

Techniques GPS-RTK appliquées à la trajectographie

Hervé Gontran, Jan Skaloud

Résumé

Le laboratoire de Topométrie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (topo.epfl.ch) mène des projets novateurs dans le cadre de la trajectographie de sportifs avec GPS, en collaboration avec la société Dartfish (<http://www.dartfish.com>), spécialiste des logiciels d'entraînement par vidéo. Ce partenariat a permis la création de séquences de réalité virtuelle, grâce auxquelles des milliers de téléspectateurs ont pu imaginer les sensations extrêmes d'un skieur alpin en descente, sous des perspectives inédites à la télévision. Cet article présente nos dernières recherches sur la transmission de corrections GPS, et développe les thèmes suivants:

- Rappels sur le concept de localisation temps réel par GPS
- Solution standard de transmission de corrections GPS-RTKⁱ
- Solutions adaptées à la trajectographie de sportifs
- Perspectives

Abstract

The Geodetic Engineering Laboratory of the EPFL, in collaboration with Dartfish, a specialist in video training software, leads innovative GPS projects within the framework of athletes' trajectography. This partnership allowed us to create sequences of virtual reality that could, for the very first time, enable thousands of television viewers to experience the extreme sensations of downhill skiers. This article presents our latest investigations concerning the broadcast of GPS corrections and is structured around the following themes:

- Reminders of the concept of GPS-RTK.
- Standard solution to broadcast GPS-RTK corrections.
- Solutions fitted to the athletes' trajectography.
- Perspectives for future work.

1. Contexte

Les applications aux sports dynamiques pour l'analyse précise de trajectoires représentent une nouvelle perspective pour la localisation GPS différentielle avec mesure de phase. Appliquée au ski de compétition, la technique GPS fournit toutes les données quantitatives pour une analyse complète position/vitesse/accélération (PVA), si bien que les trajectoires mesurées ainsi peuvent être comparées sur la totalité de la piste. Elle est donc en mesure d'aider les athlètes à trouver la ligne la plus rapide et d'identifier des fautes techniques. Il en résulte une amélioration de l'efficacité des entraînements et de la préparation, dans le but d'optimiser les

performances, aussi bien de l'athlète que de son matériel. Ce type d'analyse exige une localisation décimétrique du skieur à une cadence de 5 à 10 Hz.



Photo 1. Equipement GPS pour le ski alpin

2. Localisation temps réel par GPS

Pour obtenir une précision décimétrique souhaitée en trajectographie, des techniques GPS différentielles doivent être mises en œuvre.

Pour le DGPS code, ces techniques corrigent les pseudo-distances (affectées par des erreurs d'horloge et d'éphémérides, la troposphère et l'ionosphère) entre un récepteur GPS mobile et les satellites qu'il reçoit. En fait, un récepteur de référence, stationné sur un point prédéterminé, reçoit à chaque instant la position des satellites dans l'espace, et calcule sa propre position. Ce récepteur peut donc déterminer la distance théorique à chaque satellite et le temps de propagation des signaux correspondants. La comparaison de ces valeurs théoriques avec les valeurs réelles permet de calculer des différences qui représentent des erreurs sur les signaux reçus. De ces différences dérivent les corrections de pseudo-distances définies par la commission technique de la radio sur les services maritimes (RTCM). Ces corrections RTCM sont transmises à des récepteurs mobiles, améliorant la précision de la localisation à un niveau métrique (Dupraz, 1992).

Par analogie, pour le DGPS phase, des corrections de mesures de phase, normalisées par le RTCM, sont calculées par la référence, puis émises vers le mobile. Ainsi, l'erreur de localisation peut être réduite à 3-5cm en recevant 5kbit/s de corrections au format RTCM-RTK, pourvu que le récepteur mobile soit distant de moins de 10 km de la station de référence.

