

Le point sur les traitements de données GNSS en réseau pour un positionnement centimétrique temps réel de meilleure qualité

■ Romain LEGROS - Frédéric MOLLE - Nicolas BALARD

Depuis les années 80 et la mise en place du système GPS, les recherches dans le domaine du radiopositionnement par méthodes GNSS n'ont cessées de s'étendre et il est aujourd'hui possible de se positionner en temps réel avec une précision centimétrique de manière totalement transparente en traitant les données d'observation en réseau afin de résoudre de manière satisfaisante la majorité des problèmes rencontrés en mode RTK. D'une manière générale, il s'agit de modéliser les erreurs spatialement corrélées (ionosphère, troposphère et éphémérides) sur chaque station avant de mettre en place des modèles de propagation en réseau (plans, polynômes ou modèles d'interpolation plus ou moins complexes) et de diffuser les données nécessaires aux utilisateurs (corrections et/ou observations) pour qu'ils puissent se positionner par double différence avec la précision escomptée suivant diverses approches. L'enjeu est de taille puisqu'il s'agit, au moment où plusieurs réseaux sont en passe de couvrir le territoire (ORPHEON, TERIA, etc.), de démocratiser l'utilisation de l'information géographique en favorisant son accès.

■ mots-clés

GNSS, GPS, stations permanentes, erreurs d'éphémérides, erreurs ionosphériques, erreurs troposphériques, multitrajets, ambiguïtés entières, modélisations en réseaux, surfaces paramétrées, continuité spatiale, continuité temporelle, interpolation, RTCM, NTRIP, MAC, FKP, PRS, RRS, VRS.

Depuis le début des années 1980 et la mise en place du système GPS (Global Positioning System), les techniques de positionnement par satellites n'ont cessées de progresser pour obtenir la place prépondérante que nous leur connaissons aujourd'hui. Elles interviennent en effet aussi bien dans le domaine du positionnement (navigation terrestre, maritime et aérienne, topographie, géodésie, sciences de la terre, surveillance d'ouvrage d'art, guidage d'engins, agriculture de précision, etc.) que dans celui de la météorologie ou de la synchronisation temporelle.

Les systèmes de radiopositionnement par satellites sont en fait à décomposer en deux grandes familles en fonction du caractère "ascendant" ou "descendant" de la mesure, étant entendu que

nous laisserons de côté les systèmes ascendant de type DORIS (*Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite*) pour uniquement nous intéresser aux systèmes descendant de type GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) comme le GPS de l'armée américaine, le GLONASS (*GLObal'naya Navigatsionnaya Spunikovaya Sistema*) de l'armée russe ou encore le futur système civil européen GALILEO prévu pour la fin 2010.

Durant les vingt dernières années, le perfectionnement des techniques de positionnement GNSS a permis d'une part leur ouverture à de nouvelles applications temps réel pouvant parfois requérir une très forte dynamique (positionnement centimétrique temps réel à des fréquences pouvant atteindre les 20 Hz pour

du guidage d'engins ou de la surveillance d'ouvrages d'arts) tout en permettant d'autre part d'en améliorer encore la précision. Dans le domaine du positionnement statique et pour certaines applications scientifiques bien particulières telles que la géodésie ou la surveillance des déformations ductiles de l'écorce terrestre appliquées à la prédiction des séismes, il est ainsi possible d'obtenir une précision de quelques millimètres au prix de nombreux efforts (éphémérides précises, modèles ionosphériques et troposphériques fins, observations sur des séries temporelles longues pouvant parfois atteindre plusieurs années, prise en compte des surcharges océanographique et atmosphérique, etc.).

L'apparition, au milieu des années 1990, du mode de positionnement cinématique temps réel ou RTK (*Real Time*

■ ■ ■ *Kinematic*, couplé à la mise en place de référentiels géodésiques compatibles GPS (RGF93 en France), révolutionna les méthodes de production de données géographiques. Cette innovation permit non seulement d'ouvrir de nouveaux horizons en terme de précision et d'homogénéité des levés, mais s'accompagna aussi et surtout d'une réduction des coûts et de gains de productivité sans précédents relativement aux méthodes optiques classiques prévalant jusqu'alors.

Depuis ces dernières années, la principale innovation en terme de positionnement temps réel consiste à traiter les données GNSS en réseau pour fournir aux utilisateurs un service centimétrique totalement transparent, reléguant ainsi le RTK "classique" au second plan en libérant l'utilisateur des contraintes techniques et opérationnelles inhérentes à ce mode de positionnement (mise en place, rattachement et surveillance d'une station de référence pseudo permanente). Il est alors probable que cette innovation technologique permette de démocratiser plus rapidement le positionnement centimétrique temps réel en rendant la technique plus accessible que jamais (simplicité, réduction des coûts), lui permettant par là même de prendre son plein essor.

Au final, l'enjeu est énorme dans la mesure où ces réseaux temps réels, couplés à l'augmentation du nombre de satellites (GLONASS, GALILEO), permettront sûrement de favoriser l'utili-

sation de l'information géographique dans tous les domaines (travaux publics, VRD, aménagement, environnement etc.) dans la mesure où il n'aura jamais été aussi simple et peu onéreux d'accéder à un jeu de coordonnées précises dans un référentiel homogène, aussi bien dans le temps (répétabilité de la mesure) que dans l'espace (cohérence de levés décorrélés).

A l'heure où la France est en passe d'être couverte par plusieurs réseaux centimétriques temps réel (ORPHEON, TERIA etc.) il nous apparaît essentiel, au regard des maintenant presque deux années d'expérience d'ORPHEON dans le domaine, et surtout du retour d'expérience acquis dans la trentaine de pays où de tels services existent déjà, de faire le point autour de ces évolutions techniques afin que chacun puisse y voir un petit peu plus clair.

