

xyz

aft
association française
de topographie



Méthodes GNSS pour la topographie

Dans les réseaux GNSS

PPP, le positionnement précis du point



SOMMAIRE

Hors-série GNSS – avril 2014

Directeur des publications

Tania Landes

Maître de conférences

INSA de Strasbourg

Rédaction et administration XYZ

73, avenue de Paris

94165 Saint-Mandé Cedex

Tél. 01 43 98 84 80

Rédacteur en chef

Bernard Flacelière

Ingénieur topographe

Rédacteur en chef adjoint

Michel Trouillet

Ingénieur topographe

Comité de Rédaction

André Bailly

Ingénieur géomètre ETP

Françoise Duquenne

Ingénieur général des Ponts honoraire

Stéphane Durand

Enseignant-chercheur

Pierre Grussenmeyer

Professeur des universités

INSA de Strasbourg

Jean-Pierre Maillard

Géomètre-expert foncier

Michel Kasser

Professeur des universités

Tania Landes

Laurent Morel

Enseignant-chercheur

Emmanuel Natchitz

Ingénieur géomètre

Responsable du site Internet

Tania Landes

Publicité

Samuel Guillemin

Tél. 06 72 12 08 97

communication@aftopo.org

Conception et maquette

Dorothee Picard

ALBEDIA IMPRIMEURS

Zone industrielle de Lescudilliers

26 rue Gutenberg

BP 90449 - 15004 Aurillac Cedex

Tél. 04 71 63 44 60

Fax 04 71 64 09 09



IMPRIM'VERT®



Dépôt légal

1^{er} trimestre 2014 ISSN 0290-9057

N° CPPAP : 0116 G 80866

Tirage de ce numéro : 300 ex

Abonnement annuel

France : 83 €

Etranger (dont CEE) : 86 €

Les règlements payés par chèques

payables sur une banque située hors

de France doivent être majorés de 10 €,

sauf à utiliser l'identifiant international de

compte IBAN

FR69 2004 1000 0116 3000 3Y02 048

Le numéro : 23 €

Membre du Syndicat de la presse

culturelle et scientifique (SPCS)

L'AFT n'est pas responsable des opinions

émises dans les conférences qu'elle

organise ou les articles qu'elle publie.

Tous droits de reproduction ou d'adaptation

strictement réservés.

 La revue XYZ est éditée par l'association française de topographie

Membre de la FIG (Fédération internationale des géomètres) 

73, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé Cedex - Tél. : 01 43 98 84 80 -

Courriel : info@aftopo.org • Site Internet : <http://www.aftopo.org>

L'Association française de topographie est heureuse d'offrir ce numéro hors-série aux participants de son 10^e Forum, tenu au Mans dans les locaux de l'ESGT le 10 avril 2014, consacré aux méthodes GNSS pour la topographie. Ce numéro regroupe les articles rédigés par le groupe de travail "Réseaux GNSS" de la commission Géo-positionnement du CNIG et relatifs aux méthodes de travail dans les réseaux GNSS. Vous trouverez ici les versions parues dans notre revue XYZ aux numéros 129 et 132 à 137.

Le document original de la commission est téléchargeable librement à l'adresse suivante : <http://geopos.netne.net/spip.php?rubrique55>. En bonus, voici également l'état du PPP, le positionnement précis du point par GNSS, paru dans le numéro 138. Le comité de rédaction de XYZ, revue de l'AFT, vous souhaite un fructueux Forum de la topographie.

GÉODÉSIE

page 1 Méthodes de travail dans les réseaux GNSS

Romain LEGROS - Laurent MOREL - Flavien VIGUIER - Florian BIROT

page 5 1^{ère} partie - Le positionnement statique temps-réel par "filtrage et moyenne de positions NRTK"

Romain LEGROS - Laurent MOREL - Flavien VIGUIER - Florian BIROT

page 12 2^e partie - Le positionnement statique suivant les méthodes indirectes du pivot central ou de la station virtuelle

Romain LEGROS - Laurent MOREL - Flavien VIGUIER - Florian BIROT

page 17 3^e partie - Méthodes du "statique multi-stations"

Romain LEGROS - Laurent MOREL - Flavien VIGUIER - Florian BIROT

page 25 4^e partie - Le positionnement cinématique temps-réel suivant les méthodes "NRTK" et "RTK pivot libre"

Romain LEGROS - Laurent MOREL - Flavien VIGUIER - Florian BIROT

page 32 5^e partie - Le positionnement cinématique post-traité suivant les méthodes "NPPK" et "PPK pivot libre"

Romain LEGROS - Laurent MOREL - Flavien VIGUIER - Florian BIROT

page 40 PPP : la maturité ?

Laurent MOREL - François FUND - Romain LEGROS - Stéphane DURAND
Bernard FLACELIÈRE

Méthodes de travail dans les réseaux GNSS

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

Cet article annonce la sortie prochaine d'un document sur les méthodes de travail dans les réseaux GNSS.

Le groupe de travail "Réseaux GNSS" de la Commission Géopositionnement du CNIG finalise actuellement ce document qui devrait par conséquent être disponible au début de l'année 2012 sur le site de la Commission : geopos.netne.net. Après un rappel historique sur l'acquisition des données géographiques et la pratique du GPS dans le domaine de la topographie, l'article s'attache à présenter le champ couvert par le document ainsi que ses principales parties.

Contexte historique

Au cours des derniers siècles, les méthodes d'acquisition de données géographiques ont connu une forte mutation, aussi bien au niveau de leur facilité de mise en œuvre qu'au niveau de la qualité des données produites.

Nous pouvons dire que l'avènement de cette ère nouvelle commença aux XVII^e et XVIII^e siècles avec le développement de la géodésie moderne qui permit, après des siècles de travail approximatif, de donner enfin une représentation géométrique fiable de la surface terrestre en définissant rigoureusement les différents systèmes de référence nécessaires à l'établissement et au suivi d'un jeu de coordonnées. A compter de cette période marquant l'avènement des canevas de référence fournissant les points d'appui nécessaires aux travaux topographiques, il fut possible par méthodes topométriques de décrire localement les formes de la surface terrestre et de permettre aux cartographes d'en fournir une représentation la plus juste possible.

Au cours des trois siècles suivants, les instruments de mesure se sont perfectionnés de manière constante, mais cette évolution fut aussi très lente. En effet, pendant longtemps on travailla exclusivement sur la base de levés sur le terrain.

A partir de la fin de la seconde guerre mondiale, lorsque la photographie

aérienne devint vraiment opérationnelle, l'utilisation d'un couple stéréoscopique de photos aériennes permit enfin de traiter le terrain en salle pour en obtenir plus facilement, et surtout plus rapidement, une représentation géométrique fiable.

Cependant durant une cinquantaine d'années encore, la réalisation de cartes et de plans resta une activité laborieuse et coûteuse, car relativement lente. En effet, le temps nécessaire au recueil et au traitement de l'information issue de photos aériennes fait que l'information est déjà en partie dépassée lorsqu'elle est mise à la disposition de l'utilisateur

MOTS-CLÉS

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

sous la forme de base de données ou de cartes actualisées.

Dans un environnement en lente mutation, cette approche est restée acceptable pendant des décennies, mais aujourd'hui l'environnement change si rapidement qu'on ne peut plus tolérer de tels délais pour suivre de près et contrôler de façon fiable ces changements.

Cette constatation vaut pour tout type d'applications dans la mesure où les utilisateurs ont de plus en plus tendance à exiger des documents présentant une situation tout à fait actualisée. Il était donc temps de revoir fondamentalement les méthodes de mise à jour de nos bases de données géographiques.

L'avènement du GPS et des réseaux de stations permanentes

C'est précisément ici que les nouveaux développements technologiques ont révolutionné les méthodes d'acquisition de données géographiques avec la généralisation de l'uti-



Figure 1. Lever par méthode GPS-Statique.

► lisation opérationnelle des levés GPS à partir des années 1980. En effet, pour lever un point avec une précision centimétrique en utilisant un théodolite, nous avons besoin d'une équipe de 4 techniciens pendant 1 journée pour rattacher un chantier local au système géodésique national. Suite à l'introduction des levés différentiels GPS et des méthodes "statique" et "statique rapide", nous pouvions régler cette tâche avec deux techniciens en quelques heures en posant une base offrant une orientation absolue à proximité de la zone à relever. Le principe général de ces méthodes consiste alors à installer un premier récepteur sur un point connu très précisément en coordonnées (station de référence) puis à installer un second récepteur (mobile) sur le ou les points dont nous cherchons à déterminer les coordonnées. De retour au bureau, nous pouvons ainsi calculer les coordonnées précises des points stationnés en synchronisant les quelques dizaines de minutes à quelques heures d'observations enregistrées sur les deux appareils. Le principe consiste alors, partant du postulat que dans un certain rayon d'action les erreurs affectant les signaux GPS sont très similaires, à éliminer les erreurs spatialement corrélées par différentiation multiple. On calcule alors les coordonnées d'un vecteur connaissant l'un de ses deux points (cf. figure 1).

Mais ce n'était là qu'une première révolution dans la mesure où la méthode GPS-RTK (*Real Time Kinematic ou Cinématique Temps Réel*) permet dès les années 1990 et dans certaines conditions à un seul technicien d'exécuter cette même tâche en quelques minutes (cf. figure 2).

Ceci signifie qu'en une vingtaine d'années le rendement des techniques topographiques a été totalement bouleversé, ce qui, sur la base de considérations économiques, ne resta évidemment pas sans conséquences sur le plan opérationnel.

Dès lors, la constitution et la mise à jour de nos bases de données géographiques sous forme numérique s'accéléra rapidement et de nouvelles

applications comme le guidage d'engins agricoles ou de chantiers de travaux publics virent le jour.

Cependant l'application efficace de la méthode GPS-RTK exige un certain nombre de compétences afin d'installer préalablement au lever et à moins de 20 km du chantier une station de référence sur un point connu très précisément en coordonnées envoyant, le plus souvent par l'intermédiaire d'une radio UHF, ses mesures de phases ainsi que les coordonnées précises de ces mesures. En plus de la nécessité de trouver un tel point et d'assurer la stabilité de l'antenne dans le temps, il faut être capable d'opérer sa propre liaison radio, le tout dans des conditions de sécurité des matériels (risque de vol, de déplacement des matériels), réglementaires (nécessité de s'acquitter d'une licence radio auprès de l'ARCEP) et de portée radio acceptable (typiquement de l'ordre de quelques centaines de mètres à la dizaine de kilomètres fonction de la nature des lieux (topographie, urbani-

sation, végétation). La précision de la méthode (1 cm en planimétrie et 2 cm sur la composante verticale) décroît à mesure que la distance séparant le mobile de la station de référence augmente (de respectivement 1 et 2 millimètres par kilomètre d'éloignement) du fait de la décorrélation spatiale effective des sources d'erreurs entre les deux postes d'observation.

