

Le développement du positionnement par satellites

Le développement du positionnement par satellites a commencé au début des années 1970 aux Etats-Unis et il a abouti à la mise en service du GPS à partir de 1993. La qualité de ses performances et la multiplicité de ses applications militaires, puis civiles (en particulier pour les utilisateurs de téléphones mobiles) ont conduit au lancement, dans le monde, de plusieurs projets concurrents, notamment, en Europe, avec le projet Galileo...

par **Raymond ROSSO***

Avec la mise en service progressive du système Galileo à partir de 2013, avec celle d'une nouvelle génération de satellites GPS à partir de 2014, ainsi qu'avec l'arrivée en phase opérationnelle d'autres systèmes concurrents, le positionnement par satellites va disposer d'une infrastructure spatiale inégalée qui va permettre d'envisager de nouvelles applications, pour le plus grand bénéfice des professionnels et du grand public. Le développement de ces applications s'appuie sur les technologies de l'information et de la communication (en particulier dans le domaine de la téléphonie mobile).

INTRODUCTION

La définition de systèmes de positionnement par satellites a commencé aux Etats-Unis, dès les années 60. Elle a donné naissance au système GPS, le *Global Positioning System*. Le programme GPS est financé et dirigé par le ministère de la Défense des Etats-Unis. Aujourd'hui, le système GPS comprend trente-deux satellites et des lancements sont régulièrement effectués dans le but de remplacer des satellites défectueux ou arrivés en fin de vie. La fabrication d'une nouvelle génération de satelli-

tes, (la troisième, depuis le début du programme) vient d'être lancée l'an dernier (2008) et les premiers satellites de cette génération devraient commencer à être mis en orbite à partir de 2014.

En parallèle avec les Etats-Unis, la Russie a mis, elle aussi, en place un système similaire de positionnement par satellites : le système Glonass. Ce système, composé en 1996 de 24 satellites en orbite, a vu leur nombre diminuer progressivement, pour se réduire à 6 satellites opérationnels, à la fin de l'année 2000. En 2001, le Gouvernement russe a décidé de reconstituer la constellation des 24 satellites initiaux, d'ici 2010, et les lancements ont repris, avec une assez bonne régularité. La fabrication d'une nouvelle génération de satellites Glonass, dite Glonass-K, disposant d'une durée de vie nettement améliorée, est en cours et les lancements devraient débuter à partir de 2009. La durée de vie est passée de 3 ans pour les satellites actuellement en orbite, à 7,5 ans pour la série en cours de lancement (dite Glonass-M), et elle sera portée à 12 ans, pour les futurs satellites (Glonass-K).

En 1997, a été lancé, au niveau européen, le développement d'EGNOS, un système de renforcement régional

* Ingénieur Général des Ponts et Chaussées,
Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de
l'Aménagement du territoire.

de GPS et de Glonass, destiné à améliorer la précision du positionnement et le niveau de sécurité, pour permettre le guidage des avions en phase d'approche des pistes d'atterrissage, avec une précision équivalente à celle des instruments actuels, dits ILS Cat I. Le système EGNOS fonctionne ; sa certification, par la Direction générale de l'aviation civile française, est attendue pour la fin 2009 ou le début 2010.

En outre, l'Union européenne a décidé, en 2002, de lancer le développement de son propre système mondial de positionnement par satellites, le système Galileo. L'objectif visé est de doter l'Europe d'un système de positionnement par satellites, qui soit européen et autonome, qui assure une couverture mondiale, qui soit précis et robuste, et qui soit compatible et interopérable avec les systèmes existants (GPS et Glonass). Deux satellites expérimentaux, Giove A et Giove B (voir la figure 1) ont été lancés (respectivement en 2006 et en 2008). Le système Galileo dans sa configuration complète, soit 30 satellites, doit être mis en service en 2013.

Enfin, la Chine a décidé, à son tour, de déployer son propre système mondial de positionnement par satellites, le système Beidou – Compass. Les lancements des premiers satellites ont déjà commencé et ce système devrait être opérationnel à l'horizon 2013. Ainsi, en 2015, les usagers du positionnement par satellites pourraient avoir accès à une centaine de satellites, soit à quatre fois plus qu'actuellement (avec le seul GPS).

