. Ce projet avait pour but de modéliser l'impact du développement d'une carrière, située dans le Luberon, sur le paysage, et de prédire les effets de tel ou tel scénario d'extension sur le milieu naturel, en particulier au moyen d'images de synthèse intégrant divers éléments d'information géographique (prise en compte du relief...). Le second a une vocation plus urbaine : il s'agissait de valider un projet de déviation routière d'Evreux dans un souci de sauvegarde du cadre de vie urbain.

Au-delà de ces cas concrets précis, c'est toute une méthodologie qui est présentée. Nous nous proposons de la mettre en relief en retraçant les principales étapes du projet, et en soulignant comment le travail effectué a, d'une part apporté des éléments objectifs, décisifs à la prise de décision, et comment, d'autre part, il est apparu comme un outil de concertation et de négociation pour les différents protagonistes.

Le problème posé

Le rôle du Parc Naturel du Luberon est double : préserver et mettre en valeur l'une des plus belles régions de France. Il essaie de mettre en œuvre une politique d'urbanisme cohérente, en incitant notamment les architectes et les promoteurs immobiliers à utiliser les matériaux nobles de la région, comme la pierre de taille, par exemple. Dès lors, on comprend pourquoi le contrôle de l'exploitation de carrières est au centre de ses préoccupations, puisque la pierre de taille fait partie du patrimoine de la région et qu'il faut néanmoins veiller à ce que l'impact des carrières sur l'environnement reste raisonnable.

La carrière de la Roche d'Espeil (Vaucluse) est située en plein cœur du Luberon, juste au-dessus de la combe de Lourmarin. Sa pierre calcaire, l'une des plus réputées de la région, a servi, entre autres, à la restauration du Palais des Papes et des remparts d'Avignon. Sa dureté, sa bonne résistance à l'action de l'air marin ainsi que sa non gélivité rendent son utilisation multiple, aussi bien intérieure qu'extérieure.

La Société Méridionale d'Exploitation des Carrières de Pierre de Taille (SMECPT) a accordé en 1991 une nouvelle autorisation d'exploiter pour quinze ans à la carrière de la Roche d'Espeil. Mais le gérant, recherchant avant tout les zones où la qualité de la pierre est la meilleure, ne sait pas exactement de quelle manière et dans quelle direction il va poursuivre l'exploitation.

C'est pourquoi le Parc du Luberon souhaite entreprendre une étude sur cette carrière. Il a imaginé différents scénarii d'exploitation future et souhaite obtenir des modélisations de ces évolutions, en particulier sous la forme de vues en perspective de la carrière, à partir de différents points de vue, afin de juger de son impact sur le paysage. Les documents produits (en particulier, des images de synthèse intégrant les effets de l'extension de la carrière sur le milieu naturel) permettront de modifier les plans d'exploitation de la carrière, afin de préserver au mieux l'environnement.

Méthodologie

Les stagiaires prennent tout d'abord contact avec les personnes du Parc concernées par ce projet, et visitent la carrière d'Espeil. Cette réunion est l'occasion de présenter les éléments du problème (historique du développement de la carrière...) et la méthodologie proposée qui s'appuie sur la chaîne de traitement de perspectives urbaines TRAPU. TRAPU (TRaitement Automatique de Perspectives Urbaines) est un système informatique développé par l'IGN permettant le traitement, la visualisation et la simulation de données géographiques tridimensionnelles.

Une répartition des tâches est effectuée : les responsables du Parc du Luberon devront fournir une carte de la zone concernée où seront localisés les points de vue à partir desquels les perspectives devront être calculées; pendant ce temps, les stagiaires mettront en place les outils techniques nécessaires à la bonne marche du projet.

La mise en place du couple de photographies aériennes, la saisie MNT et la saisie TRAPU sont effectuées. Il apparaît que la carrière a considérablement évolué depuis les dernières prises de vues aériennes. Il est donc nécessaire de revenir sur le terrain pour lever le nouveau contour de la carrière.

Divers scénari d'évolution de la carrière sont transmis aux stagiaires, qui les intègrent dans la chaîne de traitement afin de générer des images de synthèse. Une vidéo est par ailleurs réalisée. Notons que le Président du Parc du Luberon et le gérant de la carrière de la Roche d'Espeil interviennent dans le film.

Le travail technique terminé, les stagiaires présentent leurs résultats lors d'une réunion regroupant toutes les parties.

Réalisation technique des images

Les images sont réalisées grâce au logiciel TRAPU, qui peut créer des perspectives urbaines en s'appuyant sur un système de gestion de base de données urbaines. La saisie des données nécessaires à TRAPU s'effectue par restitution photogrammétrique, à partir de clichés noir et blanc au 1 : 8 000. La saisie des données comporte trois phases : la mise en place des couples, la saisie du modèle numérique de terrain, et la saisie des éléments TRAPU (bâti, végétation...). Ces données permettent de représenter des vues correspondant à diverses perspectives, points de vue et instants dans la journée, et intégrant un rendu réaliste de la scène ainsi constituée.

En plus des vues en perspectives en facettes colorées, de véritables images de synthèse sont produites, en plaquant une orthophoto numérique couleur sur le MNT TRAPU. A cette fin, deux clichés aériens couleur au 1 : 20 000, qui couvrent une grande partie de la zone du MNT, sont utilisés. L'intérêt de l'orthophoto numérique réside dans le fait que sur une photographie aérienne, il y a toujours des déformations d'échelle dues à la projection conique. Dans certains cas, lorsqu'on n'utilise qu'une petite partie de la photographie, par exemple, on peut ne pas en tenir compte, mais lorsqu'on veut croiser ces données avec des données TRAPU qui sont très précises (puisque saisies à grande échelle), il est nécessaire de redresser la photographie, c'est-à-dire de réaliser une orthophoto. Ce choix s'impose donc, d'autant plus que le relief de la zone est très accentué, ce qui augmente encore les déformations sur les clichés aériens. Il faut

en outre pouvoir positionner l'orthophoto correctement sur le MNT. Une aérotriangulation est donc réalisée. Le calcul des images de synthèse nécessite trois types de données : le MNT TRAPU, l'orthophoto numérique, et les données TRAPU. Une série d'images de synthèse de la zone est créée, ainsi qu'une animation, qui simule un vol de quatorze secondes au dessus de la carrière (figure 5.1).



figure 5.1 : Image de synthèse sur la carrière de la Roche d'Espeil (Luberon, Vaucluse)

Les résultats

Le Parc naturel du Luberon demande de fournir, de quatre points de vue, des vues en facettes colorées de simulations d'extensions de la carrière. Pour cela, il a fourni des scénari d'exploitation à différents stades : deux extensions vers l'Ouest, une vers l'Est, avec ou sans merlon autour de la partie exploitée.

Il apparaît, au vu des images, que le choix du merlon a plus d'importance que la profondeur d'exploitation en ce qui concerne l'aspect extérieur de la carrière, et qu'il faut privilégier la constitution de cette butte destinée à être revégétalisée. Une hauteur estimée à trois mètres minimum paraît indispensable.

D'après les entrevues que les stagiaires ont avec le Parc du Luberon et le gérant de la carrière, la mise en place de merlons semble constituer un bon compromis : le carrier, tout en exploitant une pierre de bonne qualité, va pouvoir préserver l'image de sa carrière, et le Parc du Luberon, tout en préservant l'environnement, n'empêche pas l'exploitation de pierre de taille qui est une richesse naturelle et économique de cette région.

Autre cas exemplaire

Dans cet autre exemple, la Direction Départementale de l'Équipement de l'Eure cherche à valider un projet de déviation routière d'Evreux, et convaincre les élus locaux et la population de son souci de sauvegarde du paysage.

Dans ce but, des images de synthèse réalistes et esthétiques sont demandées à l'IGN sur des zones sensibles du projet : villages de la périphérie urbaine ou futurs lotissements à caractère résidentiel.

La méthodologie générale reste semblable à celle du premier cas. La volumétrie existante est décrite par un MNT issu de la Base de Données altimétrique IGN, enrichi au voisinage du tracé proposé par une saisie photogrammétrique complémentaire. Cette saisie décrit le "sursol" constitué par les constructions et la végétation, et apporte un complément d'information sur le sol naturel (talus, ruptures de pente...). On intègre dans cette base de données TRAPU les caractéristiques géométriques et sémantiques du projet. Le paysage actuel est décrit par une couverture photographique aérienne à grande échelle à axe vertical, en couleurs. Les perspectives définies par la DDE sont calculées à partir de ces données, puis les images de synthèse brutes sont améliorées (effet de ciel, premiers plans...) avant livraison.

Dans leur finalité et leur processus technique, les deux exemples sont semblables et offrent à l'utilisateur un moyen d'intervention dans le projet, complémentaire à l'étude sur plans, et probablement moins subjectif. L'originalité du second cas réside certainement dans la démonstration de la nécessité d'utiliser des modèles 3-D dans les projets de grands équipements, alors que bon nombre d'études sont encore menées avec des modèles 2-D.



figure 5.2 : Image de synthèse sur la déviation routière d'Evreux (Eure)

Conclusion

Les objectifs de ces deux projets sont atteints. Les vues en perspective demandées par le Parc du Luberon, ainsi que la vidéo réalisée, et les images de synthèse fournies à la DDE de l'Eure, permettent de faire avancer leurs études : ces documents matérialisent de façon rationnelle les conséquences des possibles extensions de la carrière et du réseau routier autour d'Evreux, et constituent une présentation objective des scénari possibles. Ces documents représentent la matière première et le moteur de la négociation entre les diverses parties prenantes (Parc du Luberon, Société Méridionale d'Exploitation des Carrières de Pierre de Taille dans le premier cas; DDE, élus locaux et population dans le second). Par leur caractère objectif, les images sont un outil de concertation, de médiation et de coopération puissant. Enfin, les décisions communes prises en accord avec toutes les parties montrent combien elles constituent une aide puissante à la décision.

Une telle méthodologie, basée sur un travail à la fois rationalisé et consensuel, est très prometteuse. Par ailleurs, l'aspect consensuel de la méthodologie, qui amène toutes les parties prenantes à négocier sur des bases objectives communes, est extrêmement important. Ce type de méthodologie mériterait d'être approfondi et pourrait éventuellement déboucher sur la rédaction d'une charte de la maîtrise de l'environnement, décrivant une procédure standardisée de traitement de ces problèmes.

6. Cartographie et SIG appliqués aux risques technologiques majeurs et au transport de matières dangereuses

*Daniel Gagnier
Institut Géographique National
2/4 avenue Pasteur
94165 SAINT-MANDÉ CEDEX*

*(Ministère de l'Environnement
Délégation aux Risques Majeurs 1992-1993)*

La cindynique moderne (science du danger) utilise de plus en plus la cartographie thématique et les SIG pour l'information, la prévision et la gestion de crises.

Parmi les risques technologiques, le Transport de Matières Dangereuses (TMD) représente un trafic national annuel de 120 millions de tonnes assuré à 77 % par la route et à 17 % par le fer (respectivement 53 % et 41,5 % si on raisonne en tonnes-kilomètres).

L'année 1990 a connu 198 accidents de la route dûs aux TMD. Pour 74 d'entre eux le produit a joué un rôle aggravant. Sur 16 victimes, 4 décès furent dûs à l'effet des matières dangereuses.

Consciente de la réalité du risque potentiel de catastrophes, la Délégation des Risques Majeurs (DRM) a piloté l'édition en novembre 1992 d'une carte départementale "TMD" sur la Seine-Maritime et l'étude en 1993 d'une maquette SIG sur une zone-test du même département.

Cartographie TMD 76

Le choix de la Seine-Maritime (76) pour une première application concrète est justifié par l'activité industrielle du département et par l'existence d'une base informatisée de données TMD, établie par le laboratoire "modélisation et traitements graphiques" du CNRS - Université de Haute-Normandie (F) - sur financement du Ministère de l'Intérieur. Cette Base de Données a été créée dans le cadre du plan de secours spécialisé "TMD" établi en application du décret n° 88-622 du 6 mai 1988.

Objectifs

- La diffusion de ce document répond aux objectifs suivants :
- mettre à la disposition des responsables une information synthétique sur le transport des matières dangereuses, sous une forme facilement accessible,
 - constituer un véritable aide-mémoire auquel on pourra se reporter immédiatement en cas d'accident,
 - assurer l'information préventive des citoyens prévue par la loi n° 87-565 du 22 juillet 1987, article 2.1.,
 - sensibiliser les responsables locaux pour engager des mesures de prévention.

Les intervenants (conseils techniques et/ou participations financières)

- services locaux : préfecture/protection civile, équipement, actions sanitaire et sociale, industrie, recherche et environnement, sapeurs-pompiers,
- collectivités locales : conseil régional, conseil général,
- services nationaux concernés : Ministère de l'Intérieur, mission TMD du MELTT, direction des hydrocarbures du Ministère de l'Industrie, CNRS, IGN, DRM,
- chambres de commerce et d'industrie.

Description du document

Cette "cartographie du TMD" est constituée d'un document mixte, comprenant plusieurs cartes ainsi que des tableaux, graphiques et schémas illustrant le phénomène TMD sur le département; le document au format 90 x 105 cm est réalisé en quatre couleurs et imprimé en 4 000 exemplaires par l'IGN. Il comprend :

- une carte générale du département à l'échelle du 1 : 200 000, représentant les principales installations industrielles, les axes de TMD (routes, voies ferrées, fleuves, canalisations, hydrocarbures, gaz et chimie), les points particulièrement dangereux, les zones vulnérables (habitat, limites de communes, réseau hydrographique, captages, nappes phréatiques) et la localisation d'accidents répertoriés, (Cf. la figure 6.2 pour la légende)
- un agrandissement au 1 : 100 000 des zones du Havre et de Rouen, comportant des informations plus détaillées, suivant la même légende, (Cf. figure 6.1)
- des "cartons" illustrant les données disponibles sur le département ou la région : tonnages, modes de transport, flux et emplacements des établissements industriels numérotés avec tableau récapitulatif,
- des figures informatives (prévention / signalisation) : centres de secours, étiquettes code danger, code matière, ..., (composées sur disquette par le CNRS de Rouen pour une exploitation directe par l'IGN).

La carte TMD/76, bien utile pour des réunions de concertation départementales, a une durée de vie nécessairement limitée; le souci d'actualisation des données et la recherche de scénarii possibles a naturellement conduit à prolonger la réalisation de la carte par la mise en place d'un SIG dédié au TMD.

SIG-TMD-76

Contexte

Le logiciel maquette SIG/TMD, réalisé en 1993, vise à exploiter des données géographiques numériques dans un but d'évaluation et de gestion des risques dans le domaine du TMD. Le financement a été assuré par le Comité Interministériel pour l'Informatisation et la Bureautique dans l'Administration (CIIBA) qui dépend du premier ministre.