Cependant, et c'est le second axe plaidant en faveur du développement des techniques GPS différentielles et plus particulièrement de la technique GPS-RTK, l'avènement des réseaux de télécommunication (filaire pour la collecte des observations réalisées sur chacune des stations de référence et sans fil pour la diffusion des données nécessaires au positionnement en temps réel du mobile) permet la mise en réseau de ces stations de référence qui devinrent permanentes dès les années 2000 dans l'optique de libérer les utilisateurs de toutes les contraintes opérationnelles précitées (cf. figure 3). Plus besoin donc d'ins-

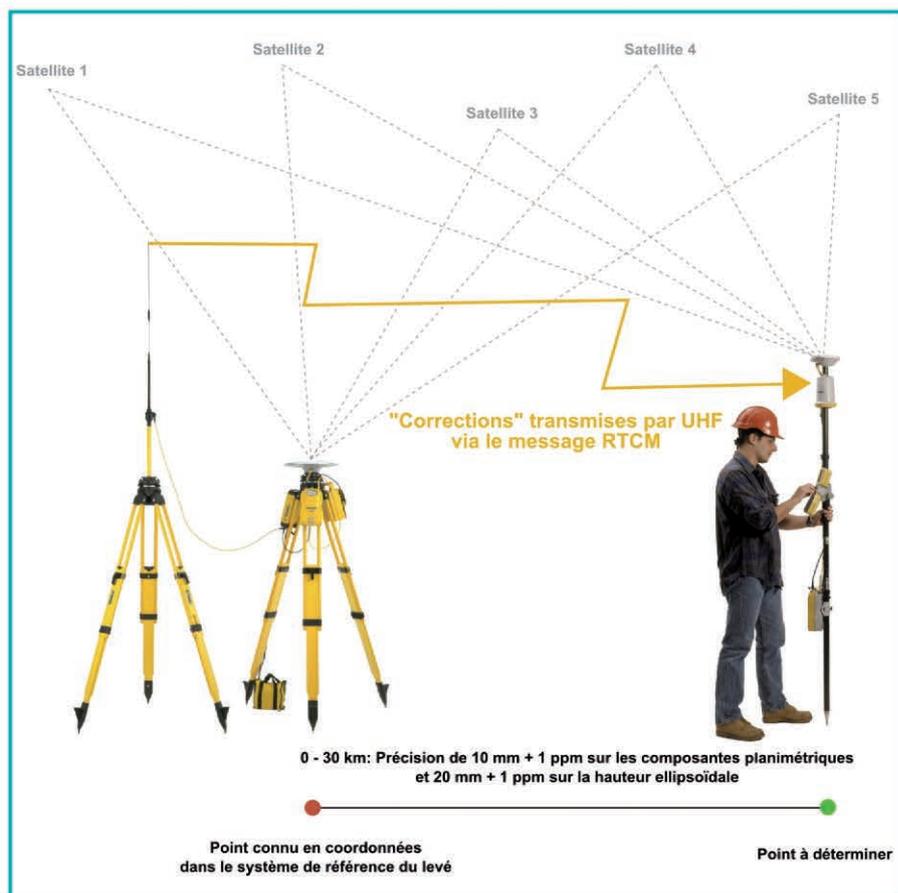


Figure 2. Lever par méthode GPS-RTK.



Figure 3. Station de référence permanente.

taller et d'opérer sa propre station de référence, des infrastructures publiques ou privées s'acquittant désormais de cette tâche.

L'avènement du RGP (Réseau GNSS Permanent maintenu et opéré par l'Institut Géographique National), puis des réseaux temps réel comme ORPHEON, S@TINFO ou TERIA permet de démocratiser ces techniques différentielles au sein même de la communauté des "géomètres-topographes" en abaissant les coûts d'acquisition et d'opération mais également au sein des différentes communautés d'utilisateurs tels que les opérateurs de réseaux (eaux, gaz, électricité, télécoms, etc.) ou encore les entreprises de travaux publics sans que cette liste ne soit bien évidemment limitative.

Plus particulièrement, l'avènement des réseaux temps réel permet un nouvel essor de la technique GPS-RTK auprès de nouvelles communautés d'utilisateurs telles que les agriculteurs pour des applications de guidage de précision en offrant à quasiment tout un chacun la possibilité d'accéder très facilement et encore plus précisément à la référence nationale à travers une "boîte noire" qui bien qu'assez complexe reste totalement transparente à l'utilisateur. Ainsi, un personnel technique peut désormais effectuer des levés de précision ou opérer un système de guidage de précision moyennant une courte formation, le maniement des

instruments étant par ailleurs devenu relativement aisé. On parle alors de levés GPS-NRTK (*Network Real Time Kinematic* ou Cinématique Temps Réel en Réseau).

D'un point de vue organisationnel, cette simplification des outils et méthodes permet à nombre d'entreprises d'internaliser la compétence d'acquisition et/ou de traitement de données géographiques de précision permettant une réelle démocratisation des techniques de positionnement et de guidage de précision.

Cette vulgarisation des techniques de positionnement engendre cependant certaines dérives dans la mesure où tous les utilisateurs ne sont pas ou plus forcément conscients des phénomènes impliqués dans le positionnement GNSS et ne disposent pas ou plus du recul nécessaire sur leur matériel pour travailler de manière optimum.

Champ du document

Dans ce contexte en pleine mutation où de nouvelles constellations de satellites se sont mises (GLONASS) et se mettent en place (GALILEO,



Figure 4. Système de guidage automatisé NRTK pour engins agricoles (travail du sol, semis de carottes et traitements phytosanitaires en une seule opération avec une précision centimétrique).

COMPASS) pour compléter GPS et rendre l'utilisation de tels systèmes encore plus disponible et plus fiable, il est apparu nécessaire au groupe de travail "Réseaux GNSS" de la Commission Géopositionnement du CNIG de faire le point sur les techniques de lever GNSS en réseau. Néanmoins il nous a semblé opportun dans un premier temps de limiter le propos aux méthodes différentielles directes utilisant les données issues d'un réseau de stations permanentes, qu'il s'agisse de levers temps réel ou temps différé (post-traitement), en dynamique comme en statique. Le PPP (*Precise Point Positioning*) consistant à modéliser chacun des postes d'erreur affectant la précision des coordonnées obtenue par un récepteur GNSS fonctionnant en mode autonome (par opposition au mode différentiel) se trouve donc de facto hors du champ de cette étude.

Nous limiterons également notre propos aux applications "topographiques" et "géodésiques" consistant à relever un certain nombre de points (typiquement de un à quelques milliers) à l'aide d'un récepteur mobile qualifié de "kit piéton" afin d'en obtenir des coordonnées tridimensionnelles décimétriques ou centimétriques, ce type d'utilisation étant à distinguer du guidage d'engins (travaux publics ou agriculture) et de la trajectographie. Ce document se voulant avant tout pratique et à destination des utilisateurs se décompose de la manière suivante (cf. tableau 1) : L'accès au document s'effectue à

travers un tableau de synthèse reprenant les avantages de chacune des 7 techniques existantes (NRTK, RTK "pivot libre", NPPK, PPK "pivot libre", Filtrage et moyenne de positions obtenues en NRTK, Statique "multi-station" et Statique "pivot central"). Une méta-fiche traitant de "la réalisation d'observations de qualité", prérequis indispensable à l'ensemble de ces sept techniques est ensuite proposée. Chacune de ces sept techniques est ensuite décrite par des fiches pratiques présentant les objectifs et prérequis nécessaires ainsi que le niveau de difficulté des tâches et actions à réaliser, chaque fiche pratique se terminant par une fiche de synthèse au format A4 reprenant les étapes et points clés de la méthode afin de pouvoir servir de pense-bête sur le terrain.

Pour tous les calculs en temps différé de type NPPK ou Statique "multi-stations" faisant intervenir plusieurs stations de référence, deux variantes sont abordées en fonction de la réalisation ou non d'un ajustement en réseau.

Les moyens de contrôle des levés réalisés en lien avec l'arrêté du 16 septembre 2003 portant sur les classes de précision seront enfin abordés pour chacune des sept techniques.

Le but de ce document n'est alors pas de reprendre dans le détail les bases du positionnement par multilatération spatiale, de nombreux documents existant à cet effet comme le très bon "GPS – Localisation et navigation par satellites" de Duquenne et al. (2005) issu des travaux de la même commis-

sion du CNIG, anciennement dénommée "Positionnement Statique et Dynamique". ●

Le document sera téléchargeable au format PDF sur le site de la Commission Géopositionnement à l'adresse suivante : <http://geopos.netne.net/spip.php?rubrique4>

Contacts

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.viguiere@sncf.fr

Florian BIROT - Elève ingénieur ESGT
florianbirot@hotmail.com

Références

Duquenne F., Botton S., Peret F., Bétaille D., Willis P. (2005). *GPS Localisation et navigation par satellites* 2^e édition revue et augmentée. Hermes-Lavoisier.

ABSTRACT

At the beginning of the year 2012, user guidelines for positioning in GNSS networks will be published on the Internet Website of the CNIG Commission Geopos, geopos.netne.net. In this article, after a brief introduction concerning basic knowledge about geographical data and GNSS positioning, the scope of this future document and its main parts are presented.

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 réel	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.

Méthodes de travail dans les réseaux GNSS 1^{ère} partie

Le positionnement statique temps-réel par "filtrage et moyenne de positions NRTK"

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

Un premier article paru dans le n°129 d'XYZ a annoncé la publication d'un document sur les méthodes de travail dans les réseaux GNSS rédigé dans le cadre du groupe de travail "Réseaux GNSS" de la Commission GEOPOS du CNIG. Ce deuxième article s'attache à décrire une première méthode "statique" pour laquelle le récepteur GNSS mobile enregistre des positions NRTK (Network Real Time Kinematic) pendant plusieurs dizaines de minutes tout en étant maintenu en place sur le point stationné. Les autres méthodes seront présentées ultérieurement.

MOTS-CLÉS

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

La méthode du "filtrage et moyenne de positions NRTK" apparaît dans la partie droite entourée en rouge du Tableau 1 de l'article précédent (cf. ci-dessous) : la structure de cet article reprend la trame de la fiche correspondante en y développant un exemple numérique 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 de travail permet de déterminer les coordonnées précises

(classe de précision 3D comprise entre 2 et 3 cm à 1σ) d'un point ou de plusieurs points stationnés quelques minutes à quelques dizaines de minutes afin de matérialiser avec une très grande fiabilité 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 coordonnées des points d'appui d'un canevas local en permettant par exemple de mettre en

référence un pivot RTK ou un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques.

- Suivre précisément l'évolution des coordonnées d'un point.

Matériel nécessaire

- Un mobile GNSS, de préférence bifréquence, équipé d'une connexion Internet mobile (GPRS-UMTS) et d'un abonnement à un service temps réel d'augmentation de précision GNSS.
- Un trépied ou a minima un bipode permettant de laisser le mobile en place sur le point stationné de manière suffisamment stable pendant plusieurs dizaines de minutes.

Principe de la méthode et niveau de difficulté

Le principe de la méthode consiste à déterminer à de multiples reprises les coordonnées du point stationné en calculant la ligne de base séparant le mobile de la station du réseau permanent la plus

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 réel		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 général sur les méthodes de travail dans les réseaux GNSS. 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.