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les quatre systèmes de positionnement par satellites (GPS, Glonass, Galileo et Beidou) utilisent le même principe de fonctionnement : chaque satellite émet en permanence un signal transportant une information sur la position du satellite et l'heure précise de l'émission (déterminée par une horloge atomique ultra-précise embarquée dans le satellite) ; l'utilisateur est équipé d'un récepteur, qui mesure les instants de réception des signaux provenant des satellites dans son champ de visibilité. La détermination de la position du récepteur consiste en la résolution d'une équation à quatre inconnues : la position géographique du récepteur (latitude, longitude), son altitude et le biais de l'horloge de mesure du récepteur. Il faut donc quatre satellites « visibles » pour déterminer une position (avec, en prime, un sous-produit disponible : la mesure précise du temps). Pour que le récepteur fonctionne sur toute la surface du globe (ou dans son voisinage : avions, satellites), il faut qu'il puisse « voir » en permanence au minimum 4 satellites et que la répartition géométrique des satellites positionnés au-dessus de lui soit la plus uniforme possible. C'est ce qui explique le nombre important des satellites à placer sur orbite : 24 satellites représentent le minimum requis pour le GPS actuel et pour le Glonass, et ce minimum sera de 30 pour les 4 systèmes futurs.

Les spécialistes utilisent le terme de « constellation » pour décrire l'ensemble des satellites d'un même système. Ce terme désigne usuellement, en astronomie, un ensemble d'étoiles paraissant proches les unes des autres dans le ciel. En astronautique, une constellation désigne un ensemble de satellites identiques utilisés pour une même application. La constellation GPS est constituée nominalement de 24 satellites, répartis 4 par 4 sur 6 plans orbitaux ; la constellation GPS future en comprendra 30, répartis sur 6 plans orbitaux. La constellation Glonass, en cours de renforcement, devrait comprendre 24 satellites répartis sur trois plans orbitaux ; la future version devrait comprendre 30 satellites, répartis sur 3 plans orbitaux (tout comme la constellation européenne Galileo et la constellation chinoise Beidou). Les orbites utilisées sont généralement circulaires, à moyenne altitude (au voisinage des 20 000 km), avec une inclinaison par rapport à l'équateur voisine de 60°, permettant ainsi de couvrir les hautes latitudes terrestres.

Les satellites de navigation émettent sur plusieurs fréquences, situées dans des bandes de fréquences attribuées à l'échelon international. Les satellites GPS actuels émettent sur deux fréquences, notées L1 (1 575,42 MHz) et L2 (1 227,6 MHz). Les futurs satellites GPS émettront aussi sur une troisième fréquence, notée L5 (1 176,45 MHz). Tous les satellites GPS émettent sur les mêmes fréquences porteuses ; le système GPS fonctionne sur le principe de l'accès multiple à répartition de codes, en utilisant la technique d'étalement de spectre par séquence directe. A chaque satellite correspond un code d'étalement, pseudo-aléatoire, qui lui est propre ; le récepteur, qui connaît les codes des satellites, effectue un calcul de corrélation entre les signaux reçus et le signal recherché.

Les satellites Galileo utiliseront le même principe que les satellites GPS (l'accès multiple à répartition de codes), en recourant à la technique d'étalement de spectre par séquence directe. Un accord entre les États-Unis et l'Union européenne a été signé, en 2004, sur le choix des fréquences de Galileo ainsi que des modulations, afin d'assurer la compatibilité et l'interopérabilité entre les deux systèmes. Selon cet accord, les satellites Galileo émettront, en permanence, sur plusieurs fréquences voisines de celles du GPS, voire en superposé avec elles : elles sont notées E1 (superposée à L1), E5a (superposée à L5), E5b (1 207,14 MHz) et E6 (1 278,75 MHz).