3. Formats de message de correction

En fait, la commission RTCM fut le premier organisme à édicter une norme sur le contenu des messages de corrections GPS. Chaque message RTCM est constitué d'un nombre variable de mots de 30 bits, dont les deux premiers servent d'en-tête. Dans le cadre de la localisation temps réel, les messages 18 et 19 sont d'un intérêt majeur, et la quantité minimale d'information à diffuser pour une correction RTK est donnée par la formule :

$$(1) \quad [\text{octets/s}] = [\text{mots de 30 bits}] \times 5 = f \times 2 \times \text{FREQ} \times (3 + 2 \times N) \times 5^*$$

Où f désigne la cadence de mesures; FREQ, valant 1 ou 2, décrit le caractère mono ou bi-fréquence du récepteur; N représente le nombre de satellites.

Il faut cependant noter que les coordonnées de la station de référence sont également diffusées, à une cadence moindre que les corrections. Neuf mots de 30 bits sont nécessaires pour décrire la position de la station de référence, ce qui génère un débit de pointe de:

$$(2) \quad [\text{octets/s}] = f \times (2 \times \text{FREQ} \times (3 + 2 \times N) + 9) \times 5$$

Le message CMR (Compact Measurement Record), désormais approuvé pour l'usage public, fut développé par Trimble pour véhiculer des corrections via des lignes de communication de bande passante réduite (2400 bauds). Dans son implémentation la plus récente, le CMR+, la position de la station de référence est transmise suivant des trames disjointes, au lieu d'un seul bloc comme dans le message RTCM (Javad Navigation Systems^{INC}, 2003). La formule donnant le débit de pointe est:

$$(3) \quad [\text{octets/s}] = f \times (6 + N \times (8 + (\text{FREQ} - 1) \times 7) + 16)$$

Voici une application numérique pour fixer les idées:

Lors de la réception de 7 satellites, à une cadence de mesures de 1Hz, un récepteur bi-fréquence diffuse en pointe:

- $(2 \times 2 \times (3 + 2 \times 7) + 9) \times 5 = 385$ octets/s = 3080 bps de corrections RTK-RTCM
- $(6 + 7 \times (8 + (2 - 1) \times 7) + 16) = 127$ octets/s = 1016 bps de corrections RTK-CMR+

Afin de limiter la saturation de la ligne de communication, nous baserons nos expériences sur la diffusion de corrections CMR.

* Ce facteur 5, au lieu de 3.75, tient compte des recommandations du RTCM.

