

## EN GUISE DE CONCLUSION

Pour de multiples raisons, le "tout-GPS" et la fin du tachéomètre ne sont pas pour demain :

D'abord parce que le lever par tachéomètre est, comme son nom l'indique, extrêmement rapide et fonctionne en toutes circonstances, de façon complètement autonome, que le ciel soit ou non visible. Ensuite, parce que tous les points à lever ne sont pas " stationnables " : on peut y mettre un réflecteur au besoin, mais certainement pas toujours une antenne GPS ! Et comme par ailleurs les levés tachéométriques nécessitent une orientation, on ne se passera pas de sitôt des réseaux locaux matérialisés qui nous sont familiers.

En matière de levés GPS de précision métrique, il y a quelques enjeux nouveaux créés par la généralisation de l'emploi de SIG pour des applications très variées. Pour leur mise à jour, la précision du mètre est parfois suffisante. Il est alors dommage d'utiliser des méthodes de précision beaucoup trop élevée, dont le coût de revient est inutilement important. Par exemple, si nous dotons un technicien d'un récepteur GPS recevant sur abonnement des corrections lui permettant d'atteindre le mètre en temps réel (matériel qui sous peu sera très bon marché), si nous lui mettons en main un télémètre laser portable permettant la

mesure de distances sans réflecteur, équipé d'un inclinomètre et d'un compas magnétique, il est clair qu'il aura ainsi la possibilité de donner les coordonnées de tous les points entrant dans son champ de vision, sans avoir, par exemple, à pénétrer dans les propriétés closes.

Il est donc important de faire bénéficier la mise à jour des bases de données géographiques de ces méthodes, probablement bien moins onéreuses que toute autre. Les sociétés offrant sur abonnement un service de corrections GPS en temps réel sont donc appelées à se multiplier dans les prochaines années, compte tenu du nombre considérable de clients potentiels !

### Bibliographie :

S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels, M. Even, P. Willis, GPS, localisation et navigation, Hermès, 1996, ouvrage de base, publié sous l'égide du Conseil National de l'Information Géographique,

Dossier "Les stations GPS permanentes" (revue Géomètre, Mars 2000), dont cette fiche reprend quelques éléments.

---

*fiche élaborée par Michel Kasser, Institut géographique national*

---

*avril 2000*

---

## LE "GLOBAL POSITIONING SYSTEM" (GPS)

Le Global Positioning System (GPS) est un moyen de positionnement dont la conception date des années 1970. Mais il ne fut réellement opérationnel (industrialisation des récepteurs, nombre de satellites en service...) que vers 1991, d'importants retards de lancement ayant été causés par les aléas du programme de la navette spatiale américaine.

### Principes généraux

- Un ensemble de près de trente satellites (Navstar, lancés par le ministère américain de la défense) orbite vers 20 000 km d'altitude. Ceux-ci émettent en permanence des signaux radioélectriques de très faible puissance, à des fréquences de l'ordre de 1,2 GHz (appelée L2) et 1,6 GHz (appelée L1) modulés par des signaux numériques pour lesquels chaque bit d'information est émis à une date connue avec une extrême précision. Ces bits décrivent par ailleurs la position du satellite concerné, avec un débit élevé (10 MHz), ce qui conduit à une émission à spectre très large et donc à une grande insensibilité aux émissions parasites.

- Au sol, un récepteur observe avec précision la date de réception de ces mêmes bits, et les décode.

Les satellites sont tous calés 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 par le récepteur : les 3 coordonnées de son antenne, ainsi que son

décalage temporel avec l'échelle de temps des satellites. Il faut donc observer simultanément au moins quatre satellites dont on connaît la position, pour calculer la position du récepteur.

Ce type de fonctionnement, compte tenu des différentes limites physiques du système, peut donner en temps réel une précision d'une dizaine de mètres en absolu. Cela suffit à satisfaire les exigences des applications militaires, mais pas celles de la topographie.

