

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 125 (1999)
Heft: 19

Artikel: GPS et navigation: faisons le point!
Autor: Gilliéron, Pierre-Yves / Merminod, Bertrand
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-79653>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

GPS et navigation : faisons le point!

Pierre-Yves Gilliéron et
Bertrand Merminod,
Institut de
Géomatique –
Topométrie, EPFL

La création récente, dans notre pays, d'un Institut de navigation exprime l'intérêt croissant du public pour les technologies liées à ce domaine dans des applications aussi bien maritimes, aériennes que terrestres. De plus en plus nombreuses sont les personnes qui ressentent la nécessité, dans leur vie professionnelle ou dans leurs loisirs, de connaître leur position géographique en temps réel, avec une précision qui varie de quelques dizaines de mètres à quelques millimètres. Cela étant, le transporteur routier ou aérien, le navigateur, le randonneur, le géomètre ou le forestier n'auront pas les mêmes attentes. La technologie GPS (Global Positioning System)¹, déjà accessible à un large public possédant un récepteur de navigation existe depuis plusieurs années. Son fonctionnement est présenté dans l'article ci-dessous, ainsi que les atouts et limites de cet instrument de navigation.

Les instruments de navigation ont considérablement évolué ces dernières années, à la suite des grands développements de l'industrie spatiale. Cependant, les utilisateurs tendent toujours à combiner plusieurs méthodes et instruments de façon à améliorer leur précision et leur sécurité. Ainsi, la navigation par satellite, malgré son attrait et sa couverture mondiale, ne remplacera pas l'ensemble des techniques traditionnelles, par souci d'autonomie et de sécurité des navigateurs. Avec le développement de ces instruments, les utilisateurs ont également éprouvé le besoin de partager leurs expériences, et plus particulièrement celles liées à l'utilisation du GPS, au sein d'une nouvelle association (voir sous rubrique « Actualité »: « Pourquoi un Institut Suisse de Navigation ? »).

Une position instantanée

Avant de décrire le principe de fonctionnement du GPS, il est utile de présenter la problématique de la navigation et les divers paramètres qu'elle englobe.

Le navigateur désirant atteindre un but, qu'il soit en mer ou dans les airs, va étudier la meilleure route possible tout en intégrant certaines contraintes. Pour cela, il établit sa planification sur une carte en s'aidant d'instructions nautiques ou aéronautiques. Durant son déplacement, le navigateur transmet les éléments de la route planifiée au pilote : la route réelle est alors mesurée en permanence à l'aide des instruments de navigation puis reportée sur la carte de façon à laisser

une trace du parcours. En navigation maritime, on peut naviguer à l'aide d'instruments de mesure comme le compas et le loch qui permettent de reporter l'estime sur une carte. Afin de contrôler ou de réajuster cette estime, on utilise des points de proximité ou des amers (points de repère sur une côte), sur lesquels on effectue des mesures géométriques pour déterminer un point précis de la route suivie.

L'avènement de la méthode de localisation par GPS modifie la technique de navigation car elle apporte à chaque instant des coordonnées géographiques ou cartésiennes (X,Y,Z) dans un système global de référence. Le GPS fournit ainsi à l'utilisateur une position instantanée. De plus, il permet d'intégrer un certain nombre de fonctions qui vont l'aider à gérer le déplacement dans l'espace et dans le temps.

Une référence globale

Tout système de coordonnées ou de cartographie repose sur une définition de paramètres de réfé-

rence issus de la géodésie et de la physique. Evidemment, il existe autant de systèmes qu'il y a de pays ou de régions sur la Terre (fig.1). Pour le système GPS, une référence globale est définie, qui répond aux objectifs d'un système mondial de navigation. Elle s'appelle WGS84 (World Geodetic System 1984) et se base sur un système géocentrique de coordonnées cartésiennes (X,Y,Z). L'origine est au centre de gravité des masses terrestres, l'axe Z représentant l'axe de rotation de la Terre et l'axe X étant défini par l'intersection du plan de l'équateur avec le plan du méridien de Greenwich; l'axe Y est perpendiculaire à X.