Les satellites Glonass utilisent une autre technique d'accès multiple, dite à répartition de fréquences : chaque satellite émet sur des fréquences qui lui sont propres. Ces signaux sont notés L1G (autour de 1 602 MHz) et L2G (autour de 1 246 MHz). Les ondes porteuses sont modulées au moyen de la technique d'étalement de spectre par séquence directe. Les fréquences choisies, voisines de celles de GPS et de Galileo, ne posent aucun problème de compatibilité. Les futurs Glonass de nouvelle génération émettront aussi sur les fréquences L1 et L5 du GPS, en utilisant les mêmes modulations que le

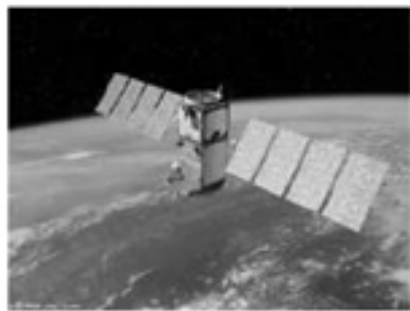


Figure 1. Le Satellite GIOVE-B (Photo ESA).

GPS, assurant ainsi l'interopérabilité tant avec GPS qu'avec Galileo.

Pour les satellites du réseau chinois Beidou, le plan de fréquences, récemment annoncé, soulève un certain nombre de difficultés pour Galileo : actuellement, une réflexion est menée par la Chine et l'Union européenne, afin d'essayer de trouver une solution acceptable pour assurer la compatibilité et l'interopérabilité entre les deux programmes.

Des satellites géostationnaires sont également utilisés en complément aux constellations à orbite à moyenne altitude. Trois systèmes de ce type sont à ce jour déployés dans le monde : WAAS (aux Etats-Unis), EGNOS (en Europe) et MSAS (au Japon). L'Inde a prévu de déployer son propre système, baptisé GAGAN. Ces systèmes assurent la surveillance des signaux émis par les satellites GPS et Glonass au moyen d'un réseau de stations de surveillance au sol. En cas de détection d'un signal anormal, un message d'erreur, généré par un centre de contrôle, est transmis aux récepteurs des usagers *via* les satellites géostationnaires-relais. Les centres de contrôle déterminent aussi les corrections qui doivent être apportées aux mesures brutes de distance sur les satellites, afin de corriger des erreurs dues à la propagation des ondes dans l'ionosphère, ce qui permet d'en améliorer sensiblement la précision.

LES SERVICES FOURNIS

Avec le GPS, les usagers peuvent bénéficier de deux niveaux de service, selon qu'il s'agit de civils ou de militaires. Pour les civils, le niveau de service est appelé service de positionnement standard. Il utilise un seul signal, émis sur la fréquence L1. Depuis qu'en 2000, le Gouvernement américain a décidé d'interrompre la dégradation volontaire de la précision du positionnement standard, celle-ci est devenue bien meilleure : aujourd'hui, le niveau de performance spécifié est de 9 m horizontalement et de 15 m verticalement, et ce dans 95 % des cas et pour l'ensemble du globe. Les futurs satellites GPS émettront des signaux supplémentaires à destination des utilisateurs. En outre, le signal L1 sera modifié : il utilisera une modulation plus perfor-

mante, similaire à celle retenue pour Galileo sur cette même fréquence. Les performances de positionnement, lorsque tous ces signaux seront disponibles, seront largement supérieures à celles obtenues actuellement avec un seul signal.

Le système Glonass offre, lui aussi, deux niveaux de services : un niveau standard, pour les utilisations civiles, et un niveau de haute précision pour les applications militaires. Ses performances de positionnement spécifiées pour le service ouvert sont voisines de celles qu'offrait le GPS avant 2000, avec une marge d'erreur de positionnement de l'ordre de 100 m, horizontalement.

Galileo offrira quatre niveaux de service : un service « ouvert », un service « commercial », un service « sauvegarde de la vie humaine » et, enfin, un service « public réglementé » :

- le service ouvert est le service de base, analogue au service de positionnement standard du GPS. Il est gratuit et les signaux émis sont d'accès libre. La précision de positionnement spécifiée est de 4 m horizontalement et 8 m verticalement ;
- le service commercial est destiné aux applications nécessitant une précision supérieure à celle du service ouvert, ainsi qu'une meilleure résistance aux brouillages, et une meilleure intégrité ;
- le service de sauvegarde de la vie humaine est un service dédié aux applications critiques en matière de sécurité (il s'agit notamment des applications de guidage des avions civils à proximité du sol, lors des approches sans visibilité en phase d'atterrissage, qui requièrent un haut niveau d'intégrité) ;
- enfin, le service public réglementé (PRS) est réservé aux applications des services gouvernementaux (comme la police, la douane, la sécurité civile, etc.) L'accès à ce service sera contrôlé par les autorités compétentes des Etats membres de l'Union européenne.