4. Solution standard de transmission de corrections GPS-RTK

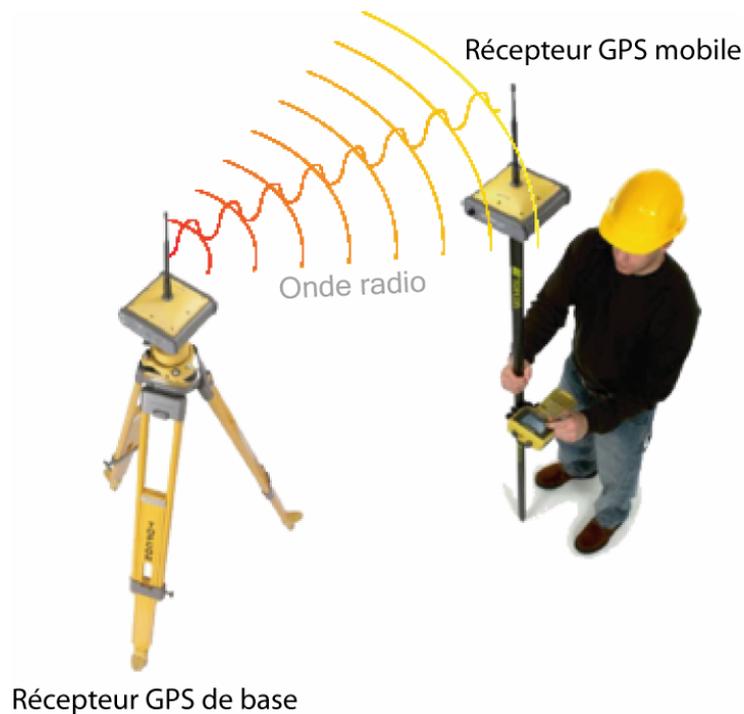


Figure 1. Liaison radio au service de GPS-RTK

La figure 1 présente une illustration traditionnelle du principe du GPS temps réel... Ne nécessitant pas l'octroi de concession de la part de l'OFCOMⁱⁱ, les liens radio de faible puissance permirent l'essor de la localisation temps réel par GPS dans le terrain. De tels liens reposent sur la *bande de base*, une technique de transmission directe des signaux numériques, sans modulation, sur une bande de fréquences indivisible, autrement dit un canal de communication unique. Il en résulte qu'un seul message peut être transmis à la fois (Pacific Crest^{INC}, 1995). On notera que la comparaison simultanée et temps réel de la trajectoire de plusieurs sportifs est donc impossible. Si l'usage de la radio continue à jouer un rôle prépondérant dans la diffusion de corrections GPS-RTK, les caractéristiques mentionnées précédemment engendrent certains désagréments suivants:

- Problème d'allocation de fréquences
- Interférences intempestives
- Limitation de portée inhérente à la faible puissance (cf. tableau 1)

Service radio	Portée	Puissance	Taxes de concession
Radiocommunication à usage général (cibiste) 27 MHz	Env. 1-30 km	1 à 4 W	48 € par année
Radiocommunication à usage professionnel VHF (fréquences dans la bande des 173 MHz)	Env. 5-20 km	2,5 W	93 € par année (par appareil)
PMR-446 (8 fréquences dans la bande des 446 MHz)	Env. 2-5 km	500 mW	Exempté de concession
SRD (short range devices) 69 canaux 433/434 MHz	Env. 1-2 km	10 mW	Exempté de concession
Radiocommunication à usage professionnel 430 MHz (3 fréquences)	Env. 5-10 km	2,5 W	36 € par année (par appareil)

Tableau 1. Portée des services radio

Par ailleurs, nos applications de trajectographie requièrent l'utilisation du "RTK inverse" – base mobile, roverⁱⁱⁱ statique – afin d'assurer le contrôle et l'affichage en temps réel de la position et de la vitesse du sportif. La puissance de la radio, proportionnelle à son encombrement, doit donc être plus élevée pour le sportif que pour la base. L'expérience montre que l'utilisation de la radio entraîne une dégradation sensible des performances de l'athlète, ce qui nous a conduits à investiguer dans des liens de communication fiables et aisément portables.

5. Transmission de corrections GPS via GSM

Le terme "portable" évoque tout naturellement téléphone cellulaire et nombreux sont les modèles équipés d'un modem pour un poids inférieur 100 grammes, batterie incluse ! La couverture assurée par les trois opérateurs nationaux fait du réseau cellulaire un média de choix et bon marché pour la transmission de corrections RTK. Lors d'une liaison commutée vers son homologue, un natel établit une connexion telle que le réseau GSM^{iv} soit transparent aux données. Ceci simule une véritable liaison point à point, comme si le destinataire de l'appel était directement relié à l'application (ou au périphérique) contrôlant le modem du natel. Ainsi, toute procédure de connexion GSM définit une ligne spécifique où circulent les informations échangées entre les 2 modems (Figure 2). Cette ligne est réservée à l'usage exclusif des périphériques. Cette technique tend à se développer et des partenaires industriels offrent un service de corrections RTK par GSM, mais dans un format et à une cadence incompatibles avec la trajectographie de sportifs.