Comme chaque pays possède sa propre référence géodésique et son système de projection, on a déterminé des transformations géométriques pour passer du système WGS84 à un système de cartographie national ou local. Certains récepteurs possèdent cette fonction de transfert, bien qu'il faille veiller à les programmer cor-

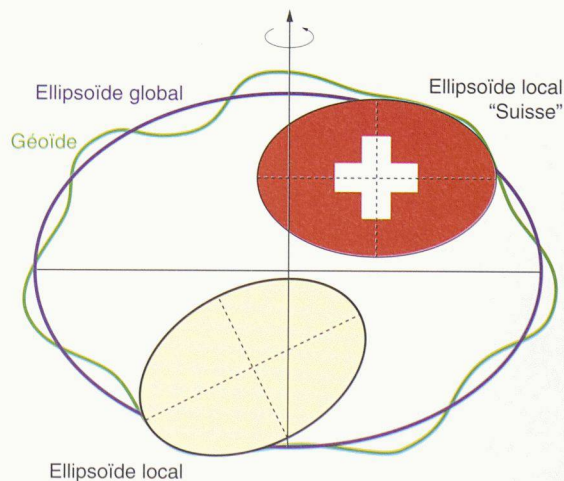


Fig. 1. - Systèmes de références locaux et globaux (décalages fortement exagérés)

¹ « GPS : un système de navigation révolutionnaire », Jean-Pierre Weibel, IAS N°9, 12 avril 1995, p. 156-163



Fig. 2. - Mesures de points topographiques pour une étude des avalanches dans la vallée de la Sionne (VS). Sont visibles le récepteur GPS et une balise pour la photographie (Photo EPFL)

rectement. On peut, en effet, choisir un système de projection (*User grid*) et lui associer une mauvaise référence (*Datum*) ; cette combinaison livrera alors des informations fausses, voire dangereuses pour l'utilisateur qui ne s'en rendrait pas compte à temps. En cas d'utilisation du GPS à l'étranger ou en relation avec une carte topographique ou maritime, la référence géodésique et le type de projection cartographique utilisés sont nécessaires ; ces informations sont généralement inscrites sur les cartes ou disponibles auprès de l'office responsable de leur production.

Des fonctions multiples

Le récepteur GPS n'a pas besoin d'être calibré, il calcule lui-même sa position X,Y,Z à un instant t . Si l'on considère une succession

d'événements dans le temps, on obtient une nouvelle position pour chacun et l'intervalle de temps entre deux points peut être programmé dans le récepteur. Si l'utilisateur se déplace, le récepteur peut construire le vecteur liant deux points successifs et calculer la direction du déplacement ainsi que la vitesse. De cette manière,

on obtient des informations précieuses pour la navigation. **333**

En combinant la localisation GPS avec des fonctions de navigation, on peut obtenir des données telles que:

- la direction de navigation par rapport au Nord géographique,
- la vitesse de déplacement en km/h ou en milles/h,
- le trajet horizontal parcouru depuis un point de départ fixé par l'utilisateur,
- les coordonnées de la position actuelle dans le système de référence choisi,
- l'altitude.

Certains appareils permettent en outre d'enregistrer le trajet parcouru avec une marque de temps pour chaque point. Le système de navigation peut ainsi reporter cette information sur une carte électronique ou la diffuser régulièrement à une centrale.

Le récepteur GPS ne fournit pas seulement des paramètres de navigation, il permet également à l'utilisateur de programmer et de gérer son déplacement. L'appareil autorise une planification de la navigation en enregistrant des points de destination ou de routes. Le récepteur GPS fournit les données de route suivantes (fig. 3):

- l'azimut entre la position instantanée et le « way point » (BRG),
- la distance horizontale entre la position instantanée et le « way point » (DST)
- la direction de navigation par rapport au Nord géographique (TRK),

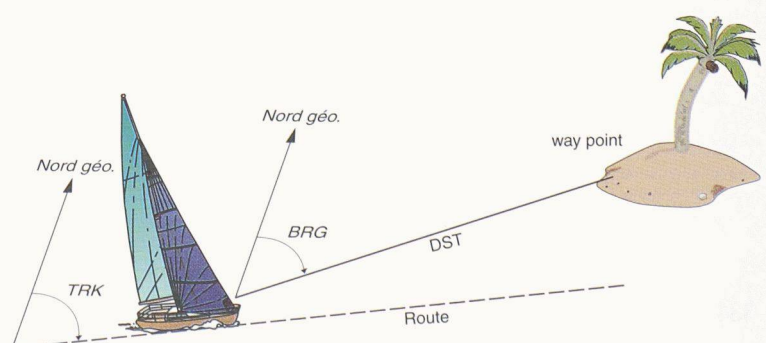


Fig. 3. - Paramètres de navigation

- l'estimation du temps nécessaire pour atteindre le but.