La DRM (Affaires Géographiques) a piloté un comité de suivi composé d'une quinzaine d'experts provenant des différents ministères, organismes et collectivités locales concernés.

La société MATRA/CS/Val-de-Reuil et un thésard du CNRS ont assuré le développement de l'étude, limitée à la feuille IGN au 1 : 50 000 de Bolbec.

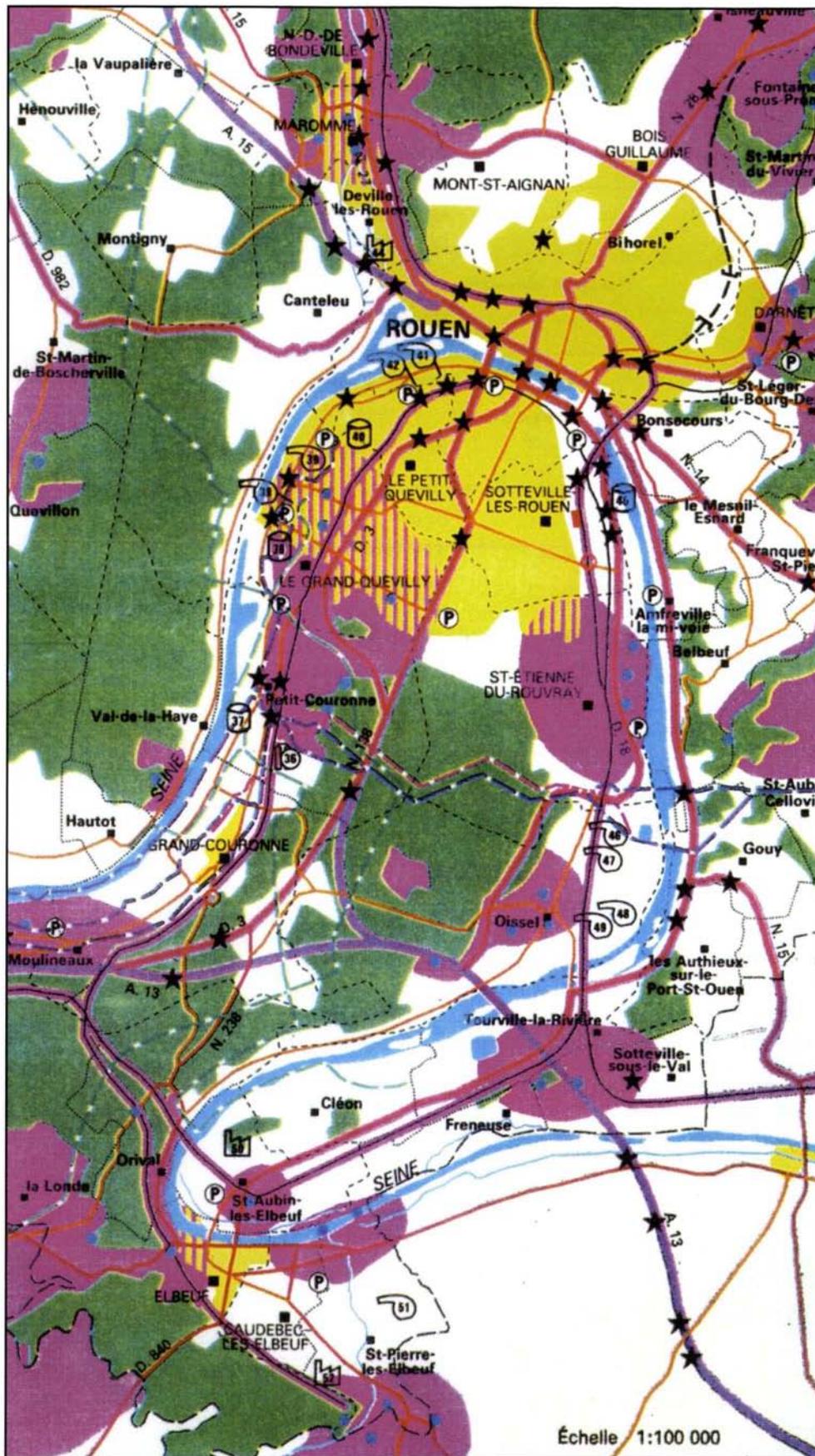


figure 6.1 : agrandissement au 1 : 100 000 de la zone de Rouen (Normandie)
 © URA 1351 CNRS/SDIS 76 1992 & IGN 1992

LEGENDE

Transport de matières dangereuses (TMD)

Transport routier :

	autoroute
	route principale
	route secondaire
	stationnement routier important

Transport ferroviaire :

	voie ferrée
	gare de triage
	passage à niveau avec trafic important

Voies navigables :

	fleuve et canal
---	-----------------

Canalisations de transport :

	de gaz
	d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés
	de produits chimiques

Principales installations fixes

	Industrie pétrolière
	Industrie chimique
	Autre usage : papeterie, parfumerie, pharmacie, verrerie, déchets
	Stockeur, grossiste, distributeur : pétrole, gaz, chimie
	Centrale nucléaire

Vulnérabilité

	Principaux itinéraires routiers ou ferroviaires de TMD
	Accidents de TMD, période 1980-90
	Zone d'habitat
	Captage d'eau potable et zone de vulnérabilité associée
	Zone mixte de vulnérabilité maximale
	Zone boisée
	Réseau hydrographique

Données administratives

	Che - lieu de canton
	Commune
	Limite de département
	Limite de canton
	Limite de commune

figure 6.2 : légende de la cartographie du TMD
© URA 1351 CNRS/SDIS 76 1992 & IGN 1992

Contenu

Données géographiques de base

- Base de données cartographiques IGN, enrichie d'une couche thématique spécifique TMD obtenue par une saisie complémentaire à l'IGN, et comportant notamment :
 - des éléments ponctuels : gares de triage, pylônes EDF, centrales, captages, stations de pompage, installations dangereuses ...
 - des éléments linéaires et zonaux : zones d'infiltrations rapides et couche spéciale des canalisations d'hydrocarbures, GDF, hautes pressions, chimiques ...
 - intégration d'une simple image Landsat (couche BD cartographique IGN occupation du sol non disponible en 1993 sur la zone).

Données exogènes

- zones de servitude, scenarii, paramètres de modèles de dispersion chimique, statistiques météo/relevés de balises et capteurs, comptages routiers, accidents.

Environnement informatique

- station de travail de type IPX sous environnement X motif - SIG, Arc Info version 6.0,
- langage C et AML.

Aperçu des fonctionnalités

Thèmes et icônes de fonctions :

- visualisation de cartes : intersection de réseaux, zones de sécurité, toponymie,
- interrogation de fonctions : météo officielle, météo mobile, simulations de propagation et de l'impact spatial de différents produits ou événements :
 - BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion),
 - UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion),
 - dispersion atmosphérique de produits toxiques.
- intersections d'objets et détermination d'emprises géographiques par croisement de différents paramètres,
- affichage d'échelle,
- calcul de distances et de superficies.

Appréciations et perspectives SIG/TMD

Une étude TMD nécessite une confrontation des informations de natures diverses (enjeux humains, environnementaux et économiques, infrastructures, occupations du sol).

De qualité incertaine et de sources multiples, le caractère diffus des phénomènes étudiés complique l'analyse de ces informations.

Le SIG/TMD/76, système ouvert, peut accueillir des données de types très variés dont l'actualité, la géométrie et la sémantique sont bien prises en compte.

Des fonctions d'analyse sont également implantées. Les synthèses spatio-temporelles nécessitent toutefois des modèles pertinents de comportement des paramètres de l'environnement; c'est bien là une problématique inachevée à laquelle se heurtent les développeurs de systèmes

La montée en puissance des Bases de Données bien localisées dans l'espace au sein d'organismes producteurs comme l'IGN permettra bientôt d'étendre l'offre de données et donc d'affiner les analyses de voisinage, la connaissance des effets de couloirs et de flux et la détermination des potentialités de surface.

Par exemple, la BDAltimétrique permet de draper une donnée sur un modèle numérique de terrain (épandage de produits toxiques).

Par ailleurs des universités et des organismes comme le CEA/Institut de protection et sûreté nucléaire, associés aux corps des sapeurs-pompiers, développent des applications notamment pour des exercices de dispersion atmosphérique (Rouen (F), février 1992) grâce à des méthodes d'analyse systémique et de raisonnement tactique appuyées sur des logiciels spécifiques tels que SAFER, CAMEO, CENT, PAMPA et BATEX.

Les collectivités locales, dans le cadre des serveurs de données environnementales, lancent des applicatifs TMD.

Les gestionnaires de réseaux font de plus en plus appel aux SIG (partenariat GDF/IGN, Nantes(F) sur Arc Info).

Ces travaux concourent à multiplier dans les SIG les combinaisons numériques qui donnent lieu au développement de "l'algèbre de cartes" avec sortie de véritables cartes "d'aptitude" qui peuvent s'appliquer à l'analyse spatiale des risques (S. Rimbart, Strasbourg (F), Bulletin SFPT n° 125, 1992).

Conclusion : impact des documents

Qu'il s'agisse de la carte TMD/76 ou du SIG/TMD qui a suivi, ces travaux font partie des actions soutenues par le CIIBA (premier ministère), dont le projet ISIS (prévention et gestion de crises pour les risques majeurs), dans le prolongement du système RAMSES (sécurité des Jeux Olympiques d'Albertville (F).)

A terme, ces développements d'outils d'information et d'aide à la décision, accessibles sur systèmes embarqués, devraient compléter l'équipement des PC et salles de situation sous l'autorité des préfetures dont certaines jouent déjà un rôle pilote.

Ces outils devraient contribuer à l'amélioration des plans ORSEC, des plans de secours spécialisés, des plans rouges et des plans particuliers d'intervention (éléments de "l'arbre de sécurité" cf. figure 6.3).

Indépendamment de la diffusion nationale dans les services publics concernés, plusieurs cellules régionales d'information préventive ont souhaité recevoir des exemplaires supplémentaires de la carte; certaines Directions Départementales de l'Équipement et Directions Régionales de l'Industrie, Recherche et Environnement envisagent des éditions similaires. Le document fait partie du dossier distribué dans les séminaires d'information préventive et les stages des enseignants pour la sensibilisation du milieu scolaire.

Le SIG/TMD a été demandé par le Centre de documentation de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux; l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité, également destinataire de la cassette et auteur de travaux sur les risques en Seine-Maritime, envisage de l'exploiter sur un matériel SIG.

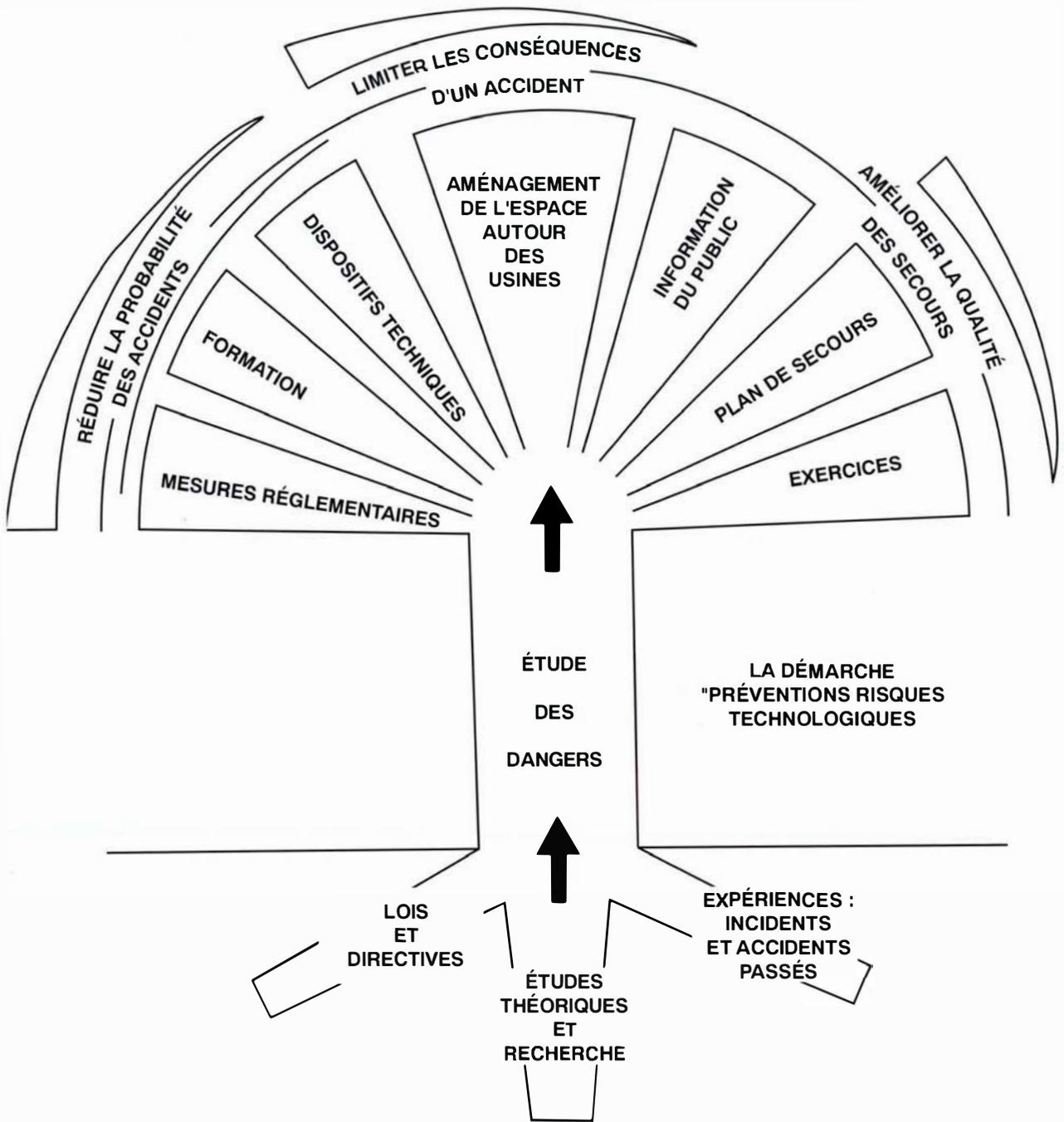


figure 6.3 : l'arbre de sécurité

7. Utilisation de la BD TOPO pour les études hydrologiques

Le cas du bassin de l'Ouvèze (Vaucluse)

*Pascal Chambon
Institut Géographique National
560 rue Albert Einstein
ZI les Milles
BP 128.000
F-13794 AIX-EN-PROVENCE cedex 03*

Hydrologie et topographie

Toute étude hydraulique ou hydrologique nécessite l'utilisation de données topographiques spécifiques. Les acteurs de ces études, maîtres d'ouvrage ou bureaux d'étude, s'accordent pour affirmer que la précision des résultats dépend pour une part du modèle mathématique, et pour une autre part, des données utilisées.