© GEODATA DIFFUSION

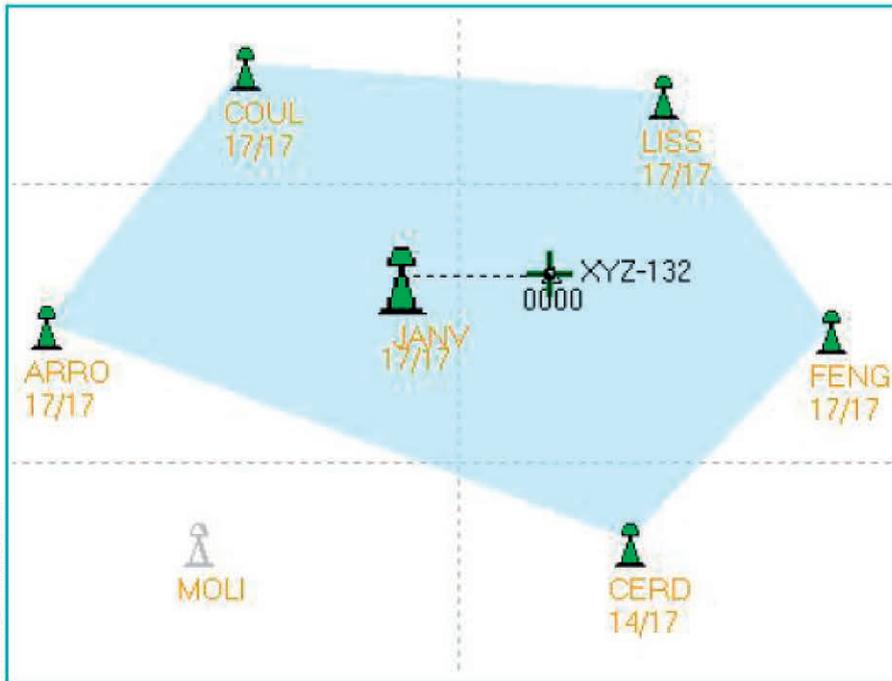


Figure 1. Principe de calcul NRTK basé sur une cellule de 6 stations permanentes permettant de calculer les corrections à apporter à chaque utilisateur en fonction de sa position au sein du réseau.

proche. Lors de ce calcul, le mobile reçoit en temps réel des "corrections" lui permettant de limiter au maximum l'influence des erreurs spatialement corrélées.

Ces corrections sont issues d'un "calcul réseau" basé sur une interpolation des erreurs géométriques (éphémérides et troposphère) et dispersives (ionosphère) à partir des erreurs effectivement mesurées sur un ensemble de stations permanentes entourant le mobile (6 stations permanentes représentées ci-dessus *Figure 1* et servant de points d'échantillonnage des modèles de corrections précitées).

L'ensemble de ces corrections peuvent également servir à générer une station virtuelle à proximité du mobile, rendant la notion même de réseau complètement transparente pour le mobile.

La robustesse de cette première méthode statique va se baser sur la répétition de la mesure NRTK permettant d'obtenir un nombre important de mesures indépendantes des coordonnées du point stationné, la répartition de l'échantillon statistique obtenu pour chaque coordonnée pouvant alors être traitée de manière à fiabiliser le résultat. Après avoir détecté les

éventuelles fautes de mesures, la moyenne obtenue sur chaque coordonnée permettra de déterminer la position du point tandis que la dispersion de l'échantillon (écarts à la

moyenne) permettra de juger de la fiabilité du point.

Deux variantes de la méthode peuvent alors être développées en fonction de la charge de travail statistique laissée à la charge de l'utilisateur. En tout état de cause, il s'agit de la méthode la plus simple d'accès et la plus facile à mettre en œuvre afin d'obtenir des coordonnées précises et fiables d'un point pour contrôler ou mettre en référence un lever obtenu par d'autres méthodes topographiques.

Préparation de la mission

■ Problèmes de télécommunications

Chaque époque de mesure du mobile devant être synchronisée aux informations envoyées par le réseau, il faut pouvoir disposer d'un lien de communication temps réel afin de faire communiquer les deux postes de mesure.

Ce lien doit être bidirectionnel afin que le mobile puisse dans un premier temps envoyer à l'infrastructure sa position en mode naturel de manière à

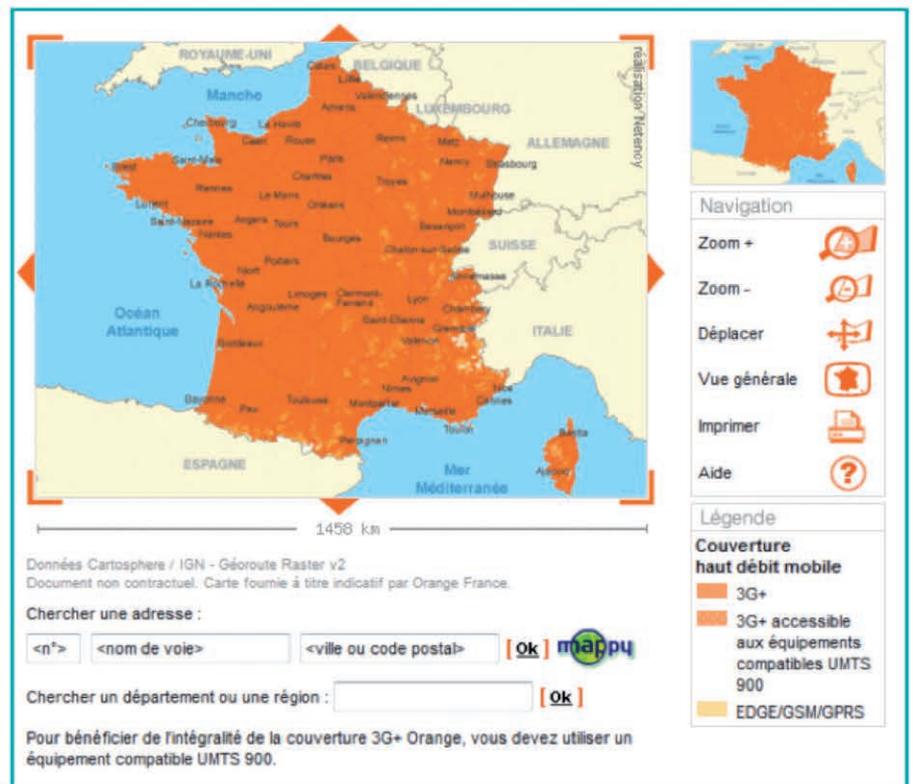


Figure 2. Interface cartographique permettant d'accéder aux cartes de couverture des réseaux GPRS/EDGE et 3G/3G+ de l'opérateur Orange.



recevoir en retour les corrections correspondant à sa zone de travail.

Les réseaux Internet mobiles permettent des portées illimitées très bon marché.

La couverture du réseau de télécommunications doit être effective sur la zone de travail, cette dernière étant consultable sur les sites Internet des opérateurs avec une exactitude moyenne de 97 % suivant le dernier rapport de l'ARCEP établi en 2009 (<http://www.arcep.fr/index.php?id=8161>).

En France métropolitaine, 97,7 % du territoire est ainsi couvert par au moins un opérateur de téléphonie mobile tel que représenté sur les cartes de couverture des différents opérateurs (<http://www.cartographie.bouyguetelecom.fr/eCouverture/eCouverture.aspx> pour Bouygues Telecom, http://mobile.orange.fr/content/ge/high/v2_offre_boutique/la_couverture/geomap.html pour Orange et http://assistance.sfr.fr/mobile_forfait/mobile/couverture-reseau/en-48-62267 pour SFR), la *Figure 2* illustrant la couverture des différents réseaux mobiles Orange.

Si les données transitent dans un réseau télécom complexe comme le réseau GPRS-EDGE où la latence moyenne est de 750 ms avec un écart-type de 750 ms à un sigma, il est fréquent que les données arrivent avec une latence de 2 secondes d'où la nécessité de configurer le récepteur mobile utilisé en mode "interpolé" afin d'effectuer un lever en temps réel ("Low Latency" chez TRIMBLE, "Précision" chez LEICA, "Extrapolation" chez TOPCON, etc.). Ce mode est à opposer au mode "synchronisé" où le mobile attend de recevoir la correction à synchroniser à sa mesure pour générer une position. Avec de tels modèles d'interpolation, les corrections reçues par le mobile à typiquement 1 Hz (une correction par seconde) lui permettent de monter un modèle d'interpolation des corrections dans lequel il va pouvoir aller chercher les 5, 10 ou 20 corrections à synchroniser à ses 5, 10 ou 20 mesures faites chaque seconde pour calculer des solutions de positionnement à 5, 10 ou 20 Hz.

La limite de validité en extrapolation d'un tel modèle étant d'environ 3 secondes, son utilisation permet de pallier les petites coupures télécoms inhérentes à l'utilisation du réseau GPRS-EDGE.

Pour faire face à des coupures plus importantes de la liaison télécom, mais aussi à toutes fins de contrôle et de traçabilité, il est recommandé d'enregistrer les données brutes en statique comme en itinérant afin de pouvoir recalculer en post-traitement l'ensemble de la chaîne cinématique mesurée à partir des données observées sur les stations de votre opérateur temps réel et/ou celles du RGP, méthode NPPK (Network Post Processing Kinematic) qui sera également décrite dans un prochain article.

■ Vérification du matériel

Il est également recommandé de s'assurer, conformément aux bonnes pratiques en vigueur et aux prérequis rappelés en préambule du document, que le matériel est apte à être utilisé dans le cadre d'un lever de précision (qualité de la bulle et longueur de la canne - grille de conversion altimétrique, modèles d'antennes et version du firmware du récepteur GPS/GNSS à jour).

Phase terrain

■ Acquisition des points

• Placez-vous sur un point bien dégagé.

Dans l'exemple développé, les deux

récepteurs GNSS utilisés sont alternativement placés sur la borne RBF du site "CHAPONNAY-I" tel qu'illustré ci-dessous *Figure 3* :

- **Allumez votre récepteur** et obtenez une position en mode "naturel".
- **Vérifiez l'état de la connexion GPRS.**
- **Lancez votre connexion réseau et vérifiez la qualité du flux de "corrections" :** Les "corrections" doivent alors arriver avec une latence moyenne comprise entre 1 et 2 secondes, cette latence ne devant pas excéder les 3 secondes (limite de validité en extrapolation des modèles de "corrections" utilisés dans les mobiles comme expliqué ci-dessus). Un indicateur donnant le pourcentage de corrections arrivées en moins d'une seconde lors de la dernière minute est parfois fourni, cet indicateur ne devant normalement pas descendre en dessous de 70 %.
- **Attendez que votre système initialise** (fixation des ambiguïtés entières) et vérifiez la qualité de l'initialisation en comparant 3 fois de suite les coordonnées données par le système sur le premier point du lever après avoir retourné l'antenne de votre mobile en direction du sol jusqu'à perte complète de la poursuite des satellites (perte de la solution de positionnement). Si votre mobile est fixé à un bipode ou un trépied (difficilement



Figure 3. Mobiles GNSS (LEICA VIVA GS15 et TRIMBLE R6) utilisés sur la borne RBF 6927001-A pour le lever servant d'exemple.



retournable), vous pouvez également demander à votre système une nouvelle initialisation.

Si votre système met plus de temps que d'habitude à fixer les ambiguïtés entières (opération typiquement de l'ordre de la minute dans le cas normal), soyez sur vos gardes (masques, multitrajets, qualité du flux de correction, phénomènes météorologiques ionosphériques ou troposphériques, qualité du réseau, etc.) et ayez plutôt tendance à "sur-contrôler" votre lever.

- **Effectuez votre lever en respectant les consignes suivantes**, sans oublier l'ensemble des bonnes pratiques également décrites dans les prérequis du document.

- Réglez votre récepteur mobile pour vous mettre dans l'une des situations explicitée ci-dessous en fonction de ce que vous souhaitez faire :

Cas simple : réglez votre mobile pour prendre les points sur 180 époques.

Reprenez le point au moins deux fois en laissant passer au moins 20-30 minutes entre deux déterminations successives de manière à laisser suffisamment changer l'état de la constellation et l'ensemble des autres paramètres d'état du système (état ionosphérique et troposphérique).

Plus vous aurez de déterminations indépendantes pour un même point, plus sa qualité sera avérée.