Pour planifier une route, on lit les coordonnées de points remarquables sur une carte topographique ou marine, en contrôlant que le système de référence de la carte est compatible avec celui sélectionné dans le GPS. Ensuite, on stocke ces points dans le récepteur. Une route peut ainsi être approchée par une suite de points, le déplacement entre deux points étant considéré comme un segment de droite.

Pour se rendre à un point fixe, l'utilisateur sélectionne une fonction lui permettant d'activer le point choisi. Le récepteur calcule les éléments géométriques reliant sa position actuelle au point de destination. Connaissant la vitesse du navigateur, il peut aussi donner le temps de déplacement nécessaire.

Lorsque l'on choisit une route, le récepteur sélectionne les points dans l'ordre donné. Dès qu'il atteint un point intermédiaire, il passe automatiquement au suivant. On peut ainsi décrire une trajectoire contenant une multitude de points. Si le trajet est sinueux, il suffit d'enregistrer assez de points. Certains appareils offrent la possibilité de visualiser le trajet parcouru. Un petit affichage présente la trajectoire suivie depuis le point de départ, offrant à l'utilisateur une vision d'ensemble de sa navigation, plus particulièrement lorsqu'il détermine une route à suivre. Les récepteurs de dernière génération permettent même d'afficher une carte comme fond d'écran. On voit alors la ligne du trajet parcouru se superposer à la carte, ce qui est particulièrement intéressant lorsque l'on doit se référer à des repères terrestres ou à un balisage maritime.

Que se soit à pied, en bateau ou en avion, le GPS ne doit toutefois jamais être le seul instrument de navigation, pour des raisons de fiabilité et d'exigences légales. On peut lui faire confiance à condition

d'observer certaines précautions et surtout de le contrôler régulièrement, d'autres outils de navigation et de détermination d'un lieu géométrique pouvant être combinés aux mesures GPS. Les moyens de repérage traditionnels et les techniques acquises en navigation, qu'elles fassent appel au compas, à l'altimètre, au sondeur ou au radar, restent encore prépondérantes sur l'utilisation parallèle du GPS.

Description du système GPS

Le système NAVSTAR-GPS (*NAVigation System by Timing And Ranging - Global Positioning System*) est un système de positionnement par satellites, conçu et mis en service par le Département de la Défense des Etats-Unis (*DoD*). Il permet de déterminer la position et la vitesse d'un objet ou d'une personne à chaque instant, avec une précision visée au départ de 10 m et d'une microseconde.

Le système se compose de trois ensembles d'éléments.

La partie spatiale est constituée de vingt quatre satellites répartis sur six plans orbitaux. Evoluant à une altitude d'environ 20 000 km, ils effectuent environ une rotation par douze heures. Chacun possède un oscillateur qui fournit

une fréquence fondamentale de 10,23 MHz calibrée sur des horloges atomiques. L'émetteur génère deux ondes (*L1* et *L2*) de fréquences respectives 1575,42 MHz et 1227,60 MHz. Il transmet régulièrement des signaux horaires, la description de l'orbite suivie (éphémérides) et diverses autres informations.

Les éléments de contrôle pilotent le système. Ils englobent cinq stations américaines au sol et un centre de contrôle. Les stations enregistrent tous les signaux émis par les satellites, le centre calcule leurs éphémérides et leur transmet des données.

L'ensemble des utilisateurs regroupe les récepteurs civils et militaires qui reçoivent les informations des satellites.

Mode de fonctionnement

Le GPS fait appel à une technique de mesure de distance unidirectionnelle où le satellite est actif et envoie continuellement un signal. Le paramètre fondamental de la mesure de distance est le temps, lequel est fourni avec une très grande précision (de l'ordre de 10^{-14} seconde) par les oscillateurs des satellites.

