

Les principes du positionnement par satellite : GNSS

Renaud Lahaye¹, Sylvie Ladet²

Résumé. Les GNSS (global navigation satellite system) parmi lesquels le système américain GPS (global positioning system) ont tous pour principal objectif de donner la position et la vitesse d'un mobile à tout instant, en tout lieu et dans un référentiel global. Comme tout système basé sur des satellites, il est structuré en trois composantes qui seront détaillées afin de mieux appréhender les principes de la géolocalisation : le segment spatial (les satellites), le segment de contrôle (les stations au sol) et le segment utilisateur (le récepteur mobile). Le calcul du géopositionnement peut être basé sur deux mesures : (1) soit la mesure du temps qu'ont mis les signaux émis par au moins quatre satellites pour parcourir la distance les séparant du mobile, (2) soit le décalage de phase des signaux auquel cas un appareillage très sophistiqué doit lever des ambiguïtés (nombre des oscillations entre l'émission du signal par le satellite et la réception par le mobile). Théoriquement (1) doit donner une précision décimétrique et (2) millimétrique mais des sources d'erreur viennent la parasiter. Pour améliorer la qualité du géopositionnement il existe d'autres systèmes satellitaires (SBAS - satellite based augmentation system) et également des réseaux de stations au sol (GBAS - ground based augmentation system) pour transmettre des corrections de positionnement. Les algorithmes de repositionnement peuvent être utilisés en direct (correction différentielle en temps réel « DGPS ») ou en différé (post-traitement) pour atteindre une précision centimétrique à condition d'avoir le matériel approprié. Sur la base des principes de la géolocalisation il sera présenté les bonnes pratiques à adopter sur le terrain : bien choisir son matériel, préparer ses levées et bien mesurer les géopositionnements.

Mots clés : positionnement par satellite, GNSS, GPS, précision, géonavigateur

Introduction

Le sigle GNSS (global navigation satellite system) est le nom générique des systèmes de navigation satellitaires fournissant une couverture globale de géopositionnement (Duquenne et al., 2005). L'objectif de ce système est de donner la géolocalisation d'un mobile ainsi que sa vitesse en tout lieu du globe et dans un référentiel global. Les premiers créateurs d'un tel système sont les militaires américains (GPS : global positioning system) suivis de très près par les russes (GLONASS : GLObal nAvigation satellite system). Depuis 2000, le système GPS est devenu accessible aux populations civiles avec une précision métrique, ce qui a permis à la géolocalisation GPS de se démocratiser. A l'heure actuelle les services utilisant ces systèmes sont très nombreux et variés avec parmi les exemples les plus connus la géonavigation automobile et la randonnée.

Cette technologie est également largement utilisée dans les dispositifs expérimentaux à différents niveaux, nécessitant diverses échelles de précision et devant répondre à différentes contraintes :

- géolocalisation d'habitats, d'espèces patrimoniales, d'essences de fruitiers (précision métrique) ;
- définition du contour d'un dispositif expérimental (précision centimétrique) ;
- géonavigation appliquée à l'agriculture de précision... (précision centimétrique d'un objet en mouvement).

Il est possible de donner ici deux sens au mot précision : (1) le détail de la mesure qui dépend de l'objet à localiser. On peut estimer utile d'avoir une précision décimétrique lorsqu'il s'agit de décrire, mesurer, une parcelle mais cette précision devient sans doute inutile lorsqu'il s'agit de décrire le territoire de l'exploitation agricole (2) la justesse de la mesure, en terme d'exactitude du positionnement. Dans ce cas il s'agit de se raccorder à un système géodésique reconnu et décrit.

1 Institut de Développement de la Géomatique (IDGEO) ; 42, avenue du Général de Crouette, F-31100 Toulouse, France ; renaud.lahaye@idgeo.fr
2 UMR 1201 DYNAFOR, INRA ; 24 Chemin de Borde Rouge- Auzeville, CS 52627, F-31326 Castanet -Tolosan cedex ; France

Description du matériel et/ou méthodes

Les trois segments du système GPS

Le GNSS, comme tous les systèmes basés sur des satellites, se compose de trois segments : le segment spatial (les satellites à proprement parlé), le segment contrôle (les stations au sol qui contrôlent le bon état de marche des satellites) et le segment utilisateur (l'opérateur qui cherche à se géolocaliser avec son matériel). Nous allons ci-après détailler le système GPS.