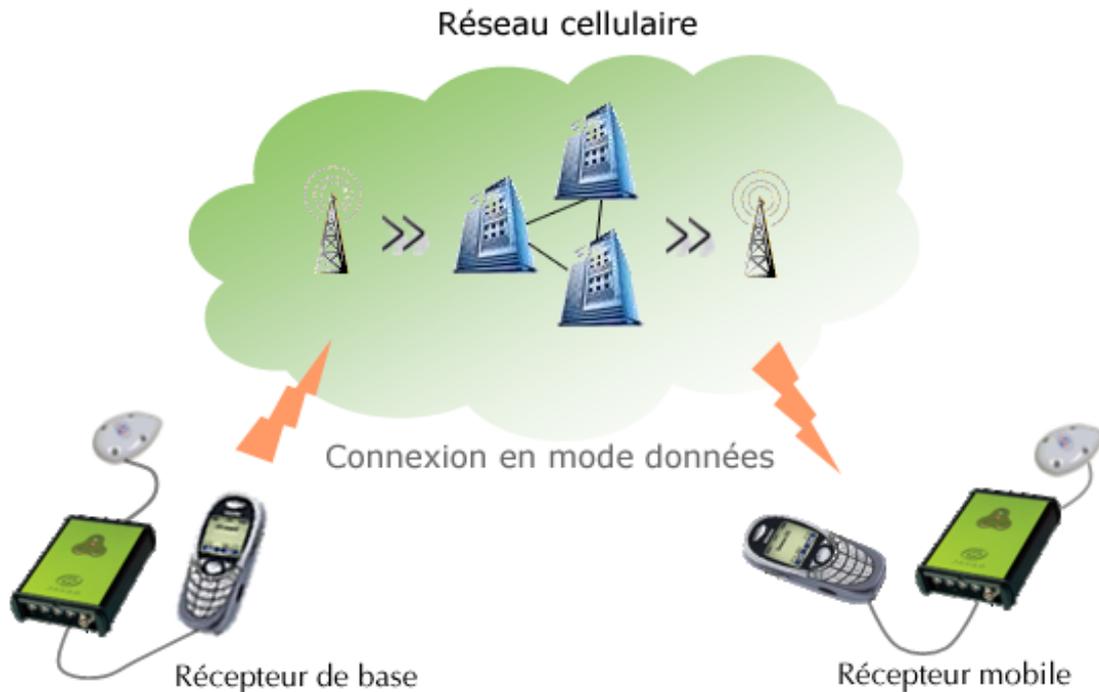


Figure 2. Diffusion de corrections GPS via GSM

6. Trajectographie et ski de vitesse

Lors d'une manche de la coupe du monde de kilomètre lancé à Leysin, en Suisse, l'utilisation du GPS pour déterminer en temps réel la trajectoire de sportifs s'est avérée un succès. Des skieurs volontaires sont équipés de récepteurs GPS haut de gamme qui diffusent leurs position et vitesse à une cadence de 10 Hz via le réseau GSM. Un ordinateur portable rassemble et analyse toutes les données GPS, en affichant la qualité du lien de communication ainsi que la position et la vitesse des skieurs, le tout en temps réel. Un algorithme de lissage par splines cubiques (Slakoud, 2003) est appliqué à chacune des trajectoires pour amener la précision à un niveau centimétrique. Comme cette précision est compatible avec la localisation des cellules de chronométrage, nous pouvons interpoler l'instant précis auquel les athlètes atteignent les cellules. Le tableau 2 illustre l'adéquation entre les chronométrages FIS^v et GPS. Le coulissage virtuel (cf. Figure 3) de la zone de chronométrage de 100m le long de la trajectoire des skieurs permet une détermination optimale du positionnement des cellules de chronométrage. Le tableau 3 montre que la position optimale du premier chronomètre se trouvait en fait 50m plus bas que celle déterminée à l'aide de sensations d'accélération.