Pour cette dernière, il a fallu mettre au point une application dérivée en utilisant le 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 (de quelques minutes pour une distance de quelques kilomètres à une heure pour de longues distances), le vecteur orienté joignant les deux antennes peut être calculé avec une précision de l'ordre du centimètre.

## SOURCES D'ERREURS RESIDUELLES

- *Connaissance de la position des satellites*, dont les paramètres d'orbites font partie des informations émises par les satellites eux-mêmes.

Cette position n'est précise qu'à quelques mètres, mais l'observation différentielle élimine la plus grosse partie de cette erreur. Lorsqu'on recherche la précision maximale, on est amené à employer des orbites recalculées avec une très grande précision, depuis 1992, par un service international composé d'un groupe de laboratoires scientifiques volontaires (IGS, pour International GPS Service) qui fournit gracieusement ces informations avec un différé d'une dizaine de jours.

- *Connaissance de l'indice de réfraction* des derniers kilomètres de l'atmosphère (troposphère).

Cette erreur est difficile à modéliser. La teneur en vapeur d'eau des basses couches de l'atmosphère, très imprévisible, est un facteur prépondérant d'incertitude. Mais ce risque d'erreur s'élimine en partie lorsque les deux récepteurs sont à la même altitude et dans des conditions climatiques proches, l'observation différentielle soustrait l'un de l'autre deux facteurs, mal connus, mais presque égaux.

Ce n'est plus le cas si les altitudes des antennes sont très différentes (montagne). On note donc sans surprise que la

détermination de la coordonnée verticale (altitude ellipsoïdique) est toujours moins bonne que celle des coordonnées planimétriques (d'un facteur significatif, d'à peu près 2 dans les meilleurs cas, jusqu'à 5 et plus dans des configurations de réception médiocres).

- *Connaissance du contenu électro-nique* de l'ionosphère (couche très haute de l'atmosphère).

Pour les ondes radio, l'ionosphère est une couche très perturbatrice. Le signal qui s'y propage 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", bien plus onéreux que les appareils "monofréquence" devenus très courants.

- *Réflexions parasites des ondes* avant de parvenir à l'antenne.

Ces "multitrajets" se produisent à proximité de surfaces très réfléchissantes (surfaces planes à 10 cm près, et conductrices). Ils représentent un allongement de la distance antenne/satellite impossible à connaître et, donc, des erreurs de mesure parfois très gênantes, que bien des logiciels de traitement ne permettent pas de détecter facilement.

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 sans trop de difficultés des réseaux de quelques kilomètres à un centimètre près avec des appareils monofréquence et des logiciels fournis par les fabricants de matériel. Mais en mettant en œuvre les méthodes les plus raffinées (recalcul d'orbite, mesures bifréquences, observations longues, etc...), des chercheurs savent mesurer des distances de plusieurs centaines de kilomètres, voire plusieurs milliers, avec une erreur sub-centimétrique.

Il faut ajouter une information générale importante : les informations émises par les satellites sont volontairement "bruitées" et leur qualité est dégradée par un code réservé aux militaires américains, ce qui conduit à des qualités de localisation avec un récepteur unique de l'ordre de 50 à 100 m. La conséquence de ces brouillages (appelés AS et SA) est simplement d'exiger, en mode différentiel précis, plus de temps de mesure pour une même qualité de résultat.

## DIFFERENTS TYPES DE RECEPTEURS ET DE MODES DE RECEPTION

Il y a sur le marché une grande variété de récepteurs GPS.

Les plus nombreux, les récepteurs destinés à un usage isolé, ne travaillent que sur la fréquence L1 et ne mesurent pas

la phase du signal reçu. Ces récepteurs sont destinés à la navigation automobile (guidage intelligent en complément d'une base de données cartographique), à la navigation de plaisance, à la randonnée. Ces récepteurs sont fabriqués à partir d'éléments électroniques qui ne coûtent qu'une centaine de francs, habillés sous un format très compact. Précision : 100 m en planimétrie, 200 m en altimétrie.

