

LES OUTILS TECHNIQUES DU CADASTRE

Les outils cartographiques

Michel Kasser

Ecole supérieure des géomètres
topographes (ESGT)

LES SYSTEMES DE REFERENCE

Surfaces de référence

La surface de la terre ne s'écarte que de quelques dizaines de kilomètres de celle d'une sphère : cette surface est elle aussi parfois appelée « topographie ». Il s'agit à proprement parler de l'interface entre la partie solide de l'écorce terrestre et l'atmosphère ou les océans. Mais si l'on cherche à décrire cette surface, on est amené à s'intéresser au champ de pesanteur terrestre : en effet, la seule grandeur accessible en tout point est la direction de la verticale, qui est donc une référence obligée.

Si l'on étudie le champ de pesanteur, champ en $1/r^2$ comme le champ électrique par exemple, on pourra définir des surfaces équipotentielles dont l'espacement sera susceptible de varier d'un endroit à l'autre. Lorsque ces surfaces se rapprochent, et comme pour le champ électrique, le champ de pesanteur augmente, ce qui se traduit par des valeurs de g plus importantes que lorsque ces surfaces s'éloignent (Une surface équipotentielle du champ de pesanteur n'a rien à voir avec une surface où g serait une constante). Une telle surface équipotentielle est partout perpendiculaire à la pesanteur, donc à la verticale locale, mais g n'y est pas uniforme. Si les océans n'étaient traversés d'aucun courant, s'ils étaient de densité constante, et s'ils étaient au repos, leurs surfaces décriraient des équipotentielles du champ de pesanteur. L'une de ces surfaces, proche en général du niveau moyen de la mer, a été prise pour origine des altitudes : on l'appelle **géoïde**.

Le géoïde est assez voisin d'un ellipsoïde de révolution, par rapport auquel il présente des irrégularités plus ou moins corrélées avec la topographie, n'excédant pas 100 mètres. Mais le géoïde est très mal connu et de toute façon n'est pas une surface simple, paramétrable par exemple avec quelques valeurs numériques. On recherche donc l'ellipsoïde qui est le plus proche du géoïde, et on privilégie cette nouvelle surface parce qu'elle se décrit mathématiquement par deux nombres seulement : le demi grand axe a et le demi petit axe b . On va donc repérer tout point par sa position sur l'ellipsoïde avec trois nombres (par exemple une longitude, une latitude et une hauteur). De très nombreux ellipsoïdes nationaux voire régionaux ont été établis par le passé, chacun approximant au mieux le géoïde sur sa zone de travail, et étant parfaitement confondu avec lui à son point fondamental (pour la France, l'ellipsoïde est dit de Clarke et date de 1880, le point fondamental étant au Panthéon). Un ellipsoïde international est désormais disponible, et il est vivement recommandé de l'utiliser préférentiellement ; il a été adopté en 1924.

LES OUTILS TECHNIQUES DU CADASTRE

Les outils cartographiques

Michel Kasser

Ecole supérieure des géomètres
topographes (ESGT)

LES SYSTEMES DE REFERENCE

Surfaces de référence

La surface de la terre ne s'écarte que de quelques dizaines de kilomètres de celle d'une sphère : cette surface est elle aussi parfois appelée « topographie ». Il s'agit à proprement parler de l'interface entre la partie solide de l'écorce terrestre et l'atmosphère ou les océans. Mais si l'on cherche à décrire cette surface, on est amené à s'intéresser au champ de pesanteur terrestre : en effet, la seule grandeur accessible en tout point est la direction de la verticale, qui est donc une référence obligée.

Si l'on étudie le champ de pesanteur, champ en $1/r^2$ comme le champ électrique par exemple, on pourra définir des surfaces équipotentielles dont l'espacement sera susceptible de varier d'un endroit à l'autre. Lorsque ces surfaces se rapprochent, et comme pour le champ électrique, le champ de pesanteur augmente, ce qui se traduit par des valeurs de g plus importantes que lorsque ces surfaces s'éloignent (Une surface équipotentielle du champ de pesanteur n'a rien à voir avec une surface où g serait une constante). Une telle surface équipotentielle est partout perpendiculaire à la pesanteur, donc à la verticale locale, mais g n'y est pas uniforme. Si les océans n'étaient traversés d'aucun courant, s'ils étaient de densité constante, et s'ils étaient au repos, leurs surfaces décriraient des équipotentielles du champ de pesanteur. L'une de ces surfaces, proche en général du niveau moyen de la mer, a été prise pour origine des altitudes : on l'appelle **géoïde**.

Le géoïde est assez voisin d'un ellipsoïde de révolution, par rapport auquel il présente des irrégularités plus ou moins corrélées avec la topographie, n'excédant pas 100 mètres. Mais le géoïde est très mal connu et de toute façon n'est pas une surface simple, paramétrable par exemple avec quelques valeurs numériques. On recherche donc l'ellipsoïde qui est le plus proche du géoïde, et on privilégie cette nouvelle surface parce qu'elle se décrit mathématiquement par deux nombres seulement : le demi grand axe **a** et le demi petit axe **b**. On va donc repérer tout point par sa position sur l'ellipsoïde avec trois nombres (par exemple une longitude, une latitude et une hauteur). De très nombreux ellipsoïdes nationaux voire régionaux ont été établis par le passé, chacun approximant au mieux le géoïde sur sa zone de travail, et étant parfaitement confondu avec lui à son point fondamental (pour la France, l'ellipsoïde est dit de Clarke et date de 1880, le point fondamental étant au Panthéon). Un ellipsoïde international est désormais disponible, et il est vivement recommandé de l'utiliser préférentiellement ; il a été adopté en 1924.

On rencontre fréquemment le cas de travaux anciens dans des systèmes de référence mal documentés, et sur lesquels des mises à jour locales sont nécessaires sans que l'on puisse tout remesurer : la technique GPS, aujourd'hui très répandue, fournit nominalement des résultats dans un référentiel (WGS 84) basé sur l'ellipsoïde international, il est souvent difficile de l'adapter au système local et c'est là une source considérable de problèmes dans l'établissement ou l'entretien de réseaux cadastraux.

Pour beaucoup d'opérations il faut en arriver à une représentation cartographique plane, permettant de travailler sur papier, et l'ellipsoïde n'est bien évidemment pas une surface développable. On va donc définir une dernière surface de référence, souvent cylindre ou cône (donc développable), et on définira une transformation amenant le point de l'ellipsoïde sur cette surface. Cette transformation est appelée représentation plane, et il s'agit fréquemment d'une simple projection, à tel point que le terme de projection désigne parfois, de manière générique et par abus de langage, toute représentation cartographique.