Il semble en effet évident que, quel que soit le modèle utilisé pour simuler ou modéliser l'écoulement d'une rivière ou la propagation d'une crue, son application sur une représentation insuffisante du relief et du sol produit un résultat final erroné.

La spécificité des données topographiques nécessaires concerne essentiellement leur précision, qu'il est d'ailleurs bien difficile de décrire : une précision différente doit être requise lorsque l'on va modéliser le ruissellement sur les bassins versants, où l'écoulement dans le lit de la rivière. Elle dépend également du type de relief concerné : on traite différemment une zone presque plate avec des talus et une zone à pente forte et régulière.

C'est pourquoi les études hydrologiques sont l'occasion presque systématique d'acquérir des données topographiques dont le coût peut représenter une part importante du coût global de l'étude.

Enfin, les résultats énoncés sont utilisés pour prendre des décisions sur la gestion et l'aménagement des rivières au sens large. L'enjeu de ces décisions pouvant porter sur des vies humaines, la maîtrise de la qualité des résultats semble primordiale.

Le cas de l'Ouvèze

La crue exceptionnelle du 22 septembre 1992 sur le bassin de l'Ouvèze a amené les services de l'Etat à lancer une étude détaillée au début de 1993.

Le Syndicat Intercommunal du bassin de l'Ouvèze s'est joint à l'Etat pour assurer la maîtrise d'ouvrage de l'étude, pilotée par la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de Vaucluse (DDAF).

Cette étude est préalable à l'élaboration ultérieure d'un schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) du bassin de l'Ouvèze, ce qui l'intègre dans le cadre de la loi sur l'eau n° 92.3 du 3 janvier 1992 et du décret d'application n° 92.10.42 du 24 septembre 1992 relatif à la SAGE.

Outre la définition des travaux d'urgence, l'étude doit déterminer principalement les risques d'inondation, et conduire à des cartes d'aléas en tenant compte des enseignements tirés de la catastrophe du 22 septembre 1992.

L'acquisition des données topographiques dans ce cadre a fait l'objet d'une réflexion montrant à la fois le coût prohibitif de la réalisation spécifique d'un levé à grande échelle sur l'ensemble du bassin, et la spécificité du besoin en données selon les zones, très différentes vis-à-vis du relief : sont concernés 580 km² en amont de Vaison et Bédarrides, 100 km² entre Bédarrides et le Rhône, mais également 300 km² pour le bassin du Sud-Ouest du Mont Ventoux, et 390 km² pour le bassin des Sorgues.

Le Vaucluse : un département riche en équipements géographiques

En 1989, le Conseil Général de Vaucluse a décidé la constitution d'une Base de Données pluridisciplinaires d'information géographique, afin de mettre à disposition des services du département, un outil de gestion performant et disponible.

C'est ainsi qu'une convention signée en 1989 entre le Conseil Général, l'IGN et la société STN prévoit l'utilisation de la Base de Données Topographiques (BD TOPO®) de l'IGN dans ce cadre. Cette initiative a permis notamment d'anticiper la programmation de la constitution de la BDTopo à l'IGN. Le Vaucluse a ainsi pu être couvert en trois années, alors que l'ensemble de la France nécessitera encore une quinzaine d'années. C'est également dans ce cadre qu'a été intégrée une orthophotographie numérique sur le département de Vaucluse.

En 1993, les données BDTopo étaient disponibles et on pouvait envisager leur utilisation pour des études diverses concernant aussi bien l'environnement, l'aide à la décision pour les services de secours, la gestion du patrimoine, des routes etc... (figure 7.1).

De nombreuses prises de vues aériennes, allant du 1 : 20 000 au 1 : 30 000, en noir et blanc et en couleur, réalisées entre 1988 et 1992 sont également disponibles sur le département de Vaucluse.

La BD TOPO s'avère utile

A l'instant où l'on a besoin de constituer des données topographiques précises, l'examen de la BD TOPO® montre que :

- ces données équivalent en précision et en contenu à un levé habituel proche de l'échelle du 1 : 10 000,
- sa précision planimétrique (écart-type pour les coordonnées XY), de l'ordre du mètre, est largement suffisante pour ce type d'étude,
- sa précision altimétrique (écart-type de la coordonnée Z), qui se situe entre 60 centimètres et 1 mètre, offre directement un modèle de terrain homogène permettant de dégrossir les problèmes,
- son contenu est riche en informations utiles à l'étude : points cotés, courbes de niveau, talus, haies, hydrographie...,
- sa structuration en base de données permet une grande souplesse d'utilisation (voir encadré),
- sa disponibilité est un élément primordial, quand on sait qu'un levé photogrammétrique nouveau nécessite de longs travaux qui débutent par la réalisation d'une prise de vues, sujette aux aléas de la météorologie.

L'étude sur l'Ouvèze se devait donc de prendre en compte l'existence de cet outil remarquable qu'est la BD TOPO®, car c'était la première fois que des données d'une telle précision et d'un tel contenu étaient disponibles sur une zone si étendue.

Ce sentiment s'est confirmé par la réponse des Bureaux d'Etude retenus qui ont proposé d'utiliser la BD TOPO®, et de la compléter par des levés terrestres dans les zones où celle-ci s'avérerait insuffisante en matière de précision.

C'est ainsi que des levés spécifiques, mais réduits, ont été réalisés : profils en travers des rivières, lits majeurs des rivières, cheminements dans certaines zones inondées lors de la crue du 22 septembre 1992 ...

La BDTOPO

La BDTOPO est une Base de Données structurée d'information géographique sur le territoire français. C'est la Base de Données nationales la plus complète et la plus précise de la gamme IGN; elle fournit un système de référence de localisation pour les applications s'étendant du territoire d'une commune à celle d'un département. Elle se caractérise principalement par :

- sa description exhaustive de l'environnement,
- sa précision métrique (champ d'application du 1 : 5 000 au 1 : 25 000),
- sa structure topologique,
- des objets saisis en trois dimensions.

Elle est élaborée par saisie photogrammétrique à partir de prises de vues aériennes réalisées spécifiquement au 1 : 30 000 et 1 : 20 000, et complètement de terrain.

Sa structure topologique, organisée en objets géographiques liés par des relations repose sur deux couches d'informations, saisies en trois dimensions :

1. la planimétrie : voies de communication routière, voies ferrées, sentiers, réseaux de transports d'énergie, hydrographie permanente et intermittente, bâtiments, végétation, limites administratives jusqu'aux communes, lignes descriptives du relief, équipement géographique, toponymie.
2. l'altimétrie : courbes de niveau et points cotés.

Elle couvrira le territoire national en 2010 environ, et la production actuelle dépasse 10 % de cet objectif.

Ses domaines d'application sont variées :

- études des Plans d'Occupations des Sols, urbanisme, gestion des réseaux publics,
- études d'impact, avant projet d'aménagement (routier, paysager...), études préliminaires,
- plans de réseaux d'eau ou d'électricité en zone interurbaine,
- schémas d'aménagement, plans de circulation et d'intervention, simulations 3-D,
- implantations de zones d'activités, grands aménagements, suivi des SDAU..

tableau 7.1 : description de la BD TOPO

Utilisation de la BD TOPO®

La BDTOPO®, précédemment livrée par l'IGN, a été extraite par la société STN sur les zones du bassin de l'Ouvèze et des Sorgues, et mise à disposition des Bureaux d'Etude par le Conseil Général de Vaucluse.

Les deux couches de données - planimétrie et altimétrie - ont été récupérées et ont fait l'objet de contrôles permettant de rejeter des éléments inutiles ou perturbateurs, afin d'être intégrées dans le système informatique de cartographie des zones inondables.

Les approches hydrauliques et hydrologiques ayant été préalablement menées en parallèle, puis confrontées pour confirmer leur compatibilité, la phase suivante concerne donc la cartographie des zones inondables, où la BDTopo présente un double intérêt :

- l'utilisation des données cotées en altitude, permettant de simuler les inondations,
- en tant que fonds cartographiques de référence pour la présentation des résultats.

Modèle numérique de terrain

Pour simuler l'écoulement de l'eau, on a besoin d'un modèle numérique modélisant le terrain en trois dimensions. Ce modèle est extrait de la BD TOPO®, cette extraction devenant très simple grâce à la structuration des données :

- les points cotés de la couche altimétrique, qui sont particulièrement utiles en zone assez plate où les courbes de niveau décrivent assez mal le relief; ces points cotés concernent généralement des points remarquables, soit sur la planimétrie (intersection de routes, angle de champs...) soit sur l'orographie (col, fond de cuvette, sommet...) et ce sont surtout ceux-là qui permettent de caractériser la forme du relief.

- les courbes de niveau qui modélisent bien le terrain en zone en pente prononcée et assez régulière; ces courbes de niveau s'avèrent être d'une qualité nettement supérieure aux courbes que l'on peut trouver sur un document graphique,

car leur continuité est assurée parfaitement à l'intérieur d'une feuille, chaque courbe possède son altitude en attribut, et les courbes en cuvette sont distinguées des autres.

- certains éléments planimétriques saisis au niveau du sol : routes, talus... qui constituent souvent des barrages aux écoulements d'eau, et qui sont connus avec leur altitude tout au long de leur tracé; les talus sont identifiés à la fois par leur sommet et leur base; il faut néanmoins faire attention à ne pas utiliser certains éléments planimétriques dont l'altitude n'est pas saisie au niveau du sol, comme par exemple les bâtiments, saisis au niveau des gouttières (figure 7.3) ; de même, certains éléments, issus du complètement BD TOPO® sur le terrain, n'ont pas d'altitude, et ne peuvent pas être utilisés pour la modélisation. Il faut également faire attention au réseau hydrographique dont l'altitude correspond à l'instant de la prise de vues aériennes ayant servi à la BD TOPO®, et qui peut varier de façon importante, justement dans les zones inondables.

C'est la superposition de ces objets géographiques qui va permettre de constituer un premier modèle de terrain ; ce modèle doit bien entendu être remplacé aux endroits appropriés par les levés effectués sur le terrain, dont la précision altimétrique est bien supérieure. Les profils des rivières permettent également d'avoir une idée de la topographie du lit; les levés complémentaires ayant été réalisés en Lambert 3, avec un rattachement au Nivellement Général de la France, sont également fournis sous forme numérique, conformément au cahier des charges qui prévoyait le croisement numérique des informations sur le relief.

Enfin, ce modèle définitif de terrain doit servir à simuler une inondation avec les paramètres hydrauliques donnés ; le logiciel permet de modéliser de façon différente le chenal principal des rivières, où la logique d'écoulement est dynamique, des écoulements secondaires, qui peuvent aller jusqu'à se dissocier complètement de l'écoulement principal ; on peut alors utiliser par exemple un modèle à "casiers" logiques, en numérisant leurs limites, prédéterminées par les hydrauliciens ; cette méthode est applicable en particulier pour le bassin du Sud-Ouest du Mont-Ventoux, zone assez plate et bien représentée par des casiers plats, qui se vident successivement les uns dans les autres; les casiers ont pratiquement une existence physique dans ces zones très particulières.

La simulation des zones inondées à partir des paramètres des crues historiques peuvent alors être confrontées aux levés de ces crues, lorsque ceux-ci existent, ce qui est le cas pour la crue du 22 septembre 1992. Cette confrontation permet de valider, ou de corriger le modèle de terrain précalculé.

Cartographie des zones inondables

Les zones inondables sont délimitées par le logiciel sur des cartes au 1 : 10 000. Environ dix coupures au format A1 sont nécessaires pour couvrir la zone d'étude. Pour chaque période de retour pertinente (décennale, centennale...), les paramètres hydrauliques permettent de représenter les contours des zones inondées, les modèles de terrain servant à différencier la hauteur d'eau à l'intérieur de ces zones, selon des seuils significatifs pour le risque. D'autres paramètres sont également cartographiés, comme la vitesse, ou la durée de submersion.

En plus de son utilisation pour le modèle de terrain, la BD TOPO® intervient ici en tant que fond cartographique de référence au 1 : 10 000, échelle tout à fait compatible avec la précision des données qui est d'environ d'un dixième de millimètre à cette échelle. L'aspect le plus important, pour cette représentation, sera de fournir un support à la fois homogène et dépouillé, afin de localiser au mieux le thème lié aux inondations, qui doit ressortir par la couleur. Le fond issu de la BD TOPO® sera essentiellement issu des objets planimétriques : voies de communication, bâtiments, végétation, toponymie : la constitution d'un fond "à la carte" est ici simplifiée par la structure ouverte de la BD TOPO®, comparativement à un fond graphique habituel, généralement issu de cartes au 1 : 25 000 agrandies, qui contiennent un fond souvent trop chargé, qu'on ne peut pas élaguer de manière aisée, et qui présente des défauts de localisation dus aux symbolisations cartographiques liées à l'échelle du 1 : 25 000.

C'est finalement quatorze jeux, pour chacune des coupures au 1 : 10 000, qui seront dessinés sur un traceur automatique, afin de servir de document d'aide aux décisions futures concernant l'aménagement et la gestion des sites.

Conclusion

L'étude de l'Ouvèze est en cours. Vraisemblablement aucune crue que celle du 22 septembre 1992 n'aura été analysée de façon aussi fouillée ; cette étude risque également d'être remarquable par la qualité des cartographies qui en seront issues. Si la récupération des données de la BD TOPO® offre a priori des perspectives particulièrement intéressantes, la publication des résultats dans le courant de l'année 1994 en précisera les limites, ce qui permettra d'envisager son utilisation dans le cadre d'autres études.