Ces appareils peuvent être associés par paire, avec, par exemple, une liaison radio entre eux. Dans ces conditions, le matériel est plus onéreux (prix de la liaison radio et d'un petit calculateur temps réel). La précision, dans la zone où la liaison radio fonctionne, est alors métrique (de 0.5 à 3 m selon les matériels).

Il existe, pour des besoins de précision plus élevés, des récepteurs ne travaillant encore que sur L1 (appelés donc "monofréquences"), mais qui mesurent la phase de la porteuse en plus des codes qui la modulent. Ces appareils n'ont d'intérêt que lorsqu'ils travaillent en mode différentiel, soit en enregistrant de part et d'autre les signaux reçus sur des mémoires de masse, soit en mode temps réel avec une liaison radio. La précision sur le vecteur orienté joignant les antennes peut alors atteindre couramment le centimètre. Les coûts, pour une paire de récepteurs, sont très variables (mémoires de masse, liaison radio...).

Ce sont des matériels professionnels, typiquement destinés aux géomètres.

Comme ils ne travaillent que sur L1, ils ne peuvent s'affranchir des effets ionosphériques. Aussi leur précision se dégrade pour des distances dépassant 10 km : le modèle d'erreur sera en planimétrie, par exemple, de 1 cm combiné avec  $2 \times 10^{-6}$  de la distance mesurée. En mode différentiel temps réel (avec liaison radio), ces équipements permettent les levers centimétriques en temps réel, qui concurrencent directement les méthodes topographiques traditionnelles, sans jamais poser de problèmes d'orientation.

Enfin, il existe des récepteurs mesurant les codes et la phase sur L1 et L2 (ils sont appelés alors "bifréquences"), avec des capacités de suivi de tous les satellites visibles, et des mémoires de masse permettant des enregistrements sur plusieurs heures. Ils permettent la mesure de grandes bases sans dégradation due à l'ionosphère, mais, de plus, les temps de mesures sont bien plus courts qu'avec des appareils monofréquences (deux fois plus de données). Ces appareils, destinés à un marché beaucoup plus limité, sont nettement plus onéreux que les précédents.

### CONTRAINTES OPERATIONNELLES POUR LES USAGERS

La contrainte principale est d'ordre expérimental : l'antenne doit être en position de recevoir au moins 4 satellites. La plupart des récepteurs reçoivent assez mal sous les feuillages, en ville les immeubles peuvent limiter considérablement la zone

visible du ciel. Donc, il existe de nombreux environnements où l'on peut être dans l'incapacité de mesurer : le matériel employé n'y est en général pour rien.

Un autre point important est relatif aux calculs effectués : que ce soit en point isolé ou sous forme de vecteur orienté allant d'une antenne de récepteur à une autre, les résultats sont purement géométriques, et n'ont d'utilité que si l'on connaît le système de référence employé. Ils sont disponibles sur un ellipsoïde international (WGS 84), et ne pourront être fournis dans un autre système que si les paramètres de transformation sont connus du logiciel : ceci peut poser de graves problèmes dans certains pays, en particulier si le système de référence national n'est pas basé sur des mesures spatiales homogènes en précision (par exemple après ré-observation par GPS).

Par ailleurs, les mesures GPS sont géométriques, c'est à dire qu'aucun lien n'est effectué avec le champ de pesanteur terrestre. Or, les systèmes d'altitudes nationaux sont tous référencés sur le champ de pesanteur terrestre : la surface d'altitude nulle étant très voisine d'une surface équipotentielle du champ de pesanteur, le géoïde. Cela revient à dire que les mesures GPS ne peuvent concourir à des déterminations d'altitudes que si le géoïde est connu avec une grande précision, ce qui n'est le cas que dans quelques pays. Il faut donc faire extrêmement attention à la coordonnée d'altitude délivrée par le GPS : il ne s'agit jamais d'une altitude

(sauf correction de géoïde incluse dans le post-traitement si de telles données sont disponibles, ce qui peut être le cas en France compte tenu de la disponibilité de la grille de correction RAF 98), mais une grandeur géométrique qui en est proche.

