

## Méthodes de travail dans les réseaux GNSS 2<sup>e</sup> partie

### Le positionnement statique suivant les méthodes indirectes du pivot central ou de la station virtuelle

■ Romain LEGROS - Laurent MOREL - Flavien VIGUIER - Florian BIROT

Après avoir abordé dans le numéro 132 la première méthode statique permettant par "filtrage et moyenne de positions NRTK" de déterminer en temps réel les coordonnées d'un point à 2-3 cm près (précision 3D à  $1\sigma$ ), nous allons continuer dans cette seconde partie notre progression par complexité croissante à la recherche d'une classe de précision meilleure, toujours en mode statique, c'est-à-dire récepteur immobile sur le point stationné pendant une dizaine de minutes minimum :

#### MOTS-CLÉS

GNSS, NRTK, RTK, PPK, NPPK, Statique, Statique rapide, RGP, réseaux temps réel

La réalisation d'observations GNSS de qualité					
Levers cinématiques				Levers statiques	
Calcul des positions en temps réel		Calcul des positions en temps différé		Calcul des positions en temps différé	
NRTK	RTK "Pivot libre"	NPPK	PPK "Pivot libre" (physique ou virtuel)	Filtrage et moyenne de positions obtenues en NRTK	Statique et statique rapide "multi-stations" Méthodes "indirectes" du "pivot central" ou de la "station virtuelle"

Tableau 1. Structure du document. Les différentes techniques de positionnement GNSS en réseau apparaissent sur la dernière ligne du tableau, la méta-fiche relative à la réalisation d'observations de qualité étant quant à elle représentée sur la première ligne du tableau.

La structure de cet article reprend la trame de la fiche correspondante en y développant un exemple sur un point du RBF (Réseau de Base Français matérialisant la Référence Nationale Géodésique RGF93) afin d'étayer le propos.

#### Objectifs et applications

Cette méthode permet de déterminer les coordonnées précises, voire très précises (classe de précision inférieure à 2 cm) d'un point ou de plusieurs points stationnés quelques minutes afin de matérialiser très exactement la référence nationale sur un chantier. Elle peut donc être utilisée pour :

- Effectuer le contrôle absolu d'un lever obtenu par méthodes topographiques tierces (GNSS cinématiques de type RTK, NRTK, NPPK, PPK, Station optique).

- Déterminer les points d'appui d'un canevas local : mise en référence d'un pivot RTK ou d'un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques.
- Suivre précisément l'évolution des coordonnées d'un point.

#### Matériels et logiciels nécessaires

- Deux récepteurs GNSS permettant de mesurer la phase, de préférence bifréquences, équipés d'un trépied ou a minima d'un bipode permettant de les laisser en place sur le point stationné de manière suffisamment longue, de quelques minutes à quelques dizaines de minutes.
- Un logiciel de post-traitement permettant le calcul des lignes de base GNSS par multi différentiation installé sur un poste informatique muni d'une

connexion Internet. Cette connexion permettra la récupération (typiquement sur le site du RGP) des observations GNSS des différentes stations permanentes encadrant le chantier. Les éphémérides précises, les modèles ionosphériques ainsi que les différents produits utiles pourront éventuellement être aussi téléchargés. Afin de réaliser des calculs plus complexes, le logiciel devra éventuellement permettre d'effectuer un calcul en réseau (ajustement libre ou contraint par moindres carrés).

#### Principe de la méthode

Le lever est fait à partir de données brutes observées à la fois sur le "mobile" et sur un "pivot" placé au plus proche du centre du chantier. Les ambiguïtés entières sont fixées lors du post-traitement. Les coordonnées RGF93 du



pivot sont déterminées au bureau à partir des observations GNSS réalisées sur les stations permanentes de référence (encadrant le chantier). Une fois ces coordonnées déterminées, les lignes de base entre le "pivot" et le "mobile" seront également calculées au bureau lors d'une autre étape de post-traitement, antérieure ou postérieure à la précédente.