✓ Segment spatial

Il est constitué d'une constellation de satellites transmettant des signaux radios aux utilisateurs. L'Air Force gère la constellation de manière à assurer la disponibilité d'au moins 24 satellites 95 % du temps. Le premier satellite a été lancé en 1975 et le système n'est pleinement opérationnel que depuis 1995. A l'heure actuelle 32 satellites constituent la constellation appelée NAVSTAR plus quelques-uns de déclassés pouvant être réactivés si nécessaire. Les satellites naviguent dans l'Orbite terrestre moyenne (MOE) à une altitude d'environ 20 200 km et effectuent chaque jour 2 fois le tour de la terre. La configuration des trajectoires des satellites permet de capter les signaux d'au moins quatre satellites n'importe où à la surface du globe et à n'importe quel moment. Les satellites sont équipés d'une horloge atomique et émettent en permanence sur deux fréquences L1 (1 575,42 MHz) et L2 (1 227,60 MHz) modulées par des codes et par un message de navigation (éphémérides permettant le calcul de la position des satellites) (**Figure 1**). Parmi les codes « portés » par la fréquence L1 (on parle également de Porteuse L1) on retrouve le code C/A (Coarse Acquisition, acquisition brute en français) entièrement ouvert aux civils depuis l'année 2000 et le code P (Précis) réservé aux utilisateurs autorisés par le gouvernement américain. Les récepteurs (ou « géonavigateurs », un GPS pour désigner le récepteur est un abus de langage) commercialisés dans le domaine civil utilisent le code C/A. Quelques récepteurs pour des applications de haute précision, comme la géodésie, mettent en œuvre des techniques permettant d'utiliser le code P (malgré son cryptage).

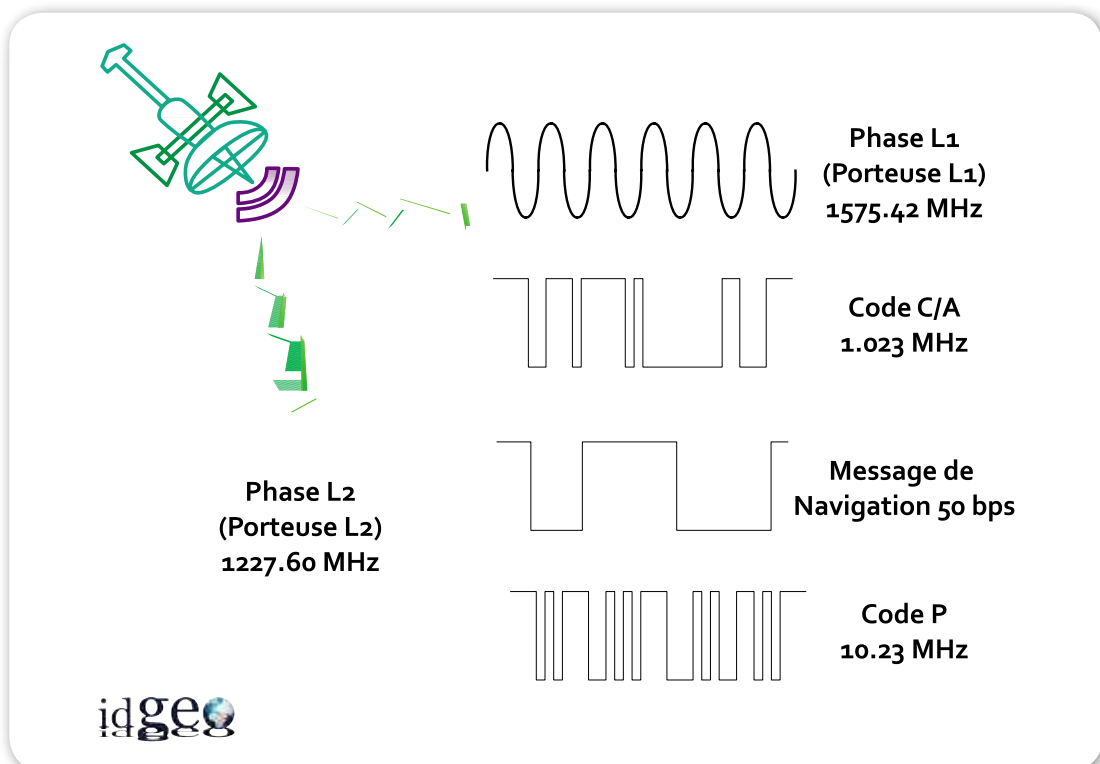


Figure 1. Structure du signal d'un satellite GPS. Deux fréquences porteuses L1 et L2 modulées sur des codes C/A, des codes P et des codes de navigation.

✓ Segment contrôle

Il s'agit d'un réseau global de stations au sol qui suivent les satellites de la constellation GPS, vérifient leurs transmissions, réalisent des analyses et leur envoient des commandes et des données (resynchronisation des horloges, rectification des orbites, ...). A l'heure actuelle le segment de contrôle comprend une station de contrôle principale, une alternative, 12 antennes de contrôle et de commande et 16 sites de suivi.

✓ Segment utilisateur

C'est l'opérateur et son matériel de réception qui « écoute » les signaux et récupère les données de chaque satellite. Le récepteur calcule la géolocalisation de son antenne. Le matériel sera plus ou moins sophistiqué selon la précision désirée et selon les contraintes du projet (mobilité de l'opérateur, fermeture du milieu, données à saisir sur le terrain...). L'utilisateur de son côté devra être sensibilisé aux bonnes pratiques du matériel et de la géolocalisation : faire attention aux masques, aux surfaces réfléchissantes, prendre en compte la géométrie des satellites...