De manière à ce que la moyenne du point se fasse bien sur 2 fois 3 minutes séparées de 20-30 minutes, redonnez le même nom de point d'une fois sur l'autre et laissez faire votre système : celui-ci devrait vous donner une indication en cas de dépassement de la tolérance fixée entre plusieurs déterminations d'un même point. Dans votre mobile, pensez donc à régler convenablement les tolérances planimétriques et altimétriques autorisées entre deux déterminations en fonction de vos besoins.

Si votre chantier était amené à durer plusieurs jours, n'hésitez pas à effectuer vos différentes sessions de mesure pour un même point sur plusieurs jours à des heures bien

distinctes. En effet, les constellations GPS et GLONASS se répètent de jour en jour aux mêmes heures avec respectivement 4 et 90 minutes d'avance. Cette recommandation vous permettra d'éviter de vous retrouver avec des DOPs similaires, même si les conditions atmosphériques ont changé.

En procédant de la sorte, tout se passera de manière automatique sans que vous ne sachiez comment procède votre mobile et donc quelle fiabilité accorder aux coordonnées calculées au-delà des estimateurs statistiques de qualité portés in fine par le point : la répartition statistique de l'échantillon considéré était-elle normale comme l'aurait imposé le théorème central limite, parfaitement adapté aux mesures GNSS, stipulant que la somme d'une suite de variables aléatoires indépendantes et de distribution individuelle quelconque converge vers une distribution normale à condition qu'aucune de ces variables aléatoires ne soit prépondérante ?

L'échantillon de la population statistique était-il dispersé, composé de plusieurs sous-ensembles ? Impossible de le savoir avec précision, seule la représentation cartographique du lever permettant de se faire une première idée "non chiffrée".

Cas évolué : pour maîtriser finement la qualité du point, réglez votre récepteur mobile en mode "topographie continue" pour prendre, si possible, une succession de points toutes les 3 à 5 époques de mesure. En cas d'impossibilité, prenez une succession de points sur une époque de mesure (toutes les secondes).

Laissez tourner votre mobile pendant une trentaine ou une quarantaine de minutes afin d'obtenir, pour 40 minutes d'observations, une population de 2400, 800 ou 480 points.

Vous pouvez également procéder en plusieurs sessions de mesure, notamment si vous avez plusieurs points importants à déterminer sur votre chantier. Stationnez alors le point 10 ou 20 minutes puis revenez dessus ultérieurement (après être

passé une première fois sur l'ensemble de vos points par exemple) en laissant au moins entre 20 et 30 minutes s'écouler entre les 2 déterminations.

Si votre chantier était amené à durer plusieurs jours, n'hésitez pas à effectuer vos différentes sessions de mesure pour un même point sur plusieurs jours à des heures bien distinctes, les constellations GPS et GLONASS se répétant de jour en jour aux mêmes heures avec respectivement 4 et 90 minutes d'avance.

Au-delà des estimateurs de la précision horizontale et verticale fournis par votre capteur (indicateurs statistiques), ne levez pas avec un GDOP ou un PDOP de respectivement plus de 3-4 ou 2-3. Pour ce faire, vous pouvez surveiller ce paramètre en temps réel et/ou définir un masque de lever.

- Vérifiez régulièrement la qualité du lien temps réel en suivant l'âge de la dernière correction reçue tel que décrit ci-dessus lors de la phase d'établissement de la connexion réseau.

- En cas de perte du statut centimétrique de votre solution de positionnement (perte de l'initialisation), par exemple après une indisponibilité télécom, reprenez une initialisation fiable en contrôlant sa qualité comme indiqué plus haut lors de la phase d'initialisation du système. Vérifiez que les coordonnées données par votre système sont cohérentes avec les dernières coordonnées calculées avec l'initialisation précédente en contrôlant l'écart de position obtenu. Cette recommandation vous permettra d'assurer la cohérence interne de votre lever.

■ Moyens de contrôle

Contrôle relatif :

- A toutes fins utiles, enregistrez les données brutes en statique comme en itinérant. Vous pourrez alors recalculer en post-traitement l'ensemble de votre chaîne cinématique (NPPK) ou les coordonnées du point en mode statique (méthode statique multi-stations qui sera décrite dans un pro-

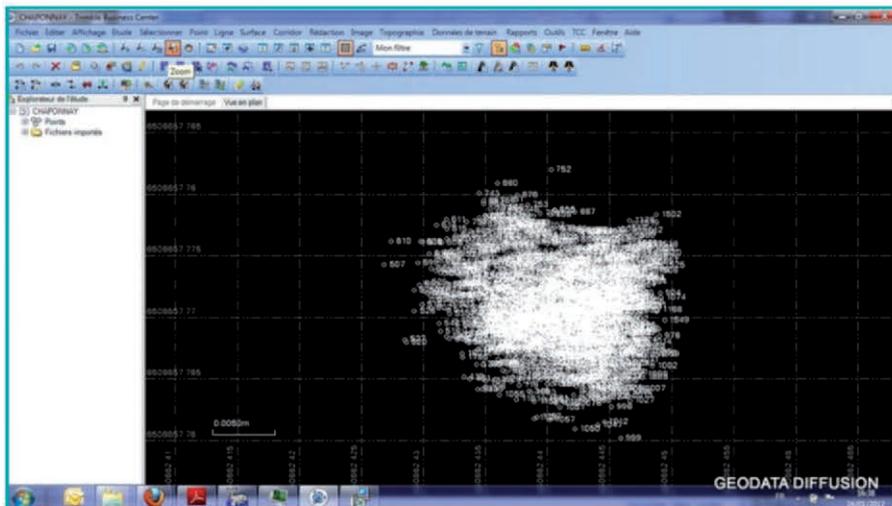


Figure 4. Répartition planimétrique d'un lever NRTK de 1800 points (30 minutes) effectué avec le service temps d'augmentation de précision GNSS ORPHEON sur la borne RBF 6927001-A.

chain article de la série) à partir des données observées sur les stations de votre opérateur temps réel et/ou celles du RGP.

- Si vous disposez d'une station optique procédez à des contrôles de distances et d'azimuts (dans cet ordre de préférence).

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 permettant d'obtenir des coordonnées au moins deux fois plus précises que celles obtenues par cette méthode de filtrage et moyenne de positions NRTK pour votre point de contrôle (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003). 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 possible" par méthodes GNSS, même si 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 d'autres stations de référence que celles utilisées pour le calcul NRTK.

Phase bureau

- **De retour au bureau, exportez votre lever** afin d'obtenir la liste des points avec leurs différents attributs (DOPs, âge de la correction, SNRs, etc.) dans le but d'effectuer un filtrage multicritères et vous assurer, outre les précautions prises sur le terrain, de la qualité de votre lever.
- **Affichez les points levés** et vérifiez qu'ils forment bien dans le plan un nuage homogène de forme "pseudo circulaire" tel que représenté ci-dessus *Figure 4*.
- **Pour le cas évolué de la méthode, considérez chacune des composantes Est, Nord et Altitude comme autant de variables aléatoires nécessaires au calcul des paramètres de statistique descriptive suivants :**

Médiane : la médiane est la valeur qui permet de partager une série numérique ordonnée en deux parties de même nombre d'éléments : autrement dit, il y a autant d'éléments à gauche qu'à droite de ce critère de position statistique de l'ensemble de valeurs considéré. L'avantage de la médiane est qu'elle est moins sensible aux valeurs extrêmes ou aberrantes que la moyenne.

Moyenne arithmétique : un autre critère de position de la tendance centrale d'un échantillon statistique d'une variable aléatoire notée X est donné par la moyenne arithmétique que nous noterons \bar{X} . D'un point de vue probabi-

lité, la moyenne arithmétique est la valeur de la variable aléatoire qui a le plus de chance de sortir lors d'un tirage (plus grande probabilité d'occurrence).

Si la moyenne et la médiane sont proches, l'échantillon statistique considéré est symétrique et a de fortes chances de suivre une loi de probabilité dont la distribution dite "normale" ou "gaussienne" est caractéristique des expériences consistant à mesurer un grand nombre de fois un phénomène donné.

En effet, si l'on mesure plusieurs fois la position d'un point par méthodes GNSS, on obtiendra chaque fois un résultat différent à cause de phénomènes perturbateurs comme l'erreur d'échantillonnage (mauvais DOPs, problème de l'adéquation à la réalité de la modélisation des sources d'erreurs spatialement corrélées sur le mobile dans le cas différentiel – notion de "flash" ou de "scintillement" ionosphérique) ou la stabilité des appareils utilisés (satellites et récepteurs). Sur un grand nombre de mesures non biaisées, on peut considérer que la variable aléatoire va suivre une loi de probabilité dont la distribution est gaussienne.

Etendue : l'étendue correspond à la distance séparant la valeur minimale de la valeur maximale de l'échantillon statistique considéré.

Il s'agit donc d'un premier critère de dispersion statistique reflétant la variabilité de l'échantillon considéré venant utilement compléter les critères de position donnés par la médiane et la moyenne.

Quantiles : les quantiles sont des points essentiels pris à des intervalles réguliers verticaux d'une fonction de répartition d'une variable aléatoire. Diviser des données ordonnées en q sous-jeux de données contenant le même nombre de points est la motivation des q -quantiles.

Les quantiles sont les valeurs marquant les limites entre deux sous-jeux consécutifs.

Un centile ou 100-Quantile correspond à chacune des 99 valeurs qui divisent les données triées en 100 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/100 de l'échantillon :

Figure 5. Statistique descriptive de l'écart à la coordonnée publiée sur la composante Est dans le système RGF 93 en projection Lambert 93 du lever NRTK ORPHEON de 1800 points (30 minutes) représenté Figure 4. En assimilant la répartition statistique à une distribution normale, l'exactitude est de 8 mm avec une précision à un sigma (écart-type) de 4 mm.



le centile est donc calculé comme étant le 100-Quantile.

A noter que le 2-Quantile correspond à la médiane précédemment décrite.

Nous travaillerons sur les 1000-Quantiles appelés milles. Le 25^e milles que nous noterons $Q_{2,5}$ sépare les 2,5 % inférieurs des données et le 975^e milles que nous noterons $Q_{97,5}$ sépare les 97,5 % inférieurs des données.