### Evolution de la qualité d'un référentiel national

Pendant des siècles et jusqu'aux années 1990, les réseaux géodésiques nationaux étaient obtenus par triangulation, avec des mises à l'échelle assez difficiles puisque les mesures de distances n'ont pu être effectuées facilement sur grandes distances que depuis les années 70. L'histoire de la conception globale d'un réseau impliquait, par suite des imperfections des procédés employés, des modèles d'erreurs très complexes. Typiquement, les coordonnées diffusées en France pour la NTF s'écartaient des valeurs exactes (que l'on aurait obtenues si tout avait été parfait) de grandeurs d'autant plus élevées que l'on s'éloignait de Paris, pouvant par exemple atteindre 10 mètres vers Nice. Le référentiel faisant foi n'était donc pas le référentiel théorique, mais celui réellement disponible au travers de ses bornes et de leurs coordonnées (fausses) publiées. D'où des difficultés sans fin lorsque les bornes étaient détruites et reconstruites : rien ne permettant de garantir que la re-détermination aurait les mêmes erreurs que la détermination ancienne. On a coutume de présenter les modèles d'erreurs de la NTF sous la forme "1 cm/km", erreur

purement relative, sans trop évoquer l'erreur absolue (pouvant donc atteindre plusieurs mètres) des coordonnées publiées. Ceci avec une excellente excuse : personne ne s'intéresse à des coordonnées absolues fausses de 10 m à Nice, mais tous sont concernés par l'erreur relative entre deux points proches. Hors, celle-ci était inférieure à 5 cm entre deux points éloignés de 5 km. Le problème d'erreurs absolues se pose surtout lorsqu'on passe d'un système à un autre, pour passer, par exemple, de la NTF au référentiel italien dans notre cas : personne ne devra alors s'étonner que le simple changement de coordonnées puisse être entaché d'erreurs atteignant le mètre...

Le modèle d'erreurs, avec la géodésie moderne utilisant le GPS précis appuyé sur la référence mondiale, est complètement différent. On peut alors parler d'erreur absolue, par exemple de 2 cm pour le RBF (réseau de base français, observé par GPS vers 1995), et guère plus (moins de 5 cm en général) pour la NTF (triangulation française terminée vers 1980) recalculée en s'appuyant sur le RBF et le densifiant, en quelque sorte.

### LES "GPS" RUSSES ET EUROPEENS

Il existe un système russe équivalent du GPS, le GLONASS, lui aussi en phase opérationnelle à titre militaire. De nombreuses démarches internationales visent à obtenir, en y ajoutant quelques autres contributions (Européenne, Japonaise)

sous forme de satellites géostationnaires (pour l'Europe il s'agit d'EGNOS), un système pleinement opérationnel pour les applications civiles comme la navigation aérienne et navale. Le GPS ne peut en effet pas servir à ce but tout seul, puisqu'il reste sous le commandement direct du Ministère de la Défense américain qui peut à tout instant le désactiver sans préavis. Dans cette logique, l'Agence Spatiale Européenne a également engagé le projet Galileo, qui pourrait vers 2008 constituer une alternative de grande qualité au GPS.

## LES STATIONS PERMANENTES

Pour les professionnels de l'information géographique, le GPS ne présente une utilité qu'avec une précision allant du centimètre au mètre. Cela implique, comme nous l'avons vu, un fonctionnement en mode différentiel : un appareil est sur un point de coordonnées connues, l'autre sur le point à déterminer.

### *Soulignons encore les différences entre variantes existantes :*

- en matière de matériel : la précision de la "détection à bon marché", destinée aux besoins du grand public, reste limitée aux alentours de un mètre, car l'on ne mesure pas la phase du signal émis par les satellites mais uniquement sa modulation ("mesure de codes"). Pour arriver à une précision de l'ordre du centimètre, on mesure la phase sur une ou deux fréquences, et le prix du matériel s'en ressent considérablement.