	Chronométrage FIS	Chronométrage GPS
Coureur 1 (antenne de qualité standard)	138.56 km/h	138.2 km/h
Coureur 2 (antenne de haute qualité)	141.37 km/h	141.3 km/h

Tableau 2. Validation du chronométrage GPS

	+10m	+20m	+30m	+40m	+50m	+60m	+70m	+80m	+90m
Skieur1	139.7	141.3	143.0	143.1	145.8	146.5	143.0	142.9	142.0
Skieur2	144.1	145.9	147.7	148.8	149.5	149.5	150.1	149.0	148.0
Skieur3	143.6	147.1	148.3	152.0	155.3	151.4	152.0	149.8	142.2

Tableau 3. Positionnement optimal des chronomètres

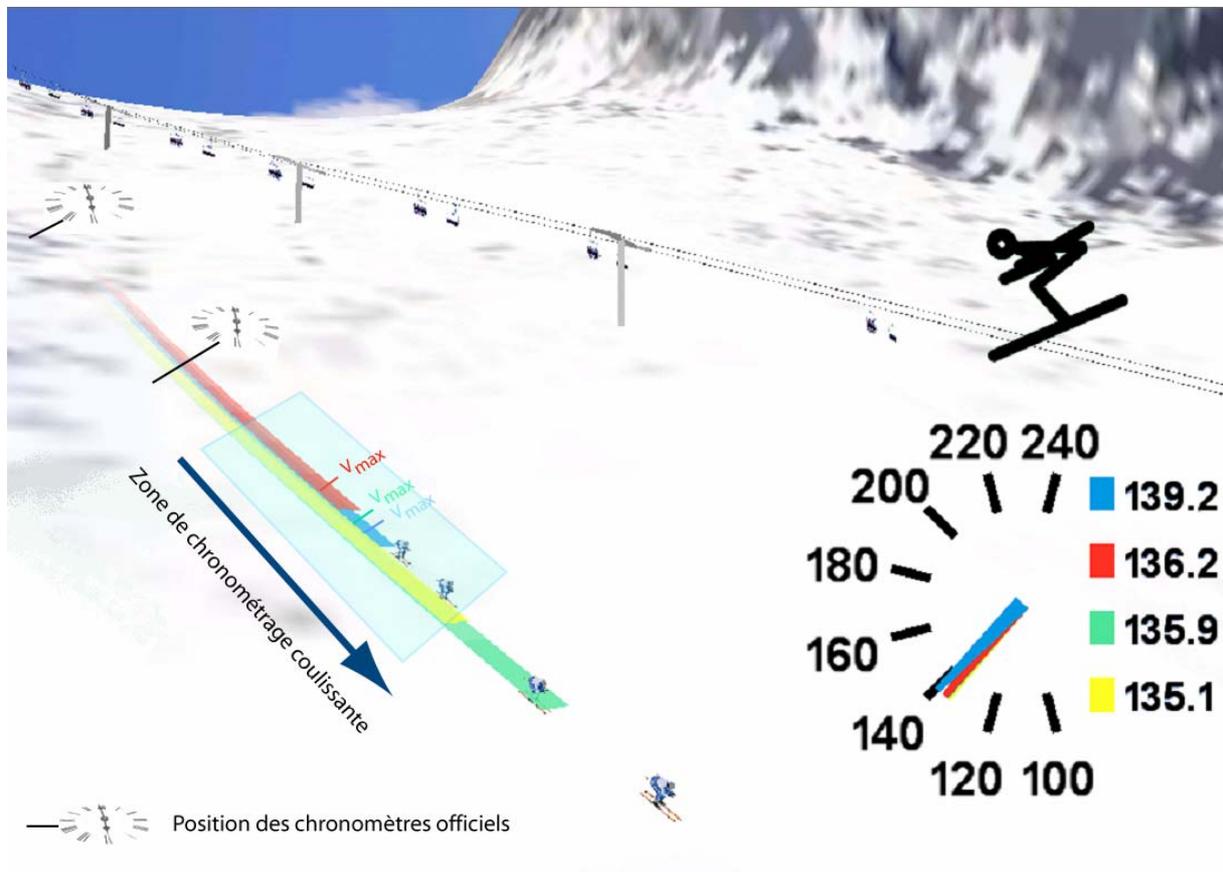


Figure 3. Optimisation du positionnement de la zone de chronométrage par GPS

Cette expérience nous a permis de mettre au point une technique non empirique de placement des cellules de chronométrage, mais elle a aussi mis en avant certains inconvénients inhérents à la communication par GSM.