La mise en œuvre des schémas préconisés par la loi sur l'eau de janvier 1992 va en effet, dans les mois et années qui viennent, demander des données topographiques de plus en plus détaillées, au fur et à mesure que l'on abordera des échelles de plus en plus précises. La montée en charge de la BD TOPO® rendant celle-ci disponible sur des zones de plus en plus vastes (figure 7.4) permettra sans aucun doute de travailler de manière économique et efficace.



figure 7.1 : la BD TOPO® à Vaison-la-Romaine (Vaucluse)

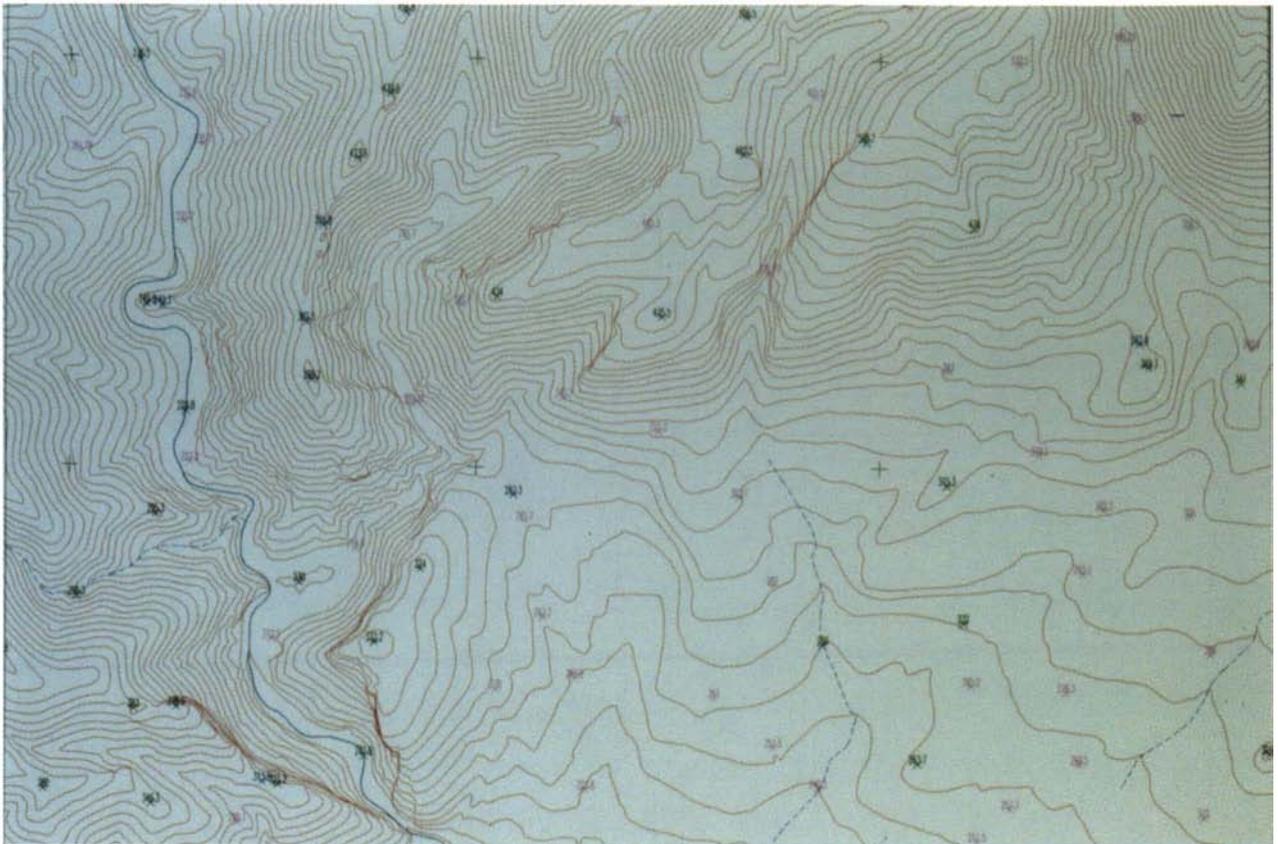


figure 7.2 : la couche altimétrique de la BD TOPO®.

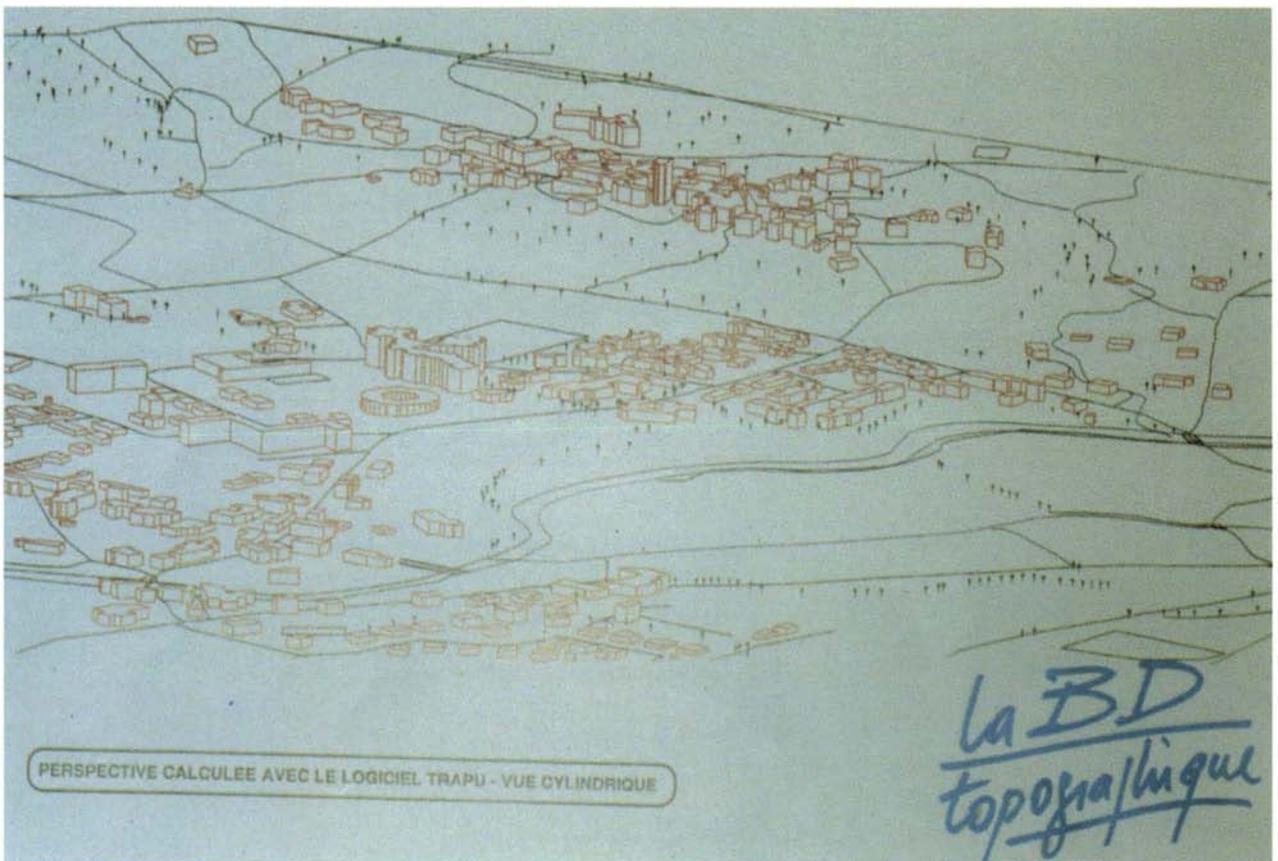
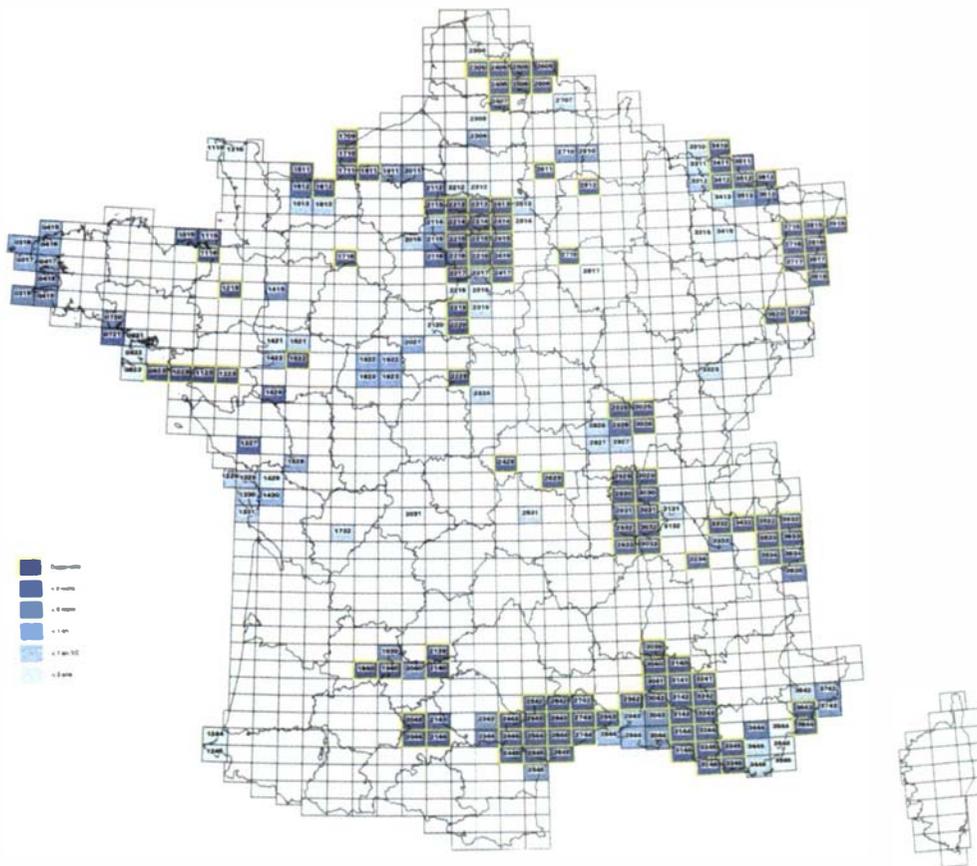


figure 7.3 : visualisation en perspective de la BD TOPO® en trois dimensions.



*figure 7.4 : Suivi de l'avancement de la BD TOPO.
Mise à jour au 1er Novembre 1996.*

8. Apport de la géodésie à la surveillance du niveau des mers

*Claude BOUCHER et Guy WÖPPELMANN
Ecole Nationale des Sciences Géographiques
6 et 8, avenue Blaise Pascal - Cité Descartes - Champs-sur-Marne
77455 MARNE LA VALLÉE CEDEX 2*

Résumé

Les enregistrements marégraphiques montrent un accroissement global du niveau moyen des mers de l'ordre du mm/an depuis un siècle. Celui-ci est dû à l'accroissement de la température moyenne qui crée une dilatation thermique des couches superficielles des océans et la fonte des glaces polaires et continentales. Cette augmentation globale de température est principalement due à l'effet de serre.

Le niveau moyen des mers est un paramètre estimable qui entre donc dans les modèles d'évolution climatique de la Planète Terre, notamment dans un but d'extrapolation et donc de prévision. La qualité de cette estimation est fondamentale pour une bonne modélisation. Or les estimations de la vitesse moyenne d'expansion depuis un siècle varient autant que la valeur elle-même (de 0 à 2 mm/an).

Une meilleure estimation est donc fondamentale, notamment une estimation sur un plus court intervalle de temps, en vue de déterminer une éventuelle accélération de ce paramètre.

En dehors de l'intérêt de ces modèles, qui se placent largement dans le cadre du programme Global Change, l'impact direct sur le littoral d'une montée du niveau moyen des mers est une préoccupation évidente pour l'environnement.

La détermination de cet accroissement est réalisable à partir des données de marégraphie côtière, dont certaines remontent à plus d'un siècle. Or ces mesures donnent accès uniquement à la variation de niveau d'eau par rapport à la côte. Tout mouvement vertical de la côte au niveau du marégraphe (tectonique, sédimentation...) doit donc être estimé afin de corriger les données brutes et obtenir ainsi le niveau d'eau et ses variations absolues.

Les techniques géodésiques ont déjà contribué depuis longtemps à résoudre ce problème, en rattachant les repères des marégraphes (c'est-à-dire des points matériellement définis et accessibles par rapport auxquels on peut définir le niveau d'eau) aux réseaux de nivellement. Mais les techniques spatiales de positionnement précis ont apporté un outil désormais indispensable pour résoudre ce problème d'une façon satisfaisante en terme d'exactitude et d'opérabilité.

En plus de la détermination ponctuelle des vitesses verticales, elles permettent d'exprimer les résultats dans un système global de référence terrestre géocentrique, alors que le nivellement ne peut qu'utiliser un géoïde régional comme référence.

Enfin, une source nouvelle de données est désormais à voir dans les surfaces topographiques globales des océans obtenues par les missions de satellites équipés d'un altimètre radar. La géodésie a là aussi le rôle essentiel de fournir une référence géométrique précise et stable pour une analyse multiannuelle et multimission de ces données.

La connaissance du niveau des mers est une préoccupation de longue date pour l'Homme comme en témoigne la première table de prédiction de marées à Hangzhou, en Chine, établie pendant le règne de la dynastie Tang (770 après JC.). La principale motivation qui a conduit l'Homme à s'intéresser de près à l'observation des variations du niveau des mers est la navigation. Alors que les tables chinoises marquaient simplement les pleines et basses mers en fonction des phases de la Lune, l'augmentation du commerce maritime et de la taille des bateaux a généré le besoin d'une connaissance plus détaillée des variations de la mer. Cette nécessité a poussé l'Homme à imaginer des moyens de plus en plus sophistiqués pour mesurer avec précision les fluctuations du niveau des mers; d'abord en installant simplement des échelles de marée, puis en utilisant des instruments mécaniques, les marégraphes à flotteur, et enfin en mettant à profit les techniques modernes tels les capteurs de pression, ou encore, les appareils à ultrasons. Notons que le premier marégraphe dans le monde a été mis en place en 1842, à Brest. Les marégraphes sont encore employés pour la navigation près des zones portuaires mais leurs données servent également à de nombreuses autres applications, en parti-

culier les études climatiques comme nous allons le voir.

Les diverses analyses portées sur les enregistrements marégraphiques montrent un accroissement global du niveau moyen des mers de l'ordre du mm/an (voir tableau 8.1). Ces études tentent de détecter une tendance moyenne séculaire récente sur l'ensemble des mers et des océans. La plupart d'entre elles s'appuient sur des séries temporelles marégraphiques de moyennes mensuelles ou annuelles du niveau marin, où les signaux de haute fréquence produits par les marées, la houle, les seiches etc... ont été filtrés. La figure 8.1 montre une des plus longues séries temporelles disponibles.

L'élévation du niveau moyen des mers s'explique d'une part par une dilatation thermique des couches superficielles des océans, appelée effet stérique, et d'autre part par un apport d'eau dû à la fonte des glaces polaires et continentales, dit effet eustatique. Ces deux effets ont une origine commune : l'augmentation globale de la température atmosphérique induite par la présence de plus en plus importante de gaz qui absorbent et renvoient l'énergie solaire réfléchie par la Terre sous forme de chaleur. Ces gaz sont appelés gaz à effet de serre, les plus cités sont le gaz carbonique (CO²) et le méthane (CH⁴) mais le plus abondant est la vapeur d'eau. La relation entre la température et la concentration en gaz à effet de serre est mise en évidence par les analyses isotopiques et chimiques effectuées sur des carottes de glace prélevées dans le continent antarctique. La concentration atmosphérique en gaz carbonique et en méthane au cours du dernier cycle climatique était plus faible en période glaciaire qu'en période chaude. Par conséquent grâce à l'effet de serre nous jouissons de conditions favorables à notre survie, mais un accroissement trop important de ce dernier pourrait perturber cet équilibre, et entraîner la Terre vers des conditions extrêmes comme celles de la planète Venus, où le flux thermique est emprisonné dans la basse atmosphère et les températures avoisinent + 490° C. Or, les observations montrent une augmentation de la concentration en gaz carbonique; celle-ci est passée de 260-270 ppm (parties par million) vers le début du XVIII^{ème} siècle à 315 ppm en 1958 puis à 355 ppm en 1990 (Observatoire de Mauna Loa à Hawaii).