Beidou prévoit deux types de services à couverture mondiale : un service ouvert, assurant une précision de positionnement de 10 m et un service, dit « autorisé », réservé aux seuls utilisateurs habilités. La constellation de satellites placés sur orbite moyenne sera complétée par des satellites géostationnaires assurant des services complémentaires dans une zone de service restreinte, avec des performances de positionnement équivalentes à celles fournies par EGNOS en Europe. Un service de transmission de messages (analogue au projet américain Geostar, arrêté dans les années 80 pour des raisons financières) sera aussi disponible *via* les satellites géostationnaires.

POSITIONNEMENT PAR SATELLITES ET TIC

Les applications civiles du positionnement par satellites sont multiples, et elles couvrent de très nombreux domaines : navigation aérienne, navigation maritime, navigation des satellites en orbite basse, transports ter-

restres, téléphonie mobile, géodésie, topographie, diffusion du temps, synchronisation des réseaux de transmission, agriculture de précision, travaux publics, exploitation minière, exploitation forestière, recherches de ressources naturelles dans le sous-sol et au fond des océans, etc. Dans la partie suivante de cet article, nous présenterons les deux applications les plus répandues, dont le développement s'effectue grâce à l'appui des technologies de l'information et de la communication, à savoir la navigation routière et la téléphonie mobile. La plupart des informations présentées ici sont extraites d'une étude récente (dont les références figurent à la fin de cet article), publiée par la société France Développement Conseil.

La **navigation routière** est la principale utilisation actuelle « grand public » des systèmes GPS. Les données de positionnement, associées à une carte numérique, permettent de se situer dans son environnement et de bénéficier d'un service de guidage dynamique vers une destination donnée. Le principal type de récepteur commercialisé pour cette application est le PND (*Personal Navigation Device*) : il s'agit d'un boîtier de dix centimètres de longueur, de sept de largeur et de deux centimètres d'épaisseur, environ, que l'on fixe au pare-brise de son véhicule au moyen d'une ventouse (voir la figure 2). Un câble d'alimentation électrique est relié à la prise de l'allume-cigare. La face avant de l'appareil est occupée par un écran d'affichage, dont la diagonale mesure une douzaine de centimètres (l'antenne de réception est incorporée).

Les GPS routiers peuvent déterminer le trajet à emprunter, grâce aux cartes numériques (développées par les sociétés Navteq et Tele Atlas, en particulier) et au *map-matching* (mise en corrélation avec ladite carte). La mise à jour des cartes numériques peut être effectuée directement par les usagers en se connectant au serveur web du fabricant du récepteur. A la carte routière est associée une base de données géo-référencées, dite des « points d'intérêt » : il s'agit des stations service, des restaurants, des hôtels, des monuments, des limitations de vitesse, du positionnement de radars automatiques de contrôle de la vitesse des véhicules, etc. La mise à jour de la base de données des « points d'intérêt » est, elle aussi, possible, *via* Internet. Ces mises à jour sont généralement payantes.

Fondée en 1991, la société hollandaise TomTom est le premier fabricant de PND dans le monde, avec plus du tiers du marché. La dernière application développée par la société TomTom, sous le nom de *TomTom HD Traffic*, concerne l'information de trafic « haute définition ». Ce service, d'ores et déjà opérationnel dans d'autres pays européens, devrait être lancé en France au premier semestre 2009 avec SFR. La force du système HD Traffic réside dans son utilisation du réseau de téléphonie mobile et dans le concours des utilisateurs, qui non seulement obtiennent des informations sur l'état du trafic, mais aussi en diffusent. De manière anonyme, le gestionnaire du service (SFR, pour la France) collectera la vitesse et la direction des équipements mobiles, dans