Systèmes de coordonnées

Pour décrire la position d'un point A à la surface de la terre, différents systèmes de coordonnées sont utilisés :

a : coordonnées géographiques

Longitude, latitude et altitude, avec deux variantes :

- Altitude ellipsoïdique : distance de A à l'ellipsoïde ;
- Altitude : différents systèmes existent, tenant plus ou moins compte du champ de pesanteur, et dont la surface de référence est le géoïde.

b : coordonnées rectangulaires planes

Employées sur le plan de représentation plane, l'axe des Y est dans la direction du Nord pour au moins un méridien donné (attention, il y a bien des systèmes dans lesquels dès que l'on quitte le méridien central, l'axe des Y s'écarte de la direction Nord-Sud : les méridiens sont généralement convergents dans la projection adoptée), et l'axe des X lui est perpendiculaire : X est croissant vers l'Est et Y vers le Nord.

c : coordonnées cartésiennes tridimensionnelles

Elles sont fréquemment employées comme intermédiaire de calcul lorsqu'on emploie des méthodes de positionnement spatial. Les axes X et Y sont orthogonaux dans le plan de l'équateur, l'axe Z est confondu avec l'axe de rotation terrestre moyen.

Représentations planes ou « projections »

La représentation cartographique du terrain sur un plan passe par l'intermédiaire de l'ellipsoïde. La représentation des points du terrain ramenés à l'ellipsoïde (par projection) sur la surface cartographique (qui est développable) peut prendre un grand nombre de variantes différentes, selon que l'on préfère que les angles entre deux visées soient conservés (représentations conformes), ou plutôt que les surfaces le soient (représentations équivalentes), ou que les surfaces ou les angles soient quelconques. On appelle *altération linéaire* la variation relative d'une longueur passant de l'ellipsoïde à la représentation cartographique, et *correction de réduction à la corde*, ou *correction de dV*, la

correction angulaire qu'il convient d'apporter à une visée ramenée sur l'ellipsoïde lorsqu'elle est représentée sur le plan cartographique.

Les projections les plus courantes sont les suivantes : Lambert (employée pour la carte de France), U.T.M. (Mercator transverse, très employée dans le monde) et stéréographique (emploi fréquent pour des travaux scientifiques).

Les méthodes de la géodésie

Mesures terrestres

Mesures d'angles :

C'est le procédé topométrique employé depuis le plus longtemps et jusqu'aux années 70, c'était pratiquement avec le chaînage direct de longueurs la base de tous les travaux de terrain : même les distances étaient mesurées indirectement au travers de mesures d'angles (mesures stadimétriques). La triangulation, employant les mesures d'angles dièdres autour de la verticale, permet en effet de créer des réseaux géodésiques pratiquement illimités avec un nombre très réduit de distances (qui ont été longtemps très difficiles à mesurer) : pensons que le réseau français de premier ordre reposait en 1960 sur 11 bases de 10 à 20 km seulement ! Mais cette méthodologie qui privilégie la verticale a eu des conséquences importantes sur les techniques de terrain qui ont ainsi toujours séparé les déterminations planimétriques et altimétriques, essentiellement parce que la triangulation n'exige aucune altimétrie et n'en fournit aucune ; et heureusement car l'étude de la réfraction nous montre qu'au-delà des premiers mètres au dessus du sol (visées longues de sommet à sommet par exemple), le gradient d'indice étant vertical, toute visée reste généralement dans un plan vertical quelles que soient les conditions météorologiques, avec une courbure mal connue. Donc des visées angulaires planimétriques gardent un modèle d'erreur indépendant de la distance, alors que des visées altimétriques sont fortement affectées par cette courbure mal connue : la séparation entre triangulation et nivellement vient aussi beaucoup de là. On peut y ajouter que le nivellement se réfère sur le géoïde (mal connu) et la triangulation sur l'ellipsoïde, et l'on voit la genèse de toute cette dichotomie entre X-Y et Z qui ne s'estompe que depuis peu avec l'emploi du GPS.

Héritier des anciens cercles de grande dimension construits et utilisés au XVIII^e siècle, le théodolite est donc l'instrument de mesure des angles dièdres autour de la verticale, et des angles de site. Il n'a été rendu raisonnablement compact que vers 1930 par le constructeur suisse Wild (théodolite T2). Puis progressivement on a vu apparaître une correction automatique du défaut de verticalité de l'axe principal sur les mesures de site, puis vers 1980, une lecture automatique des angles à 1 mgr près, puis vers 1988 à 1 dmgr près, et enfin une correction automatique des deux angles en fonction d'un défaut de verticalité de l'appareil en cours de mesure. La gamme d'instruments actuels est à la fois très étendue en performances et en prix, et les meilleurs théodolites offrent une précision, une commodité et une sûreté d'emploi dont on n'a jamais disposé auparavant, permettant en particulier que la mesure acquise par l'appareil soit transmise sans aucun risque de faute vers l'ordinateur de l'utilisateur. Il existe encore un parc important d'appareils à lecture non automatique des angles, car leur fabrication a été tellement soignée que même des appareils anciens, pratiquement inusables, rendent des services équivalents à ceux qu'ils rendaient étant neufs : ils sont moins commodes mais presque aussi précis que les appareils actuels.

Le marché du théodolite neuf comporte beaucoup d'appareils électroniques de précision 1 mgr, qui incorporent souvent des appareils de mesure électronique de distances (on les appelle alors « tachéomètres »), mais aussi des théodolites très précis à 1-1,5 dmgr près.

Mesures électro-optiques de distances :

Les *appareils électroniques de mesures de distances (AEMD)* n'ont guère qu'un quart de siècle, et ils ne se sont réellement répandus que dans les années 1970 pour compléter la gamme des mesures topographiques et géodésiques qui jusque là employaient presque uniquement des mesures d'angles. L'appareil émet une onde électromagnétique (généralement une lumière infrarouge) modulée qui se réfléchit et revient vers l'appareil. Le déphasage entre le signal de modulation émis et le signal reçu ne dépend que de la distance D , et obéit à :

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{2 \cdot D \cdot f}{c}, \text{ c étant la vitesse de l'onde électromagnétique dans l'air traversé.}$$

Et finalement, $2 \cdot D = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \cdot \frac{c}{f} + k \cdot \frac{c}{f}$ où k est un entier *a priori* inconnu.

Il faut avoir alors recours à plusieurs fréquences f_1, f_2, \dots permettant, grâce aux mesures Df_1, Df_2, \dots de calculer ce k et donc la valeur sans ambiguïté de D .