L'utilisation de la méthode du pivot central permet de réduire les temps d'observation par rapport à la méthode "statique multi-stations". En l'état actuel (stations RGP à moins de 100 km les unes des autres au 01/02/12), cette méthode est pertinente pour le calcul de lignes de base "pivot central- point à lever" de moins de 10-15 km.

A moins de 10-15 km d'une station du RGP, l'utilisateur pourra envisager d'utiliser cette station permanente comme pivot afin de réduire les contraintes opérationnelles (exemple des agglomérations ayant installé une station permanente intégrée au RGP). En milieu rural, l'utilisation de son propre pivot central demeure souvent la solution la plus judicieuse.

Il est également à noter qu'une station virtuelle peut être utilisée comme pivot central : dans ce cas de figure, plusieurs stations GNSS permanentes physiques permettent de calculer les observations virtuelles en correspondance avec les observations qui auraient effectivement pu être réalisées sur la position centrale du chantier. Dans ce cas de figure, de nombreuses contraintes opérationnelles disparaissent comme la nécessité de disposer d'un second récepteur GNSS, de le mettre en station dans un endroit sécurisé ou encore de le rattacher à la référence nationale. L'utilisateur devra cependant être conscient que les données d'une station virtuelle obtenue par calcul contiennent déjà une certaine part d'incertitude liée :

- aux approximations réalisées lors du calcul des observations virtuelles, notamment lors de la modélisation des erreurs spatialement corrélées (erreurs atmosphériques).
- au fait que la constellation visible sur chacune des stations permanentes servant à modéliser la station virtuelle puisse différer et donc induire un RDOP potentiellement plus fort entre

le mobile et la station virtuelle. En effet, la station virtuelle ne contient par nature que les observations virtuelles des satellites communs à toutes les stations de référence utilisées.

## Planification de la mission

### ■ Détermination des stations de référence à utiliser pour la mise en référence du pivot central.

Choisissez au moins deux stations permanentes afin de calculer la position du pivot :

1. Par intersection de deux lignes de base si votre logiciel de post-traitement est capable de réaliser un ajustement
2. Par moyenne des deux jeux de coordonnées obtenus si votre logiciel de post-traitement GNSS ne permet pas de réaliser un ajustement

Le fait d'utiliser trois stations permanentes permet de détecter une éventuelle faute de calcul ou d'éliminer la ligne de base apportant le plus d'imprécision dans la solution tandis qu'une quatrième station permet d'effectuer un éventuel contrôle : idéalement, il faut donc disposer de 3 stations permanentes plaçant le pivot central au barycentre d'un triangle quasi équilatéral. Une quatrième station située à proximité du pivot central sera également requise pour effectuer un contrôle des travaux (les coordonnées de cette station ne seront pas fixées lors de l'éventuelle phase d'ajustement). En effet en comparant les coordonnées calculées pour ce point avec les coordonnées publiées

nous pourrons vérifier la qualité de mise en référence du pivot (cf. figure 1).

Deux critères topologiques doivent guider votre choix dans la sélection des stations de référence à savoir proximité et répartition. Il convient de choisir les stations de référence permettant de former les lignes de base les plus courtes possibles s'intersectant le plus possible à angles droits afin de limiter au maximum (sur le point calculé) le volume formé par l'intersection des ellipsoïdes d'erreurs associés à chacune des lignes de base.

Pour des applications topographiques avec des logiciels commerciaux, les lignes de base ne doivent normalement pas excéder 200 km. Pour les lignes de base supérieures à 200 kilomètres, de nombreuses précautions particulières devront être prises (modèles ionosphériques, modèles troposphériques, éphémérides précises...).

Les stations de référence servent à se rattacher au système géodésique légal en vigueur, à savoir le RGF93. Elles doivent donc être référencées dans ce système ou pour des stations frontalières dans une réalisation d'un système compatible avec le RGF93 et très bien déterminé (système ETRS89 et réalisations associées ETRF) permettant une transformation fiable et précise.