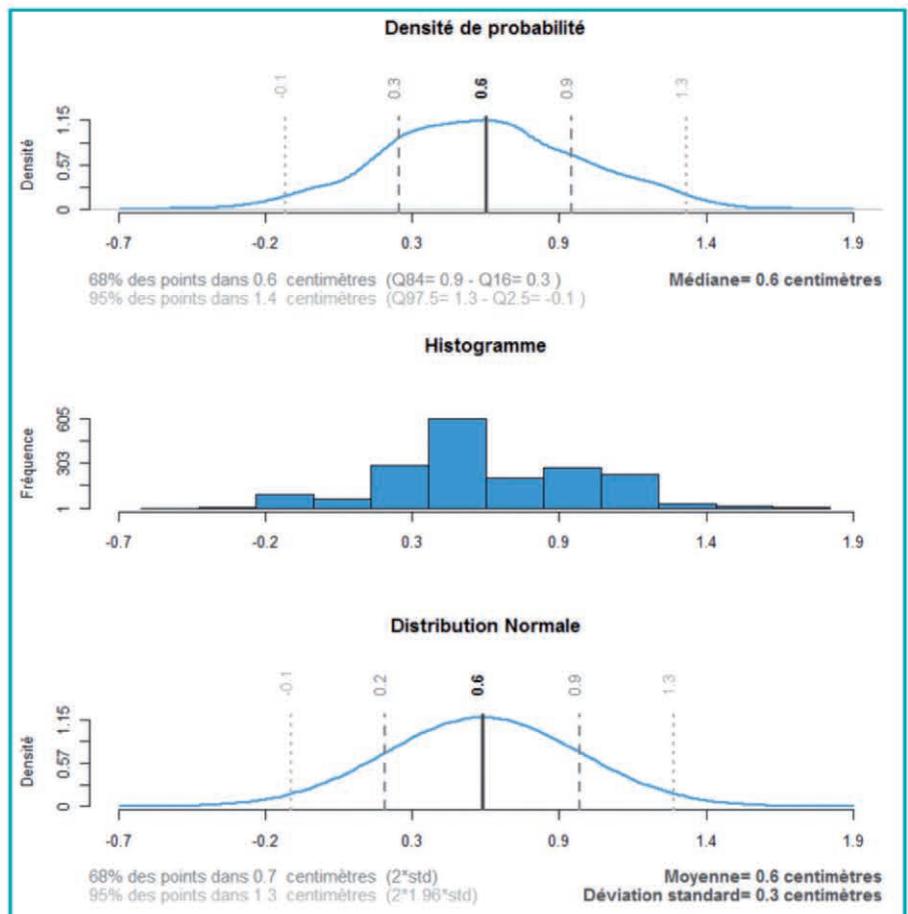
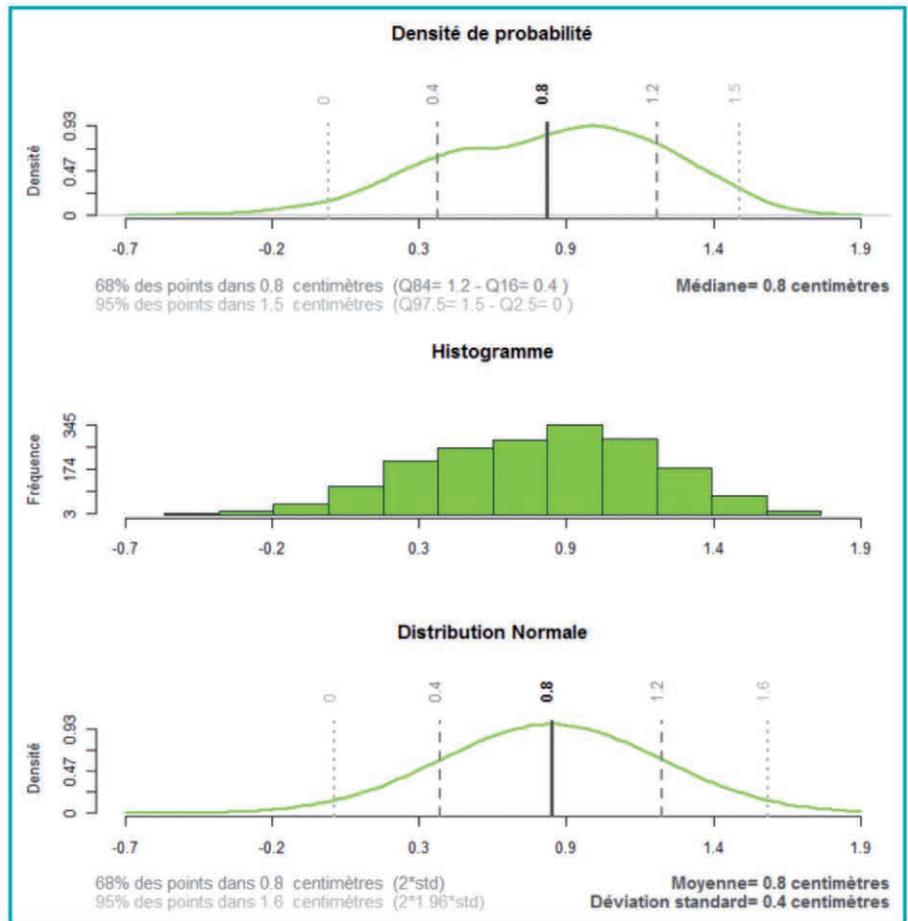
Les quantiles sont des mesures utiles parce qu'elles ne sont pas trop sensibles aux distributions allongées et aux valeurs aberrantes.

Calculez $Q_{97,5}$, Q_{84} , Q_{16} et $Q_{2,5}$ et formez $Q_{84} - Q_{16}$ afin de savoir dans quel intervalle se situent 68 % de l'échantillon ainsi que $Q_{97,5} - Q_{2,5}$ afin de savoir dans quel intervalle se situent 95 % de l'échantillon.

Ces distances inter-quantiles donnent donc des critères de dispersion statistique reflétant beaucoup plus finement la variabilité de l'échantillon statistique considéré que l'étendue précédemment décrite.

Déviat ion standard de l'échantillon : la déviation standard de l'échantillon ou "écart-type non biaisé" est défini comme l'écart moyen à la moyenne de l'échantillon statistique considéré. La déviation standard donne un critère unique et immédiat de la dispersion statistique de l'échantillon. Tracez alors la densité de probabilité de chaque échantillon statistique considéré ainsi que son histogramme comme représenté sur les parties hautes et intermédiaires des Figures 5, 6 et 7.

Figure 6. Statistique descriptive de l'écart à la coordonnée publiée sur la composante Nord dans le système RGF 93 en projection Lambert 93 du lever NRTK ORPHEON de 1800 points (30 minutes) représenté Figure 4. En assimilant la répartition statistique à une distribution normale, l'exactitude est de 6 mm avec une précision à un sigma (écart-type) de 3 mm.



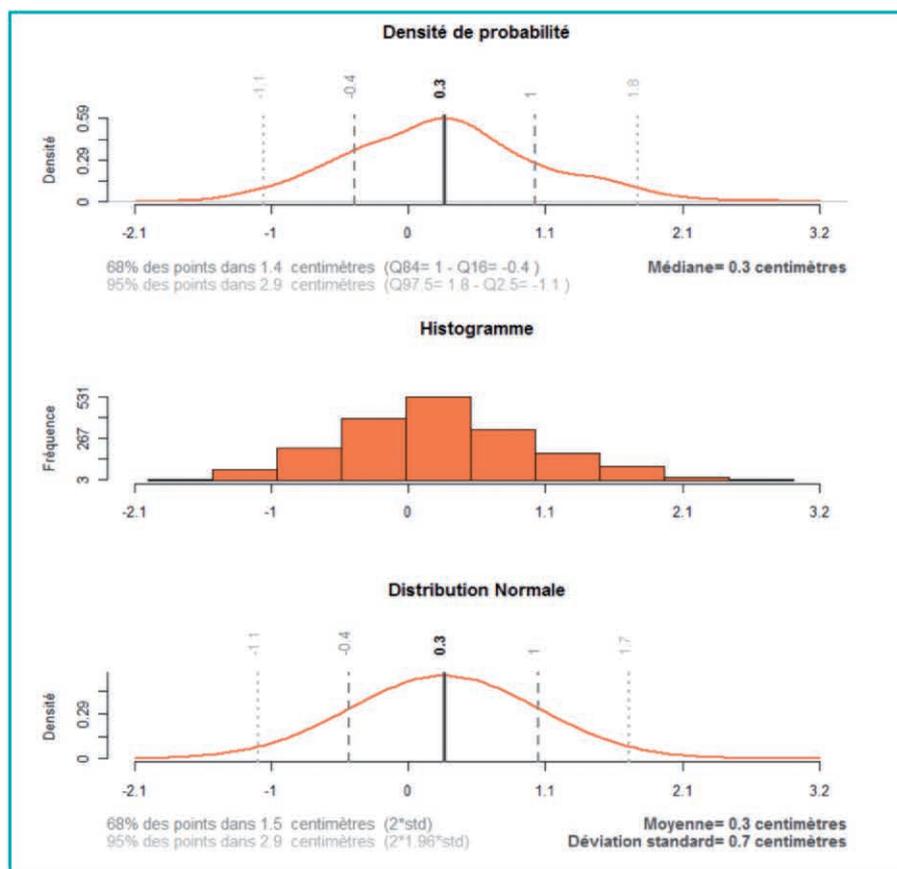


Figure 7. Statistique descriptive de l'écart à la coordonnée publiée sur la composante Altitude IGN69 du lever NRTK ORPHEON de 1800 points (30 minutes) représenté Figure 4. En assimilant la répartition statistique à une distribution normale, l'exactitude est de 3 mm avec une précision à un sigma (écart-type) de 7 mm.

Éliminez le cas échéant les valeurs au-delà de $3 \times (Q_{99,5} - Q_{0,5})$ pouvant être considérées comme aberrantes (fautes de mesures) et recommencez vos calculs.

Ces indicateurs ne présupposent pas de la normalité de la population statistique considérée et peuvent être utilisés dans tous les cas.

Intéressez-vous ensuite à la normalité de la population afin de vérifier que les coordonnées trouvées sur chaque composante sont bien réparties de part et d'autre de leur valeur moyenne avec une densité de probabilité qui une fois tracée forme une "courbe de Gauss" avec sa forme "en cloche" si caractéristique, comme nous l'avons précédemment évoqué, d'un grand nombre de mesures GNSS non biaisées conformément au théorème central limite.

Pour ce faire :

- Calculez les valeurs associées à une distribution normale : à partir de l'estimateur non biaisé de l'écart-type de la

population que nous noterons σ ou "std" pour "Standard Deviation" ou "Déviation Standard", calculez l'erreur due à la dispersion statistique en pré-supposant que l'échantillon suive une loi normale. Avec une telle loi
 68 % des points sont situés dans une plage $[X - \sigma, X + \sigma]$
 95 % des points sont situés dans une plage $[X - 1,960 \sigma, X + 1,960 \sigma]$
 99 % des points sont situés dans une plage $[X - 2,576 \sigma, X + 2,576 \sigma]$

- Procédez à un test de normalité : bien qu'il soit possible d'effectuer des tests donnant des résultats numériques (difficiles à appliquer car supposant une parfaite indépendance des données de l'échantillon et fortement sujettes à la taille de l'échantillon), vérifier "à l'œil" que la densité de probabilité réelle de l'échantillon statistique et sa densité de probabilité sous hypothèse de normalité soient "à peu de chose près" superposables.

De manière à ne pas travailler avec des valeurs trop grandes et pour des résultats plus parlant, vous pouvez former pour chaque composante une variable aléatoire en retranchant à chaque coordonnée la valeur moyenne de l'échantillon ou la valeur de contrôle de la composante en question issue d'une méthode de travail au moins deux fois plus précise que l'estimation de la classe de précision de votre lever NRTK filtré et moyenné (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003).

• Pour tous les points de contrôle absolus stationnés lors de votre lever et afin de contrôler l'exactitude de votre lever, vérifiez les écarts entre les coordonnées obtenues par filtrage et moyenne de positions NRTK et les coordonnées des points de contrôle telles que publiées sur les fiches géodésiques (ou les coordonnées obtenues par une méthode de travail au moins deux fois plus précise que l'estimation de la classe de précision de votre lever NRTK (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003)).

L'exemple qui nous intéresse étant dans ce cas de figure, les coordonnées publiées de la borne RBF 6927001 sont retranchées aux différentes positions NRTK afin de traiter trois variables aléatoires traduisant de "l'écart à la coordonnées publiée" dont les principaux éléments de statistique descriptive sont repris sur les Figures 5, 6 et 7.

Cette fiche est la première à être publiée dans XYZ, les 6 autres méthodes du Tableau 1 trouveront leur place dans les prochains numéros. ●

Contacts

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.birot@geoaction.eu

Méthodes de travail dans les réseaux GNSS 2^e 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 1σ), 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'interceptant 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/>).