Généralement, l'appareil affiche : $D_0 = \left(\frac{\Delta\phi}{2\pi} + m \right) \frac{c_0}{2 n_0 f} + a$ qui serait réellement D si l'on avait

$n = n_0$, n étant l'indice de réfraction de l'air le long du trajet parcouru par l'onde. Le but de cette opération est d'obtenir un affichage qui ressemble à une distance, alors même que l'information sur n n'est pas disponible dans le microprocesseur. Celui-ci utilise donc cette valeur n_0 , choisie arbitrairement par le constructeur. Donc, $D = D_0 \cdot n_0/n$, ou encore, si on emploie la notation :

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \text{ (co-indice de réfraction), } D = D_0 + 10^{-6} (N_0 - N) \cdot D_0$$

Ce dernier terme $[10^{-6} (N_0 - N) \cdot D_0]$ est souvent appelé « correction météo » et se calcule à partir de N (mesuré à partir des mesures météorologiques) et de N_0 ; l'écart entre ces deux valeurs est multiplié par la distance en km, et on obtient ainsi directement la correction en mm.

Certaines erreurs de mesure sont liées à la détermination de n . Nous avons : $\frac{dD}{D} = \frac{dn}{n} - 10^{-6} dN$ et

l'erreur sur N représente directement en ppm (parties par million) l'erreur proportionnelle sur la distance mesurée D . L'analyse de la sensibilité des différents paramètres météorologiques peut se faire ainsi :

$$dN = -1,1 dT + 0,37 dP_a - 0,05 dP_v$$

Donc une erreur de 1 ppm sera la conséquence d'une erreur de 1° sur T ou de 3 mmhg ou 4 mbar sur P_a .

Pour les distances courtes (quelques kilomètres), la précision globale de la plupart des appareils étant de l'ordre de 5 mm, ceci rend inutile la mesure de P_v , peu importante la mesure de P_a (10 à 15 mmhg de précision suffiront fréquemment) et peu critique celle de t (à 2 ou 3 degrés près). On annonce la précision sur une mesure de D sous la forme $s_D^2 = a^2 + b^2 \cdot D^2$, en général directement en millimètres pour D exprimé en kilomètre.

Par exemple, de mauvaises conditions de mesures :

- augmenteront **a**, à cause de la turbulence et de la scintillation atmosphérique ;
- augmenteront **b**, à cause de mesures des paramètres météorologiques médiocres.

Mesures de dénivelées, ou nivellement :

Nous avons expliqué précédemment pourquoi historiquement le nivellement avait été une opération toujours disjointe de toute détermination planimétrique. Il faut encore préciser un aspect essentiel : le nivellement est certainement l'opération topométrique la plus ancienne et la plus précise dont l'homme ait eu besoin, surtout pour l'écoulement par gravité de l'eau, besoin fondamental s'il en est. En France, il y a plus de 130 ans qu'il a été jugé utile que l'Etat assure le maintien d'un ensemble de repères homogènes d'altitudes, afin de minimiser les innombrables opérations de nivellement locales et de les rendre compatibles entre elles, et il en a été de même ensuite dans pratiquement tous les pays du monde. Compte tenu de la précision cherchée, on a beaucoup employé le nivellement géométrique ou nivellement direct, et seulement depuis peu le nivellement trigonométrique, ou indirect, pour les réseaux nationaux.

Le nivellement direct

Il s'agit d'un procédé simple : sur chacun de deux points entre lesquels on cherche à mesurer la dénivelée, on dispose une *mire*, règle graduée tous les centimètres tenue verticalement. A mi-distance, on s'installe avec une lunette dont l'axe optique peut être rendu horizontal, le *niveau*. La visée successive sur chaque mire permet d'obtenir la hauteur de l'axe optique par rapport à chaque point stationné (qui est confondu avec l'origine de chaque mire), et par soustraction entre les lectures sur mire, on obtient la dénivelée entre ces points. Lorsque toutes les précautions sont prises, est en soignant particulièrement les mesures, la précision peut être meilleure que 0.1 mm pour une dénivelée entre deux points distants de 80 mètres. Cela dit, comme on ne peut viser à grande distance (au-delà de 90 m on ne peut guère lire la mire correctement), le nivellement direct a pendant longtemps été une opération très fastidieuse à cause de la grande quantité de lectures à noter et à contrôler sur le terrain. Une nouvelle génération d'instruments entièrement numériques a fait depuis peu disparaître ce type de sujétion.

Le modèle d'erreur résultant est une composition d'erreurs réputées aléatoires pour chaque nivelée. Il s'exprime sous la forme $a \cdot D^{1/2}$, en millimètres pour une distance **D** en kilomètres, et **a** peut varier de 3 à 4 mm (nivellement courant) jusqu'à 0.1 mm (très haute précision pour la surveillance de mouvements du sol). Mais lorsqu'on observe de grands réseaux, on n'évite semble-t-il jamais que se glissent quelques erreurs à caractère systématique, et sur lesquelles on ne sait que peu de choses. Par exemple, entre deux séries d'observations sur le réseau de premier ordre français, avec Marseille comme origine, un écart croissant du Sud au Nord a été observé, culminant à près de 60 cm à Dunkerque, alors que l'écart probable n'aurait guère dépassé 10 cm en l'absence de systématismes. On a supposé, sans vraiment de preuves, que cet effet Nord-Sud était lié aux observations humaines et à l'éclairage des mires par le soleil.

Les niveaux de haute précision anciens employaient une nivelle très sensible pour rendre l'axe de visée horizontal. Depuis 1980 environ, des niveaux automatiques ont pu atteindre une précision comparable, voire meilleure, avec une bien meilleure facilité d'emploi. Dans ces instruments, la sensibilité de pointé est obtenue grâce à une lame à faces parallèles, qui translate verticalement la

visée afin d'amener en coïncidence parfaite le trait de la mire avec le réticule de la lunette. La lecture est alors double : lecture du nombre de centimètres sur la mire, et de l'appoint (en 0.1 ou 0.01 mm) sur le mécanisme d'entraînement de la lame à faces parallèles.

Depuis 1990, l'appareil LEICA NA2000 a complètement changé la technique de mesure : la mire est formée d'une série pseudo-aléatoire de bandes noires et blanches (dérivant d'un code calculé pour que l'auto-corrélation soit partout nulle sauf en 0). Dans l'appareil, une barrette CCD analyse l'image de la mire et un processeur corrèle cette image unidimensionnelle avec le code de la mire. On en déduit à la fois la distance de la mire et la position de l'axe optique sur celle-ci. Donc la lecture est entièrement automatique, aucune faute n'étant possible désormais dans la transmission des données, entièrement électronique, vers le calculateur du bureau.

le nivellement indirect

Si l'on mesure l'angle de site sous lequel depuis une station on observe un point (ou le complémentaire de cet angle, appelé « distance zénithale » Z), et que la distance D (suivant la pente de la visée) soit mesurée directement ou fournie par un autre procédé, on peut envisager de calculer la dénivelée pour autant que le rayon de courbure r du rayon lumineux soit connu ; et généralement il ne l'est pas. La dénivelée D_n entre le théodolite et la cible est donnée par :

$D_n = D \cdot \cos Z + D^2 / 2 \cdot r$ et la précision qui en résulte est médiocre : un ou deux centimètres à un kilomètre par exemple. Toute autre est le cas si l'on stationne les deux points simultanément avec deux théodolites, et si l'on mesure Z_1 et Z_2 au même instant.