Alors évolution ou révolution?

Avant d'entrer dans le vif du sujet, nous supposons que le lecteur possède les pré-requis nécessaires sur les principes inhérents au radiopositionnement par méthodes GNSS, étant entendu que nous l'encourageons vivement à se référer au fascicule intitulé "*Quelques brefs rappels sur le positionnement de précision par méthodes GNSS - Application au système GPS*" spécialement préparé pour l'occasion afin de compléter cet article et bientôt téléchargeable sur le site web du projet ORPHEON (<http://www.orpheon.biz>), rubrique "Téléchargements".

Intérêts et concepts généraux sous jacents à l'utilisation de données GNSS en réseau

Le mode de positionnement RTK est idéal pour se positionner avec une grande précision tant que la distance séparant le mobile de sa station de référence (ligne de base) reste relativement courte. Dès que la longueur des lignes de bases augmente, les erreurs corrélées dans l'espace liées aux perturbations atmosphériques (erreurs ionosphériques et troposphériques) ainsi qu'à l'incertitude portant sur la position des satellites au moment de l'émission du signal (erreurs d'éphémérides) ne sont plus les mêmes sur la station de référence et sur le mobile, entraînant des problèmes de résolution des ambiguïtés entières sur le mobile.

Ces erreurs corrélées dans l'espace induisent en fait, lorsqu'elles ne rendent pas impossible la mesure (impossibilité de fixer les ambiguïtés entières), une perte de précision comprise entre 1 et 10 ppm en fonction des conditions météorologiques [Wübbena et al., 1996], la longueur des lignes de bases utilisables pour un positionnement de précision pouvant parfois se trouver limitées à moins de 10 km durant les périodes d'intense activité ionosphérique [Vollath et al., 2002].

D'une manière générale, les réseaux de stations permanentes permettent alors de pallier ce problème d'éloignement à la référence rencontré avec les stations permanentes "isolées". Les recherches dans le domaine du traitement de la phase des signaux GNSS en réseau s'étant multipliées ces dernières années, il est en effet aujourd'hui possible de se positionner n'importe où au sein d'un réseau de stations permanentes avec une précision centimétrique sans que l'utilisateur n'ait à se soucier de la distance le séparant de la station la plus proche.

Pour entrer un peu plus dans le détail, les performances du mode RTK dépendent en fait de l'aptitude du mobile à résoudre les ambiguïtés entières et à modéliser les résidus des erreurs corrélées dans l'espace dans le calcul par doubles différences de la ligne de base le séparant de



Figure 1. Exemples d'application du positionnement GPS centimétrique temps réel au sein d'un réseau de stations permanentes.

sa station de référence et le traitement des données en réseau permet de résoudre de manière satisfaisante la majorité des problèmes rencontrés [Lachapelle et al., 2000]. Il est en effet possible de fixer les ambiguïtés entières sur chaque station du réseau puis de modéliser ponctuellement les retards ionosphérique et troposphérique ainsi que les erreurs d'éphémérides [Fotopoulos et al., 2001]. En combinant les observations sur les stations du réseau, la résultante de ces erreurs spatialement corrélées peut être modélisées sur toute la région couverte par diverses techniques de paramétrisation tandis que la répétitivité de la mesure permet de moyennner ou même filtrer les erreurs spatialement décorréées comme les multitrajets ou les bruits de mesure portant sur les stations de référence [Lachapelle et al., 2000].

Le fait d'envoyer ces informations au mobile lui permet alors de s'initialiser (résolution des ambiguïtés entières) plus rapidement indépendamment de sa position [Roberts, 2000] pour fournir un positionnement de meilleure qualité au sens large. Wübbena et al. [1996] ont ainsi montré en simulant un réseau de stations permanentes par post-traitement qu'il était possible de limiter les erreurs à moins d'un centimètre quelle que soit la position du mobile dans le réseau (meilleure précision) tandis que Fotopoulos et al. [2001] ont montré que les traitements en réseau permettaient d'accroître l'intégrité et la disponibilité du positionnement comparativement à un calcul ne faisant intervenir qu'une seule station de référence.

Vollath et al. [2002] ont enfin démontré que le positionnement RTK en réseau

ne faisait pas que réduire les erreurs mais en changeait les caractéristiques intrinsèques pour aboutir à une augmentation significative des performances comparativement à une solution RTK classique.

A travers cet article, nous allons tenter de mettre en lumière les principales étapes nécessaires au traitement des données GNSS en réseau en illustrant certains principes ou concepts à partir d'expérimentations effectuées sur l'îlot francilien du réseau ORPHEON. Pour rendre le discours plus parlant, nous nous arrêterons régulièrement sur les concepts et méthodes de traitement repris dans les concepts VRS, FKP et MAC ainsi que sur certains détails d'implémentation des différentes solutions commerciales associées, notre but n'étant pas de classer ces solutions ou de porter un quelconque jugement de valeur, mais plutôt d'apporter des éléments constructifs aux lecteurs.

Pour simplifier, les opérations à réaliser pour permettre à un mobile de se positionner en temps réel avec une précision centimétrique sont reprises dans la figure 2 dont nous allons expliciter chacune des composantes tout au long de notre exposé.

Récupérer les données d'observation et calculer les erreurs ponctuellement

Toutes les stations permanentes d'un réseau sont connectées par l'intermédiaire d'un réseau de télécommunication à un centre de contrôle qui va se charger de récupérer toutes les données d'observation à une fréquence de 1 Hz.