- Un natel qui n'est pas géré par le firmware d'un récepteur GPS nécessite une programmation (Siemens AG, 2001) par des commandes Hayes non normalisées !
- L'établissement de la connexion peut prendre quelques minutes alors que la patience des compétiteurs est limitée.
- La facturation est basée sur le temps à cause du lien réservé et exclusif entre les deux postes.
- La vitesse de transfert est limitée à 9 600 bps.

7. NTRIP (Networked transport of RTCM via Internet Protocol)

En raison de la capacité accrue d'Internet, les radios en ligne, qui débitent des flux continus de paquets IP^{vi}, sont devenus des services bien établis. Le transfert de données GPS temps réel requiert une bande passante relativement étroite par rapport à ces applications. Par conséquent, la dissémination de corrections RTK via Internet constitue une alternative intéressante à l'usage des techniques de diffusion mentionnées précédemment. Dans le cadre d'EUREF^{vii}, l'agence fédérale de cartographie et géodésie de Francfort (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) a développé une technique temps réel de collecte et d'échange de données GPS sur Internet. Le procédé, baptisé NTRIP (Weber et al., 2003), fait appel à une architecture de serveurs très lourde permettant à des milliers d'utilisateurs de se connecter simultanément (figure 4). Cette caractéristique, ainsi que la difficulté d'implémenter nos propres routines sur un serveur NTRIP, nous a conduit à investiguer sur l'exploitation d'une simple station de travail comme serveur de corrections RTCM.

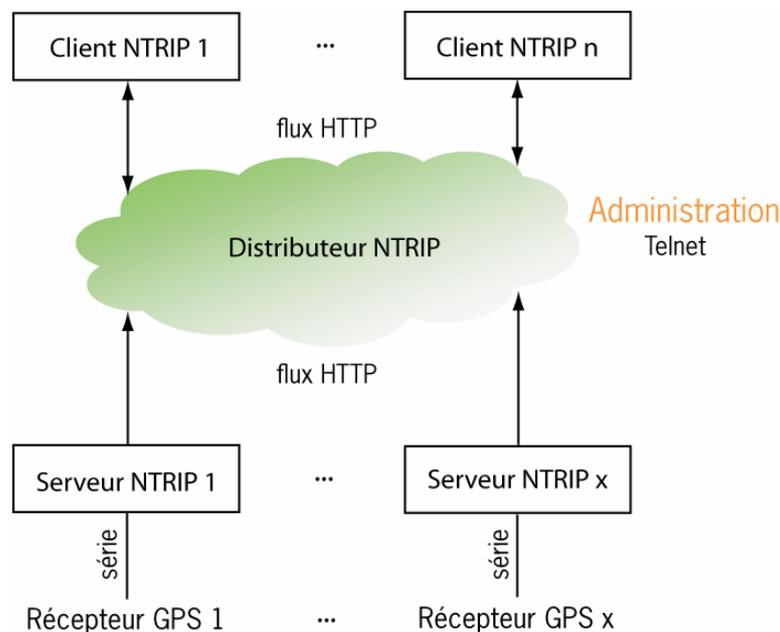


Figure 4. Architecture NTRIP

L'Internet mobile est intimement lié au GPRS^{viii} (Cisco Systems^{INC}, 2000) qui est un service de transmission de données par radio, utilisant la commutation de paquets sur le réseau GSM. Dans le cadre d'une liaison GPRS (figure 5), la connexion est directement réalisée sur Internet et le modem se comporte comme une interface réseau UDP^{ix} / TCP/IP. Aucune ligne n'est réservée pour l'échange des données entre les modems, puisque les ressources nécessaires à la communication sont allouées dynamiquement sur demande. Les données sont organisées sous forme de blocs UDP ou TCP/IP, si bien que le débit peut atteindre 171,2 kbps, soit 10 fois plus qu'une liaison GSM. En outre, la facturation d'une connexion GPRS est basée sur le volume de paquets IP transférés, indépendamment du temps et du lieu de réception des informations. Cette approche présente l'avantage de projeter directement