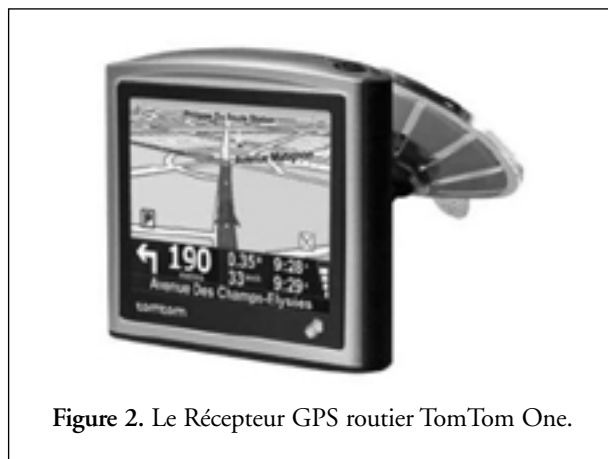


Figure 2. Le Récepteur GPS routier TomTom One.

les voitures en déplacement, pour les transmettre aux GPS TomTom connectés. Le service assurera une couverture de tout le territoire français. De plus, la mise à jour des données sera effectuée toutes les deux minutes.

Une autre innovation, un peu plus ancienne, proposée par TomTom, est sa technologie *TomTom Map Share*. Cette technologie permet à chaque utilisateur d'apporter des corrections aux cartes. Ce service, offert gratuitement aux utilisateurs de TomTom, se base sur une communauté d'utilisateurs qui a d'ores et déjà dépassé le million de membres.

TomTom se transforme aussi, avec l'acquisition récente de Télé Atlas, un des deux leaders mondiaux de la cartographie numérique. La société finlandaise Nokia, qui adopte la même stratégie, a racheté l'autre leader de la cartographie numérique : Navteq.

D'après l'étude de la société France Développement Conseil (FDC), 39 millions d'appareils mobiles de navigation ont été vendus en 2007, dont 90 % de PND. Pour la seule Europe, 15 millions de PND ont été écoulés sur le marché (à comparer aux 11 millions des Etats-Unis). La France représente, à elle seule, 3 millions d'unités vendues en 2008. Si les ventes progressent régulièrement en nombre d'unités, il n'en est pas de même en ce qui concerne la valeur du marché associé : une forte concurrence a mené à une guerre des prix très agressive, qui a entraîné la disparition d'un certain nombre de fabricants.

La téléphonie mobile : 2008 a enregistré une forte progression du nombre de téléphones mobiles de troisième génération intelligents (les « *smartphones* ») intégrant la fonction de positionnement par satellites. Selon la société FDC, le nombre de puces GPS intégrées dans les *smartphones* a plus que doublé au cours du 2^e trimestre 2008, atteignant 10,4 millions d'unités dans la région Europe + Moyen-Orient + Afrique. Ces *smartphones* vont ainsi rapidement envahir le marché, et même faire concurrence aux PND embarqués à bord des véhicules. Même si ces derniers offrent des fonctions mieux adaptées à la navigation routière, il est très probable que, dans la période de crise économique que nous traversons, beaucoup d'utilisateurs préféreront se contenter de celles offertes en la matière par leur *smartphone*.



Figure 3. Le Smartphone Nokia.

Ces téléphones mobiles intelligents offrent des fonctions, toujours plus avancées et perfectionnées, qui dépassent largement leur fonction première de communication. Les téléphones les plus avancés intègrent ainsi une fonction de réception des signaux GPS (voir la figure 3). Cette fonction peut servir à de nombreuses applications géo-localisées et tout particulièrement à la navigation piétonne ou routière. À ce titre, deux familles de solutions peuvent être identifiées : les solutions *on-board*, qui intègrent la totalité de la cartographie numérique dans le téléphone, et les solutions *off-board*, qui téléchargent la cartographie locale depuis des serveurs, afin de situer l'utilisateur et de le guider. Nokia est une société finlandaise spécialisée dans les technologies mobiles : elle est principalement connue pour ses téléphones mobiles – secteur dont elle est le leader mondial. En ce qui concerne le GPS, Nokia y voit un moyen de se différencier de la concurrence, d'améliorer l'expérience de l'utilisateur et, surtout, de commercialiser des services. Ainsi, le groupe a développé des téléphones portables intégrant une puce GPS et une fonction A-GPS (*Assisted GPS*) : cette fonction permet de réduire le laps de temps nécessaire à l'acquisition des satellites, lors d'un démarrage à froid ou à chaud – après une interruption momentanée – par une récupération des paramètres orbitaux des satellites directement auprès d'un serveur dédié, via le récepteur intégré au téléphone mobile.