Il est alors important de noter que la latence d'un tel réseau est un élément important à prendre en compte dans la mesure où moins elle sera importante, plus les modèles d'erreurs seront à jour et moins la latence finale du positionnement côté utilisateur sera grande. Dans le cas de la solution GPSNet commercialisée par la société TRIMBLE-TERRASAT, les modèles en question sont renseignés toutes les secondes et perdent leur limite de validité s'ils ne sont pas alimentés de manière suffisamment régulière pendant 30 secondes, période au-delà de laquelle les erreurs corrélées dans l'espace à un instant donné atteignent leur limite de validité.

La fiabilité et la performance du réseau de télécommunication utilisé sont donc une issue importante dans la mesure où une perte de données se traduira directement par un manque de disponibilité du service (époques manquantes).

Il est donc important de bénéficier d'un réseau disponible, à très faible latence et relativement bon marché pour limiter les coûts de fonctionnement. Il s'agit vraiment d'une issue importante et l'émergence des réseaux de type TCP/IP et des nouvelles technologies associées sont une véritable aubaine dans ce domaine même si l'Internet classique (ADSL) ne suffit souvent pas dans la mesure où ses performances sont trop dépendantes de l'état de charge du réseau.

Fixer les ambiguïtés entières

La résolution des ambiguïtés entières est une issue fondamentale pour se positionner avec précision par méthodes GNSS et il s'agit vraiment d'un sujet de recherche important au regard des 300 papiers scientifiques consacrés au sujet depuis les années 1990 [Kim et Langley, 2000]. Ce sujet est donc bien documenté et les dernières approches se basent sur la théorie des moindres carrés [Teunissen, 1993] pour estimer les ambiguïtés entières en temps réel comme paramètres dans le calcul d'une ligne de base par double différence au même titre que les coordonnées en elles-mêmes. Dans ces méthodes de résolution dites "OTF" pour "On the Fly", les

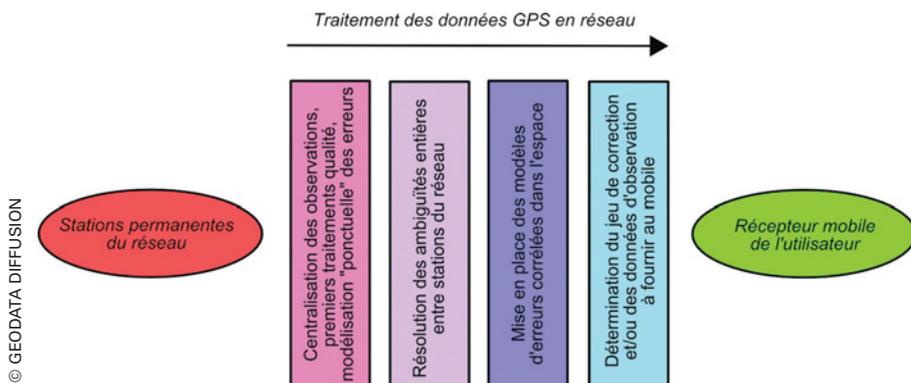


Figure 2. Les différentes étapes d'un traitement GPS en réseau modifiées d'après Euler [2005].

ambiguïtés sont donc estimées comme des réels avant d'être fixées à leur valeur entière.

Les moteurs de résolution des ambiguïtés entières en réseau peuvent alors travailler suivant deux approches temps réel bien différentes, pour chaque ligne de base pour tous les satellites, soit en les calculant par double différence [Landau et al., 2001 ; Rizos et al., 2002], soit en les estimant après modélisation des erreurs ionosphériques, troposphériques, d'éphémérides, voire des multitrajets, les coordonnées précises des stations étant déjà connues avec une très bonne précision dans les deux cas.

Si nous considérons un réseau minimaliste de trois stations sur lequel les ambiguïtés portant sur l'une des lignes de base ne pouvaient être fixées, les observations des satellites incriminés pour les époques en question ne seraient pas prises en compte dans la solution réseau. Sur le même principe, et de manière très liée à la résolution des ambiguïtés, si la fermeture du triangle formé par ces trois lignes de base excédait les 20 mm dans la solution GPSNet, les signaux correspondant ne seraient pas pris en compte pour la génération de la solution réseau.

La résolution des ambiguïtés entières réalisée, une première approche consiste à envoyer au mobile de l'utilisateur les observations de la station de référence la plus proche, appelée "station maîtresse", accompagnées des corrections de différences de phases calcu-

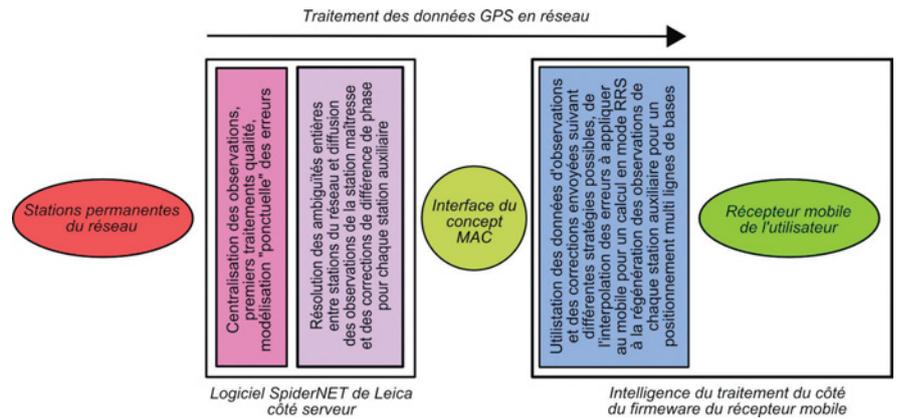


Figure 3. Schéma de principe du concept MAC modifié d'après Euler [2005].

lées pour chaque station environnante jouant le rôle de "station auxiliaire". Il s'agit du concept MAC (*Master Auxiliary Concept*) normalisé par le comité RTCM 3.0 (cf. figure 3).