l'application/le périphérique contrôlant le modem sur Internet via un APN (Access Point Name). Comme le port http (TCP 80) n'est généralement pas filtré par un pare-feu, un serveur de corrections RTK peut exploiter celui-ci à l'aide d'un logiciel convertissant un flux sériel de données en GPS en paquets TCP/IP. Il en découle que le rover est prêt à accéder au serveur de corrections à partir de n'importe quelle zone couverte par GSM à un coût unique.

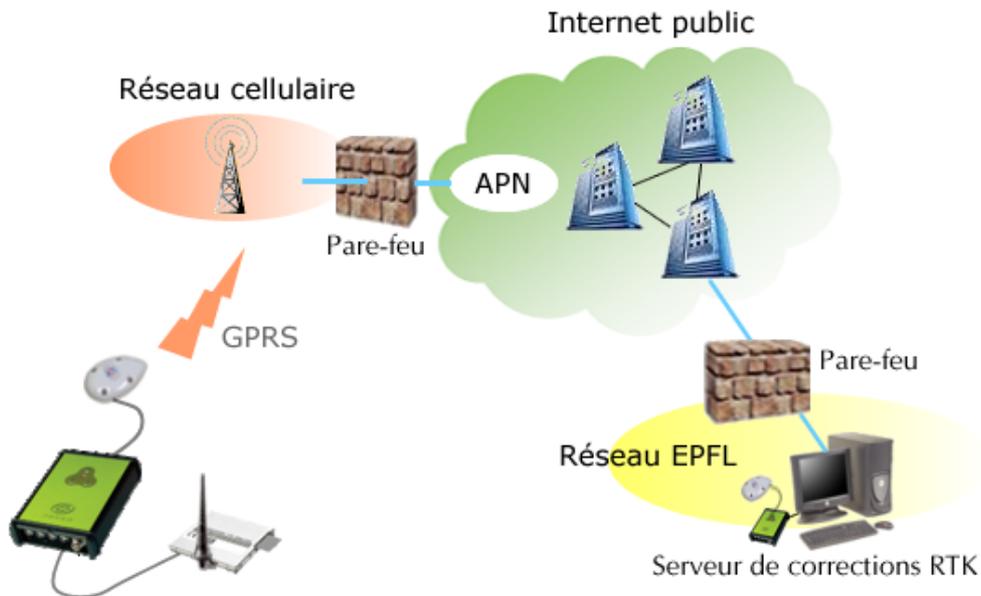


Figure 5. Diffusion de corrections GPS via GPRS

Néanmoins, un natel compatible GPRS ne peut pas transmettre de corrections GPS à un rover, dans la mesure où aucune commande Hayes ne permet d'introduire l'adresse IP du destinataire. Dans le cas d'une introduction manuelle du numéro IP du serveur, le navigateur web du téléphone cellulaire tente d'interpréter les corrections GPS, ce qui mène à des dépassements de temps de connexion.

La solution réside dans l'intégration d'un modem embarquant la pile de protocoles de communication PPP, UDP et TCP/IP. Grâce à un tel périphérique, le rover se comporte comme s'il était directement connecté au serveur par un câble série virtuel.

Le processus de connexion est limité à l'exécution du script suivant:

- AT+CGDONT = 1, "IP" , "mon.apn.ch" *Désignation de l'APN*
- AT#USERID = "mon_nom" *Authentification de l'utilisateur*
- AT#PASSW = "ma_clef" *Mot de passe*
- AT#SKTSET = 0,80,"mon_serveur_RTK" *Définition du serveur distant*

8. Vers un NTRIP mobile

L'implémentation de NTRIP que nous venons de décrire fonctionne, pourvu que le serveur de corrections appartienne à un réseau local. Réaliser une solution entièrement mobile implique la connexion de modules GPRS à la fois au niveau du

rover et de la référence. Or, l'APN de l'opérateur téléphonique attribue dynamiquement une adresse IP privée aux cartes SIM; ces dernières n'acceptent donc aucune connexion entrante.