Comment fonctionne la géolocalisation ?

La méthode la plus couramment utilisée pour déterminer la position d'un point à la surface du globe repose sur le principe de la triangulation. La triangulation permet par exemple de localiser un objet en connaissant la distance qui le sépare de 3 points de référence (**Figure 2**). En 3D il est nécessaire de rajouter une quatrième distance reliant l'objet à un autre point de référence pour connaître l'altitude, on parle alors de multilatération. Extrapolée à la géolocalisation d'un récepteur à la surface du globe, il est possible de définir les coordonnées X, Y et Z d'un point si l'on connaît les distances qui le séparent de quatre satellites. Les coordonnées du point d'intersection des sphères représentant les signaux émis par les différents satellites seront d'autant plus précises que le nombre de satellites captés sera important.

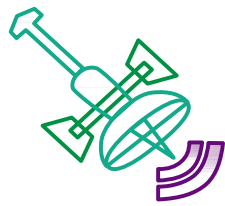


Figure 2. Principe de la triangulation pour géolocaliser un récepteur à la surface du globe. Un quatrième satellite permettra de définir l'altitude (Source : <http://www.anr-prodige.com/index.php ?n=Technologies.Geolocalisation>)

✓ Calcul des pseudo-distances satellites-récepteur

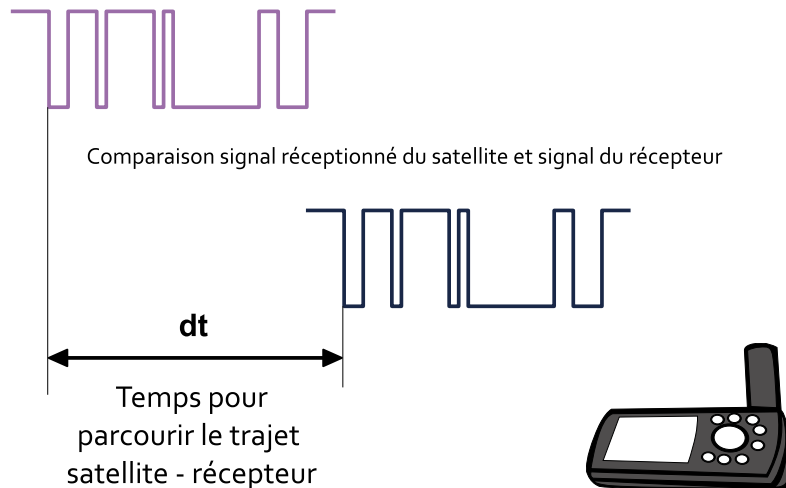
Le principe du calcul des distances séparant le récepteur d'au moins quatre satellites repose sur le temps que mettent les signaux du code C/A pour parcourir la distance séparant l'opérateur des satellites (**Figure 3**). Le temps est multiplié par la vitesse de propagation du signal (vitesse de la lumière) pour obtenir la distance satellite - opérateur. Le calcul des quatre distances permettra par multilatération de définir les coordonnées X, Y et Z de l'opérateur. La précision de cette méthode peut atteindre au mieux 1 mètre si on lui associe des corrections de positionnement (correction différentielle, cf. Lahaye et Ladet, 2014b). Des méthodes utilisant la phase de la porteuse et non le code ont été développées pour de nombreuses applications nécessitant des résolutions plus importantes.





Calcul de la distance satellite – Récepteur :
= $dt * \text{vitesse de la lumière}$

Résolution du système de 4 équations à 4
inconnues : Coordonnées X et Y, Altitude, dt



idgeo

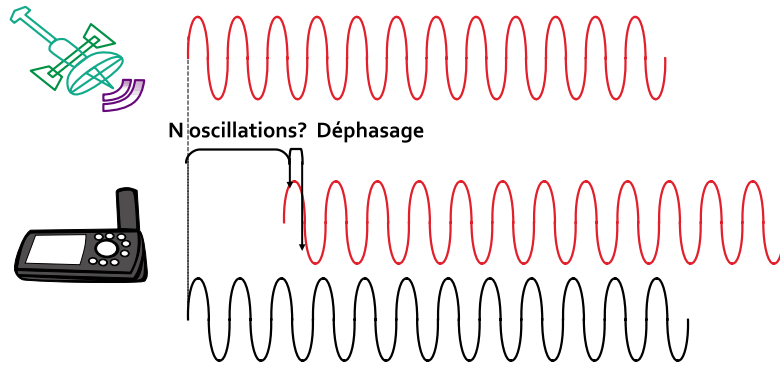
Figure 3. Géolocalisation et mesure des pseudo-distances.