Disposant des ces corrections de différences de phases pour chaque station auxiliaire et des observations en provenance de la station maîtresse, le mobile est capable de régénérer les observations de chaque station pour potentiellement calculer plusieurs lignes de base en temps réel. En fait, toute l'intelligence du traitement se trouve du côté du mobile qui peut également choisir d'interpoler les corrections de différences de phases représentant la résultante de toutes les erreurs sur chaque station auxiliaire relativement à la station maîtresse selon diverses stratégies de pondération [Euler et al, 2001] (cf. figure 4).

Pour ceux qui souhaiteraient aller un petit peu plus loin, la mise en équation et le détail de la méthode seront bientôt disponibles sur le site web du projet ORPHEON (www.orpheon.biz), toujours dans la rubrique "Téléchargements" où vous pourrez accéder à une version plus complète de cet article.

L'ensemble formé par les stations auxiliaires et la station maîtresse est appelé "cellule", la propriété d'une cellule étant d'avoir un niveau d'ambiguïté commun (normalisation des ambiguïtés à

celles de la station maîtresse pour réduire le volume de données échangées).

Du point de vue des implémentations existantes, seule LEICA GEOSYSTEMS a pour l'instant retenu ce principe à travers son produit SpiderNET, plusieurs modes étant disponibles en fonction du type de message utilisé (RTCM 2.3 ou 3.0) et du type de communication utilisé.

Modéliser les erreurs en réseau

Comme nous l'avons déjà évoqué, les sources d'erreurs affectant la précision du positionnement par méthodes GNSS ont plusieurs origines et il est possible de distinguer les erreurs liées aux satellites (erreurs d'orbites et correction d'horloge du satellite), de celles liées à la propagation du message (erreurs atmosphériques), des erreurs liées à la station en elle-même ou à son environnement immédiat (correction d'horloge du récepteur, variation du centre de phase de l'antenne, bruit électronique du récepteur, multitrajets et sauts de cycles lors d'une perte du signal).

Une première étape va alors consister à traiter chaque ligne de base entre station par simples, doubles et triples différences afin de respectivement éliminer les décalages d'horloges des satellites, les décalages d'horloges des récepteurs, ainsi que les sauts de cycles sur chaque station. Après double différenciation, pourvu que les sites et matériels utilisés soient de bonne qualité (migration du centre de phase des antennes

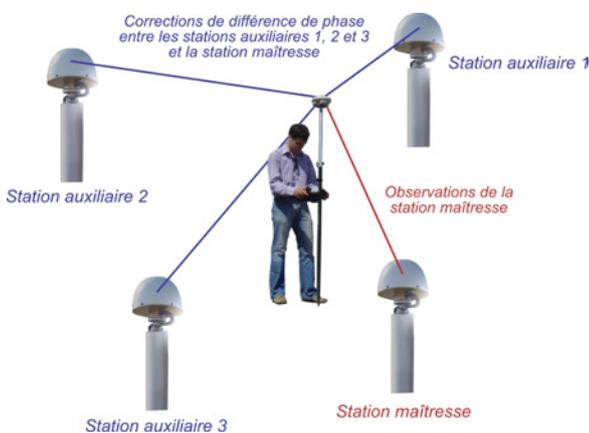


Figure 4. Principe de fonctionnement du concept MAC.

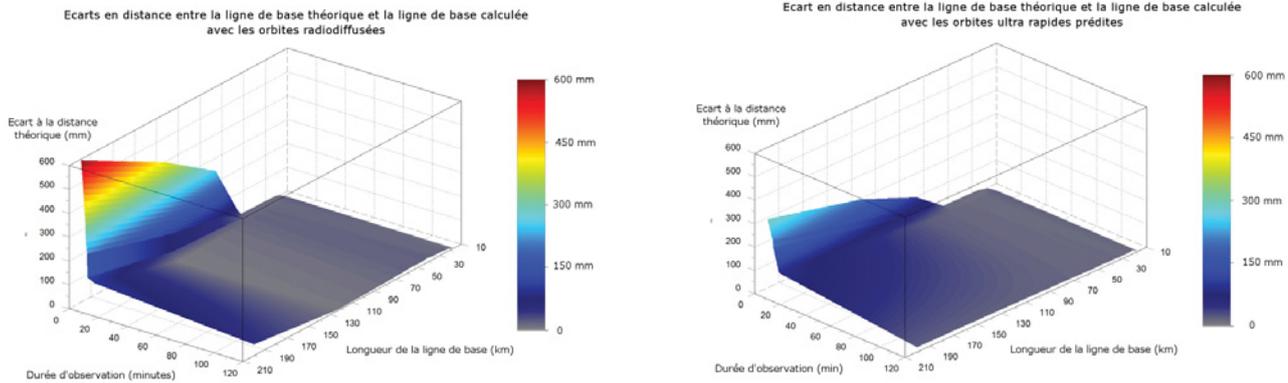


Figure 5. Comparaison entre orbites radiodiffusées et orbites ultra rapides prédites. [Molle, 2005]

GPS calibrées, peu ou pas de sources de multitrajets, peu de biais d'électronique des appareils) il est possible de calculer une ligne de base en temps réel avec une précision centimétrique. Pour plus de précisions, n'hésitez surtout pas à vous référer au fascicule prévu en complément de cet article.