- en matière de transfert de données : le calcul exige de connaître les mesures obtenues sur les deux stations. Si le transfert de données est effectué en temps réel par liaison radio, alors on peut également obtenir des coordonnées en temps réel. Mais il est possible de se satisfaire de traiter les deux lots de données en temps différé - par exemple lors du retour au bureau. Cela évite le souci d'établir, puis d'entretenir, une liaison radio, mais enlève toute certitude que les données mesurées soient bonnes. La certitude est pourtant un "sous-produit" normal et fort apprécié d'un calcul de coordonnées en temps réel.

- en matière de type de traitement des données possible : sur des bases courtes (typiquement moins de 15 km), il est possible de mesurer et calculer en mode "statique rapide", avec des temps d'observation réduits à quelques minutes. Mais lorsque la station de référence est plus éloignée, (voire beaucoup plus : on sait calculer des bases de plus de 5000 km), le temps de mesure devient plus long et se compte en heures, voire en journées. Il y a donc actuellement un saut quantitatif dans la valeur économique du GPS : sur bases courtes le "GPS temps réel" serait souvent un bon concurrent du tachéomètre s'il fallait n'amortir qu'un appareil seulement au lieu de deux.

Le concept de "station permanente GPS" est issu de telles considérations.

Il faut en effet bien se rappeler que la grande majorité des levers se font dans les agglomérations, là où la densité de population est grande. C'est là qu'une baisse significative du coût de mesure sera la plus intéressante, même si l'emploi du GPS n'y est pas facile, à cause des masques formés par les bâtiments ou la végétation urbaine. Pour réduire fortement l'investissement initial requis, il y a donc un grand intérêt à mettre en commun une station GPS unique, à mettre les données enregistrées en permanence à la disposition de tous, afin que chacun puisse travailler en GPS en n'utilisant qu'un seul récepteur. Et en gardant à l'esprit ce seuil actuel de l'ordre de 15 km, on comprend qu'il est possible d'optimiser la dépense globale en installant une station permanente dans chaque agglomération de taille significative. La charge logique en revient alors au service technique de la ville, puisque les administrés en sont les principaux bénéficiaires.

L'installation d'une liaison hertzienne locale permettant le temps réel précis (mode dit "RTK" pour Real Time Kinematic) présente souvent des difficultés (installation un émetteur radio actuellement peu aisée, et subsistance de zones "d'ombre" dans les agglomérations, causées par des bâtiments empêchant une réception correcte du signal radio). Mais la situation devrait évoluer rapidement à cause de la généralisation prévue sous peu de GSM (téléphones cellulaires) à grand débit de données (on prévoit 2

MB/s disponible vers 2002). Si le prix de la liaison n'est pas excessif, cela permettra une généralisation rapide du temps réel. Pour l'instant, une bonne solution consiste à mettre les données à disposition sur un serveur (Internet par exemple), avec un différé n'excédant pas 1 heure par exemple. Ainsi les équipes rentrant du terrain téléchargeront leurs données de la station de référence et calculeront tous leurs points levés, sans perdre de temps. Il reste que l'installation d'une liaison temps réel n'est pas exclusive d'un post traitement, que l'on emploiera par exemple lorsque la liaison radio est mauvaise.

Toutefois dans la comparaison entre temps réel et temps différé, il ne faut pas oublier les points suivants :

- Une mise à disposition des données de référence, par Internet, en temps légèrement différé, restera probablement gratuite de façon durable, sans avoir à acquérir un matériel particulier. Un format standard, le RINEX, existe pour ces échanges, il est déjà largement pratiqué,

- En revanche, la mise à disposition d'une liaison temps réel ne bénéficie aujourd'hui pas d'une standardisation complète des formats. Elle exige un matériel complémentaire de réception des données temps réel, directement compatible avec le matériel RTK de la station d'émission des données, et n'aura finalement pas de raison d'être gratuit.