✓ Utilisation des phases et levée des ambiguïtés

Le calcul de la position se base ici sur la phase de la porteuse L1 (ou L2) et non sur le code C/A comme vu précédemment. En comparant le signal émis et le signal réceptionné le récepteur peut mesurer le décalage de phase, une mesure que permet de calculer la distance séparant l'opérateur du satellite en théorie au millimètre près. La difficulté de cette méthode est liée à l'inconnue, dite « ambiguïté », du nombre d'oscillations qu'il y a eu entre l'émission et la réception du signal (**Figure 4a**). Pour lever cette ambiguïté il existe des méthodes liées à des dispositifs très longs à mettre en œuvre et qui nécessitent un matériel sophistiqué capable de gérer de lourds algorithmes. Une des méthodes couramment utilisées (**Figure 4b**) consiste à regarder les intersections des fronts d'ondes émis par les satellites avec une surface discoïdale (2D) représentant la position possible de l'opérateur, surface obtenue rapidement à partir d'une géolocalisation classique basée sur les pseudo-distances. Les intersections entre cette surface et les fronts d'ondes des signaux émis par les satellites vont représenter un maillage. Les satellites étant mobiles dans l'espace, la direction des fronts d'ondes va varier dans le temps et le maillage avec. Seule la maille où se situe l'opérateur ne varie pas, c'est là que se situe sa position précise. Devant suivre le mouvement des satellites un certain temps, l'initialisation d'un tel dispositif est très longue à mettre en œuvre. Le dispositif est également très coûteux car il fait appel à du matériel très lourd et onéreux mais il permet d'obtenir une géolocalisation millimétrique (en théorie).

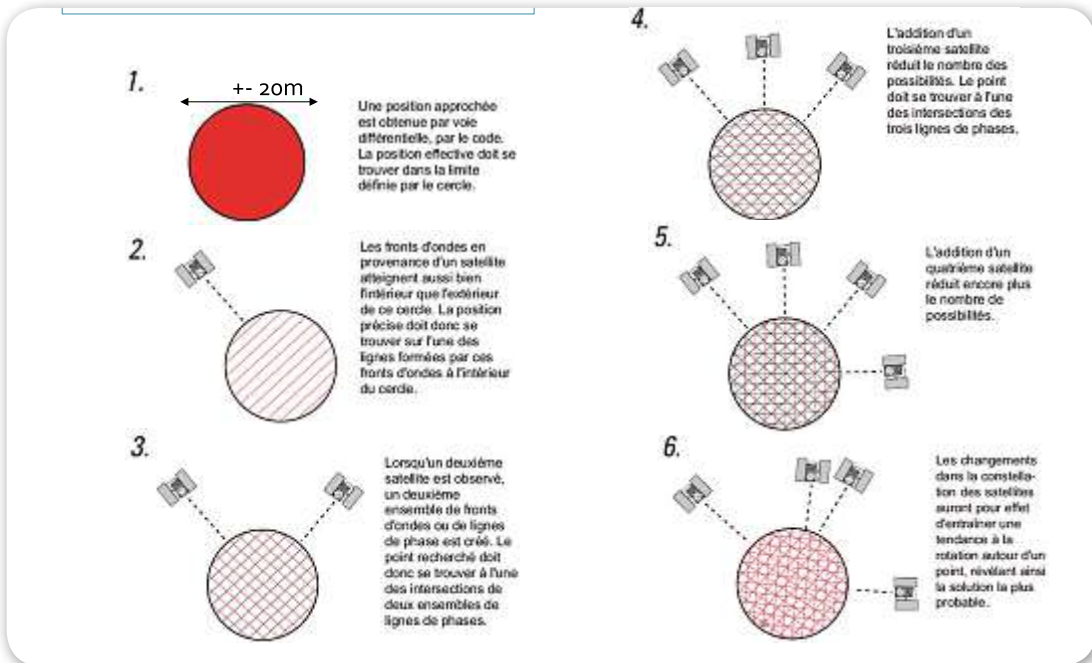
Calcul de la distance satellite – Récepteur :
 = longueur d'onde x (Déphasage + nombre d'oscillation)

Déphasage : mesure possible
 Nombre d'oscillations ? Ambiguïtés



idgeo

a)



b)

Figure 4. Géolocalisation et mesure des phases (d'après LEICA www.geoplane.com/gpsbasics.pdf)

✓ Système géodésique de référence : le WGS 84

Les coordonnées X, Y et Z sont converties par défaut par le récepteur dans un référentiel global largement utilisé sur terre, le WGS84. Les coordonnées « géographiques » ainsi converties sont mieux connues sous les termes « longitude, latitude et altitude ». La plupart des récepteurs peuvent également convertir les coordonnées vers d'autres référentiels comme le RGF93, le système géodésique officiel français. Concernant l'altitude donnée par le récepteur, il faut prendre en compte que celle-ci est calculée par rapport à l'ellipsoïde du système géodésique et non par rapport au géoïde. Certains récepteurs incluent des modèles de géoïde qui permettent de corriger l'altitude selon la position du récepteur.



Sources d'erreur

La précision de la géolocalisation d'un récepteur est en théorie métrique si on utilise les pseudo-distances (code C/A) et millimétrique si la phase est utilisée (porteuse L1 ou L2). En pratique les précisions observées sont généralement comprises entre 3 et 50 mètres et quelques centimètres, respectivement. De nombreuses erreurs peuvent venir entacher le calcul de la géolocalisation (**Figure 5**). Certaines de ces erreurs pourront être corrigées par des modèles et algorithmes et d'autres pourront être évitées par des bonnes pratiques.