On obtient alors D_n par : $D_n = D \cdot \sin (Z_1 - Z_2) / 2$, sans aucune hypothèse sur r , si ce n'est le fait qu'il est supposé constant tout le long de la visée.

L'emploi de mesures de distances zénithales réciproques et simultanées, rendu possible uniquement grâce aux AEMD, permet aujourd'hui des mesures de dénivelées qui ont une précision digne du nivellement direct, mais très variable en fonction de la distance maximale D autorisée (toutefois la rapidité et donc le coût varient aussi, contrairement au nivellement direct). Pour $D < 250$ m, on obtient l'équivalent d'un nivellement de premier ordre ($a = 1$ à $1,5$ mm \cdot km $^{-1/2}$), alors qu'avec $D < 1,2$ km on obtient a de l'ordre de 5 à 6 mm \cdot km $^{-1/2}$, avec des conditions économiques très intéressantes, en particulier dans les zones montagneuses où la présence d'une pente éventuellement forte ne ralentit pas la progression du cheminement.

Méthode G P S (Global positioning system) :

Le GPS représente un moyen de positionnement dont la conception date des années 70, et réellement opérationnel (industrialisation des récepteurs, nombre de satellites en service...) depuis la fin des années 80. 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, le vecteur joignant les deux antennes peut être calculé avec une précision qui peut être de l'ordre du centimètre. 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 souvent plus rapides 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 (quelques centimètres) et surtout, n'étant pas référencée sur le géoïde, elle est peu utile pour le nivellement de précision. Notons enfin qu'il y a une très grande diversité de matériels fabriqués, par exemple de petits appareils très bon marché pour la randonnée ou la plaisance (fonctionnant de façon autonome, précision de l'ordre de 100 m). Mais le géomètre ne peut travailler qu'en mode différentiel, avec des appareils beaucoup plus onéreux, et ne produit des coordonnées que par rapport à un point dont la position est prise en référence.

La photogrammétrie

Ce procédé de lever est essentiel depuis longtemps pour la cartographie, mais il a encore pris de l'importance depuis la multiplication des besoins des collectivités locales en systèmes d'Informations Géographiques (SIG), qui exigent un approvisionnement énorme en données numériques à jour, que pratiquement seule la photogrammétrie peut fournir.

Le principe général est basé sur la perception humaine du relief par observation stéréoscopique. Faisons voler un avion équipé d'une chambre de prise de vues au dessus d'une région, et faisons en sorte qu'une partie du terrain figure sur deux clichés correspondant à deux positions différentes de l'avion. Si maintenant nous faisons en sorte d'observer simultanément un cliché avec un œil et le second avec l'autre œil grâce à un outil optique approprié (stéréoscope à miroirs, appareil de restitution, etc.), nous allons voir en relief la zone de terrain imagée sur les deux clichés. La vision humaine permet en effet de voir ces images en relief dans une large gamme de dispositions relatives de ces deux clichés. Mais si nous disposons ces derniers dans une position relative exactement semblable à celle qu'ils avaient au moment de la prise de vue, alors l'image stéréoscopique observée est une exacte homothétie du terrain réel photographié, pour autant que la chambre de prise de vue soit parfaite, c'est-à-dire n'apporte aucune distorsion à l'image (on l'appelle alors chambre « métrique »). Pour exploiter alors cette scène stéréoscopique, l'appareil de restitution superpose à chaque image un petit point (le « ballonnet »), que la vision humaine comprendra comme un petit objet dont la position est déplaçable à volonté en hauteur au dessus de l'image du terrain grâce à des commandes appropriées. L'opérateur aura donc pour travail de promener ce ballonnet dans l'image sur

tous les objets à mesurer, pendant que l'appareil archivera toutes les informations numériques produites.

Pour que l'image observée soit une copie exacte du terrain, il faut contraindre un certain nombre de points dans l'image en les obligeant à être à des positions relatives similaires aux leurs sur le terrain. Pour un couple stéréoscopique donné, on montre qu'il faut 6 points connus pour que l'image soit fidèle. Ces points seront mesurés sur le terrain : cette opération est appelée *stéréopréparation*. Lorsque de nombreux couples stéréoscopiques sont enchaînés (bande de clichés aériens), on peut limiter le nombre de points terrain à mesurer en analysant toutes les contraintes géométriques qui se transmettent de cliché à cliché. Le processus de calcul, très complexe, s'appelle *aérotriangulation*. Par ailleurs, la manipulation des grandes quantités de données numériques extraites pose des problèmes spécifiques, résolus par des logiciels spécialisés qui ont pris beaucoup d'importance depuis quelques années puisqu'ils sont l'outil de mise en forme finale des données sorties de l'appareil, d'entrée de toutes les corrections en provenance des équipes qui complètent sur le terrain les levés de toutes les informations non visibles sur les clichés et corrigent les points douteux (*complètement*), et enfin de formatage des données selon les besoins du client. Depuis peu l'emploi de mesures GPS dans l'avion photographe se généralise : il permet d'effectuer l'aérotriangulation avec très peu de points d'appui au sol et réduit donc les coûts de tels levés.

Les appareils de restitution ont longtemps été entièrement mécaniques, et donc très délicats et précis. Depuis les années 80, on s'est mis à employer plutôt des appareils où presque toutes les fonctions mécaniques sont effectuées par un ordinateur qui commande le déplacement des clichés. Ces appareils sont appelés *restituteurs analytiques* et permettent une meilleure rapidité de mise en place et d'exploitation des clichés. Depuis 1992, une nouvelle variante d'appareil est arrivée sur le marché, utilisant exclusivement un ordinateur puissant. Les clichés sont tout d'abord numérisés par scannage, et présentés simultanément par exemple sur les cotés droit et gauche d'un écran graphique haute résolution où ils sont observés en stéréoscopie avec un système approprié. L'opérateur procède alors comme sur un appareil classique, mais en plus il dispose d'aides informatiques puissantes comme la corrélation automatique (qui remplace, sans intelligence bien entendu, la vision stéréoscopique humaine).