Accroissements (mm/an)	Références	Commentaires
1,1 ± 0,8	Gutenberg (1941)	Beaucoup de marégraphes, 1807-1939.
1,2 à 1,4	Kuenen (1950)	Méthodes combinées.
1,1 ± 0,4	Lisitzin (1958, 1974)	6 marégraphes, 1807-1943.
1,2	Fairbridge et Krebs (1962)	Sélection de marégraphes, 1900-1950.
3	Emery (1980)	Beaucoup de marégraphes, 1850-1979.
1,2	Gornitz et al. (1982)	193 marégraphes, 1880-1980.
1,5	Klige (1982)	Beaucoup de marégraphes, 1900-1975.
1,5 ± 0,15	Barnett (1983)	9 marégraphes, 1903-1969.
1,4 ± 0,14	Barnett (1984)	155 marégraphes, 1881-1980.
2,3 ± 0,23	Barnett (1984)	155 marégraphes, 1930-1980.
0-3	Aubrey (1985)	Beaucoup de marégraphes.
1,0 ± 0,1	Gornitz et Lebedeff (1987)	130 marégraphes, 1880-1982.
1,2 ± 0,3	Gornitz et Lebedeff (1987)	Enregistrements marégraphiques corrigés du rebond post-glaciaire.
1,0 à 1,5	Braatz et Aubrey (1987)	44 marégraphes de la côte Est des U.S.A. 1920-1983.
1,15	Branett (1988)	155 marégraphes, 1880-1986.
0,4 à 0,6	Pirazzoli (1989)	58 marégraphes en Europe, 1920-1980.
1,26 ± 0,078	Gornitz et Seeber (1990)	Côte Est des U.S.A., 1880-1980
1,8 ± 0,1	Douglas (1991)	Enregistrements marégraphiques corrigés du rebond post-glaciaire.
2,4 ± 0,9	Tushingham et Peltier (1991)	Enregistrements marégraphiques corrigés du rebond post-glaciaire.

tableau 8.1 : Estimations de l'accroissement global du niveau des mers à partir de données marégraphiques

L'étude et la modélisation de l'évolution du climat de notre planète, notamment dans un but d'extrapolation et de prévision, ne peuvent s'effectuer de manière satisfaisante sans une approche globale prenant en compte les phénomènes physiques assez complexes qui ont lieu dans l'atmosphère, dans les océans mais aussi sur les terres émergées, et, les interactions entre ces trois milieux. A présent, un degré supplémentaire de complexité semble se rajouter avec les importantes perturbations entraînées par l'activité humaine, en particulier depuis l'avènement de l'ère industrielle et l'explosion démographique que nous connaissons. Un des objectifs des modèles d'évolution climatique est d'évaluer l'impact

des activités humaines en considérant différents scénarios probables d'évolution pour les paramètres qui sont affectés par les perturbations anthropogéniques.

Cependant, à l'heure actuelle, notre compréhension des phénomènes de géophysique intervenant dans le processus climatique, et leurs interactions, est limitée par le manque de données de qualité. En particulier, le niveau moyen des mers est un paramètre important pour la climatologie, mais les estimations de la vitesse moyenne d'expansion effectuées jusqu'à présent sur divers ensembles de marégraphes varient autant que la valeur elle-même (voir tableau 8.1). L'incertitude de ces estimations s'explique par la variabilité des vitesses indiquées par les marégraphes qui apparaît non seulement à l'échelle mondiale mais aussi à des échelles régionales et locales (voir tableau 8.2). Par ailleurs, la mauvaise répartition des marégraphes dans le monde (ceux-ci sont surtout concentrés dans l'hémisphère Nord le long des côtes fortement industrialisées d'Europe et des États-Unis) introduit probablement un systématisme dans l'estimation de ce paramètre global. L'étude effectuée par KO. Emery et DG. Aubrey [5] sur un échantillon de 578 marégraphes de plus de dix ans de mesures, illustre cette remarque; en effet, 68% des stations marégraphiques se trouvent entre 30 et 60 degrés de latitude Nord pour une surface équivalente en océans de seulement 12%.

MARÉGRAPHE	TENDANCE ± ECART-TYPE (mm/an)	NOMBRE D'ANNÉES
DUNKERQUE	2,45 ± 0,60	19
CALAIS	-3,27 ± 2,14	14
BOULOGNE	3,21 ± 1,90	9
DIEPPE	6,62 ± 0,88	26
LE HAVRE	3,38 ± 0,82	18
CHERBOURG	-1,39 ± 1,24	17
SAINT-MALO	14,37 ± 5,45	7
ROSCOFF	-0,66 ± 1,41	14
LE CONQUET	1,46 ± 0,85	20
BREST	0,93 ± 0,05	163
PORT TUDY	0,52 ± 1,13	15
SAINT NAZAIRE	0,06 ± 1,14	19
POINTE ST. GILDAS	0,23 ± 1,07	21
LA PALLICE	-2,73 ± 1,17	11
LE VERDON	-1,28 ± 2,26	6
ST. JEAN DE LUZ	0,25 ± 0,81	24
MARSEILLE	1,18 ± 0,08	95
TOULON	-3,57 ± 3,98	6
NICE	4,79 ± 1,77	15
MONACO	-2,66 ± 1,25	9

tableau 8.2 : Tendances indiquées par l'analyse des moyennes annuelles de marégraphes en France (métropole)
(Moyenne pondérée sur l'ensemble des tendances : 1,01 mm/an ± 0,44 mm/a)

Les émissions de gaz à effet de serre se poursuivant, on s'attend à une accélération de l'élévation du niveau moyen des mers. Cependant, les prédictions sont encore trop entachées d'incertitudes qu'il est essentiel de réduire rapidement afin de pouvoir mettre en place une stratégie de réponse adéquate, dont les coûts et les répercussions socio-économiques seront sûrement importants. Par ailleurs, les études sur l'évolution du climat à l'échelle de temps géologique semblent indiquer un comportement climatique sous forme de seuils "irréversibles" et de constantes de temps encore mal déterminées. Par exemple, l'hémisphère Sud suivrait le refroidissement de l'hémisphère Nord avec un retard d'environ 1 000 ans. Une estimation de meilleure qualité de cette augmentation du niveau moyen marin est donc urgente. Pour cela, la communauté internationale doit déjà faire un effort pour assurer la qualité des instruments marégraphiques, la continuité de leurs mesures, leur répartition mondiale et la représentativité des sites choisis vis-à-vis du phénomène étudié (en raison des mélanges variables d'eau douce et salée, les mesures de marégraphes proches de cours d'eau sont inexploitablement pour déterminer la variation eustatique du niveau des mers). Cet effort a été initié en 1985 par la définition du réseau GLOSS (Global Sea Level Observing System) coordonné par la Commission Océanographique

Internationale (COI) de l'UNESCO, mais le fonctionnement satisfaisant de tous ses éléments est encore loin d'être assuré (voir figure 8.2).

En dehors de l'intérêt des modèles climatiques, qui se placent largement dans le cadre du programme Global Change, l'impact direct sur le littoral d'une montée du niveau moyen des mers est une préoccupation évidente pour l'environnement. Parmi les effets attendus nous citerons d'abord l'érosion plus importante des côtes et la subsidence des terres basses. Un exemple de cette modification du littoral est présentée dans l'étude de OE. Frihy [6] sur le delta du Nil où il a calculé un recul du trait de côte de 1,7 km, 1,9 km et 1,4 km dans les régions respectives suivantes: la partie ouest d'Abu Quir Bay, la région du lac Manzala et la partie ouest de la baie Tineh. Une autre conséquence prévisible de cette montée est la pénétration de l'onde de marée plus en amont dans les cours d'eau, et la contamination des nappes phréatiques d'eau douce par des apports d'eau salée plus importants. Les nouvelles contraintes hydrologiques et sédimentaires qui se mettent en place lentement, s'accompagneront certainement d'une nouvelle distribution de l'espace et de sa couverture végétale. Enfin nous soulignerons que le niveau moyen de la mer étant plus élevé, l'occurrence des tempêtes catastrophiques sera d'autant plus importante.

La détermination de cet accroissement est réalisable à partir des données de marégraphie côtière, dont certaines remontent à plus d'un siècle. Cependant nous constatons que les tendances calculées à partir de ces mesures varient beaucoup d'un marégraphe à l'autre (voir tableau 8.2). L'explication se trouve dans la nature même de la mesure d'un marégraphe. En effet, quel que soit le principe de mesure du marégraphe côtier (à flotteur, à pression, à ultrasons, ou autres), ce dernier est posé sur un support inévitablement soumis à ses propres variations, en particulier celles de la croûte terrestre: les mouvements tectoniques, le rebond postglaciaire, les marées terrestres, la surcharge océanique etc... mais aussi les variations artificielles comme la subsidence d'un quai, ou encore le pompage de pétrole ou des nappes phréatiques (voir tableau 8.3). Tout mouvement vertical au niveau du marégraphe doit être estimé afin de corriger ses données brutes et obtenir ainsi le niveau d'eau et ses variations absolues provoquées par un réchauffement général de la Terre.

PHENOMENE	AMPLITUDE	ÉCHELLE SPATIALE	ÉCHELLE TEMPORELLE
Marées terrestres	≈ 30 cm	globale	effet périodique (12-24 h, mois...)
Surcharge océanique	≤ quelques cm	côtes	effet périodique (12-24 h, mois...)
Rebond post-glaciaire	≤ +2 cm	régionale (Canada, Scandinavie)	liée au dernier cycle glaciaire (≈ -18000 ans)
Surcharge atmosphérique	≤ +2 cm	locale, régionale	variable
Néotectonique (jeux de failles, plissements)	≤ cm/an	locale, régionale et globale	millions d'années
Tremblements de terre	jusqu'à quelques m.	locale, régionale	effet bref
Volcanisme	≤ quelques décam.	locale	variable
Sédimentation	< cm/an	à l'échelle du bassin	milliers d'années
Variations des nappes phréatiques	jusqu'à plusieurs cm/an	locale	variable
Subsidences dues aux pompages (gaz, pétrole...)	jusqu'à plusieurs cm/an	locale	variable
Ouvrages (supports des marégraphes)	jusqu'à plusieurs cm/an	locale	variable

tableau 8.3 : mouvements verticaux à la surface terrestre

Les techniques de géodésie ont déjà contribué depuis longtemps à résoudre ce problème en rattachant les repères des marégraphes. En effet, la référence des mesures du niveau d'eau d'un marégraphe est généralement matérialisée par des repères physiques proches et accessibles. Ces derniers sont utiles, d'une part pour retrouver cette référence lorsque l'instrument a été détruit, déplacé ou remplacé, et d'autre part pour contrôler la stabilité locale du support par l'intermédiaire de leur rattachement périodique au réseau de nivellement. L'analyse des dénivelées obtenues successivement par différentes campagnes de géodésie classique permet de détecter des mouvements verticaux relatifs

entre repères. De plus, le réseau de nivellement a aussi servi à comparer les niveaux moyens fournis par différents marégraphes. Par exemple en France, le niveau moyen de la Manche est à l'altitude + 43 cm dans le système IGN69, et celui de l'Atlantique est à + 33 cm dans ce même système d'altitudes. Le niveau zéro de l'IGN69 correspond à la moyenne, entre le 1er février 1885 et le 1er janvier 1897, des mesures du marégraphe totalisateur de Marseille. Mais la différence entre les niveaux marins, déduite du rattachement de marégraphes à un réseau de nivellement tel que l'IGN69, ne doit pas être interprétée trop hâtivement. En effet, l'exactitude du nivellement de précision se dégrade sensiblement sur de grandes distances : une erreur systématique résiduelle de dix micromètres sur une mesure élémentaire de dénivelée entraînerait un biais décimétrique sur une distance de 1000 kilomètres.

Les techniques spatiales de positionnement précis apportent un outil désormais indispensable pour résoudre ce problème d'une façon satisfaisante en terme d'exactitude et d'opérabilité. Ces techniques sont fondées sur des principes de mesure différents, mais présentent certaines caractéristiques communes : intervisibilité des points sur des grandes distances de milliers de kilomètres, positionnement tridimensionnel dans un système de référence mondial lié à la Terre, et propagation d'ondes électromagnétiques à travers l'atmosphère. Parmi ces techniques modernes on trouve :

- le VLBI (Very Long Baseline Interferometry), qui repose sur l'observation simultanée, par au moins deux radio-télescopes, de radiosources extragalactiques,
- le SLR (Satellite Laser Ranging), qui mesure le temps de propagation aller-retour d'un tir laser sur les réflecteurs d'un satellite (cette technique est appelée LLR lorsque l'objet visé est la Lune),
- le GPS (Global Positioning System), qui est un système américain de positionnement radioélectrique descendant, dont le segment spatial est nominalement prévu par une constellation de 24 satellites,
- enfin, le système français DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés par Satellite), système Doppler ascendant qui s'appuie sur un réseau de stations de poursuite terrestre de couverture mondiale bien uniforme.

Leur exactitude en terme de positionnement est remarquable (voir tableau 8.4) et évolue encore comme le prouvent les récents résultats de DORIS [Willis, Bertiger 94].

Technique	Exactitude (cm)	Durée d'observation (jours)
GPS mode navigation avec accès sélectif	10 000	0,1
GPS mode navigation	2 000	0,1
Transit opérationnel	200	15
GPS précis	100	8
Transit précis	80	8
DORIS éclair	20	1
SLR 2ème génération	20	90
VLBI S/X M2	5	10
SLR 3ème génération	3	60
DORIS précis	3	30
GPS ultra-précis	1	4
VLBI S/X M3	0,7	3

tableau 8.4 : Localisation absolue

L'apport des techniques spatiales se situe sur deux plans : la détermination ponctuelle des vitesses verticales, et leur contribution à la réalisation d'un système global de référence terrestre géocentrique précis, comme celui qui est adopté et recommandé par l'IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) depuis 1991 : l'ITRS (IERS Terrestrial Reference System), réalisé par l'IERS (International Earth Rotation Service). (voir figure 8.3). En rattachant les

repères des marégraphes à cette référence par les techniques les plus légères, telles que : GPS, DORIS, ou autres, nous pourrions, d'une part distinguer dans le signal marégraphique les mouvements de la croûte terrestre des variations du niveau moyen de la mer, et d'autre part comparer les résultats entre les différents marégraphes, ou encore, entre la marégraphie côtière et l'altimétrie radar sur satellite puisqu'ils seront alors exprimés dans le même système de référence.