Deux solutions sont envisageables:

- Définir un accord avec l'opérateur GSM pour d'obtenir des adresses IP routables pour les cartes SIM intervenant dans la communication GPRS
- Effectuer une connexion GPRS de la base et des mobiles sur l'adresse IP d'un serveur Internet, qui autorisera l'échange des corrections GPS.

Les tests de la première solution aboutissent à des résultats prometteurs, les opérateurs s'intéressant au flux maximal d'informations diffusables via leur réseau.

9. Perspectives

Grâce à la large bande passante du GPRS, une seule station de référence peut diffuser des corrections RTK vers plusieurs mobiles, au rythme et au format choisi par l'utilisateur. Par ailleurs, les scripts de connexion Internet sont exécutables à la mise en service des modules GPRS, sans prise en charge par le firmware des récepteurs GPS. Ceci laisse présager de multiples applications innovantes:

- Accès simplifié au mode GPS-RTK (sélection d'une ligne série et du type de corrections en entrée)
- Equipement rapide de compétiteurs avec des récepteurs GPS-RTK directement fonctionnels.
- Comparaison en temps réel de la trajectoire de nombreux sportifs sans déploiement massif de capteurs.

Les modules communicants sont bien entendu utilisables dans d'autres domaines de la géomatique, à savoir la surveillance de risques naturels en temps réel, notamment les glissements de terrain, et un dialogue permanent avec des bases de données géographiques, par exemple dans le cadre du géo-marketing.

Conclusion

GPS-RTK suscite un grand engouement parmi les géomètres et les chercheurs dans la mesure où il rend facultatif le post-traitement des données GPS. Cette technique impose le choix d'une liaison de communication en adéquation avec les besoins de l'utilisateur. Le service GPRS, et plus tard l'UMTS (Universal Mobile Telecommunications Systems), constitue une solution simple et flexible pour la transmission de corrections RTK. A quand l'intégration dans les récepteurs GPS d'un décompacteur de paquets TCP/IP et à quand la généralisation de récepteurs GPS intégrés aux téléphones mobiles?

Contact

Hervé Gontran
Laboratoire de Topométrie (EPFL) <http://topo.epfl.ch>
herve.gontran@epfl.ch

Bibliographie

Cisco Systems^{INC}, 2000. GPRS White Paper, documentation technique.

Dupraz, H., Sancho, I., Zdravkovic, A., 1992. La méthode GPS, support de cours à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Javad Navigation Systems^{INC}, 2003. GPS Receiver Interface Language (GRIL), manuel technique.

Pacific Crest^{INC}, 1995. The Guide To Wireless GPS Data Links, manuel technique.

Siemens AG, 2001. AT command set for S45 Siemens mobile phones and modems, manuel technique.

Skaloud, J., Limpach, Ph., 2003 [Synergy of CP-DGPS, Accelerometry and Magnetic Sensors for Precise Trajectory in Ski Racing](#) Proceedings de la conférence de ION GPS/GNSS 2003 Portland, USA, 9-12 septembre 2003.

Weber, G., Dettmering, D., Gebhard, H., 2003, Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP).

Glossaire

ⁱ RTK : Real-Time Kinematic

ⁱⁱ OFCOM : Office Fédéral de la COMmunication

ⁱⁱⁱ Rover : Récepteur mobile

^{iv} GSM : Global System for Mobile communications

^v FIS : Fédération Internationale de Ski

^{vi} IP : Internet Protocol

^{vii} EUREF : EUropean REference Frame

^{viii} GPRS : General Packet Radio Service

^{ix} UDP : User Datagram Protocol

^x TCP : Transmission Control Protocol