L'objectif que s'est fixé Nokia, est que le taux d'équipement de ses téléphones en récepteurs GPS dépasse le seuil des 50 % entre 2010 et 2012. Nokia a aussi mis au point son propre logiciel de navigation : *Nokia Maps*. En 2008, Nokia a réalisé la plus importante acquisition de toute son histoire en rachetant l'éditeur de cartes numériques Navteq. Avec l'acquisition de ce leader de la cartographie, Nokia se positionne de manière idéale dans la course au marché des téléphones mobiles équipés de GPS. La solution de navigation Nokia Maps proposée par Nokia est du type *off-board* : les cartes nécessaires au guidage sont donc téléchargées lors de chaque utilisation. Cela implique une augmentation du trafic de données, et donc une hausse des revenus des opérateurs de téléphonie mobile.

En général, les coûts des services géo-localisés (dits LBS : *Location-Based Services*) sont relativement élevés

et constituent, de fait, un frein à la progression de ces services et à la demande de Smartphones équipés de GPS. Cependant, il existe d'autres facteurs qui limitent l'utilisation du GPS à partir de téléphones mobiles : la taille de l'écran desdits téléphones est plus petite que celui des PND, et cela rend l'utilisation inconfortable, surtout pour la navigation (notamment en voiture) ; le temps de positionnement à froid est encore trop long pour une utilisation « nomade » ; la puce GPS entraîne un surcroît de consommation électrique, au détriment de l'autonomie de l'appareil. Ce handicap ne sera sans doute pas levé dans un proche avenir, et limitera l'utilisation des téléphones portables pour certaines applications du GPS.

CONCLUSION

Internet et la navigation par satellites sont deux techniques, qui ont été conçues en même temps, à la fin des années 60, aux Etats-Unis, par le ministère américain de la Défense. Leur développement s'est considérablement accéléré à partir du moment où ces techniques ont été mises à la disposition du grand public.

Le GPS a su offrir aux professionnels comme aux particuliers, un moyen de positionnement financièrement abordable, précis, fiable et disponible 24 heures/24 en tout point du globe et, ce, quelles que soient les conditions météorologiques. Le champ de ses applications est si étendu que 30 ans après la mise en orbite du premier satellite, et près de 15 ans après sa mise en œuvre opérationnelle, de nouvelles applications ne cessent d'apparaître, tandis que le marché des équipements et services associés poursuit sa croissance, inexorablement.

L'arrivée prochaine des nouvelles constellations Galileo (européenne), Glonass (russe) et Beidou (chinoise) va permettre aux usagers de disposer d'un nombre de satellites bien plus important, en visibilité à un instant donné : le traitement simultané des signaux envoyés par des satellites appartenant à plusieurs constellations devrait améliorer sensiblement les performances des services basés sur la localisation. En environnement urbain, en particulier, il y aura toujours un nombre de satellites suffisant pour se positionner, ce que ne permet pas de faire, aujourd'hui, le seul GPS.

La mise en service des nouvelles constellations requerra sans doute encore un certain délai, en raison de la difficulté des problèmes techniques à résoudre (comme celui de la mise au point des horloges atomiques embarquées). En attendant, il est possible, et même recommandé, de commencer à développer des applications en utilisant les signaux GPS disponibles seuls, ou renforcés par les signaux émis par les systèmes de complément géostationnaires, comme EGNOS, dont la certification est imminente.

Le développement de nouvelles applications à destination du grand public devra s'opérer en s'intégrant dans le processus actuel de développement des nouvelles

technologies de l'information et de la communication : l'Internet (via les fixes et mobiles) et la téléphonie mobile de troisième génération. Les services basés sur la localisation sont appelés à un développement très important ; c'est là, sans aucun doute, un domaine où les innovations devraient se développer dans un proche avenir.

BIBLIOGRAPHIE

« Etat des lieux des usages des systèmes GNSS et Panorama des marchés associés de produits et de services », Rapport final, 28 novembre 2008, France Développement Conseil (FDC).