Enfin, les surfaces topographiques globales des océans obtenues par les missions de satellites équipées d'un altimètre radar (GEOS-3, SEASAT, GEOSAT, ERS-1, et le projet franco-américain TOPEX/POSEIDON) représentent désormais une nouvelle source de données. Le niveau de la mer fourni par cette technique provient de la mesure du temps de propagation d'un signal radar qui émet vers le nadir et qui se réfléchit à la surface de la mer sur une superficie de 5 à 10 km de diamètre. Cette mesure "brute" est ensuite convertie en distance, en tenant compte des conditions de propagation de l'onde à travers les différentes couches de l'atmosphère, et la connaissance de l'orbite du satellite permet de déduire la surface topographique marine dans un système de référence géométrique. L'altimétrie radar par satellite est devenue un outil précieux pour les océanographes et les climatologues. L'analyse de ses données montre la dilatation saisonnière de la surface océanique : entre mars et septembre l'océan se réchauffe et se dilate, et entre octobre et mars il se refroidit et se contracte. De plus, le phénomène est asymétrique puisque la variation d'amplitude est plus faible dans l'hémisphère Sud (5 cm) que dans l'hémisphère Nord (15 centimètres).

La géodésie joue là aussi un rôle essentiel en fournissant une référence géométrique précise et stable, dans laquelle sont calculées les orbites des satellites océanographiques. La comparaison de ces orbites issues de calculs indépendants, utilisant des approches et des données de poursuite différentes (DORIS, SLR et GPS), indique qu'une exactitude de 2 à 3 centimètres sur la composante radiale est atteinte pour le satellite TOPEX/POSEIDON. Par ailleurs, si l'orbite est exprimée dans le même système de référence que les coordonnées de marégraphes de qualité, une calibration de l'altimètre radar est alors possible pour déterminer le biais et une éventuelle dérive de l'instrument à bord du satellite. De plus, l'étude de la variabilité interannuelle du niveau moyen de la mer nécessite le raccord des missions de ce type puisque la durée de vie de ces satellites est limitée (5 à 7 ans prévus pour TOPEX/POSEIDON); ceci est encore une fois possible via le maintien d'un système de référence stable et précis.

Bibliographie

[Bonnetain 87] P. Bonnetain : *Instruction à l'usage des techniciens du département du nivellement, Instruction technique interne à l'IGN, IT/G n° 100, mars 1987.*

[Carter et al] WE. Carter, DG. Aubrey, T. Baker, C. Boucher, C. Le Provost, D. Pugh, WR. Peltier, M. Zumberge, RH. Rapp, RE. Schultz, KO. Emery et DB. Enfield : *Geodetic fixing of tide gauge bench marks*, Technical report WHOI-89-31 (CRC-89-5), Woods Hole Oceanographic Institution, August 1989.

[Boucher, Altamimi] C. Boucher et Z. Altamimi : *Development of a Conventional Terrestrial Reference Frame*, Geodynamics series : "Contributions of space geodesy to geodynamics : earth dynamics", vol. 24, DE. Smith and DL. Turcotte editors, pp. 89-97, 1993.

[Boucher, Wöppelmann] C. Boucher et G. Wöppelmann : *Combinaison de la marégraphie et de la géodésie pour l'estimation à long terme du niveau des mers*, Poster présenté au séminaire de travail "Élévation du niveau de la mer", Paris (F), 6-7 décembre 1994.

[Emery, Aubrey] KO. Emery et DG. Aubrey : *Sea levels, land levels and tide gauges*, Springer Verlag, 1991.

[Frihy] OE. Frihy : *Beach response to sea level rise along the Nile delta coast of Egypt*, Geophysical Monograph 69, IUGG volume 11 : "Sea level changes : determination and effects", J.P.L. Woodworth et al editors, pp. 81-85, 1992.

[Godfrey, Love] JS. Godfrey et G. Love : *Assessment of sealevel rise, specific to the South Asian and Australian situations*, Geophysical Monograph 69, IUGG volume 11 : "Sea level changes : determination and effects", JPL Woodworth et al, pp. 87-94, 1992.

[Le Provost 91] C. Le Provost : *Le niveau de la mer, un index fondamental pour l'océanographie et la climatologie*, La Météorologie n° 40, pp. 3-12, 1991.

[Peltier, Tushingham 91] WR. Peltier et AM. Tushingham : *Influence of glacial isostatic adjustment on tide gauge measurements of secular sea level change*. Journal of Geophysical Research, vol. 96, n° B4, pp. 6779-6796, 1991.

[Pirazzoli 86] PA. Pirazzoli : *Secular trends of relative sea level (RSL) changes indicated by tide gauge records*, Journal of Coastal Research, spec. issue 1, pp. 1-26, 1986.

[Willis, Boucher 88] P. Willis et C. Boucher : *Rattachement de marégraphes au système géodésique mondial BTS par les systèmes GPS et DORIS*, Présentation aux "Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels" (notice interne IGN/SGN : n° 27.486), Paris (F), juin 1988. Recent results for point positioning and orbit determination. Institute of Navigation, National Technical Meeting, Navigating the Earth and Beyond, San Diego (USA), janvier 1994.

(Source des données: le Permanent Service for Mean Sea Level, UK)

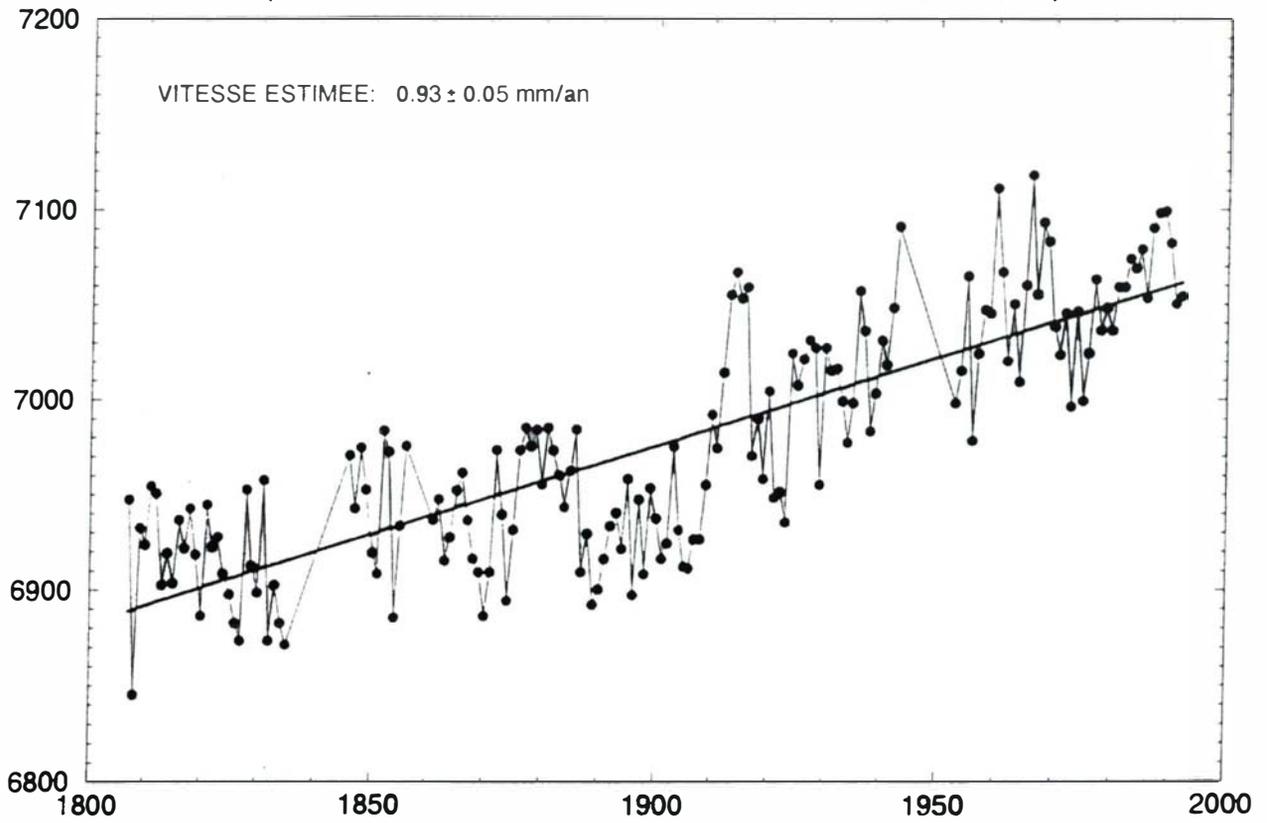


figure 8.1 : marégraphe de Brest : moyenne annuelles

(note: le PSMSL est chargé de la collecte des données moyennes)

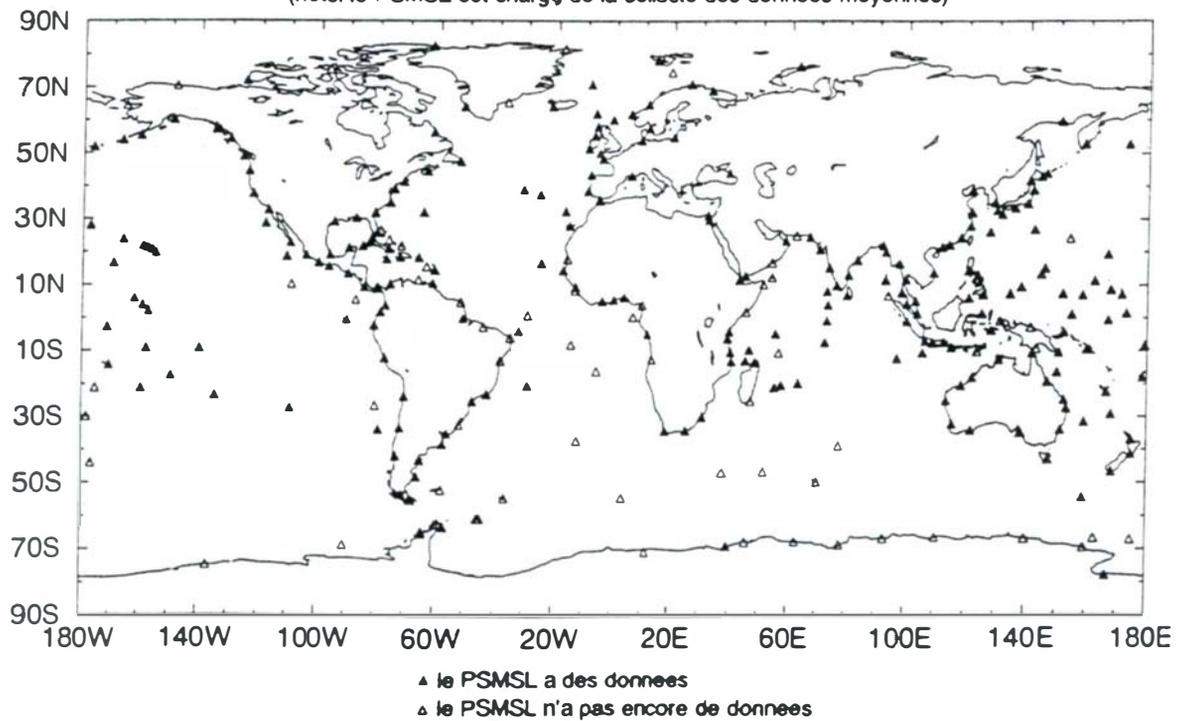


figure 8.2 : réseau de marégraphes GLOSS

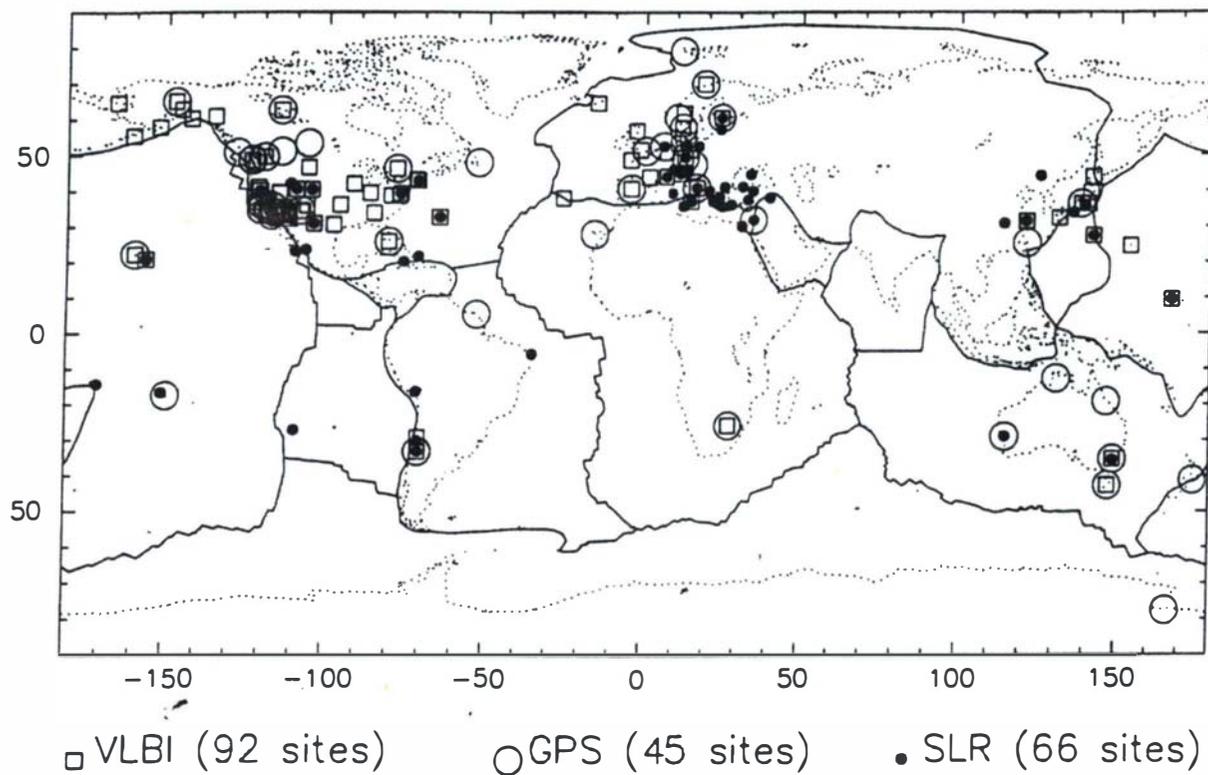


figure 8.3 : répartition des 152 sites de l'ITRF92

9. La mesure des mouvements du sol par méthodes géodésiques

Michel KASSER
Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes
8 allée Jean Rostand
F-91025 EVRY CEDEX

Introduction

Les mesures de déformations du sol sont devenues de plus en plus courantes dans les dernières décennies du fait des précisions autorisées par les techniques de topométrie et de photogrammétrie, liées aux extraordinaires progrès techniques que ces méthodes ont connus. Les cas d'emploi sont multiples, et nous pouvons recenser en particulier les glissements de terrain, les mouvements liés aux séismes (précurseurs ou encore réajustements post-sismiques), les mouvements liés aux extractions ou aux variations de contraintes dans le sous-sol (volcans, exploitations minières ou pétrolières) etc... L'objet de cet article est de procéder à un bilan des méthodes actuellement utilisables et aussi à un bilan des problèmes qui restent à résoudre pour satisfaire les ingénieurs (géotechniciens par exemple) et les scientifiques (géologues, sismologues, volcanologues, tectoniciens etc...).