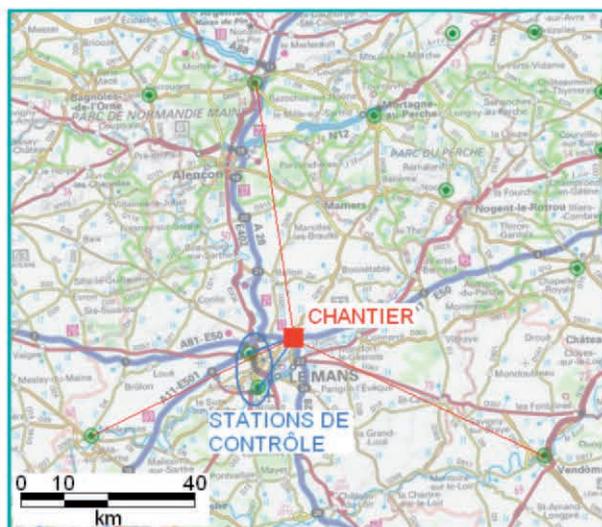


Figure 1. Choix des stations permanentes du RGP (cercles verts) pour le calcul du pivot central (carré rouge).



■ 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

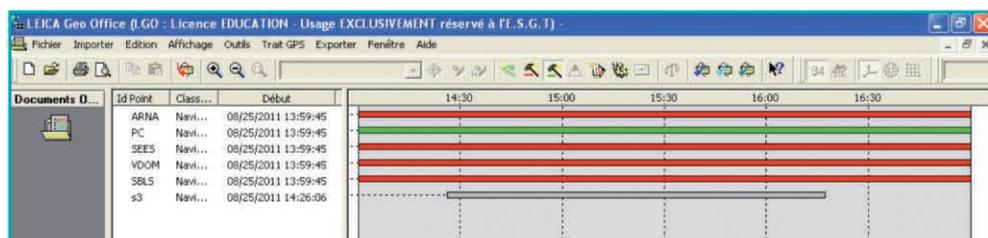


Figure 3. Configuration du traitement pour la détermination du pivot central (en rouge les stations permanentes du RGP fixées à leurs coordonnées RGF93 et en vert le pivot central, PC, dont on détermine les coordonnées).

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://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/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

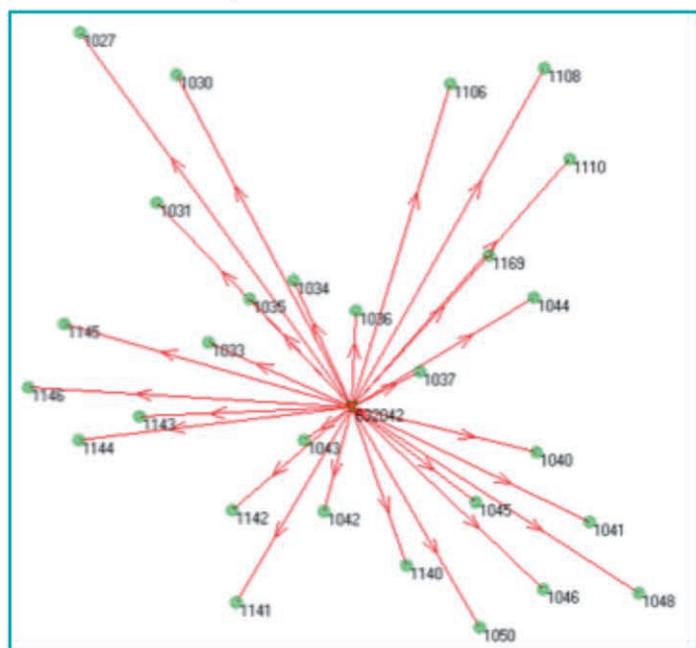


Figure 4. Construction des lignes de base dans la méthode du pivot central.

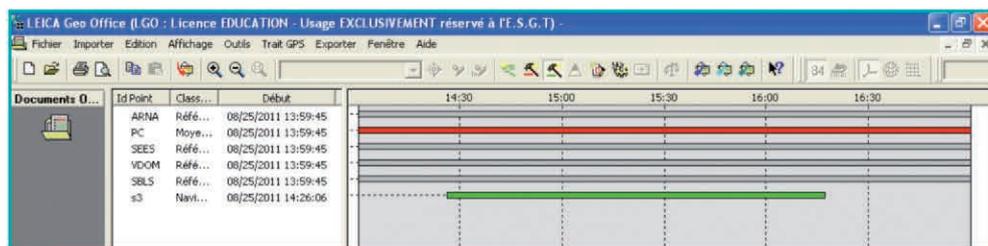


Figure 5. Configuration du traitement pour la détermination des points du chantier (en rouge le pivot central préalablement déterminé et en vert un point du chantier, S3, dont on détermine les coordonnées).



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.viguiere@sncf.fr

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

Méthodes de travail dans les réseaux GNSS

3^e partie

Méthodes du "statique multi-stations"

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

Après avoir abordé dans le numéro 132 la méthode du "filtrage et moyenne de positions NRTK" et dans le numéro 133 les méthodes indirectes du "pivot central ou de la station virtuelle", nous continuons notre progression par ordre de complexité croissante à la recherche de la classe de précision "ultime", toujours avec un mobile stationnaire, à travers cet article sur la méthode du statique "multi-stations" :

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.

A noter que le document "Méthode de travail dans les réseaux GNSS" vient d'être mis en ligne et peut être librement téléchargé à l'adresse suivante : <http://geopos.netne.net/spip.php?rubrique55>

La structure de cet article reprend la trame de la fiche correspondante du document "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS" en développant un exemple numérique afin d'étayer le propos, cet exemple consistant à calculer les coordonnées d'une station inconnue portant l'acronyme CHIN (CHINON, Indre-et-Loire) à partir des 3 ou 4 stations RGP voisines.

Objectifs et applications

La méthode du statique "multi-stations" permet d'aller au bout de ce qu'il est possible d'obtenir par méthodes GNSS, tant en terme d'exactitude que de précision : cette méthode permet en effet de déterminer les coordonnées très précises (classe de précision inférieure à 2 cm avec des logiciels "com-

merciaux") voire extrêmement précises (classe de précision infra-centimétrique en prenant certaines précautions et avec des logiciels "scientifiques") de points stationnés de quelques dizaines de minutes ou dizaines d'heures (précision 3D à 1 σ). Cette méthode peut donc être utilisées pour :

- Mettre en référence une station de référence pseudo-permanente (ou base ou pivot) afin de réaliser un lever suivant la méthode statique du "pivot central" ou les méthodes cinématiques RTK ou PPK "pivot libre" (se référer aux deux fiches afférentes du document "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS" pour de plus amples informations).
- Mettre en référence un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques en déterminant les coordonnées des points d'appui d'un canevas local.
- Effectuer le contrôle absolu d'un lever obtenu par méthodes topographiques tierces (GNSS cinématiques de type RTK, PPK, NRTK, NPPK, – GNSS statiques de type "pivot central" ou "station virtuelle" – Station optique).

- Suivre très précisément l'évolution des coordonnées d'un point.

Matériels et logiciels nécessaires

- Au moins un récepteur GNSS permettant de mesurer la phase, de préférence bifréquences, équipé d'un trépied ou *a minima* d'un bipode permettant de le laisser en place sur le point stationné de manière suffisamment stable pendant plusieurs dizaines de minutes.
- Un logiciel de post-traitement installé sur un poste informatique pouvant se connecter à Internet afin de récupérer les observations GNSS réalisées sur un certain nombre de stations permanentes de référence appartenant à un réseau GNSS (typiquement le RGP) ainsi que les divers produits utiles (éphémérides précises, modèles ionosphériques, etc.) afin de calculer des lignes de base par multi-différenciation. Ce logiciel devra éventuellement permettre d'effectuer un calcul en réseau (ajustement libre et/ou contraint suivant la méthode des moindres carrés).

Principe de la méthode

Le lever est fait à partir de données brutes faites sur le "mobile" et sur plusieurs stations de référence d'un réseau permanent. On calcule en post-traitement les coordonnées RGF93 du point stationné par intersection des lignes de base le séparant des différentes stations de référence utilisées.

Planification de la mission

■ Détermination des stations de référence à utiliser

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

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 mobile au barycentre d'un triangle équilatéral (critères géométriques d'une triangulation de Delaunay) tout en disposant d'une quatrième station située à proximité du mobile dont les coordonnées ne sont pas fixées lors de la phase d'ajustement afin de contrôler la qualité de la mise en référence du mobile en comparant pour cette quatrième station les coordonnées issues du calcul à ses coordonnées publiées.

Les figures 1 et 2 illustrent respectivement le cas simple à trois stations "en étoile" et le cas "évolué" à 4 stations "en réseau" permettant de contrôler la qualité de la mise en référence effectuée :

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

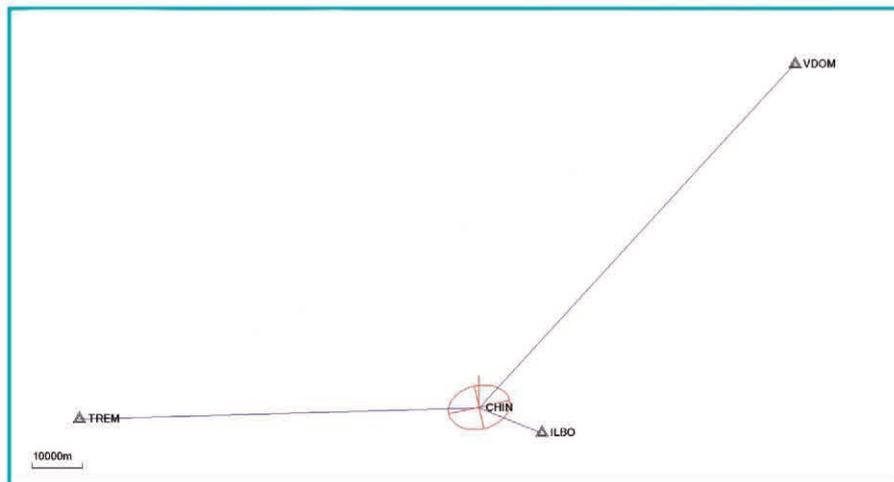


Figure 1. Calcul des coordonnées de la station CHIN à partir des 3 stations RGP l'entourant suivant les critères géométriques d'une triangulation de DELAUNAY (ILBO, VDOM et TREM).

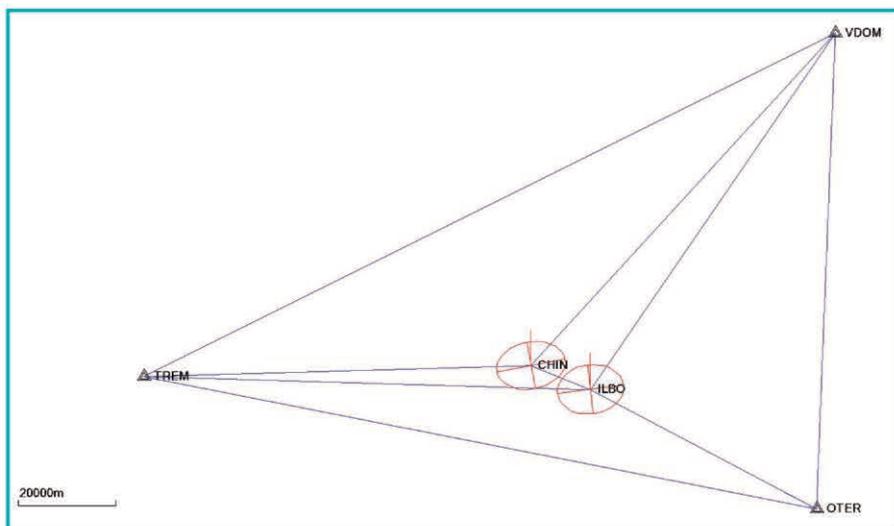


Figure 2. Calcul des coordonnées de la station CHIN à partir des 4 stations RGP l'entourant suivant les critères géométriques d'une triangulation de Delaunay (ILBO, VDOM, TREM et OTER), la plus proche de ces stations (ILBO) n'étant pas fixée afin de servir de contrôle.

possible s'interceptant 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 sauf en prenant des précautions particulières.