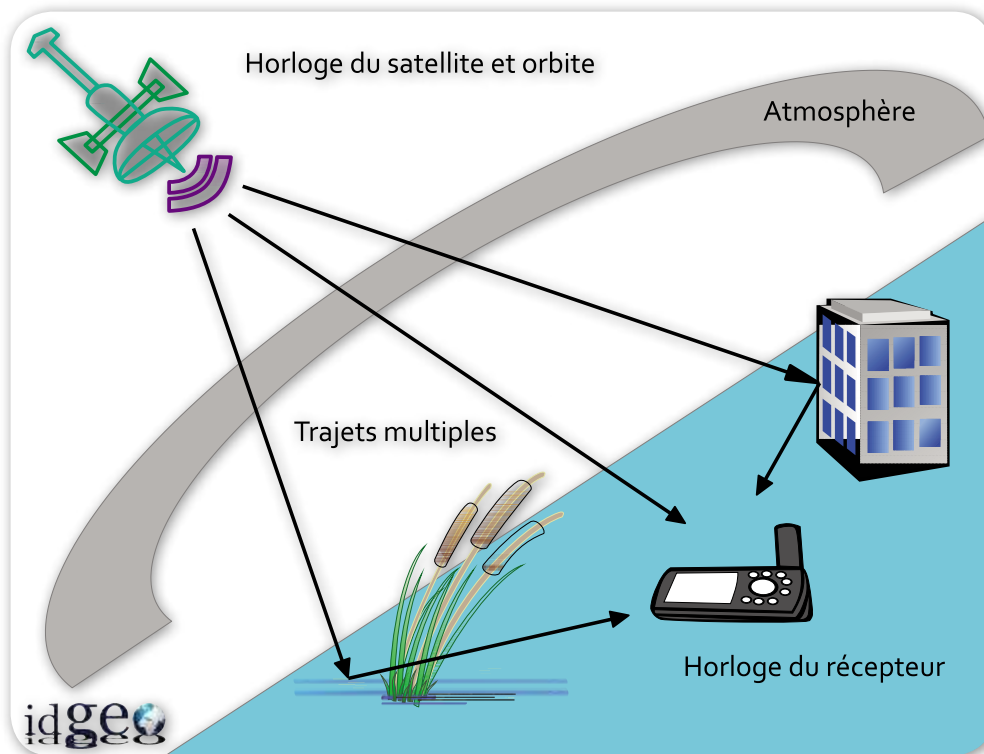


Figure 5. Principales sources d'erreur impactant la précision du calcul de la géolocalisation.

✓ Synchronisation des horloges

Bien que les horloges embarquées à bord des satellites soient extrêmement précises et que les stations de contrôle surveillent leur synchronisation, elles peuvent être sujettes à de légères dérives et entraîner des erreurs affectant la précision de la position (1 ns = 30 cm). L'horloge du récepteur a rarement la même précision que celle des satellites. Seules les différences de temps entre satellites sont donc précises. Ce problème est résolu s'il y a suffisamment d'émetteurs (quatre satellites au minimum).

✓ Troposphère et ionosphère

Les ondes ont des vitesses variables selon le milieu qu'elles traversent. Émises des satellites les ondes auront à traverser des couches de l'atmosphère plus ou moins humides, plus ou moins ionisées. La présence d'humidité et les modifications de pression de la troposphère modifient la vitesse et la direction de propagation des ondes radios. Certains récepteurs intègrent des modèles de correction.

Une autre couche traversée par les signaux : l'ionosphère. Cette couche ionisée par le rayonnement solaire va modifier la vitesse de propagation du signal. La plupart des récepteurs intègrent là aussi des modèles de correction, mais en période de forte activité solaire cette correction n'est pas assez précise. Pour corriger plus finement cet effet, certains récepteurs bi-fréquences utilisent les deux fréquences L1 et L2 qui ne sont pas affectées de la même manière pour recalculer plus précisément la position.

✓ Géométrie de la distribution des satellites dans l'espace : dilution de la précision (DOP)

Si les satellites visibles sont très proches dans l'espace, la précision sera moins bonne que s'ils sont répartis régulièrement sur une large étendue au-dessus de l'utilisateur. Les distances utilisées pour le calcul doivent en

quelques sortes être le plus hétérogènes possible afin d'échantillonner au mieux l'espace au-dessus du récepteur. Les effets de la géométrie du système peuvent être appréciés par un paramètre : le DOP (dilution of precision). La précision attendue est d'autant plus importante que le DOP est petit (**Figure 6**). Certains dispositifs permettent de filtrer des positions calculées en dessous d'un certain DOP. Ce coefficient DOP peut se décliner horizontalement (HDOP) et verticalement (VDOP).