Le RGP apporte une couverture dense sur le territoire français (plus de 300 stations au 01/02/12). Les données de ce réseau GNSS sont fournies sur le site Internet du RGP au plus tard 1 heure après la dernière heure d'observation (<http://rgp.ign.fr/>).



Figure 1. Choix des stations permanentes du RGP (cercles verts) pour le calcul du pivot central (carré rouge).



## ■ Evaluation des temps de mesure

De manière à avoir le maximum de précision sur les coordonnées du point stationné, vous devez chercher à fixer les ambiguïtés entières sur toutes les fréquences mesurées, objectif pour lequel il vous faut un certain volume minimum de mesure et donc un certain temps d'observation.

### Mesure du pivot central

Vous ne devez prendre aucun risque quant à la détermination du pivot car une erreur sur sa position peut rendre vaine une ou plusieurs journées de travail sur le terrain. En fonction de la longueur des vecteurs, stationner le pivot a minima une à deux heures.

### Mesure des points du canevas

L'équation ci-dessous permet de donner une idée de la durée à respecter lorsque vous stationnez sur un point du canevas. On observe ici que 10 minutes représentent le temps minimum d'acquisition requis. On privilégiera néanmoins des durées d'observations d'environ 20 minutes afin de limiter les erreurs liées à la propagation des signaux (multitrajets GPS par exemple : pour rappel on estime que le temps moyen d'un multitrajet est d'environ 20 minutes).

*Temps de station = 10 minutes + 1 minute par kilomètre de ligne de base + 1 minute par 100 mètres de dénivelée*

**Équation 1.** Temps de station nécessaire en fonction des paramètres d'une ligne de base.

## Phase terrain

### ■ Choix de l'emplacement et monumentation du point

Cette phase de planification réalisée, installez le pivot sur un point central sécurisé, stable, bien dégagé et per-



Figure 2. Exemple d'installation d'un récepteur GNSS en mode statique.

mettant la réalisation d'observations GNSS de qualité conformément aux prérequis présentés dans le document "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS".

Une fois l'emplacement choisi, matérialisez au sol le point à stationner à l'aide d'un repère stable (clou, borne, etc). Installez ensuite le mobile sur des points répondant aux mêmes critères et matérialisez-les également au sol afin de pouvoir les réoccuper.

### ■ Installation des équipements

Procédez à l'installation du pivot en prenant soin de monter le trépied de la manière la plus stable possible, de centrer et de buller convenablement l'embase sur laquelle est fixée l'antenne. Lors de cette phase, il faut particulièrement veiller à bien enfoncer les pieds du trépied dans le sol et à serrer convenablement les vis de réglage dudit trépied. En cas de forte chaleur et de forte exposition au rayonnement solaire, préférez utiliser un trépied en bois plutôt qu'en aluminium pour limiter les phénomènes de dilatation et si nécessaire n'hésitez pas à créer une zone d'ombre à l'aide d'un parasol posé au sol permettant d'abriter le trépied sans masquer l'antenne.

Mesurez alors la hauteur d'antenne selon les recommandations de l'équi-

pementier choisi, soit de manière inclinée soit verticalement (cf. figure 2).

N'oubliez pas de mesurer les hauteurs d'antenne (3 lectures les plus indépendantes possible) et de vérifier le bullage de l'embase en fin de session afin de s'assurer de la stabilité effective de la mise en station.

Procédez de même avec le mobile.

## Phase bureau

### ■ Positionnement du pivot central dans le RGF93

Dans un premier temps vous devez déterminer les coordonnées RGF93 du pivot central en calculant les lignes de base le séparant des stations de référence préalablement choisies (cf. figure 3).

Pour ce faire, vous pouvez vous référer au prochain article sur le positionnement statique "multi-stations" si vous pouvez réaliser un ajustement avec votre logiciel de post-traitement.