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 (346 stations au 01/02/13). 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/>).

■ 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.



L'équation ci-dessous permet de donner une idée de la durée de station à respecter, 10 minutes étant donc un strict minimum.

$$\text{temps de station} = 10 \text{ minutes} + 1 \text{ minute par kilomètre de ligne de base} + 1 \text{ minute par } 100 \text{ mètres de dénivelée}$$

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

Cependant et vu l'utilisation des points obtenus (contrôle, mise en référence de pivots, etc.), vous ne devez prendre aucun risque quant à la bonne détermination du mobile car une erreur sur sa position peut rendre vain 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, étant entendu que plus la station sera longue, meilleure sera la détermination du point.

Dans l'exemple qui nous intéresse, la station CHIN a été stationnée 24 heures.

Phase terrain

■ Choix de l'emplacement et monumentation du point

Cette phase de planification réalisée, installez le mobile sur un point sécurisé, stable, bien dégagé et permettant 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



Figure 3. Exemple d'installation d'un récepteur GNSS en mode statique.

l'aide d'un repère stable (clou, borne, etc.).

■ Installation des équipements

Procédez à l'installation du mobile en prenant soin de monter le trépied ou le bipode de la manière la plus stable possible, de centrer et de buller convenablement l'embase ou la canne sur laquelle est fixée l'antenne. Lors de cette phase, il faut particulièrement veiller à bien enfoncer les pieds du trépied ou du bipode dans le sol et à serrer convenablement les vis de réglage dudit trépied ou bipode.

En cas de forte chaleur et de forte exposition au rayonnement solaire, préférez utiliser un trépied en bois ou une canne et un bipode en fibres composites plutôt qu'en aluminium pour limiter les phénomènes de dilation 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'équipementier choisi, soit de manière inclinée soit orthogonalement.

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.

Phase bureau

■ Choix des lignes de base et des sessions de mesure

De retour au bureau, sélectionnez pour

les lignes de base retenues les sessions de mesure que vous utiliserez afin qu'il n'y ait pas de dépendance linéaire au sein du réseau, c'est-à-dire de manière à faire en sorte qu'on ne puisse pas revenir sur un même point en suivant des lignes de base observées au même moment. En procédant de la sorte, vous évitez la propagation d'erreurs liées à des conditions d'observation particulières (biais global des paramètres d'état du système).

Pour ce faire, téléchargez les observations nécessaires pour les stations de référence utilisées et désactivez les sessions correspondantes comme illustré sur la *figure 4*. A noter que le cas simple à 3 stations "en étoile" ne permet pas, par définition, de procéder à cette étape de sélection des sessions visant à casser la dépendance linéaire pouvant exister au sein de la figure formée. Si un biais existe sur un des paramètres d'état du système lors de la session de mesure réalisée, il n'y aura aucun moyen de s'en apercevoir, sauf à utiliser une deuxième session de mesure pour au moins une des lignes de base considérée, impliquant donc d'au moins doubler les temps de station pour le mobile...

■ 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

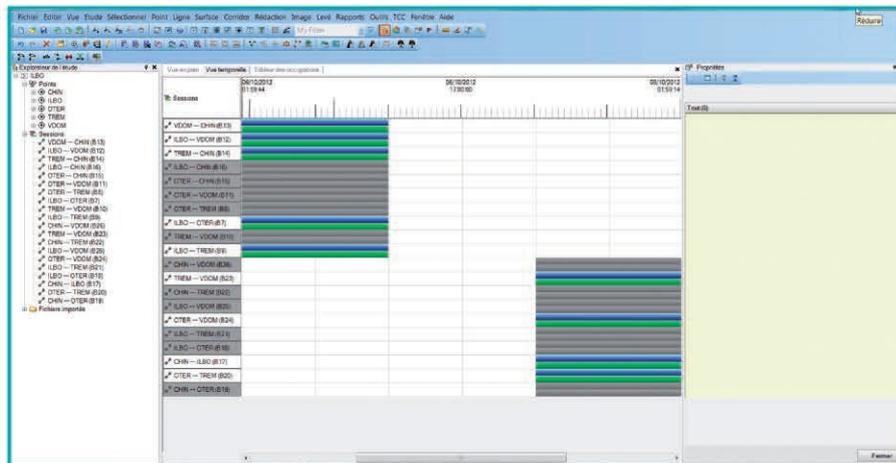


Figure 4. Sélection des sessions de mesure pour les lignes de base du réseau formé *figure 2* afin de casser la dépendance linéaire pouvant exister au sein de la figure formée.



ces satellites sont les plus importants, et les sources de perturbation desdits signaux sont donc inacceptables pour la classe de précision recherchée.

Le masque d'élévation est réglé sur 10° dans l'exemple considéré.

■ 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 données est certes plus important mais nettement moins significatif en terme d'évolution des conditions atmosphériques (ionosphère, troposphère) et des potentiels artefacts liés au nombre des satellites, leur état de santé et leur disposition géométrique (DOP). A 1 hertz, les positions sont moins indépendantes qu'à une fréquence plus faible, alors que le fait de disposer de mesures indépendantes est un prérequis de base pour tous les traitements statistiques impliqués lors du calcul des positions. L'intervalle de traitement est réglé sur 30 secondes dans l'exemple considéré.

■ 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, 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://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/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 de manière similaire, c'est-à-dire au Nord géographique de manière à ce que la position du centre de phase puisse correctement être déterminée pour chaque antenne époque après époque. Le modèle de calibration absolu des antennes mis à disposition par le NGS est utilisé dans l'exemple considéré.

■ Fréquences et 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 certaines précautions. 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 DOPs et d'augmenter significativement la quantité de données observées (nombre d'équations d'observation). Lors du calcul, cherchez tout d'abord à fixer les ambiguïtés entières sur L1 et L2 pour l'ensemble des lignes de base. Pour celles ne passant pas de la sorte (solution flottante, plutôt pour des longues lignes de base), utilisez une combinaison linéaire des phases des fréquences L1 et L2 appelée combinaison "iono free" et notée L3 ou LC permettant de s'affranchir de toute influence ionosphérique.

Remarques : il est à noter qu'il est préférable d'utiliser la combinaison "iono free" pour des lignes de base supérieures à 15 km. Pour les courtes lignes de base préférez la fixation des ambiguïtés sur L1 et L2.

Dans l'exemple considéré, les fréquences L1 et L2 des constellations

GPS et GLONASS sont utilisées dans la mesure où les ambiguïtés entières ont pu être fixées de la sorte, maximisant ainsi le nombre de satellites utilisables et donc les DOPs associés au calcul de chaque position.

■ De l'utilité d'utiliser des éphémérides précises

Les éphémérides radiodiffusées sont transmises dans le message de navigation des satellites. Elles donnent la position en temps réel de chaque satellite avec une précision de l'ordre de 100 cm ainsi que le décalage de l'horloge du satellite dans le temps de la constellation considérée à 5 ns soit une erreur de 1,5 m en terme de pseudo distance. Avec un rayon orbital de l'ordre de 20 000 km, on obtient un écart relatif de position de l'ordre de 10^{-7} . Un tel écart donne par conséquent des résultats centimétriques en planimétrie pour des lignes de base de l'ordre de 100 km.

Les éphémérides précises sont délivrées par l'IGS (*International GNSS Service*), dans des délais différents suivant la précision fournie. Il en existe quatre types : les ultra-rapides observées, les ultra-rapides prédites, les rapides et les finales tel que décrit sur cette page : <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.

Elles fournissent toutes une précision géométrique du centre de masse des satellites considérés inférieure ou égale à 5 centimètres ainsi qu'un décalage de l'horloge du satellite de l'ordre de 150 ps pour les éphémérides ultra-rapides observées soit une erreur de 4,5 cm en terme de pseudo-distance. L'écart relatif est donc de l'ordre de 10^{-9} permettant par conséquent d'autoriser des résultats millimétriques en planimétrie pour des lignes de base de 100 km. Ceci dit, elles ne contiennent pas la position du point de référence de l'antenne émettant le signal (ARP pour *Antenna Reference Point*) relativement au centre de masse du satellite, les paramètres d'orientation du satellite étant inconnus. Leur intérêt réside donc principalement dans l'amélioration des horloges.

En ce sens et à la recherche de la meilleure précision possible dans la détermination des coordonnées du mobile, il est recommandé d'utiliser des

éphémérides précises téléchargeables sur le site du RGP à l'adresse suivante : <ftp://rgpdata.ign.fr/pub/products/ephemerides/>.

Dans la suite du calcul les éphémérides finales sont utilisées, tant pour les constellations GPS que GLONASS.

■ De l'utilité d'utiliser un modèle ionosphérique et un modèle troposphérique

Il est possible d'utiliser un modèle ionosphérique ainsi qu'un modèle troposphérique précis pour ce type de calcul où nous cherchons à obtenir la meilleure classe de précision possible. En effet, les effets ionosphériques et troposphériques ne peuvent être totalement annulés par le calcul différentiel du fait de la trop grande décorrélation des observations lorsqu'elles sont réalisées à plusieurs dizaines de kilomètres. Des modèles numériques sont disponibles sur plusieurs sites Internet notamment sur le site du RGP aux adresses suivantes pour respectivement la partie ionosphérique et troposphérique : <http://rgp.ign.fr/PRODUITS/iono.php> et <http://rgp.ign.fr/PRODUITS/tropo.php>.

Pour la troposphère et à défaut de pouvoir utiliser ces modèles numériques, les logiciels commerciaux permettent d'utiliser des modèles paramétriques permettant d'estimer la teneur en vapeur d'eau de la troposphère en prenant en compte l'élévation et l'azimut des satellites, la température ainsi que la pression atmosphérique (Hopfield, Dry-Neil, Saastomoinen, etc.).

■ 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 de base fixées (dont les ambiguïtés entières sont fixées) et un certain nombre d'indicateurs statistiques relatifs à la qualité de ces lignes de base.

En plus du PDOP, du GDOP et du RDOP définis dans les prérequis, il est possible d'analyser les deux indicateurs suivants :

- Ratio : le ratio donne une indication sur la validité statistique de la résolution des ambiguïtés entières déterminées de manière itérative. Les deux

Résultats du traitement						
Enregistrer	Observation	Type de solution	Précision horizontale (95%)	Précision vert. (95%)	RMS	Longueur
<input checked="" type="checkbox"/>	TREM --- ILBO	Fixe	0,002	0,005	0,001	81969,393
<input checked="" type="checkbox"/>	TREM --- CHIN	Fixe	0,002	0,005	0,005	78656,796
<input checked="" type="checkbox"/>	TREM --- OTER	Fixe	0,002	0,005	0,001	141063,696
<input checked="" type="checkbox"/>	TREM --- VDOM	Fixe	0,002	0,005	0,001	159036,924
<input checked="" type="checkbox"/>	VDOM --- ILBO	Fixe	0,002	0,005	0,001	69377,878
<input checked="" type="checkbox"/>	OTER --- ILBO	Fixe	0,002	0,005	0,001	52806,779
<input checked="" type="checkbox"/>	CHIN --- ILBO	Fixe	0,003	0,008	0,001	13281,719
<input checked="" type="checkbox"/>	OTER --- VDOM	Fixe	0,002	0,005	0,001	98598,621
<input checked="" type="checkbox"/>	VDOM --- CHIN	Fixe	0,002	0,005	0,003	83061,713

Figure 5. Résultats du calcul des lignes de base dans l'exemple suivi.