Dans la littérature, les erreurs restantes après double différentiation sont en fait traditionnellement séparées en deux catégories en fonction de leur caractère dispersif (variant avec la fréquence des signaux utilisés) ou non dispersif. Le distinguo est ainsi fait entre les erreurs ionosphériques, dispersives, qualifiées de non géométriques, et les erreurs troposphériques, d'éphémérides et liées aux multitrajets dépendant uniquement de la position des satellites à un instant donné, et donc qualifiées de géométriques.

Mise à part les multitrajets modélisables dans le temps comme la composante de l'erreur géométrique se répétant pour une configuration satellitale donnée, toutes ces erreurs possèdent la propriété importante d'être corrélées dans l'espace et des interpolations spatiales entre stations permanentes permettent d'obtenir des résultats plus que pertinents même si ces corrélations diminuent lorsque la longueur de la ligne de base augmente [Fotopoulos, 2000].

La multiplicité de ces erreurs nécessite alors plusieurs approches et il est parfois simple de s'en affranchir, au moins partiellement. L'IGS (*International GPS Service for Geodynamics* (<http://www.igsb.jpl.nasa.gov>)), propose en effet gratuitement et en temps réel des

orbites ultra rapides prédites toutes les 6 heures échantillonnées à 15 minutes dont l'étude complète sur l'ensemble de la constellation GPS montre des écarts moyens voisins de 10 cm en lieu et place des 2 m des orbites radiodiffusées contenues dans le message de navigation. L'amélioration de la précision du positionnement est illustrée sur la figure 5 représentant les écarts entre lignes de bases théoriques et lignes de bases calculées avec des éphémérides radiodiffusées ou ultra rapides prédites pour différentes durées d'observation et différentes longueurs de lignes de bases.

Le gain est en fait localisé sur les courtes durées d'observation. Dès que l'observation dépasse 20 minutes (1 200 points dans l'étude), les résultats sont similaires. Il faut en fait 1 200 points en mode "orbites radiodiffusées" pour obtenir une précision comparable à 60 points en mode "orbites prédites". L'éloignement est lui largement moins dimensionnant puisque, pour des durées d'observation supérieures à 20 minutes, les écarts croissent peu en éloignement et sont surtout bien modélisables [Molle, 2005].

Dans d'autres cas, l'absence de données

exogènes nécessite la construction de modèles géométriques de retards ionosphériques et troposphériques à partir des retards déterminés sur chaque station du réseau, le nombre de paramètres de ces modèles croissant proportionnellement avec le nombre de stations. Les modèles surfaciques simples, triangles par triangles donnent déjà de très bons résultats et le fait de les étendre à plus de trois stations en réalisant un ajustement par moindres carrés permet de réduire les effets de bord tout en améliorant les interpolations hors maille, la contrepartie étant de lisser les résultats à l'intérieur du réseau [Fotopoulos, 2000] (cf. figure 6).

Le retard ionosphérique est alors le plus facilement modélisable car inversement proportionnel au carré de la fréquence.

L'équilibre à rechercher se situe donc entre la taille de la maille et le nombre de paramètres du modèle surfacique, un triangle de stations fixes de 70 km de côté (erreurs orbitales acceptables et limite de décorrélation spatiale des erreurs atmosphériques) avec des modèles simples à 3 paramètres aboutissant déjà à des précisions de positionnement de l'ordre de

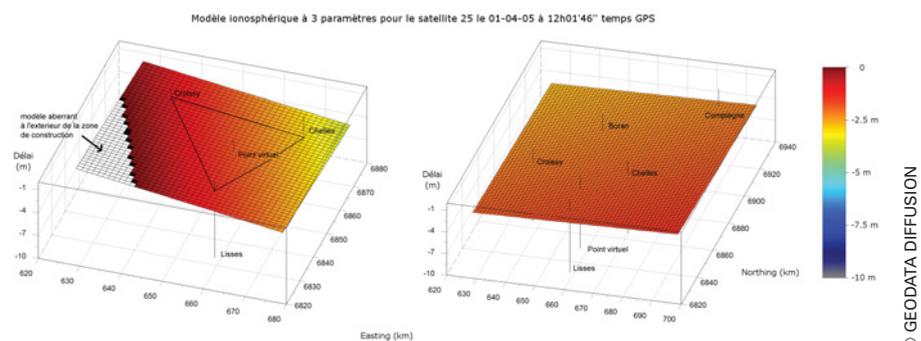


Figure 6. Modèle de correction ionosphérique plan ajusté sur 3 ou 5 stations. [Molle, 2005]

■ ■ ■ quelques centimètres [Molle, 2005].

A l'inverse, un modèle unique pour un réseau entier doit comporter un nombre plus important de paramètres, l'idée générale consistant à effectuer un développement limité d'ordre 2 ou 3 du modèle surfacique [Fotopoulos, 2000] (cf figure 7).

La qualité des modèles repose également sur leur stabilité dans le temps et plus le modèle est paramétré finement, plus sa stabilité est caractérisée. Les résultats témoignent, pour des triangles de 70 km de côté avec des modèles à 3 paramètres, de durées de stabilité pouvant atteindre la minute pour les erreurs ionosphériques [Molle, 2005], les valeurs standards de rafraîchissement des modèles ionosphériques et troposphériques proposées par le comité RTCM66 (2002) étant de respectivement 2 et 30 secondes [Euler, 2004]. Les modèles troposphériques, plus complexes, suivent les mêmes logiques mais nécessitent souvent plus de données en entrée dans la mesure où ils dépendent des conditions météorologiques des basses couches atmosphériques (modèles de Hopfield, Goad et Goodman ou encore Saastamoinen pour les plus utilisés).