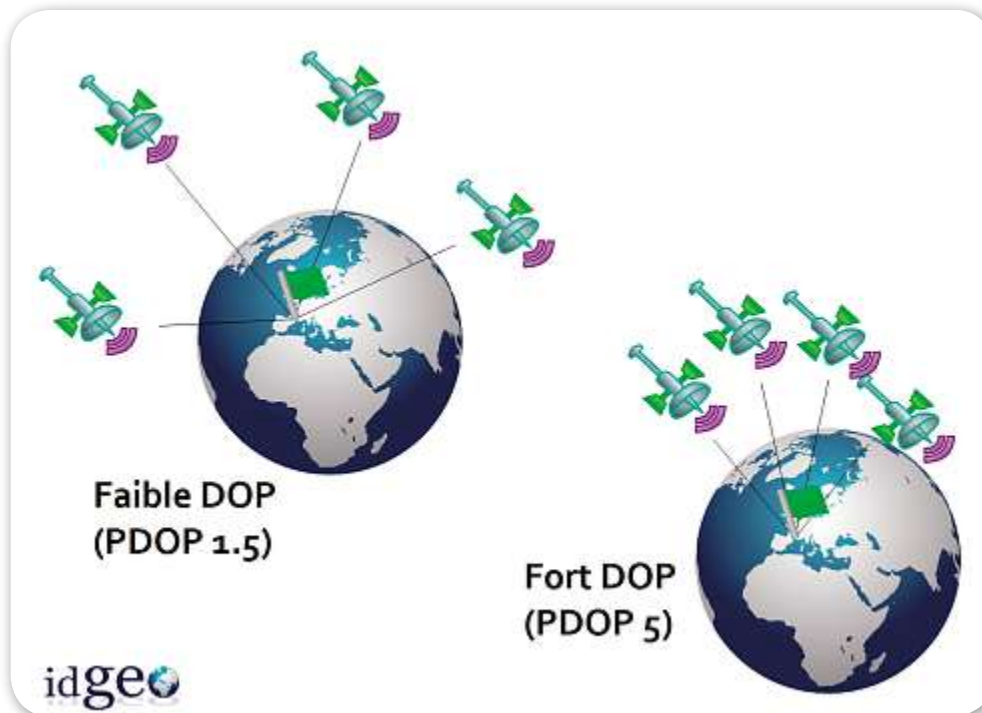


Figure 6. DOP et signification des valeurs forte et faible.

✓ Cryptage

Le GPS étant conçu par et pour les militaires américains, un certain nombre de moyens ont été mis en place pour empêcher l'utilisation du système par un hostile. Ce but est atteint par deux brouillages : la dégradation volontaire de la précision du positionnement et le cryptage du code P. L'accès sélectif ou « selective availability » (SA) est une dégradation de la précision des horloges embarquées à bord des satellites. Cette dégradation volontaire a fonctionné de manière permanente jusqu'en mai 2000. L'anti-leurrage ou « anti spoofing » (AS) est le cryptage du code P (précis) transformé en code dit « Y ». Ce cryptage rend impossible la mesure directe des pseudo-distances basée sur le code P.

✓ Réflexion et perte des signaux : trajets multiples et effets « canyons »

La topographie du milieu et sa structuration peuvent influencer sur la qualité de la géolocalisation. Le relief ou des bâtiments peuvent occulter des satellites et influencer directement sur la précision du positionnement. Ce phénomène de « canyon » se rencontre particulièrement en zone urbaine et en zone montagneuse. Les signaux de satellites peuvent également être réfléchis par des surfaces d'eau voire même des murs : c'est le problème des multi-trajets. Dans ce cas le géonavigateur ne réceptionne que des échos des signaux et la géolocalisation calculée tarde à se stabiliser.

Les systèmes d'optimisation de la précision de la géolocalisation

Il existe des systèmes dont l'objectif principal est de réduire l'imprécision de la géolocalisation induite par les sources d'erreur précédemment citées. Les erreurs ionosphériques ou troposphériques peuvent être corrigées par des stations d'observation. Ces stations, dont les coordonnées X, Y et Z sont précisément connues, vont mesurer en permanence les erreurs pour ensuite transmettre le signal de correction aux utilisateurs. La diffusion des



corrections peut se faire indirectement via des satellites, on parle alors de système SBAS (satellite based augmentation system) ou directement au récepteur par d'autres moyens de communication (téléphone, radio, internet, ...), on parle alors de LBAS (local based augmentation system).

✓ SBAS (WAAS / EGNOS)

Principe : des satellites géostationnaires délivrent en temps réel des corrections permettant d'accroître la précision ainsi que des informations permettant de garantir l'intégrité de ces corrections. Les erreurs sont observées sur un réseau de stations au sol.

Exemple : EGNOS (european geostationary navigation overlay service).

Ce système prend en compte les satellites des constellations GPS et GLONASS (et prochainement Galileo). Trois satellites géostationnaires transmettent en Europe des corrections de positionnement. L'activation de l'utilisation de ce système d'optimisation sur le géonavigateur peut permettre d'atteindre une précision comprise entre 1 et 3 mètres. Le système équivalent dont la couverture est principalement américaine se nomme le WAAS (wide area augmentation system).