Dans le cas contraire, vous calculerez la moyenne des coordonnées du pivot central obtenues à partir de chaque ligne de base. Vous analyserez ensuite les écarts à la moyenne des coordonnées obtenues avec chaque ligne de base, ces écarts ne devant pas excéder 2 cm.

### ■ Positionnement des points du chantier

Comme son nom l'indique, le pivot central est la station qui sert de base au calcul de tous les autres points de canevas stationnés du chantier. Avec la méthode du pivot central il suffit donc de former des lignes de base "en étoile" autour du pivot (cf. figure 4).

Dans un second temps vous devez déterminer les coordonnées RGF93 de tous les points du chantier à partir du pivot central (PC). Cette procédure est illustrée sur la figure 5 où le point S3 du

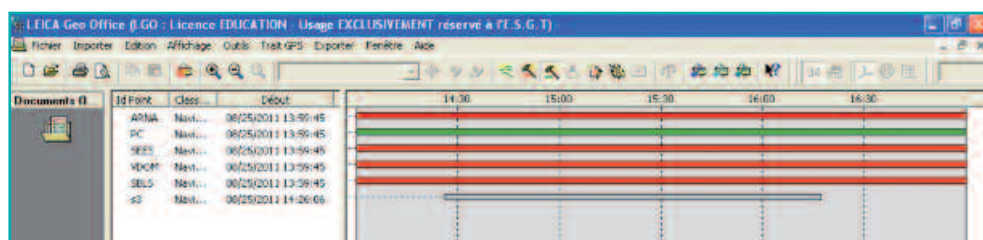


Figure 3. Configuration du traitement pour la détermination du pivot central (en rouge les stations permanentes du RGP fixées à leurs coordonnées RGF93 et en vert le pivot central, PC, dont on détermine les coordonnées).



chantier sera déterminé à partir de PC. Bien entendu, on peut déterminer simultanément l'ensemble des autres points du chantier de la *figure 4* à partir du pivot central.

### Masque d'élévation

A partir des observations, calculez chaque ligne de base avec un masque d'élévation de 10-15°. Cette procédure vous permettra d'utiliser une constellation bien répartie tout en ne prenant pas en compte les satellites les plus bas sur l'horizon. En effet, les délais de propagation atmosphérique des signaux de ces satellites sont très importants et les sources de perturbation desdits signaux sont donc inacceptables pour la classe de précision recherchée.

### Intervalle de traitement

Choisissez un intervalle de traitement de 15 ou 30 secondes afin de limiter le phénomène de corrélation temporelle qui engendrerait artificiellement de trop bons résultats. En effet, en traitant les lignes de base avec un intervalle de traitement de 1 seconde, le volume de don-

nées est certes plus important mais nettement moins significatif en terme d'évolution des conditions atmosphériques (ionosphère, troposphère) et des potentiels artefacts liés au nombre de satellites, leur état de santé et leur disposition géométrique (DOP) : à un hertz, les positions sont alors moins indépendantes qu'à une fréquence plus faible, le fait de disposer de mesures indépendantes étant un prérequis de base pour tous les traitements statistiques réalisés lors du calcul des positions.

### Modèles d'antenne à utiliser

Les décalages de centre de phase des antennes (PCO pour *Phase Center Offset*) doivent être correctement renseignés dans le logiciel de post-traitement utilisé.

En l'état actuel des choses, il est recommandé d'utiliser des modèles de calibration absolus, un fichier formaté étant disponible sur le site de l'IGS (International GNSS Service) à l'adresse suivante : [http://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs\\_cb/station/general/igs08.atx](http://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs_cb/station/general/igs08.atx) ou sur le site du RGP en téléchargeant le fichier

ngs08.atx (<http://rgp.ign.fr/STATIONS/antennes.php>).

Les variations du centre de phase en fonction de l'élévation et de l'azimut des satellites (PCV pour *Phase Center Variation*) peuvent être utilisées. Dans ce cas, les antennes devront être orientées au Nord Géographique de manière à ce que la position du centre de phase puisse correctement être déterminée pour chaque antenne époque après époque.