Du point de vue des implémentations existantes, la solution GNSMART de chez GEO++ s'appuie sur la modélisation d'un vecteur d'état du système tandis que la solution GPSNet utilise les orbites ultra rapides prédites, un polynôme à 2 paramètres (latitude de l'utilisateur et angle zénithal du soleil) pour modéliser les erreurs ionosphé-

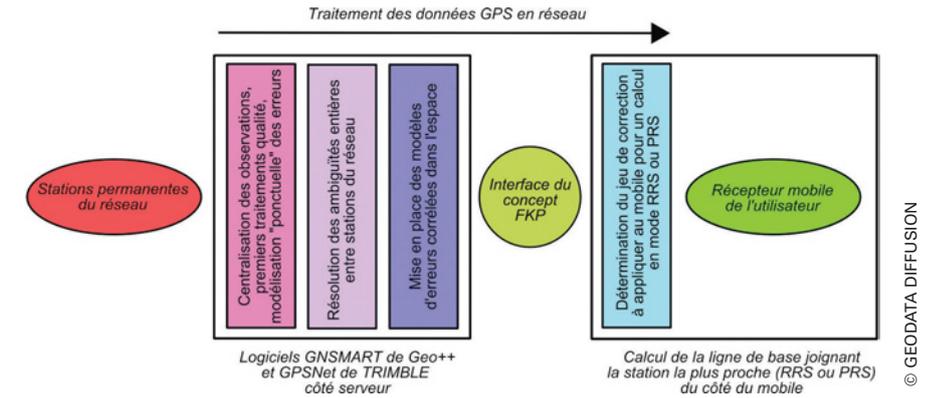


Figure 8. Schéma de principe du concept FKP modifié d'après Euler [2005].

riques, les erreurs troposphériques étant estimées à partir d'un modèle géométrique de Hopfield modifié.

Une autre approche consiste à prendre en compte la variation spatiale des erreurs corrélées dans l'espace par l'intermédiaire de corrections surfaciques ou FKP pour *Flächenkorrekturparameter* (cf. figure 8). Cette méthode consiste à créer autour de chaque station du réseau une surface plane correspondant à la variation de l'erreur autour de cette station, les pentes de cette surface étant déterminées à partir des observations sur les stations voisines. Pour déterminer les corrections à appliquer à sa mesure, le récepteur du mobile a seulement besoin de récupérer les coefficients de pentes pour les erreurs dispersives et non dispersives, ces derniers pouvant être transmis par radio. Pour plus de précisions, vous trouverez également des compléments dans la version plus complète de cet article librement téléchargeable sur le site www.orpheon.biz.

efficients de pente étant véhiculés par la composante 59 du message RTCM.

Interpoler les erreurs et diffuser un jeu de corrections et/ou d'observations

Les modèles de propagation des erreurs mis en place, qu'il s'agisse de corrections de différences de phase, de plans ou encore de surfaces polynomiales prenant en considération plus ou moins de stations, reste à calculer la position du mobile par double différence. Plusieurs stratégies sont alors envisageables en fonction de la nature unie ou bidirectionnelle du lien de communication reliant l'utilisateur au réseau. En effet, si le récepteur mobile est capable d'envoyer sa position approchée en mode naturel via la trame GGA du message NMEA (GSM ou mieux pour des raisons économiques par Internet via GPRS à travers le protocole NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*)), il est possible de générer une station virtuelle à proximité de l'utilisateur qui lui servira de référence pour se positionner par double différence, la ligne de base utilisée étant toujours très courte afin de limiter les erreurs résiduelles corrélées dans l'espace.

Le principe de ce mode VRS (*Virtual Reference Station*, ©TRIMBLE) va en fait consister à générer les données d'observations qu'il serait effectivement possible d'observer à l'endroit de l'initialisation du mobile en y plaçant une station de référence bien réelle (cf. figure 9). Connaissant les coordonnées de la station du réseau la plus proche, les coordonnées des satellites

Modèle ionosphérique à 5 paramètres pour le satellite 20 le 01-04-05 à 12h00'16" temps GPS

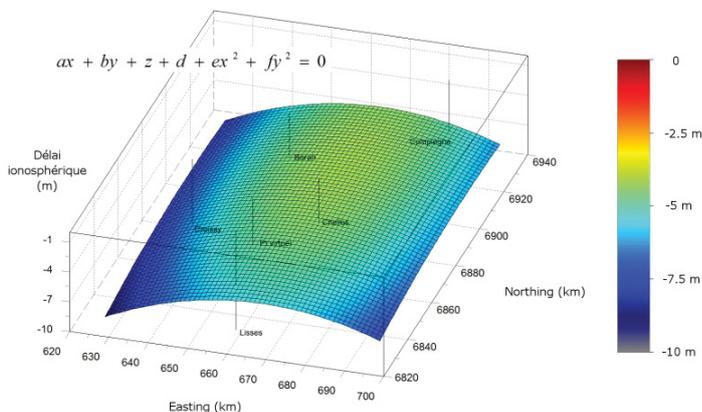


Figure 7. Modèle ionosphérique à 5 paramètres. [Molle, 2005]

nées de la station du réseau la plus proche, les coordonnées des satellites en vue à cet instant ainsi que les coordonnées de cette station virtuelle, la construction des observations (pseudo distances et phases) revient à faire la somme de deux vecteurs en prenant en compte les erreurs dispersives et non dispersives précédemment modélisées.