Du point de vue de sa structure, le signal émis par le satellite peut être décomposé en trois parties:

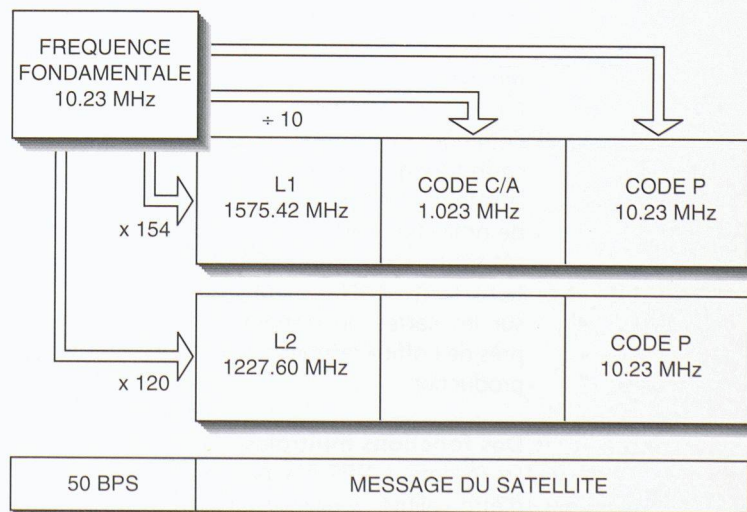


Fig. 4. - Signal GPS

- les ondes porteuses $L1$ et $L2$, dont la longueur est d'environ 20 cm,
- les codes C/A (Coarse Acquisition) et P (Precise), modulés sur les ondes porteuses selon une séquence binaire (pour le code P , l'élément unitaire correspond à environ 30 m ; alors que pour le code C/A , il correspond à quelque 300 m),
- les informations nécessaires pour calculer la position des satellites.

En admettant une résolution proportionnelle à la longueur d'onde, ou à l'élément unitaire du code, il ressort des indications ci-dessus que les porteuses donnent des résultats plus précis que les codes. En pratique, on considère qu'un récepteur peut mesurer 1/100 de la longueur d'onde ou du code. Le code P est donc dix fois plus précis que le code C/A , mais il est réservé aux militaires américains.

Le système GPS offre ainsi deux services qui se différencient par la qualité obtenue dans les résultats : standard ou de précision (fig. 4).

SPS (Standard Position Service)

Le SPS a été mis à disposition des utilisateurs civils par l'intermédiaire

du code C/A . Il n'occasionnera aucun coût d'utilisation jusqu'en 2005 environ, mais sa précision dépend fortement de la disponibilité sélective (*Selective Availability - SA*). Cette dégradation volontaire est mise en place par les gérants du système GPS afin de limiter la précision que l'on peut atteindre en navigation : ± 100 m, en positionnement absolu.

PPS (Precise Position Service)

Réservé aux militaires américains et à certains utilisateurs autorisés par le DoD, ce service implique des récepteurs équipés d'algorithmes de décryptage permettant d'accéder au code P .

Principe de mesure GPS

Le principe consiste à mesurer le temps de propagation d'une onde dans l'espace entre un satellite et un récepteur. La détermination d'un lieu géométrique est basée sur l'intersection de trois sphères dans l'espace, dont chacune est définie par son centre, correspondant à la position d'un satellite, et par son rayon, qui est la distance entre le centre et le récepteur GPS de l'utilisateur (fig. 5). Ainsi la me-

sure correspond à la distance entre un satellite et un récepteur. Les éphémérides du satellite transmises par le message permettent de calculer la position de celui-ci dans un repère terrestre à l'instant de l'observation.

Mesure de code

Pratiquement, les satellites génèrent un code pseudo-aléatoire qui est modulé sur les ondes porteuses, tandis que les récepteurs GPS génèrent le même code, synchronisé par rapport aux satellites. Pour déterminer la distance séparant un satellite d'un récepteur, on va mesurer le temps de propagation d'un code se déplaçant à la vitesse de la lumière. Quand le récepteur le reçoit, il est capable de déterminer le retard dû au trajet parcouru. La mesure se fait en retardant le code du récepteur jusqu'à ce qu'il soit aligné sur celui du satellite. On trouve ainsi une différence de temps que l'on peut multiplier par la vitesse de la lumière, pour obtenir la distance recherchée.