Il s'agit très probablement d'une évolution irréversible de la photogrammétrie qui prendra de l'ampleur dans les prochaines années. Les clichés que l'on emploie sont comme nous l'avons vu souvent pris en avion, avec des axes pratiquement verticaux. Les chambres métriques habituelles sont très lourdes (plus de 100 kg) car le format de cliché est de 24 cm x 24 cm, et l'optique doit collecter beaucoup de lumière parce que les temps de pose ne peuvent être longs (quelques millisecondes, sinon le mouvement de l'avion crée un « filé » sur l'image), et en plus n'avoir qu'une distorsion insignifiante (quelques mm au pire). Depuis peu certaines chambres ont une compensation de filé : pendant le temps de pose, on déplace dans le plan focal le film à la même vitesse que l'image. Ceci permet des temps de pose plus longs et donc des prises de vues dans des conditions d'éclairage ou de vitesse peu favorables (soleil voilé, vols à basse altitude pour clichés à grandes échelles, etc.).

Les images exploitées peuvent aussi être obtenues avec des appareils « terrestres », de formats plus modestes (depuis 6 x 6 cm jusqu'à 13 x 18), que l'on emploie beaucoup pour des levés architecturaux (plans de façades par exemple) ou pour la « métrologie photogrammétrique » de grands objets industriels. Mais dès que les axes des clichés ne sont plus approximativement parallèles, seuls les appareils de photogrammétrie récents permettent l'exploitation (les appareils mécaniques anciens n'ont pas de débattement suffisant sur certains axes pour cela).

L'orthophotographie

Il s'agit d'un document cartographique, donc à échelle rigoureusement constante, basé sur l'emploi de photographies aériennes déformées afin de compenser exactement les effets de perspective de la prise de vue. Lorsqu'il s'agit d'une zone importante faisant appel à plusieurs clichés, il faut en outre modifier les radiométries (niveaux de gris des clichés) afin que les raccords de photos ne soient pas perceptibles. L'ensemble de ces opérations, maintenant entièrement numériques et techniquement assez délicates, ne requiert à aucun stade d'interventions humaines non entièrement automatisables. Il est donc probable que ces documents seront bientôt commercialement accessibles avec un traitement complètement automatique et économiquement très attractif. Les orthophotographies (sous forme numérique) devraient donc de plus en plus servir de couche de base dans des systèmes d'informations géographiques, parce que leurs informations ne sont pas « interprétées » comme l'est une carte, et que donc leur mise à jour est très facile. Elles s'avèrent tout à fait adaptées pour le cadastre grâce à cette particularité. L'habillage d'une orthophotographie est très variable, et peut se borner à un simple carroyage, ou comporter des courbes de niveau, une superposition d'autres données numériques, etc. selon les besoins.

L'informatisation de la cartographie, les bases de données géographiques

Les données géographiques (dites aussi « géoréférencées ») avaient traditionnellement un seul type de traitement possible, qui était la rédaction de documents sur papier. Lors de l'arrivée de moyens informatiques très économiques, l'intermédiaire entre les levés et le papier a été le fichier numérique. Puis les moyens informatiques ont disposé d'une puissance suffisante pour permettre de représenter ces données directement sur écran, sans sortie sur papier systématique. On a alors beaucoup œuvré pour se rapprocher du concept « une carte à la carte » et deux directions en ont résulté : d'abord la généralisation de moyens de cartographie assistée par ordinateur, puis l'emploi de ces données numériques dans des SIG (voir ci-après) permettant des gestions beaucoup plus souples de grandes quantités d'informations.

Afin de permettre une cohérence optimale entre les usagers possibles, très souvent les organismes nationaux se sont engagés dans de gros programmes de mise au point de bases de données géographiques nationales. L'objectif est alors que tout levé nouveau puisse s'appuyer sur une base de données géographiques homogène existante, ce qui représente alors une économie globale certaine. Ces bases de données ont été obtenues de façons très diverses, soit par numérisation très soignée des cartes nationales existantes, soit par des levés nouveaux (en général photogrammétriques). Il s'agit dans tous les cas d'un travail énorme, et dont un volet très important concerne la mise au point de méthodes de routine pour une mise à jour régulière. Il y a même aujourd'hui des bases de données géographiques couvrant le monde entier (par exemple DCW, ayant un contenu de précision hectométrique).

Dans ces bases de données, la notion de précision devient tout à fait essentielle, alors qu'elle ne l'était pas pour des documents papier. Lorsqu'il s'agit d'un document graphique, une cartographie dite « régulière » est représentée à une échelle pour laquelle **l'erreur de mesure a une valeur graphique de 0.1 mm** (taille du plus petit détail perceptible par l'œil à courte distance). Pour des données géographiques sous forme numérique, la notion d'échelle n'existe plus à proprement parler, et par extension leur « échelle » est liée par le même moyen à leur précision de détermination. Par exemple, à une échelle de 1/1000 correspond théoriquement une précision de 10 cm.

En matière cadastrale, un mélange de genres parfois gênant a résulté de ces démarches. En effet les plans cadastraux sont souvent les seules cartes à très grande échelle couvrant un pays, au moins partiellement, et beaucoup d'acteurs économiques ont un grand besoin de données numériques à de telles échelles. Ils utilisent donc préférentiellement les plans cadastraux numérisés pour couvrir leurs besoins, alors même que ces plans cadastraux n'ont pas du tout été conçus dans ce but (but fiscal en priorité). Néanmoins un service public comme le cadastre d'un pays ne peut plus ignorer aujourd'hui les emplois secondaires qui peuvent résulter de son travail, qui devraient d'ailleurs conduire logiquement à une évolution des spécifications des levés cadastraux.

Un autre problème nouveau résulte de la diffusion de bases de données géographiques, celui du maintien d'une certaine protection juridique des fournisseurs de données garantissant le retour sur investissement de ceux-ci. La copie de documents informatiques est en effet très facile, et assez difficile à prouver en plus. Une certaine jurisprudence s'établit actuellement en la matière, condamnant la copie au titre de l'enrichissement sans cause et de la copie servile. Mais de grands secteurs ne sont pas encore dans une situation très claire. Une carte à moyenne ou petite échelle comporte un volet artistique (organisation particulière des données), de même qu'une base de données structurée. Mais un levé à très grande échelle est une copie de la réalité sans qu'il y ait œuvre de l'esprit au sens de la défense de la propriété littéraire et artistique. Un *modus vivendi* international doit s'établir en la matière pour garantir les droits de chacun de façon correcte.

Les systèmes d'informations géographiques (SIG)

Il s'agit d'un concept récent, et qui recouvre un ensemble de techniques dont l'importance économique suit une croissance spectaculaire, à tel point qu'on peut sérieusement penser qu'il pourrait s'agir de l'avenir principal des professions de la géométrie. Un SIG est un outil permettant de mettre en relation des données géographiques et des données littérales au besoin très riches : ainsi on pourra par exemple, en désignant sur un écran une parcelle figurant dans un plan cadastral, connaître le nom du propriétaire, le numéro de parcelle, etc. Ou alors, en désignant le nom d'un propriétaire, on pourra produire à l'écran la portion de plan cadastral où se trouve la parcelle.