### Constellations à utiliser

Lors de la réalisation de tels calculs où la précision optimale est recherchée, il est dans un premier temps préférable de travailler en mode GPS seul. En effet, un calcul GNSS trop complexe peut induire une perte de précision si l'opérateur ne respecte pas les précautions d'usage. Sans entrer trop dans les détails, nous pouvons citer les problématiques suivantes :

1. Synchronisation temporelle des différentes constellations.
2. Mise en référence des orbites des satellites dans un système géodésique commun.
3. Normalisation des bruits interférences sur le mobile ainsi que sur les différentes stations de référence utilisées, notamment dans un contexte multimarque.

Notez alors que cette stratégie n'est pas trop pénalisante pour ce type de lever. En effet, on cherche principalement ici à déterminer des points de contrôle (ou des points de base), il est donc aisé pour de tels points de se mettre dans des endroits parfaitement stationnables par méthodes GNSS.

Toutefois, les observations GLONASS peuvent être utilisées en cas de problème majeur (impossibilité de résoudre les ambiguïtés entières sur une ligne de base) afin d'améliorer les



Figure 4. Construction des lignes de base dans la méthode du pivot central.

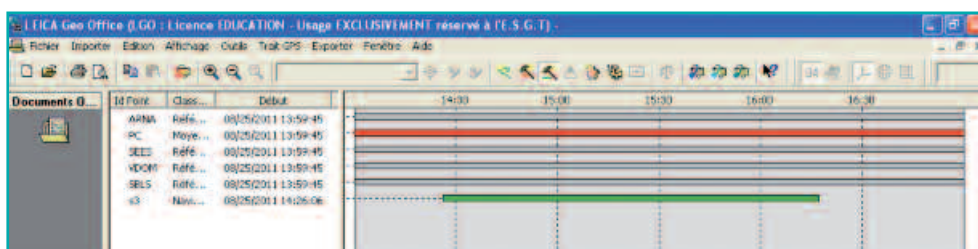


Figure 5. Configuration du traitement pour la détermination des points du chantier (en rouge le pivot central préalablement déterminé et en vert un point du chantier, S3, dont on détermine les coordonnées).



DOPs et d'augmenter significativement la quantité de données observées (nombre d'équations d'observation). Les lignes de base formées étant intrinsèquement courtes (inférieures à 15 km) de par la nature même de la méthode, préférez la fixation des ambiguïtés entières sur L1 et L2. En cas d'impossibilité à fixer les ambiguïtés entières pour certaines lignes de base, utilisez la combinaison linéaire "iono free" L3 (encore parfois notée LC).

### ■ Ephémérides utilisées

Il n'est pas forcément nécessaire d'utiliser des éphémérides précises. Les éphémérides radiodiffusées sont suffisantes pour ce type de calcul. Cependant, si les ambiguïtés entières ne pouvaient être fixées pour certaines lignes de base, il est possible d'utiliser les éphémérides ultra-rapides prédites, rapides voire finales en fonction de vos impératifs en termes de délais de livraison.

Pour plus d'information à ce sujet, référez-vous au document "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS".

### ■ De l'utilité d'utiliser un modèle ionosphérique ou troposphérique

Il n'est pas forcément nécessaire d'utiliser un modèle d'ionosphère ou de troposphère pour des lignes de base aussi courtes, le calcul différentiel tendant à annuler quasi totalement la réfraction ionosphérique et troposphérique pour des lignes de base de seulement quelques kilomètres.

Cependant, si les ambiguïtés entières ne pouvaient être fixées pour certaines lignes de base, il est possible d'appliquer de tels modèles.

Pour plus d'information à ce sujet, référez-vous au document "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS".