Les besoins actuels en mesure de déformations

Nous pouvons les classer, assez arbitrairement à vrai dire, en deux groupes : les besoins scientifiques purs (comprendre un phénomène) et les besoins opérationnels, liés à une appréhension d'un risque naturel (surveillance d'un volcan par exemple) ou simplement à l'optimisation d'une exploitation de ressources géologiques (cet aspect est encore très peu développé). Il est certain que les liens entre ces deux groupes sont nombreux, bien que pas toujours désirés (le chercheur n'est guère armé - et perd sa sérénité face à des contraintes liées à un risque naturel majeur), et que les mélanges de genres ne sont pas toujours très heureux.

Par exemple. Lors de la crise volcanique de 1976 à la Soufrière de Guadeloupe, les divergences d'interprétation entre les scientifiques présents se sont transformées en conflits personnels, la presse servant de témoin. Les interprétations les plus alarmistes ont été montées en épingle par celle-ci, créant la terreur au sein des populations locales et rendant finalement son évacuation obligatoire, puisque des pillages commençaient à avoir lieu. Pourtant le risque était bien mince et on pouvait déjà bien l'établir à cette époque ; bilan : une évacuation de la moitié de l'île pour rien.

Néanmoins nous adopterons cette première approche.

Besoins scientifiques

Par exemple la volcanologie. L'évolution physico-chimique des matériaux contenus dans un volume confiné appelé "chambre magmatique" et alimenté périodiquement en matériaux fondus, conduit à une cristallisation partielle de ceux-ci au fur et à mesure du refroidissement. Les gaz dissous sont expulsés de la maille cristalline de ces matériaux nouvellement formés, avec pour résultat une augmentation progressive de la pression gazeuse, qui à son tour induit des déformations en surface. Il y a ainsi un réel espoir qu'une mesure systématique et très précise de ces déformations de surface permette un jour de prévoir l'approche des éruptions (qui se produisent alors quand la pression dans la chambre

dépasse la pression lithostatique). Aujourd'hui on considère volontiers que c'est la méthodologie la plus prometteuse après la sismologie pour arriver à ce but. En tout cas on espère pouvoir en déduire la profondeur de cette chambre ainsi que le comportement mécanique des roches formant l'édifice volcanique.

Ensuite pour les glissements de terrain, il faut parvenir à localiser la profondeur de la surface de glissement, à comprendre la cinétique de l'ensemble. Pour ce faire, nous avons actuellement un grand nombre de solutions, soit d'usage courant en topométrie (observation des positions d'un certain nombre de repères, et suivi de leur évolution temporelle), soit dérivées de celles-ci (pour obtenir des mesures en continu), ou encore méthodes un peu futuristes et pas tout à fait au point, mais prometteuses (interférométrie radar - utilisant un radar spatial -, ou étude d'images spatiales SPOT et corrélation automatique sur un grand nombre de pixels). Une fois obtenue une carte des vitesses des repères, cela permet d'essayer de comprendre le fonctionnement mécanique de l'ensemble, et d'anticiper si possible un mouvement d'ensemble catastrophique.

En sismologie, on est toujours à la recherche d'une compréhension complète du phénomène d'accumulation de contraintes, de propagation d'une fracture, de constante de temps pour les comportements tantôt élastiques et tantôt plastiques des roches selon leur température, leur profondeur et la constante de temps du phénomène concerné. Une analyse des déformations de surface permet de retrouver les variations de contraintes dans le sous-sol; c'est donc un élément capital pour progresser dans cette direction. Malheureusement, l'outil idéal n'existe pas : celui-ci mesurerait de manière automatique, continue, très précise, et sur un très grand nombre de points. On l'approche par différents moyens, comme pour l'étude des glissements de terrain.

Besoins opérationnels

Ils sont toujours liés à la surveillance des risques naturels d'origine géologique. Nous l'avons vu pour la volcanologie, l'étude des glissements de terrain, mais c'est encore le cas pour participer à la prévision des séismes, objectif ambitieux dont nous sommes encore bien loin semble-t-il. Mais ce besoin passe toujours par une analyse scientifique très approfondie du phénomène étudié, qui comporte un nombre tellement élevé de paramètres significatifs que les conditions de recherche sont encore aujourd'hui très imparfaites. Nous sommes finalement toujours à l'affût d'une solution permettant de décorrélérer ces variables les unes des autres. Les méthodes géodésiques sont appelées à fournir une grande précision de mesure (qui doit alors se compter en millimètres le plus souvent) et permettre un fonctionnement quasi continu de manière automatique. Comme nous le verrons plus loin, ces méthodes ne sont pas nombreuses et ont encore un besoin significatif de développement pour atteindre les buts énoncés ci-dessus.

Les méthodes employées en mesure de déformations

Les méthodes de topométrie terrestre de haute précision

Il s'agit des mesures d'angles, mesures de distances, nivellement de précision etc... que l'on emploie couramment en topométrie. Ces mesures sont parfois réadaptées avec des processus qui sont de plus en plus automatisables (théodolites motorisés télécommandés, nivellement automatique etc...) afin de permettre dans certains cas des mesures en quasi-continu. Fruits de plusieurs siècles d'évolutions méthodologiques et de luttes contre les effets indésirables de la réfraction atmosphérique, elles ont séparé mesures altimétriques (nivellement) et planimétriques (triangulation) en deux sous-classes presque totalement disjointes. Ainsi le nivellement direct est-il extrêmement précis (jusqu'à 0,1 mm d'erreur sur une dénivelée entre deux points distants d'un kilomètre) mais aussi très lent et onéreux (et sa précision en fait malgré tout un outil privilégié pour détecter de tous petits mouvements). Par opposition, triangulation et mesures de distances sont bien plus rapides. Ils suivent des modèles d'erreurs en $a + b \cdot D$, erreur d'écart-type fixe a composée avec une erreur d'écart-type proportionnelle à la distance D . Pour les mesures d'angles, a est très petit (jusqu'à 0,02 mm, limité uniquement par le procédé de centrage du théodolite) alors que b , limité par l'atmosphère très turbulente au ras du sol, peut difficilement être meilleur que 2 à 5 mm/km. A l'inverse, pour les mesures électroniques de distances a vaut généralement de 1 à 5 mm (il peut descendre à 0,2 mm pour quelques instruments très onéreux), alors que, limité par une mauvaise connaissance de l'indice de l'air, b peut tout de même être inférieur à 1 mm/km.

Depuis quelques années, les industriels ont su mettre sur le marché des ensembles [théodolite + appareil de mesure de distance] motorisés (commandables par un ordinateur), dont le pointé est suffisamment précis pour permettre

de mesurer de manière automatique les positions d'un nombre aussi élevé que nécessaire de réflecteurs (suivi quasi-continu de mouvements de terrain, pour autant que la visibilité le permette).

A l'emploi de réseaux spécialisés, il convient d'ajouter la réobservation des réseaux nationaux lorsque ceux-ci sont disponibles : on dispose alors d'une base de mesure généralement moins précise, mais s'étendant sur des durées très longues. C'est ainsi que la simple comparaison des mesures obtenues sur des réseaux nationaux de nivellement lors de leurs réfections successives (de trente à cinquante ans entre chaque réobservation) permet de quantifier les mouvements sur de nombreuses failles, parfois même inconnues.

Les méthodes photogrammétriques

Là encore on voit combien la disponibilité de photographies aériennes métriques anciennes (depuis 1950) peut permettre de connaître les mouvements passés sur une zone au comportement subitement alarmant (cf. travaux de l'IGN sur le glissement de terrain de Saint-Etienne de Tinée).

Les méthodes de géodésie spatiale

Le GPS représente un moyen de positionnement dont la conception date des années 1970, et réellement opérationnel (industrialisation des récepteurs, nombre de satellites en service...) depuis la fin des années 1980. Le principe est le suivant :

- un ensemble d'une vingtaine de satellites (Navstar, lancés par l'armée américaine) orbite vers 20 000 km d'altitude. Ceux-ci émettent en permanence des signaux radioélectriques, à des fréquences de l'ordre de 1,2 et 1,5 Ghz pour lesquels chaque bit d'information est émis à une date extrêmement bien connue. Ces bits par ailleurs décrivent la position du satellite concerné,

- au niveau du sol on emploie un récepteur, dont le travail consiste à observer avec précision la date de réception de ces mêmes bits, et à décoder ceux-ci. Le fonctionnement général du système est le suivant : les satellites sont tous recalés sur la même échelle de temps, par contre le récepteur ne dispose pas au départ d'une heure précise. Il y a donc quatre paramètres inconnus au niveau du récepteur : ses coordonnées x, y et z, ainsi que son décalage temporel avec l'échelle de temps des satellites t. On observe donc simultanément au moins quatre satellites, ce qui permet de calculer sa position connaissant celle des satellites. Ce type de fonctionnement, compte-tenu des différentes limites physiques du système, peut donner en temps réel une précision de l'ordre de la dizaine de mètres en absolu, ce qui est sans doute primordial pour les applications militaires, mais peu utile en topographie. C'est donc une application dérivée qui a été mise sur pied, en utilisant ce système en mode différentiel : si deux récepteurs (ou plus) reçoivent les mêmes satellites au même moment et s'ils sont capables de faire les mesures de manière continue (par un asservissement sur la phase même du signal émis) pendant de longues durées (par exemple une heure), le vecteur joignant les deux antennes peut être calculé avec une précision qui peut être de l'ordre du centimètre. Les sources d'erreurs résiduelles sont les suivantes :

- *Connaissance de la position des satellites* : cette position est nécessairement imprécise au niveau de quelques mètres, mais l'observation différentielle élimine la plus grosse partie de cette erreur. Lorsqu'on recherche la précision maximale, on est amené à stationner avec des récepteurs un jeu de points connus avec une bonne précision dans un référentiel mondial (eux-mêmes obtenus par d'autres méthodes spatiales - radioastronomiques ou mesures de distances Terre/satellites avec un télémètre laser très puissant -). On recalcule alors a posteriori la position exacte des satellites. Depuis 1992, un service international (IGS, pour International GPS Service) fournit de telles orbites à des fins scientifiques.

- *Connaissance de l'indice de réfraction des derniers kilomètres de l'atmosphère* : cette erreur que nous savons analyser (la vapeur d'eau en est un facteur prépondérant) s'élimine en partie lorsque les deux récepteurs sont à la même altitude et dans des conditions climatiques proches, car l'observation différentielle soustrait l'un de l'autre deux facteurs mal connus mais presque égaux, ce qui n'est plus le cas si les altitudes des antennes sont très différentes (montagne). Toutefois on note que la détermination de la coordonnée Z (altitude ellipsoïdique) est toujours moins bonne que celle de X et de Y.

- *Connaissance du contenu électronique de l'ionosphère* : pour les ondes radio, l'ionosphère est une couche très perturbatrice, le signal qui se propage y est ralenti en fonction de la teneur locale en charges libres (qui varie parfois très rapidement avec le flux de particules venant du Soleil et de l'espace) et de la fréquence du signal. Lorsqu'on recherche la précision maximale, en recevant les deux fréquences émises et en comparant les temps de propagation sur ces deux

canaux, on sait éliminer l'essentiel de cet effet. Mais ceci exige des récepteurs dits "bifréquence" et bien plus onéreux que les appareils "monofréquence" devenus très courants.

On remarque donc que le matériel employé, la nature des opérations de mesure ainsi que le type de calcul effectué sont essentiels pour la précision des résultats. Aujourd'hui on mesure des réseaux de quelques kilomètres à un centimètre près avec des appareils monofréquence et des logiciels fournis par les fabricants de matériel sans trop de difficultés, alors qu'en mettant en oeuvre les méthodes les plus raffinées (recalcul d'orbite, mesures bifréquences, observations longues etc...), des chercheurs ont su mesurer plusieurs centaines de kilomètres, voire bien plus, avec une erreur centimétrique.

Le GPS est maintenant une méthodologie essentielle dans la profession de géomètre, mais doit être employé avec discernement et ne pourra pas remplacer toutes les méthodes terrestres classiques, bien plus précises lorsque le besoin se fait sentir et plus rapides dans beaucoup de cas, sauf pour certains types de travaux bien identifiés (établissement de réseaux géodésiques par exemple). Il n'exige pas l'intervisibilité entre stations, mais nécessite l'absence d'obstacles autour et au dessus de la station (arbres, lignes électriques, immeubles...). Par contre l'altimétrie qu'il fournit est assez peu précise et surtout, n'étant pas référencée sur le géoïde, elle est peu utile pour le nivellement de précision. En surveillance de déformations, les données recueillies dans chaque récepteur doivent être acheminées en point commun afin d'être traitées : cela implique une télétransmission de données vers un site équipé en moyens de calcul, ce qui finalement n'est pas très facile à faire en bien des cas. On perd ainsi une partie de l'intérêt du procédé qui réside dans la non-nécessité d'intervisibilité. Par ailleurs le matériel nécessaire sur chaque station est d'un coût élevé, de sorte que l'on ne peut guère envisager de surveiller continuellement un grand nombre de points par cette méthode (contrairement par exemple à des mesures de distances avec un théodolite motorisé). Cela explique pourquoi le GPS est surtout employé pour des observations ponctuelles de réseaux, plutôt que pour des mesures de surveillance opérationnelle.