✓ LBAS (DGPS, RTK)

Principe : ce système est un processus de différenciation qui supprime les sources d'erreurs de positionnement du GPS et améliore son intégrité. Les corrections sont calculées à partir d'une station de référence qui peut être paramétrée par l'opérateur ou faire partie d'un réseau (par exemple le RGP, réseau GNSS permanent). Les corrections sont appliquées au GPS mobile en temps réel ou dans un logiciel de post-traitement. On parle alors de correction différentielle ou DGPS (Lahaye et Ladet, 2014b). Si le récepteur est en mouvement et que la précision souhaitée est centimétrique en temps réel, la méthode de géolocalisation utilisera la phase plutôt que le code et des algorithmes permettant de répondre aux contraintes de la mobilité.

Les bonnes pratiques

Une fois que l'opérateur a pris connaissance des principes et des contraintes de la géolocalisation par GPS, des bonnes pratiques s'imposent.

✓ Reconnaissance terrain (identification des masques)

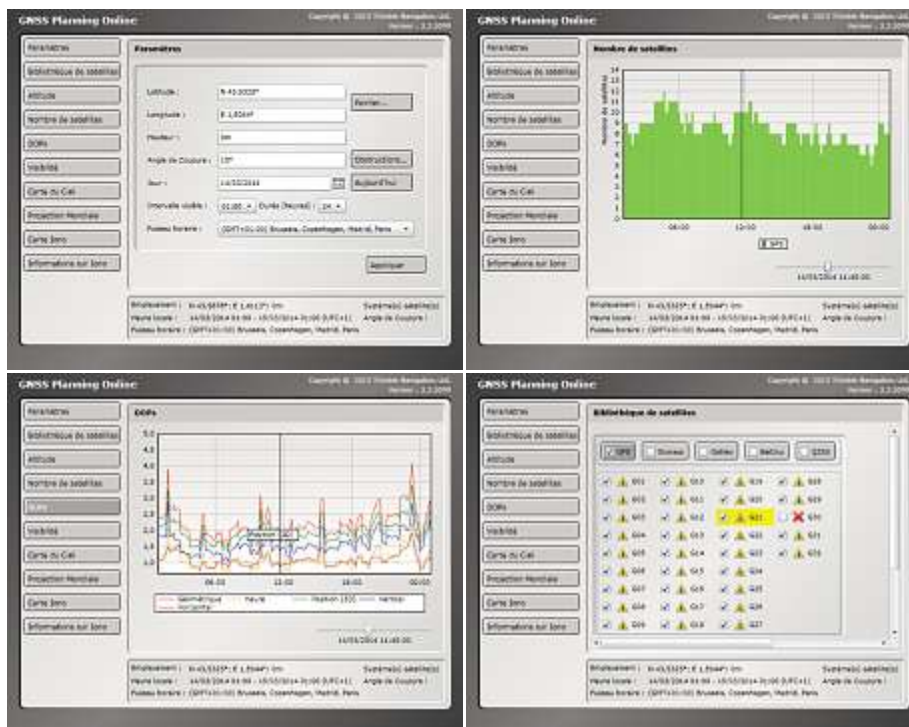
Cette première étape a pour objectif d'identifier des éléments du milieu d'expérimentation qui pourront impacter la précision de la géolocalisation. La présence de « masques » comme des bâtiments imposants, une pente importante et une exposition sur un versant par exemple Sud qui empêchera le matériel de capter les signaux des satellites venant du Nord, ces éléments devront être notés et pris en compte dans l'étape suivante. Cette reconnaissance peut s'effectuer à partir de logiciels cartographiques comme Google Earth mais il est préférable d'aller directement sur le terrain, cela permettra notamment d'avoir une idée du temps d'accès à la zone.

✓ Utilisation des éphémérides et modélisation de la journée de relevés

Les satellites ayant une périodicité de 12 h avec des trajectoires orbitales connues, il est possible de modéliser leur évolution durant les différentes heures de la journée. Ces données sont également disponibles via une éphéméride que des applications peuvent utiliser pour représenter graphiquement le nombre de satellites disponibles durant la journée, l'évolution des DOPs, pour matérialiser des obstacles (masques) et visualiser l'impact sur la visibilité des satellites (**Figure 7**).