Un SIG est tout d'abord un ensemble de données localisées dont les origines peuvent être variées : scannage de cartes existantes, levés nouveaux ayant des précisions diverses (soit directs, soit photogrammétriques), voire Bases de données existant sur le marché. Le scannage de plans implique souvent une difficile « remise en géométrie » basée sur la position des croisillons imprimés sur les plans, afin de compenser par des traitements numériques appropriés les déformations parfois considérables du papier sous l'effet du vieillissement, des variations hygrométriques, etc. Il produit de plus des fichiers très volumineux (par exemple 1 point tous les 0.1 mm), que l'on est obligé de « vectoriser » afin de ne garder que la seule géométrie des traits. Cette opération est partiellement automatisable mais nécessite une intervention pour « nettoyer » le fichier de scannage (supprimer les tâches, les toponymes, restaurer les traits en partie effacés, etc.).

Ensuite un SIG se compose d'outils informatiques (matériels et logiciels) permettant d'employer ces données, et souvent de les enrichir, de les mettre à jour, etc. L'objectif du SIG est de permettre d'une part un accès aisé aux données, et de créer des documents cartographiques sur mesure à partir de celles-ci. Il est aussi de permettre une véritable gestion de ces données (c'est le point essentiel qui différencie un logiciel de SIG d'un logiciel de CAO), et de servir d'aide à la décision grâce à cette possibilité de gestion *a priori* bien plus puissante que dans le cas de données papier. Les SIG sont donc le prolongement normal de la cartographie d'autrefois, à laquelle on ajoute l'extraordinaire

puissance de travail des ordinateurs actuels. Evidemment, on trouvera des SIG ayant de très grandes différences de performances, selon qu'ils utiliseront des PC, ou des stations de travail, ou de gros ordinateurs. Nous citerons pour terminer les grands problèmes posés par les SIG :

- la notion d'échelle disparaît, et comme nous l'avons vu précédemment elle est remplacée par celle de précision du lever, et celle-ci n'étant plus indissociable des données, de sérieuses erreurs d'interprétation peuvent en résulter (agrandir une carte papier agrandissait aussi la taille des traits, l'erreur étant égale à 0.1 ou 0.2 mm pour une carte « régulière » ne pouvait être oubliée). Les outils graphiques des SIG ne gèrent pas encore l'épaisseur des traits, ce qui constitue manifestement une faiblesse ;
- une grande importance doit être donnée à la compatibilité des données entre elles, si l'on veut pouvoir bénéficier d'une synergie dans leur emploi commun : une même limite peut servir à plusieurs thèmes, et en assurer l'interopabilité implique que ce soit le même fichier numérique qui soit employé dans tous les thèmes concernés. On entrevoit la difficulté que rencontrent alors tous ceux qui veulent travailler sur un mélange de cartes scannées (par exemple cadastre) et de levers directs, car leur superposabilité n'est garantie - en l'absence de toute intervention préliminaire - que dans la marge donnée par la tolérance de chaque document, ce qui est quand même toujours inacceptable. On se trouve donc face à une nouvelle nécessité d'un référentiel unique pour tous les levers si l'on veut bénéficier de la possibilité de recouper leurs informations ultérieurement ;
- les données peuvent être structurées de façon plus ou moins poussée. Au minimum, on disposera de données « spaghetti », sans aucune qualification de chaque trait, comme si dans une carte tout était représenté en une seule couleur. A l'opposé les données peuvent être structurées avec beaucoup de luxe : on décrira alors leur « topologie » (relations existant entre elles) pour pouvoir s'en servir utilement. Ainsi une base de données routière devra différencier par des codes différents les routes selon leur taille, leur viabilité, etc., de sorte qu'un logiciel adapté à ce codage particulier permettra d'extraire à volonté par exemple « toutes les routes permettant de convoier un camion de 25 tonnes » et ensuite de choisir la plus rapide pour joindre deux villes. Les données graphiques sont donc structurées en « couches » parfaitement superposables, plus ou moins nombreuses (dans notre exemple, une pour les routes, une pour les cours d'eau, une pour les voies ferrées, etc.), et sont mises en relation avec des données alphanumériques qui les qualifient ou « attributs » (comme la largeur des voies, les noms des villes, etc.) ;
- le problème des formats est donc fondamental, si l'on veut sauvegarder des possibilités d'échanges entre SIG, et éviter d'être enchaîné à un fournisseur particulier de logiciels (qui impose donc son format). On a mis au point en France tout récemment une norme, appelée EDIGEO, pour assurer un format d'échange standardisé entre SIG ; et il est probable qu'un format international verra le jour sous peu, au moins en Europe ;
- les SIG se répandent rapidement et sont extrêmement gourmands en données topographiques numériques. Aux côtés de la numérisation de plans existants, la photogrammétrie est le moyen d'approvisionnement privilégié pour le moment, mais il faut bien noter que tout SIG que l'on crée non seulement exige des données, mais aussi représente un besoin régulier et à long terme en données de mise à jour.

Dans le domaine du cadastre, on retiendra un des points essentiels de la démarche : si les données de cadastre sont intégrées dans un SIG, cela permet un raccord très aisé entre des informations sur des ayant-droit (ne serait-ce que le nom de famille), des numéros de parcelles, et des documents

cartographiques. On pourra ainsi interroger facilement, soit en pointant sur le plan à l'écran pour obtenir des données textuelles sur la parcelle (numéro, propriétaire, surface, etc.), soit en interrogeant les données textuelles qui renverront l'utilisateur vers le plan à l'écran (où est la parcelle de M. X ?). Ceci représente un énorme gain (ne serait-ce que de convivialité) par rapport aux données cadastrales traditionnelles sur papier.

Dans les utilisations principales des SIG pour les collectivités locales de petite taille, l'application « cadastre » est considérée comme la plus évidente, et sert souvent d'introduction à l'emploi de tels outils informatiques vers d'autres applications techniques (gestion des réseaux enterrés, par exemple).

LA TELEDETECTION

Echelle et rendu des images

Les outils cartographiques dits de télédétection désignent, un peu abusivement il est vrai, ceux qui utilisent des capteurs spatiaux. Ceux qui concernent notre propos sont uniquement les imageurs spatiaux (actuellement Landsat et Spot essentiellement), et les radars spatiaux. Ce sont toujours des capteurs numériques, et donc leurs performances sont assez largement fonction des traitements informatiques que l'on fait subir aux données. Néanmoins certaines spécifications conditionnent très largement les usages possibles, comme celles de taille de pixel, de fréquence de passage au dessus d'une zone donnée, de capacité stéréoscopique (permettant des levés photogrammétriques). On attend dans les prochaines années plusieurs systèmes commerciaux permettant de fournir des images avec un pixel de un mètre, mais actuellement le pixel le plus petit est fourni par Spot (pixel de 10 m en mode noir et blanc), avec une dynamique bien meilleure que celle d'une photographie argentique classique (256 niveaux de gris contre une cinquantaine en moyenne) et une bonne capacité de stéréoscopie. Avec un pixel de 20 m, on trouve Spot avec trois canaux spectraux permettant un certain niveau de discrimination des objets selon leur couleur. Puis avec un pixel de 30 m, on trouve le système Landsat qui fournit aussi une analyse spectrale très poussée des objets terrestres observés, mais sans possibilités stéréoscopiques.