Très récemment, la France a été à l'origine d'un nouveau système spatial original et dont l'utilisation en surveillance pourrait devenir importante, baptisé DORIS. Une cinquantaine de points répartis aussi uniformément que possible à la surface du globe ont été équipés de balises émettant sur deux fréquences extrêmement stables (400 Mhz et 2 Ghz). Certaines stations sont communes avec des stations de télémétrie laser satellites ou des stations VLBI et ont ainsi des coordonnées absolues très précises. A bord d'un satellite est embarqué un récepteur, qui mesure pour chaque balise émettrice, l'effet doppler sous lequel le signal est reçu (les premiers satellites équipés ont été SPOT-2, puis TOPEX-POSEIDON et SPOT-3). Après les calculs effectués par le CNES, on en déduit l'orbite du satellite porteur avec une excellente précision (10 cm), et en sous-produit, on peut améliorer considérablement notre connaissance du champ de pesanteur terrestre. Second sous-produit appréciable, un positionnement absolu des balises à mieux que 6 cm près, ou en relatif avec de 1 à 3 cm d'erreur. Mais nous avons avec DORIS cette spécificité que les mesures sont automatiquement centralisées et rediffusées depuis le CNES-Toulouse vers l'utilisateur qui reçoit ainsi directement à son bureau les coordonnées de sa balise qui est éventuellement de l'autre côté de la Terre. On peut donc penser que les capacités de centralisation des mesures DORIS seront mises à profit tout particulièrement pour suivre les mouvements de terrain dans des zones à risque, et des expériences-pilotes en ce sens sont en cours.

Des méthodes locales continues

Pour instrumenter rapidement une zone sujette à des déformations intenses, on peut aussi envisager des mesures géométriques très locales mais extrêmement précises, et permettant des suivis en continu des paramètres étudiés. Les solutions techniques disponibles sont essentiellement l'extensométrie (qui peut aussi être exploitée en fissurométrie pour suivre les rejeux d'une fracture bien identifiée) et l'inclinométrie :

- *l'extensomètre* emploie un capteur capable de mesurer des variations de longueur sur une base très courte (quelques centimètres le plus souvent) avec une précision extrême (on sait mesurer localement jusqu'au nm - 10⁻⁹ m - voire mieux). On peut évidemment voir ainsi toute variation de contraintes dans le milieu, mais on ne sait pas bien se débarrasser de nombreux signaux parasites, soit d'origine bien modélisable (marée terrestre), soit d'origine météorologique (effets thermiques, niveau de l'eau dans les nappes phréatiques etc...), qui se superposent aux signaux utiles à un niveau très élevé (rendant inutile toute recherche de précision dans la mesure). De plus, il est difficile de garantir que des mouvements lents, observés à long terme, ne sont pas de simples artefacts d'installation du capteur. Ces quelques remarques montrent que les données ainsi obtenues sont plus qualitatives que quantitatives, que toutes les fréquences temporelles ne sont pas auscultées avec le même niveau de signification, et finalement qu'une connaissance approfondie du capteur sur le site est nécessaire pour pouvoir interpréter tout mouvement apparent,

- l'inclinomètre est conçu pour fournir la variation de sa position angulaire par rapport à la verticale locale avec toute la précision voulue (on sait mesurer au nanoradian près si besoin est), mais les remarques faites précédemment s'appliquent aussi intégralement, de sorte que la plus grande prudence est de mise lorsqu'il s'agit d'interpréter de petits mouvements, d'ampleur proche du bruit de fond local.

Ces mesures locales sont donc délicates d'emploi, mais elles permettent un suivi continu et donnent de précieuses informations en périodes de crises, par exemple pour comprendre la cinétique détaillée d'une montée de magma (cf. figure 9.1) ou pour apprécier les corrélations entre un mouvement de terrain et un paramètre externe.

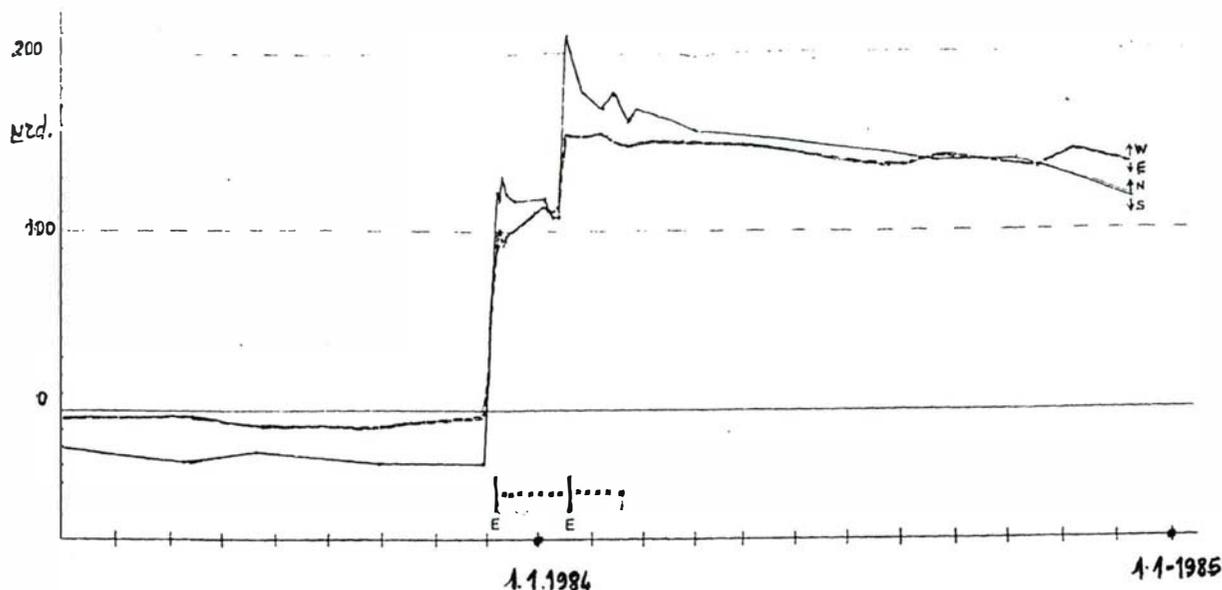


figure 9.1 : mesures inclinométriques obtenues en 1983-1985 sur le piton de la Fournaise, volcan de l'île de La Réunion. Les deux courbes représentent les enregistrements des deux composantes (N-S et E-O), en E démarrage d'une éruption : l'injection de magma dans les fissures suivie de son refroidissement lent est clairement visible. Unité de temps = 1 mois

Une méthode nouvelle pour bientôt

L'aérotrilatération, mesures de distances avec un télémètre laser impulsionnel à champ large depuis un avion survolant des rétroreflecteurs (procédé IGN en cours de développement). Nous avons étudié les moyens techniques permettant une cartographie des mouvements verticaux de surface dans des conditions plus appropriées que le nivellement de précision, avec les contraintes suivantes :

- mesure permettant de traiter une surface et non pas un simple cheminement linéaire,
- mesure rapide (un jour, par exemple) parce que de nombreuses actions ayant des effets de surface contradictoires se passent avec une échelle de temps courte (pompages pétroliers et injection d'eau, par exemple),
- mesure extrêmement précise (écart-type inférieur au millimètre).

Ces considérations nous ont amené à mettre au point une méthode aéroportée originale (Cf. figure 9.2) comportant :

- un ensemble de réflecteurs laser de type coin-de-cube tournés vers le ciel et fixés sur des points du sol dont le mouvement soit représentatif de l'environnement du point (ancrage profond),
- dans l'avion, un dispositif permettant d'émettre une impulsion laser puissante en faisceau divergent vers le sol, et permettant de détecter le train d'échos laser en provenance des différents réflecteurs illuminés par l'impulsion de départ. De cette manière, pour chaque tir laser on obtient une série de distances simultanées sur plusieurs cibles,
- dans l'avion également, un récepteur GPS permettant de donner une position approchée de l'avion au

moment du tir, ceci afin d'identifier de quelles cibles viennent les échos mesurés (on connaît en effet la position approximative des cibles).

A la fin du vol, un calcul global permettra, pour chaque tir laser, et connaissant les positions approchées des réflecteurs sol et de l'avion (mesures GPS), d'attribuer avec certitude la plupart des échos mesurés aux réflecteurs qui leur ont donné naissance (les autres échos étant éliminés), puis par une inversion globale de toutes les mesures, de calculer les positions relatives des réflecteurs, avec une très bonne précision altimétrique (mieux que 1 mm sur un chantier de 10 km x 10 km avec un point tous les km). Destiné initialement à des suivis d'exploitation pétrolière, il pourra évidemment aussi servir à l'auscultation aérienne de tout champ susceptible de se déformer, avec des performances de précision égales aux meilleures méthodes de nivellement, et d'une rapidité sans équivalent (moins d'une demi-heure de mesures).

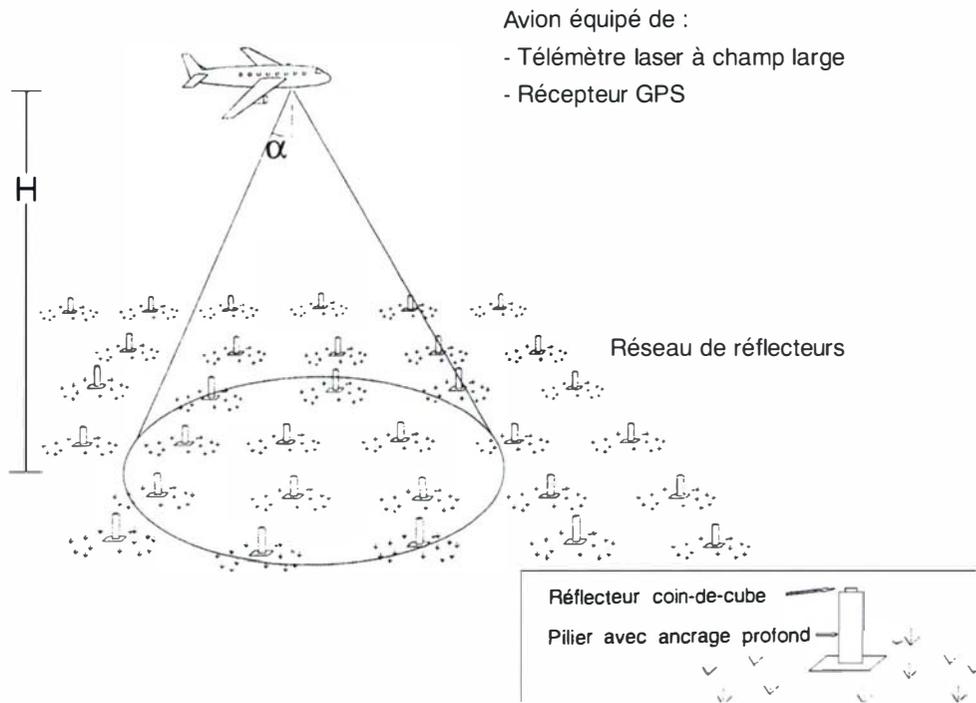


figure 9.2 : schéma synoptique du procédé de télémétrie laser aéroporté;
H : altitude de vol de l'avion; *a* : demi-angle du cône du faisceau laser

Ce dispositif a fait l'objet de nombreuses études soutenues par Elf-Aquitaine (F), et un prototype est en cours d'élaboration à l'IGN.

Ce qui manque à la panoplie actuelle

La précision

... dans beaucoup de cas, car les mouvements à détecter sont très petits la plupart du temps. Certains des procédés évoqués successivement peuvent fournir une précision limite acceptable à long terme, mais ils sont généralement trop lents et chers pour que leur diffusion soit assurée dans de bonnes conditions économiques.

La mesure en continu

... à des échelles de temps pouvant varier rapidement en cas d'événement. Le stockage et la transmission des données reste encore un problème mal résolu. Par exemple, pour des données à flux très réduit (quelques dizaines d'octets par jour), des méthodes utilisant la liaison ARGOS sont satisfaisants; mais dès que le débit augmente par rapport à ces flux, le réseau téléphonique commuté n'étant pas disponible en bien des régions surveillées, les transmissions

hertziennes deviennent inévitables, avec leurs innombrables servitudes (allocations de fréquences de plus en plus difficiles, énergie à fournir, coût du matériel, émetteur à installer nécessairement sur un point haut etc...). Un moyen de transmission spatiale à flux important (1200 bauds par exemple), faible coût (comme ARGOS par exemple) et non saturable (jusqu'à mille stations émettant simultanément) devrait être mis à l'étude pour permettre de dépasser les blocages actuels.

Une déontologie

... du scientifique lorsqu'il est confronté à des problèmes de surveillance, débouchant en cas de crise sur de réels problèmes politiques. Le scientifique dispose d'informations nécessairement très partielles (les mesures) sur un système physique très complexe. Sa perception du phénomène en cas d'imminence de catastrophe conserve donc des aspects subjectifs majeurs. Comment le politique doit-il réagir dans ce type de cas ? Il écoute le scientifique et prend des décisions ayant parfois de lourdes conséquences économiques. Si le scientifique communique ses sentiments et ses incertitudes directement à la presse, le politique perd toutes les possibilités d'action maîtrisée. De ce fait la relation scientifique-politique devient très dissymétrique, et dans certains cas elle a pu conduire à de véritables conflits, dommageables aux deux parties. Il est donc important qu'une déontologie du scientifique impliqué dans une surveillance de phénomène naturel à haut risque soit établie, permettant de s'y référer sans avoir à repenser toutes les obligations générales de chacun en période de risque.

Des optimisations économiques afin de diminuer autant que possible le coût de la surveillance

Il faut faire aussi précis pour moins cher, c'est donc un travail d'ingénieur, mais ce type d'ingénieur ayant une grande polyvalence technologique n'est à ce jour formé nulle part.

Conclusion

Il faut développer de nouveaux moyens de mesure, avec des améliorations dans plusieurs directions : mesurer vite, avec une grande précision, pour un prix très faible, et résoudre le problème de la télétransmission des données vers un site central. En ce qui concerne la précision, de bonnes mesures sont peu utiles si elles ne sont pas doublées d'un autocontrôle efficace fournissant une bonne estimation de la précision des résultats : les mesures géométriques sont à cet égard exemplaires puisqu'elles peuvent sans difficulté être mises en oeuvre dans des conditions telles que cette précision finale soit très bien connue, ce qui est essentiel pour pouvoir interpréter leur degré de signification. Mais, comme on l'aura noté, une telle approche technique ne sera pas suffisante pour faire évoluer les problèmes de mitigation de risques géologiques, pour lesquels une optimisation de l'attitude des différents partenaires politiques et scientifiques vis-à-vis les uns des autres reste à faire admettre comme essentielle.

Directeur de la Publication : Jacques Poulain
Rédacteur en Chef : Serge Motet

Imprimé à l'Institut Géographique National
© Bulletin d'Information de l'IGN

136 bis rue de Grenelle
F-75700 Paris 07 SP

Tél. 01 43 98 80 00

Imprimerie de l'Institut Géographique National

Dépot légal 1er trimestre 1997
N° d'édition : 176 - n° d'impression : 197