### ■ Les différents indicateurs statistiques utilisés pour qualifier la qualité du calcul d'une ligne de base

A ce stade du rattachement, vous obtenez un ensemble de lignes pour lesquelles les ambiguïtés entières sont fixées. Un certain nombre d'indicateurs statistiques traduisant la qualité de ces

lignes de base sont également fournis. En plus du PDOP, du GDOP et du RDOP décrits dans les prérequis du document "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS", il est possible d'analyser les deux indicateurs suivants :

**1. Ratio :** Le ratio donne une indication sur la validité statistique de la résolution des ambiguïtés entières déterminées de manière itérative. Les deux meilleures solutions sont alors comparées (ratio) et cet indicateur se doit d'être supérieur à 1,5 pour que la meilleure solution ait de bonnes raisons statistiques d'être retenue.

**2. RMS :** Le RMS (*Root Mean Square*) correspond à la somme quadratique de la moyenne et de l'écart-type des résidus sur le calcul de la ligne de base pour chaque époque. Au final, les résidus (ou bruit de la mesure) sur chaque satellite devraient être centrés en 0 avec un écart-type de plus ou moins 15 mm, le plus souvent possible inférieur à 20 mm en n'excédant jamais 30 mm.

### ■ Moyens de contrôle

#### Contrôle relatif :

- Vous calculez une seule ligne de base pour chaque point, à savoir la ligne entre le point mesuré et le pivot central. Par conséquent il est primordial de se contrôler en réoccupant entre 10 et 100 % des points stationnés avant par exemple de les utiliser comme point de base d'un lever. Il est alors recommandé de laisser s'écouler de plusieurs dizaines de minutes à plusieurs heures entre deux occupations afin de laisser suffisamment changer l'état de la constellation. Plus ce temps entre deux déterminations sera long, meilleure sera la solution, et plus vous aurez de déterminations pour un même point, plus sa qualité sera avérée.

Conformément aux explications données dans le document "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS", il n'est pas recommandé de réoccuper un même point de jour en jour aux mêmes heures avec 4 (GPS) ou 90 (GLONASS) minutes d'avance au risque de se retrouver avec des DOPs similaires, mêmes si les conditions atmosphériques ont changé.

- Si vous disposez d'une station optique

procédez à des contrôles de distances et d'azimuts (dans cet ordre de préférence) entre les différents points stationnés.

#### Contrôle absolu :

Stationnez tous les points connus en coordonnées (RBF, NGF, autres...) afin d'assurer un contrôle absolu de la qualité de votre lever ou procédez aux observations nécessaires pour un contrôle par méthodes statiques. Cette méthode de contrôle doit vous permettre d'obtenir pour votre point de contrôle des coordonnées au moins deux fois plus précises que celles obtenues par la méthode du pivot central (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003 relatif aux classes de précision applicables aux différentes catégories de travaux topographiques).

En d'autres termes et si aucun point de contrôle n'était disponible, utilisez la méthode statique "multi-stations" en prenant toutes les précautions nécessaires permettant d'obtenir les coordonnées "les plus précises possibles" par méthodes GNSS. Néanmoins, il est important de noter que le coefficient de sécurité de 2 mentionné dans l'arrêté du 16 septembre 2003 sera parfois difficile à justifier. Procédez aux observations à un autre moment que celui de votre chantier (observations indépendantes) et effectuer si possible le calcul de post-traitement avec des stations de référence différentes de celles utilisées pour mettre en référence le pivot central. ●

*Le prochain article traitera en détail de la méthode statique "multi-stations" permettant d'obtenir la meilleure classe de précision possible par méthode GNSS.*

### Contact

Romain LEGROS Directeur Général  
de la société GEODATA DIFFUSION  
r.legros@orpheon.biz

Laurent MOREL  
Maître de conférences à l'ESGT  
laurent.morel@esgt.cnam.fr

Flavien VIGUIER  
Direction de l'ingénierie de la SNCF  
flavien.viguiier@sncf.fr

Florian BIROT - Responsable technique  
de la société GEODATA DIFFUSION  
florian.biro@geoaction.eu