Cette opération est effectuée simultanément avec l'ensemble des satellites visibles. Géométriquement, trois satellites suffisent pour obtenir un point intersection de trois sphères. Toutefois, l'imperfection de synchronisation du récepteur et des horloges des satellites affecte la mesure de distance, on parle alors de pseudo-distances entre les satellites et le récepteur. C'est pourquoi quatre satellites sont requis pour s'affranchir de cette erreur d'horloge.

Mesure de phase

Pour des applications plus précises, on peut exploiter directement la phase sur les ondes porteuses $L1$ et $L2$ en déterminant le déphasage entre le satellite et le récepteur. La phase du signal reçu par le récepteur est comparée à celle du signal généré par le récepteur, réplique du signal original. Ce mode de mesure est plus compliqué à mettre en œuvre que

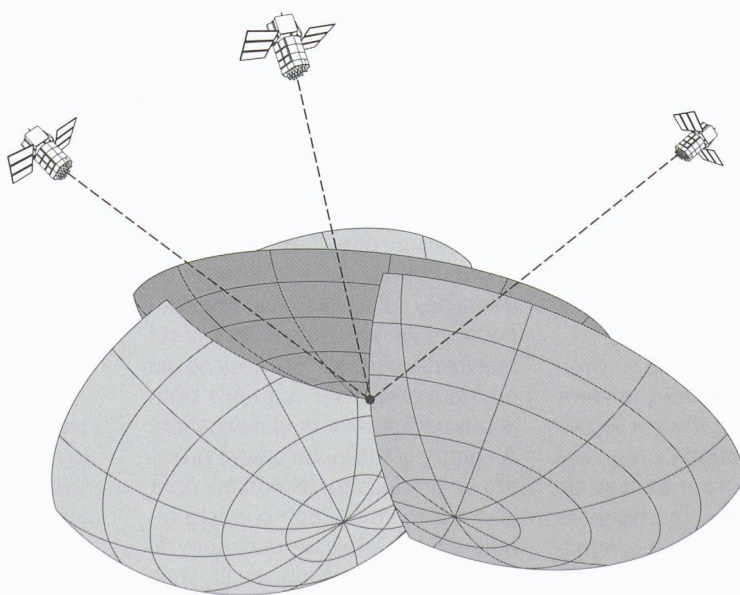


Fig. 5. - Positionnement tridimensionnel à partir de trois satellites (Remarque: un quatrième satellite est nécessaire pour éliminer l'imperfection de l'horloge du récepteur)

celui basé sur le code. Pour cela, il existe des récepteurs spécifiques permettant d'exploiter le code et la phase. Généralement, les données sont traitées ultérieurement à l'aide de logiciels spécialisés. On peut aussi traiter ces signaux en temps réel, on parle alors de RTK (*Real Time Kinematic*).

Modes de positionnement

On distingue deux modes de positionnement qui se différencient par la manière de lier les mesures à un système de référence : le positionnement absolu et le positionnement relatif.

Le *positionnement absolu* consiste à déterminer les coordonnées d'un point quelconque de la Terre en utilisant les codes générés par les satellites. Il est qualifié d'absolu, car il considère la relation entre un récepteur et plusieurs satellites. Ce type de positionnement est utilisé en navigation sur terre, sur mer ou dans les airs. L'intérêt de cette méthode est la possibilité de l'exploiter en temps réel et d'obtenir une position instantanée. C'est le mode utilisé par la majorité des navigateurs.

Le *positionnement relatif* fait intervenir deux récepteurs qui enregistrent simultanément les signaux GPS sur deux points différents. Dans ce cas, on s'intéresse au vecteur spatial reliant ces deux points. La connaissance d'un point de référence dans un système de coordonnées permet de rattacher précisément chaque vecteur à ce dernier, c'est pourquoi l'on parle de positionnement relatif.