Avec de telles tailles de pixels, on note que la télédétection n'est en général guère appropriée à des travaux cadastraux urbains. Néanmoins dans des zones rurales, elle permet d'établir aisément des zonages en fonction du type d'occupation des sols.

Les radars spatiaux (ERS 1 et 2, Radarsat, etc.) ont dans tout cet ensemble une place à part. Ils ont l'inconvénient d'exiger des traitements de données d'une extrême complexité, mais ils permettent souvent d'atteindre une résolution géométrique de l'ordre de 10 m, et surtout leurs performances sont totalement indépendantes de la nébulosité, ce qui est atout majeur sur de larges zones du globe (zones tropicales et équatoriales).

Corrections géométriques et radiométriques

Les images spatiales ont, par rapport aux photographies aériennes habituelles, la particularité d'être prises de très loin, avec des optiques à très grande focale. Le résultat en est qu'elles sont comparativement peu déformées par le relief, en particulier lorsque le satellite vise à la verticale au dessous de lui (visée au nadir). On comprend dès lors qu'il y a de nombreux niveaux de corrections géométriques possibles pour une image spatiale. Par ailleurs, le capteur employé présente des caractéristiques de sensibilité qui évoluent au cours de sa vie en orbite, et on peut également procéder

à des corrections dites « radiométriques », afin de se ramener à l'équivalent d'une image prise par un capteur parfaitement étalonné. C'est ainsi que l'on définit par exemple différents « niveaux » de correction pour une image Spot :

- Niveau 0 : aucune correction ;
- Niveau IA : application d'une correction d'étalonnage radiométrique du capteur ;
- Niveau IB : rajout d'une correction géométrique pour tenir compte de la rotation de la terre et de la position théorique du capteur et de la scène, celle-ci étant assimilée à une surface ellipsoïdale (pas de reliefs et altitude nulle) ;
- Niveau IIA : rajout d'une correction géométrique permettant de projeter une scène de niveau IB sur un plan cartographique quelconque ;
- Niveau IIB : niveau IIA, la projection étant recalée sur des points de coordonnées connues ;
- Niveau III : si l'on dispose d'un modèle numérique de terrain, prise en compte du relief. L'image est alors parfaitement cartographique ;
- S (superposable) : permet d'obtenir une nouvelle scène avec exactement la même géométrie qu'une scène existante.

Photocartes, spatiocartes

Lorsqu'une image aérienne ou spatiale est parfaitement cartographique (par exemple une orthophotographie, ou une image SPOT niveau III), il arrive qu'on souhaite conserver toute la richesse de l'information photographique tout en se donnant les moyens de représenter des éléments graphiques supplémentaires, résultats d'une interprétation et d'un complément de l'image (toponymie, carroyage dans le référentiel national, tracé des routes avec un signe conventionnel, etc.). On obtient alors une photocopie, ou une spatiocarte si l'image est d'origine spatiale. Il s'agit de documents dont les avantages/inconvénients sont :

- processus de reproduction plus délicat. La photocopie donne par exemple généralement des résultats très médiocres, il est difficile d'utiliser ces documents sous forme de calques techniques ;
- documents difficiles à employer comme base de levés sommaires ultérieurs : le trait de crayon ne se voit pas bien, des tracés manuels sur le document papier sont délicats à lire ;
- grande richesse de renseignements, avec laquelle la carte au trait ne peut rivaliser. Par exemple en zones rurales, les variétés fines dans le couvert végétal ou dans la géologie se voient sans difficulté, et une thématique cartographique traditionnelle ne peut en aucun cas donner un tel niveau de détails.

Ces documents ont maintenant un nouvel intérêt dans les SIG, comme couche de base ainsi que nous l'avons mentionné pour les orthophotographies, mais surtout parce qu'on peut les garder sous forme purement numérique. Ils permettent, pour des études de cadastres en zones rurales, de faciliter considérablement les travaux de terrain ultérieurs d'identifications de zonages, de détails ayant une importance pour l'identification de droits, etc.

LE PLAN PARCELLAIRE

Le plan et la carte

Un plan est le résultat d'un travail de lever, que le résultat soit sur papier ou sur support informatique. Il ne comporte donc d'interprétation qu'en terme de codage des différents points levés (tel trait représente un mur, ou une bordure de trottoir, etc.). Une carte par contre comportera une interprétation plus ou moins poussée de la géométrie des traits représentés, par l'adoption de signes conventionnels mais aussi à cause de la nécessité de sélectionner les éléments à reporter sur la carte (sinon elle sera peu lisible), et de déplacer au besoin certains éléments pour éviter que leur représentation conventionnelle ne chevauche celle d'un autre élément représenté (on parle alors de « généralisation »). Il est donc clair qu'une carte, même si l'on change son échelle à cette fin, n'est qu'approximativement superposable à un plan dont elle est issue.

De plus, il convient de ne pas oublier qu'une carte est presque toujours fournie dans un référentiel cartographique bien défini (Lambert, UTM, etc.), alors qu'un plan pourra très bien être disponible dans un référentiel local inconnu et arbitraire, sans orientation et avec une origine des coordonnées quelconque. Ceci peut d'ailleurs rendre très délicate la récupération de plans anciens en vue de confectionner un plan cadastral de qualité, si les levés ont des références seulement locales (et c'est souvent le cas si aucune géodésie n'existe, ou si elle a été progressivement détruite faute d'entretien, ou si les géomètres n'ont pas pris la discipline de référencer tous leurs levés par rapport à cette géodésie locale).

Dans l'analyse de ces notions de plans et de cartes, il faudra donc toujours être prudent quant à :

- l'origine et l'orientation des levés ;
- la projection choisie et l'altération des longueurs qui en résulte ;
- le niveau de généralisation adopté, et l'échelle de la carte employée, qui conditionne sa précision (la différence entre un 1/2000^e régulier et un 1/2000^e obtenu par agrandissement d'un 1/25000^e est grande...).

Méthodes de levés directs

Les méthodes permettant de lever des objets sur le terrain ont considérablement évolué au cours des dernières années. Le but final étant l'exécution d'un plan parfois graphique mais presque toujours numérique, on sépare généralement l'opération de terrain en deux phases. Tout d'abord, un **canevas** de points est établi : ces points, souvent appuyés sur les points géodésiques du réseau national, représentent une première densification de celui-ci, organisée afin que tout détail à lever soit visible depuis au moins un de ces points. Ensuite, on procède au **levé des détails**, détermination des coordonnées de tous les points requis par le cahier des charges.