✓ Fiches terrain / notes papier

Avant d'aller sur le terrain il est plus sûr de dédoubler sa prise de notes sur des fiches terrain ou un carnet. Si l'appareillage tombe en panne, on dispose d'une sauvegarde papier. Ces fiches pourront également stocker des informations non saisissables dans un simple géonavigateur qui lui est limité à deux types d'information, l'identifiant du point ou de la trajectoire et des commentaires (255 caractères).



http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/



Figure 7. Préparation de la sortie terrain. Selon les coordonnées du lieu de relevés, la date envisagée pour les relevés, sont matérialisées les obstructions, les choix des constellations et des satellites, la visibilité des satellites, l'évolution des DOP (et autres cartes). Source : <http://www.gnssplanningonline.com/#/Settings>

✓ Choix du matériel

Il existe une grande gamme de matériels de géolocalisation dont les prix augmenteront avec la précision et la diversité des fonctionnalités proposées. Un simple GPS géonavigateur de randonnée permettra une géolocalisation de l'ordre d'une dizaine de mètre et une saisie d'informations limitée. Un carnet de note avec un système d'exploitation couplé à un système de géolocalisation utilisant les phases, dont le prix sera jusqu'à 100 fois supérieur au précédent matériel, permettra d'atteindre une précision centimétrique et une saisie personnalisée d'informations (Lahaye et Ladet, 2014a).

Résultats et exemples d'applications

Dans cet exemple, notre but est de relever des waypoints ou points de cheminement pour des objets (coins de parcelles expérimentales de l'Unité Grande Culture de l'INRA de Toulouse) que nous voyons en même temps sur la photo aérienne et sur le terrain. Nous pensons que la précision métrique est alors suffisante pour notre objectif. Cette précision est atteinte par une multitude de modèles de GPS basiques. Nous avons opté pour un GPS Garmin 62st (Figure 8, encart A) car il satisfait quelques besoins spécifiques :

- précision GPS : < 10 mètres ;
- présence d'une antenne satellite « haute sensibilité » pour une bonne réception sous couvert ;
- espace de stockage de données (sous forme de point de cheminement (waypoint), trace (track) ou itinéraire (route)) disponible : 500 Mo ;
- portabilité et autonomie : jusqu'à 20 h pour une utilisation normale ;
- existence de BaseCamp : interface logicielle simple permettant de gérer ces données géographiques acquises sur le terrain et de les importer dans un logiciel SIG. A noter que le fichier .GPX (GPS eXchange Format) est le format standard d'échange de données « GPS », ouvert, permettant l'échange de coordonnées GPS entre BaseCamp et ArcGis ou Quantum Gis, par exemple ;



- bonnes pratiques sur le terrain : attente de l'initialisation de l'appareil (capture de tous les satellites disponibles), prises de notes, saisie des points quand les coordonnées X et Y sont stabilisées, si nécessaire (et si possible selon l'appareillage utilisé) rester immobile et faire des points moyens pour augmenter la précision. En d'autres termes quand un opérateur cherche à se géolocaliser en un point fixe, le calcul de sa position variera selon les signaux des satellites captés. En restant au même endroit et en relevant les géolocalisations à intervalles de temps réguliers, il est possible de calculer un point moyen qui s'approchera d'une géolocalisation précise au mètre près.



Figure 8. Résultat d'un relevé GPS et coordonnées correspondantes sur le Géoportail IGN. L'encart A (photo : S. Ladet) illustre la page satellite du GPS Garmin 62 ST lors de la relève avec 7 satellites captés et les coordonnées métriques renvoyés en UTM zone 31 (à savoir X=378846 et Y=4820613). La partie B illustre la lecture des coordonnées de ce coin de parcelle (croix rouge) sur le Géoportail sur un fond de carte composite construit à partir de la photo aérienne et de la carte topographique. Cet ensemble de données est en accord, à un mètre près, avec les données de notre GPS Garmin 62st.

Ces appareils basiques peuvent enregistrer les coordonnées de centaines de points, soit relevées directement sur le terrain (fonction de création de waypoints), soit téléchargées à partir d'un projet SIG décrivant un plan d'échantillonnage (fonction voir et rallier un waypoint). Dans ce dernier cas, on peut connaître, pour atteindre un point donné, le cap à suivre, la distance et le temps restant à parcourir.

Conclusions et perspectives

Les GNSS sont des systèmes complexes nécessitant d'avoir des connaissances minimales sur le vocabulaire des systèmes de navigation satellitaire et sur les bonnes pratiques à adopter sur le choix du matériel GPS, les étapes de préparation de la mission d'acquisition de relevés sur le terrain. Si votre expérimentation nécessite une précision plus importante reportez-vous à l'article de Lahaye et Ladet (2014b) pour en savoir plus sur le DGPS et le RTK. Si l'expérimentation nécessite la saisie de nombreuses informations il peut être envisagé de déployer un SIG nomade (Bernier et al., 2014 ; Lahaye et Ladet, 2014a).

Références bibliographiques

- Bernier S, Duthoit S, Ladet S, Baudet D (2014) Les concepts de base des systèmes d'information géographique (SIG) : les données et les fonctions générales. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé. pp. 19-26.
- Duquenne F, Botton S, Peyret F, Bétaille D, Willis P (2005) Localisation et navigation par satellites. Edition Hermès Lavoisier, 2^e édition revue et augmentée, ISBN : 2-7462-1090-8, 330 p.
- Lahaye R, Ladet S (2014a) Les concepts de base des SIG nomades. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé. pp. 28-35.
- Lahaye R, Ladet S (2014b) Les réseaux de correction différentielle. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, N° spécial GéoExpé. pp. 36-43.