A partir des données d'observation de cette station virtuelle (messages RTCM 3 et 18, 19 ou 20, 21), le récepteur mobile est alors en mesure de calculer sa position par double différence sans même savoir qu'il s'agisse d'une station virtuelle, rendant la solution parfaitement compatible avec tous les récepteurs du marché, même les plus anciens. Or ce qui peut s'avérer être un avantage non négligeable peut également se transformer en inconvénient dans certains cas dans la mesure où la ligne de base utilisée peut parfois être tellement courte que certains mobiles pourraient ne pas calculer correctement les résidus des erreurs corrélées dans l'espace calculés de manière stochastique (réduction du nombre de mesures servant à approximer la résultante des erreurs modélisée par méthodes de Monte Carlo, ces méthodes reposant sur la loi des grands nombres pour approcher la vraie valeur d'un phénomène observé pour lequel il n'existe pas de formule fermée, mais uniquement des approximations numériques.)

Dans les dernières versions de la solution GPSNet, les coordonnées de la station la plus proche (contexte réseau) sont ainsi également envoyées au mobile via la composante 59 du message RTCM dans un mode intitulé "VRS High Precision" pour palier ce problème.

Dans la solution GNSMART, une station virtuelle peut être créée sur le segment de droite reliant la station la plus proche à la position de l'initialisation du mobile à une distance de l'utilisateur paramétrable par le gestionnaire du réseau (mode PRS pour *Pseudo Reference Station*), le problème se posant alors de savoir quelle distance utiliser (a priori entre 5 et 10 km), étant entendu qu'il est également possible de travailler en mode RRS (*Real Reference Station*) à partir de la station la plus proche.

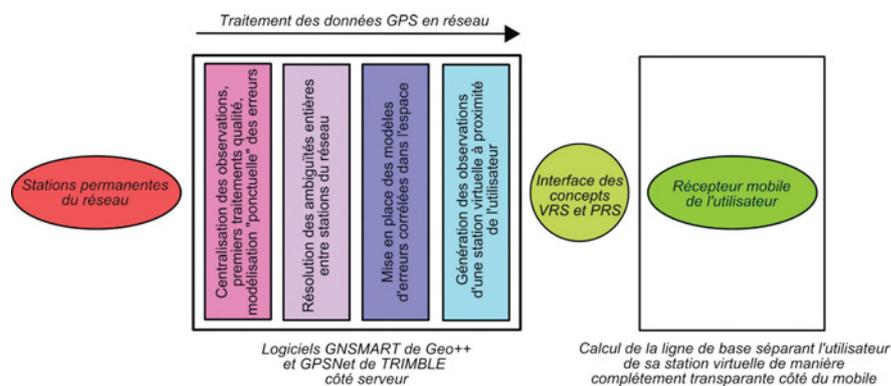


Figure 9. Schéma de principe du concept VRS modifié d'après Euler [2005].

Dans la solution SpiderNET, le RTCM 2.3 ne permettant pas d'envoyer les corrections de différences de phases, une solution transitoire dénommée "i-Max" a été mise au point. Le mobile commence alors par envoyer sa position au système qui lui attribue une cellule de 6 stations, la station maîtresse étant définie comme étant la plus proche de l'utilisateur. Les erreurs dispersives et non dispersives sont alors modélisées sur la position du mobile par interpolation des corrections de différences de phases calculées pour cette cellule et les observations de la station maîtresse sont ensuite modifiées afin de prendre en compte ces erreurs dans le calcul de la ligne de base la reliant à l'utilisateur.

Synthèse et conclusion

Comme expliqué dans cet article, plusieurs approches sont possibles pour traiter la phase des signaux GNSS en réseau suivant que l'interface utilisateur, c'est-à-dire le lien de communication permettant de fournir les corrections et/ou données d'observation d'une station virtuelle (VRS, PRS) ou réelle (RRS), soit plus ou moins en amont de la chaîne de traitement décrite figure 2 pour calculer une position centimétrique.

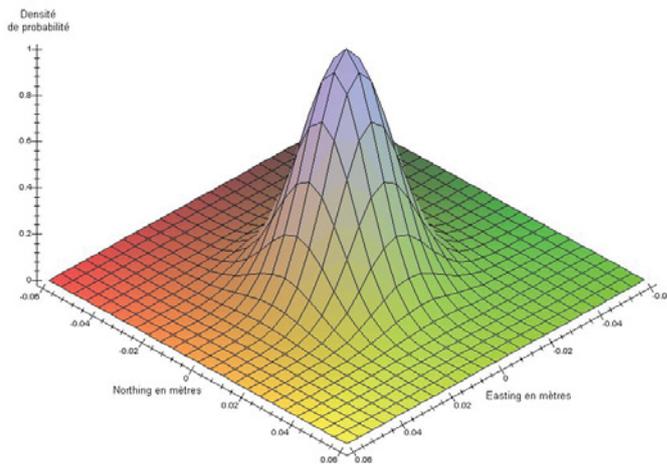
Il s'agit vraiment d'une issue importante, au moins en terme d'interopérabilité, dans la mesure où plus l'interface utilisateur du réseau sera en aval de cette chaîne de traitement, plus l'intelligence se situera du côté du serveur et moins la solution sera ouverte.

En effet, si la structure du message 59 RTCM servant à diffuser des informations propriétaires (paramètres FKP,

mode VRS HP) est parfaitement connue de tous afin que chaque constructeur de matériel GPS puisse lire ce message et rendre son matériel compatible avec une solution donnée, seul l'éditeur du logiciel connaît le détail des calculs effectués et peut donc proposer une solution cohérente à ses clients. C'est pour cette raison que la solution MAC, seule à être normalisée par le comité RTCM 3.0, se limite à résoudre les ambiguïtés entières sans s'occuper de paramétrer la moindre surface d'interpolation afin de laisser toute l'intelligence du traitement au mobile, et donc à la sagacité des constructeurs de matériels.