GPS différentiel (DGPS)

Le GPS différentiel permet un positionnement en temps réel, utilisant des corrections qui affinent le calcul et lui confèrent une plus grande précision. Une station de référence, dont les coordonnées sont connues, reçoit en permanence les signaux GPS et calcule des valeurs de correction qui sont ensuite radiodiffusées. Cela implique pour l'utilisateur de s'équi-

per d'un récepteur radio connecté à son GPS afin de bénéficier de ces corrections. Il existe plusieurs de ces services en Europe, dont celui proposé par l'Office fédéral de topographie et SWISSCOM.

Perspectives

Les utilisateurs de GPS s'interrogent sur la fiabilité du système dans les années à venir, étant donné que la précision des informations fournies par les satellites dépend du bon vouloir du Département de la Défense des USA. Cependant, plusieurs arguments viennent plaider en faveur d'une collaboration soutenue entre cet organisme et les utilisateurs civils. Premièrement, le développement et le bénéfice qu'engendrent les applications civiles ont pris une telle ampleur qu'ils représentent un intérêt non négligeable pour l'économie et la politique extérieure américaine. Deuxièmement, les autorités américaines, par la voix du Président Clinton, ont exprimé leur volonté de maintenir le système GPS à disposition des civils, conscientes qu'elles sont d'offrir un produit performant et plein d'avenir. Troisièmement, la concurrence existe sur cet intéressant marché du positionnement, par le biais d'un système russe analogue baptisé GLONASS et par l'intérêt marqué de la Communauté Européenne à créer son propre système civil de navigation par satellite avec le programme GALILEO.

Ainsi, le GPS n'est pas qu'un simple appareil de mesure de la position sur terre. Il est utilisé dans grand nombre d'applications et de domaines d'activité. La communauté civile y a trouvé un intérêt manifeste dans ce qui touche au développement de solutions pour le positionnement et la navigation. A l'heure actuelle, on trouve quantité de produits sur le marché, dont le choix et l'utilisation correcte requièrent toutefois un minimum de connaissances techniques. Et, vu la dépendance qui existe face à l'administration américaine, les systèmes combinés, où l'accent est

mis sur le contrôle, sont privilégiés. Pour l'heure, nous souhaitons un bon envol à l'Institut Suisse de Navigation (ION-CH) et espérons vivement que cette association saura attirer des membres d'horizons très divers, encourager l'art de la navigation et permettre aux nombreux passionnés de se rencontrer et d'échanger des expériences. □

Références bibliographiques

- HOFMANN-WELLENHOF, « GPS : theory and practice », Lichtenegger, Collins / Springer-Verlag, Wien New-York, 1994
- BOTTON, DUQUENNE, EGELS, EVEN, WILLIS, « GPS: localisation et navigation », IGN France/Hermès, 1996
- KAPLAN, ELLIOT D., « Understanding GPS: principles and applications », Boston / Artech House Publ.
- DUPRAZ H., « La méthode GPS », Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1997
- DAVA SOBEL, « Longitude », JC Lattès, 1996

Organismes et sites Internet

- Institut Suisse de Navigation (ION-CH) <http://www.ion-ch.ch>
- Office fédéral de topographie : point de contact national en matière de GPS et service offrant des prestations de DGPS <http://www.swisstopo.ch>
- Institute Of Navigation (USA) <http://www.ion.org>
- GPS-WORLD, magazine mondial sur le GPS et base de données des récepteurs <http://www.gpsworld.com>
- Université du Texas, présentation détaillée du système GPS <http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/gps/gps.html>
- Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Institut de géomatique, Unité de topométrie <http://dgrwww.epfl.ch/TOPO/>

Applications : du contrôle d'ouvrage à la course de ski

L'Institut de géomatique de l'EPFL développe plusieurs projets, où l'emploi du GPS s'avère d'ores et déjà fort utile. Trois exemples sont présentés ci-après.

Géodésie et contrôle d'ouvrage

Les grands barrages sont soumis périodiquement à des contrôles de déformation dans lesquels interviennent des mesures géodésiques d'angles et de distances. L'avènement de la méthode GPS permet de renforcer ces réseaux et surtout de les rattacher à une référence extérieure suffisamment éloignée de l'ouvrage.