Etablissement d'un canevas d'appui

Il peut de faire de différentes manières, soit traditionnelles (triangulation ou polygonation), soit par géodésie spatiale GPS (cas de plus en plus fréquent, un des récepteurs stationnant un point géodésique servant de référence).

En **triangulation**, à l'origine on mesurait les angles d'une série de triangles accolés joignant les points entre eux ; un des cotés étant connu ou mesuré permettait alors de calculer la position de tous les

points. Aujourd'hui certes on utilise toujours des mesures au théodolite mais assez fréquemment aussi des mesures de distances pour créer un grand nombre de relations géométriques entre les points géodésiques d'appui (dont les coordonnées sont imposées dans le calcul d'ensemble) et les points nouveaux. Ceci permet la détermination, avec une forte surabondance de mesures, des coordonnées des points nouveaux (calculs par moindres carrés, voir 4,2 ci-après). Il faut encore mentionner quelques dénominations d'usage lorsqu'on calcule les coordonnées d'un point depuis lequel on a visé au moins trois points connus et plutôt davantage (**relèvement**), ou lorsqu'on vise un point nouveau depuis plusieurs points connus que l'on stationne (**intersection**).

La **polygonaion** est une méthode moins fiable mais plus légère et bien plus courante pour obtenir des points de canevas. Le **cheminement goniométrique** exploite des mesures d'angles et de distance entre des points successifs (cf. Fig. 6), en général plus ou moins alignés : chaque nouveau coté est orienté à partir de l'orientation du coté précédent, ainsi il faut connaître une orientation sur le point de départ mais aussi d'arrivée (c'est alors à titre de contrôle), ces deux points étant des points géodésiques connus. Par contre avec une **orientation indépendante des cotés**, soit en se référant sur le Nord magnétique (0,1 gr. près environ), soit sur des visées astronomiques (précision de 0.01 gr sur le soleil jusqu'à 0,0002 gr. sur une étoile proche du pôle), soit sur l'axe de rotation de la terre (Nord vrai) avec un chercheur de nord gyroscopique. Une telle réorientation de chaque coté conduit à un modèle d'erreur beaucoup plus favorable : elle est souvent nécessaire en travaux souterrains.

Lever des détails

Le topographe stationne maintenant chacun des points du canevas afin de mesurer la position des détails à lever. Différentes méthodes sont employées : abscisses et ordonnées, quasi-ordonnées et obliques latérales, alignements et prolongements. Mais la méthode de loin la plus courante, depuis l'existence des *tachéomètres électroniques* (intégrant un AEMD dans un théodolite électronique), est la méthode dite par **rayonnement**. On stationne les points du canevas avec le tachéomètre, et on oriente l'appareil à l'aide d'au moins une visée sur un ou plusieurs autres points connus (en particulier d'autres points du même cheminement).

A partir de là, pour chaque point stationné par l'opérateur géomètre équipé d'une canne munie d'un réflecteur, la mesure de deux angles (horizontal et vertical) et de la distance permet de localiser ce point. Le technicien qui met en œuvre le tachéomètre introduit alors dans son terminal informatique (« carnet électronique ») de terrain (souvent étroitement associé au tachéomètre) un code décrivant le type de point mesuré (par exemple angle de bâtiment, chemin, poteau électrique, etc.), qui restera associé à l'enregistrement des trois mesures proprement dites. Le géomètre aura donc une description par points de l'espace, avec une densité qui ne dépend que du cahier des charges de son lever. A la suite de son travail de terrain (le matériel actuel permet de lever jusqu'à plus de 800 points par jour si besoin est), le « carnet électronique de terrain » est vidé vers l'ordinateur (éventuellement par ligne téléphonique), et un logiciel approprié permet le traitement de ces données, leur correction interactive sur écran, puis le report automatique sur papier.

Le bornage

Le bornage est une opération qui consiste à fixer les limites d'une parcelle de terrain et à les matérialiser par des bornes (où simplement à les définir par rapport à des éléments naturels). Généralement, un bornage crée une protection de la parcelle face à des contestations de voisinage,

mais pour avoir toute sa valeur, il doit s'inscrire dans un contexte légal précis. On parlera par exemple de bornage contradictoire, lorsque toutes les parties concernées par une limite acceptent celle-ci (en France, elles doivent alors signer en même temps sur le plan du géomètre), ou de bornage judiciaire (lorsque les parties ne peuvent s'entendre). Dans la plupart des pays, le bornage ne peut être réalisé que par un géomètre assermenté, soumis à une supervision (soit de l'Etat, soit d'un Ordre professionnel contrôlé par l'Etat comme l'Ordre des géomètres-experts en France). Le bornage est une opération qui, selon les administrations nationales concernées, est ou n'est pas indépendant des levés cadastraux. Par exemple pour un cadastre purement fiscal, les parcelles peuvent n'avoir jamais reçu de bornage juridique sans créer de problème majeur (cas général en France).

A un moindre niveau de complexité, le bornage peut aussi être simplement consensuel (la limite passe par tel arbre, tel chemin, etc.), et c'est sous cette forme qu'il est souvent pratiqué en Afrique, sans enregistrement papier évidemment, dans le cadre du droit coutumier traditionnel.

Il faut encore noter, à propos du bornage, que désormais un « bornage virtuel » est désormais accessible grâce au GPS (mis en œuvre dans certaines conditions, grâce à l'observation de réseaux d'appuis nationaux très précis), puisque ce moyen de géodésie permet si besoin est de raccorder un quelconque lever à un référentiel mondial, avec une précision de raccordement qui si besoin est peut s'approcher du centimètre. Dans ces conditions, une parcelle peut être définie par un certain nombre de coordonnées des angles de celle-ci, et si les limites sont contestées ultérieurement on peut les réimplanter sans aucune ambiguïté. Le coût d'une telle opération, si le cadastre a été correctement conçu autour d'une géodésie d'appui de bonne qualité, ne sera guère élevé si les géomètres capables d'intervenir sont équipés de matériels GPS convenables.

Un bornage contradictoire est nominaleme nt une opération coûteuse, puisqu'elle implique à chaque fois un lever topographique et l'analyse de tous les documents relatifs à un ensemble de parcelles. Il est donc en général difficile de procéder à une telle opération sur un pays entier sans de très importants moyens financiers. Le « bornage virtuel » décrit précédemment rend une telle opération inutile pour l'Etat, le bornage réel deviendra à cet égard bientôt réservé à l'initiative individuelle, et ne sera réalisé qu'à la demande des parties qui le demandent, et à leur charge.