Pour pousser la réflexion un petit peu plus loin, le jour où les médiums de communication seront suffisamment performants pour l'autoriser, nous pourrions même envisager de directement transférer les données d'observations des stations du réseau au mobile pour lui laisser toute la charge du calcul, ce qui nécessiterait d'ailleurs d'y embarquer des moyens de calcul plus conséquents que ce que nous trouvons actuellement, ou a contrario de récupérer les observations du mobile pour ne lui renvoyer qu'une position centimétrique (augmentation de la charge de calcul côté réseau cette fois-ci).

Quoi qu'il en soit, tout le monde s'accorde aujourd'hui sur le fait qu'il soit possible d'atteindre une précision constante voisine de 2 cm en planimétrie et 3 cm en altimétrie (cf. figure 10), quelle que soit la solution utilisée et la marque du récepteur pourvu que la distance entre les stations du réseau ne dépasse pas les 70 km (limite de corrélation spatiale des sources d'erreurs atmosphériques), d'où l'intérêt manifeste pour



© GEODATA DIFFUSION

Figure 10. 16 septembre 2004: PARIS - Point RBF "La Vilette" (point A du site 7505603) - mode VRS - 160 mesures indépendantes de 3 époques - Résultats à 1σ : 0,8 cm en X et 1,3 cm en Y (coordonnées géographiques Lambert 93) et 2,4 cm sur l'altitude IGN69

■ ■ ■ tiale des sources d'erreurs atmosphériques), d'où l'intérêt manifeste pour l'utilisateur (simplicité d'utilisation accrue, limitation considérable des coûts dans un rapport d'au moins deux relativement au mode RTK "classique") et donc indirectement pour une véritable démocratisation de l'utilisation de l'information géographique dans tous les domaines d'activité où la composante spatiale est importante (aménagement, travaux publics, VRD, environnement etc.). ●

Contacts

Romain LEGROS, Ingénieur Géographe ENSG, Maître spécialisé d'Architecture des Systèmes d'Information Géographiques (ENSG), DESS d'Application de l'informatique aux Sciences de la Terre (Paris VI, ENSG) - Responsable du projet ORPHEON

Frédéric MOLLE, Ingénieur Géographe ENSG, Maître spécialisé de Photogrammétrie, Positionnement et mesures de Déformation (ENSG), Ingénieur Ecole de l'air. Officier de l'armée de l'air, Directeur Technique adjoint de l'Établissement de Production des Données Géographiques (EPDG) - Stagiaire de fin d'étude sur le projet ORPHEON

Nicolas BALARD, Ingénieur ETP, Maîtrise au Centre de Recherche en Géomatique de l'Université LAVAL (Canada) - Enseignant-chercheur au Laboratoire de Topographie

à l'École Spéciale des Travaux Publics du Bâtiment et de l'Industrie (ESTP)

Bibliographie

- Euler, H.-J., S. Seeger, O. Zelzer, F. Takac, B.E. Zebhauser** (2004) - *Improvement of Positioning Performance Using Standardized Network RTK Messages* - Published in proceedings of ION NTM, January 26-28, 2004, San Diego, California, USA.
- Euler, H.-J., R. Keenan, B. Zebhauser, G. Wübbena** (2001) - *Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays* - Published in proceedings of ION GPS 2001, September 11-14, 2001, Salt Lake City, Utah, USA.
- Fotopoulos, G.** (2000) - *Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors over a Regional Network of Reference Stations* - Thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of requirements for the degree of master science, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada
- Hong Diep Dao, T.** (2005) - *Performance Evaluation of Multiple Reference Station GPS RTK for a medium Scale Network* - Thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of requirements for the degree of master science, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada
- Kim, D., R.B. Langley** (2000) - *GPS Ambiguity Resolution and Validation: Methodologies, Trends and Issues* - Presented at the 7th GNSS Workshop - International Symposium on GPS/GNSS,

November 30 - December 2, 2000, Seoul, Korea

Legros, R., (2005) - *Quelques brefs rappels sur le positionnement de précision par méthodes GNSS - Application au système GPS* - White Paper ORPHEON, Lisses, France.

Molle, F., (2005) - *Evaluation de la précision globale d'un positionnement GPS en réseau* - Rapport de stage de fin d'études, Maître spécialisé de Photogrammétrie, Positionnement et Mesures de Déformations, Cycle des Ingénieurs Géographes de l'ENSG, Champs-sur-Marne, France.

Wübbena, G., A. Bagge (2002) - *RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP-Geo++* - White Paper Geo++, Garbsen, Germany

Wübbena, G., A. Bagge (2002), **M. Schmitz** (2001) - *RTK Networks based on Geo++ GNSMART - Concepts, Implementation, Results* - Presented at the International Technical Meeting ION GPS, 2001, September 11-14, 2001, Salt Lake City, Utah, USA.

Sites Web

<http://www.igsb.jpl.nasa.gov>

<http://www.orpheon.biz>

ABSTRACT

Since the 80's and GPS's emergence, researches in the field of GNSS techniques became more and more important and it's nowadays possible to obtain very simply a set of coordinates with a centimeter level in real time through a network of reference stations to resolve RTK problems principally due to bad modeling of space dependent errors existing on the baseline used. In a general approach, it consists to calculate ionospheric, tropospheric and ephemerid errors on each station before propagate those errors in all the network (plan, polynomial or interpolation models) and broadcast necessary data to users (corrections and/or observations) to obtain precise positioning by double difference with various methods. At this very present time where country will be covered by those kind of networks (ORPHEON, TERIA etc.), this issue is very important to democratize the access, and so the use, of geographical information.