C'est le cas du barrage de l'Hongrin où l'on a ajouté de nouveaux points au réseau de mesures, dont un de l'autre côté du lac. Lors des mesures GPS, on a exploité la phase sur les fréquences L1 et L2 en mode relatif. Plusieurs longues sessions de mesures ont permis d'obtenir des résultats affichant une précision relative de 1 mm. Cet ordre de précision est identique à celui obtenu par les moyens classiques de la géodésie, avec l'avantage que le GPS ne nécessite pas une intervisibilité entre les points.

Cartographie interactive

Les applications en temps réel du GPS ouvrent des perspectives intéressantes lorsqu'il s'agit d'effectuer certains relevés de terrain, par exemple dans le processus de mise à jour de cartes topographiques. Les applications des systèmes d'infor-

mation géographique (SIG) permettent de recevoir les informations de localisation d'un GPS préalablement couplé à une planchette numérique (*penpad*), qui offre une interface graphique interactive à l'opérateur. On peut ainsi confronter directement une carte existante à la réalité du terrain et, si nécessaire, lever les objets pour la mise à jour. Seul le GPS apporte en continu des coordonnées de localisation au SIG pour une utilisation interactive dans le terrain.

Ski et DGPS

Les courses de ski et de slalom se gagnent souvent sur quelques centièmes de seconde. L'étude précise de la trajectoire d'un coureur doit permettre de mieux analyser sa course et si possible améliorer sa performance. L'équipement GPS étant peu encombrant, le skieur peut l'embarquer lors de la course afin d'enregistrer des mesures sur l'intégralité du parcours.

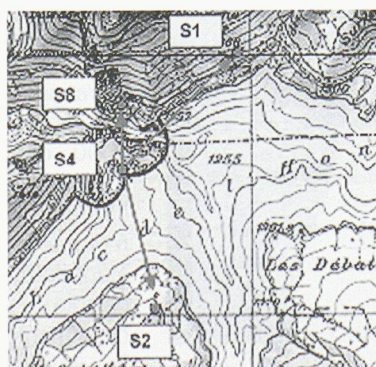
Le GPS en mode différentiel (DGPS) utilisant le code et partiellement la phase, permet de déterminer la position et la vitesse instantanée du coureur avec une précision de quelques centimètres, respective-



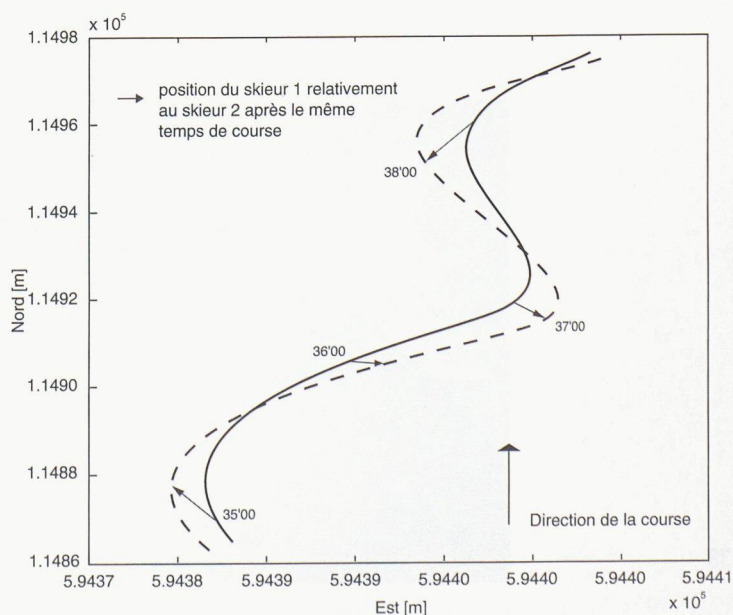
Planchette numérique couplée à un GPS

ment 1 cm/s. Lors d'entraînements, l'usage d'un tel dispositif permet d'analyser les passages où certains coureurs sont particulièrement performants, afin de développer une stratégie pour l'équipe.

Ce projet s'insère dans une recherche menée conjointement avec l'Institut de physiologie de l'UNIL et soutenue par le Fonds national suisse de la recherche scientifique. Il a été couronné par le premier prix au « GPS World Applications Contest », au mois d'août 1999. □



Plan de situation des points GPS à l'Hongrin



Trajectoires de deux skieurs mesurées par GPS