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.

- 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.

Bien souvent et comme illustré sur la figure 5, vous trouverez également un estimateur statistique des précisions horizontale et verticale généralement donné avec un intervalle de confiance à 95 % (2σ) :

■ Ajustement libre

Nous venons à cette étape de calculer un certain nombre de lignes de base

nous permettant d'accéder aux jeux de coordonnées des points situés à leurs extrémités, uniquement à partir des observations, sans fixer de point.

Nous allons maintenant procéder à une compensation libre afin de répartir, de manière homogène sur l'intégralité du réseau formé, les erreurs sur chacun des jeux de coordonnées obtenus : le principe va alors consister à minimiser par moindres carrés les résidus sur la fermeture du réseau.

Pour le moment, les coordonnées des points de référence n'ont pas encore été prises en compte dans le rattachement. Cette étape, dite de compensation libre, s'applique donc dans le calcul d'un réseau sans véritable mise en référence afin d'en vérifier la cohérence interne. Cette étape permet d'évaluer la qualité interne du réseau en détectant les erreurs et les fautes dans les observations et d'ajuster la précision des observations *a priori* (détermination de la matrice de poids pour l'ajustement par moindres carrés lors de la phase suivante d'ajustement dite à "contraintes minimales").

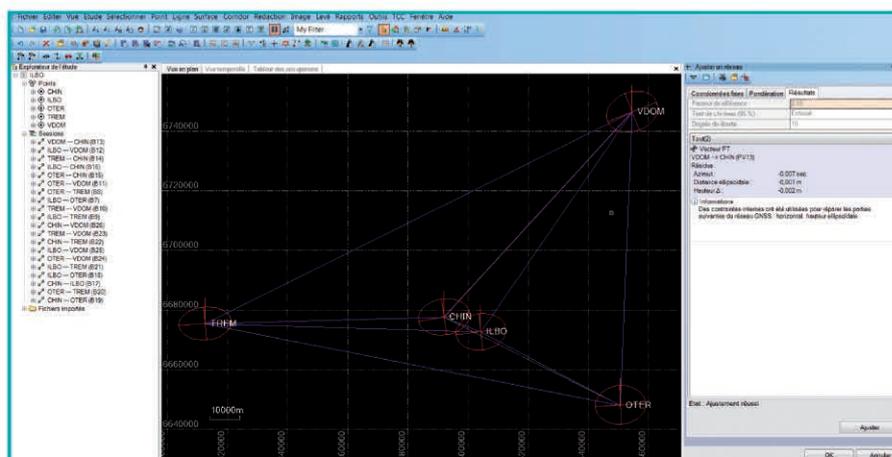


Figure 6. Résultats de l'ajustement libre avec obtention d'un facteur de référence à 2.55.

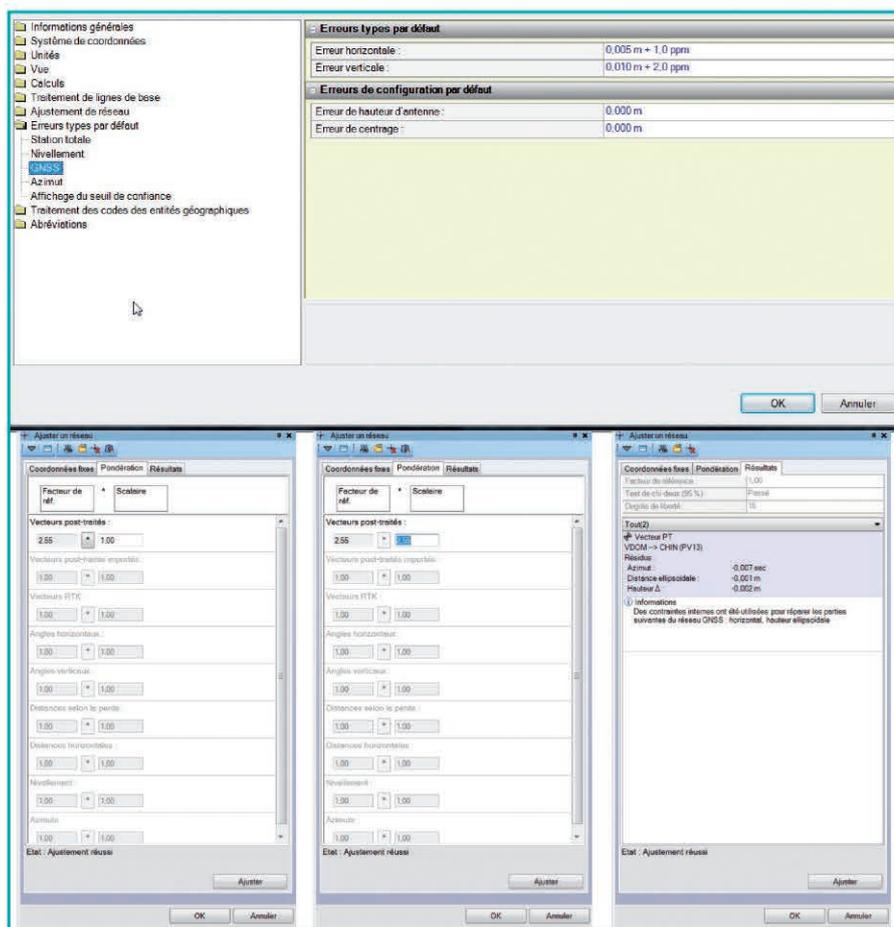


Figure 7. Définition du modèle stochastique utilisé pour les observables GNSS et application d'un scalaire aux erreurs *a priori* pour obtenir un estimateur "robuste" des erreurs *a posteriori*, c'est-à-dire avec un facteur de référence égal à 1.

Un indicateur possible afin de qualifier la qualité de cet ajustement est "l'écart-type de l'unité de poids" ou "variance de référence" ou encore "facteur de référence du réseau" : cet indicateur mesure la dimension des résidus d'observation d'un réseau par comparaison aux erreurs d'observation estimées *a priori* d'après le modèle stochastique théorique associé au type d'observations GNSS réalisées, cet indicateur devant être le plus proche possible de 1. Nous avons alors :

$$\text{Var}_{\text{référence}} = \frac{\text{Var}_{\text{observés}}}{\text{Var}_{\text{estimés}}}$$

Équation 2. Variance de référence ou écart-type de l'unité de poids ou encore facteur de référence du réseau.

Les erreurs *a posteriori* (erreurs sur le point après ajustement libre) sont alors calculées en multipliant les erreurs *a priori* (erreurs matérialisées par les ellipses d'erreurs sur chaque ligne de

base) par la variance de référence résultant d'une compensation. Cela signifie que lorsque la variance de référence est voisine de 1, les erreurs estimées *a priori* sont cohérentes avec les erreurs résultant de la compensation

libre (résidus). En d'autres termes, cela signifie que les erreurs répercutées sur un point lors de la compensation libre pour le faire coller à ses homologues déterminés à partir d'autres lignes de base sont cohérentes avec les erreurs estimées sur chacune des lignes de base. Cette valeur indique donc la qualité de la correspondance des erreurs *a posteriori* de l'ajustement avec les résidus d'observation et donc d'estimer avec quel degré de succès les erreurs d'ajustement *a priori* (pré-ajustement) correspondent aux erreurs *a posteriori* (post-ajustement). Plus cette variance de référence est proche de 1, plus le modèle stochastique utilisé est en adéquation avec la qualité des observations et du moteur de calcul utilisé.

Dans l'exemple qui nous intéresse (cf. figure 6), le facteur de référence du réseau est de 2.55 après ajustement libre.

Comme illustré sur la figure 7, les erreurs *a priori* issues du calcul des lignes de base prenant en compte les données du modèle stochastique définies dans le projet (modèle d'erreur choisi pour les observations GNSS) sont multipliées par ce facteur de référence (application d'un scalaire) pour estimer les erreurs *a posteriori*.

■ Fermeture de boucles

Cette première grande étape de validation des observations se termine, le cas échéant, c'est-à-dire lorsque les lignes de base retenues pour le calcul forment des triangles, par l'analyse de la ferme-

Informations relatives à l'étude		Système de coordonnées	
Nom:	C:\Users\ROMAIN\Desktop\ILBO\Cas-Elaboré.vce	Nom:	France
Taille:	687 KB	Datum:	RGF93
Modifié:	16/02/2013 14:50:04 (UTC:1)	Zone:	Lambert 93
Fuseau horaire:	Paris_Madrid	Géotid:	RAF09 (France)
Numéro de référence:	ILBO	Datum vertical:	
Description:	Calcul de la statio RGP ILBO		

Résultats de fermeture de boucle GNSS					
Récapitulatif					
Étapes dans la boucle 3					
Nombre de boucles: 7					
Nombre réussi: 7					
Nombre échoué: 0					
	Longueur (Mètre)	Δ3D (Mètre)	ΔHoriz (Mètre)	ΔVert (Mètre)	PPM
Critères de réussite/échec:					1
Meilleure		0,004	0,001	0,003	0,009
La plus mauvaise		0,012	0,008	0,011	0,050
Boucle moyenne	282538,166	0,009	0,005	0,007	0,034
Erreur standard	73779,141	0,009	0,006	0,007	0,014
Date: 19/02/2013 10:50:55		Eude: C:\Users\ROMAIN\Desktop\ILBO\Cas-Elaboré.vce		Trimble Business Center	

Figure 8. Rapport de fermeture de boucle montrant une fermeture 3D moyenne à 9 mm avec un écart-type à un sigma de 9 mm.

ture des boucles joignant l'ensemble des points de votre réseau afin de juger de la cohérence des coordonnées ainsi trouvées. Les résultats de fermeture de boucles sont également consultables dans un rapport fourni par le logiciel de post-traitement et témoignent de la qualité géométrique de la figure que vous venez de former.

Le principe de cette fermeture de boucle consiste alors, partant d'un point, à calculer les coordonnées du point suivant en considérant un vecteur donné et ainsi de suite jusqu'à revenir au point de départ pour comparer les coordonnées initiales et finales comme illustré sur la figure 8.

■ Ajustement à contraintes minimales

La figure géométrique formée par les vecteurs de votre réseau va maintenant être "translatée" sur un seul et unique point de référence afin d'évaluer la correspondance de votre solution avec le réseau géodésique de référence. Les résultats sont là aussi repris en intégralité dans un rapport fourni par le logiciel de post-traitement utilisé.

Là aussi une variance de référence est généralement fournie ainsi qu'un tableau des résultats dont l'analyse permet de se faire une idée assez juste des points que vous pourrez utiliser comme points de contrôle dans la prochaine étape.

■ Ajustement contraint

Nous allons maintenant bloquer les coordonnées des points de référence utilisés afin de trouver par moindres carrés les trois composantes d'un vecteur de translation, les trois rotations et le facteur d'échelle (7 paramètres) permettant de passer du référentiel de vos observations (système de référence utilisé contraint sur un seul point) vers le système de référence national en vigueur en minimisant les résidus entre les coordonnées issues de la compensation à contraintes minimales et les coordonnées des points de référence utilisés. Travaillant en trois dimensions, il nous faut donc un minimum de trois points de référence (9 observations pour 7 inconnues) pour pouvoir résoudre le système. Les résultats sont généralement repris en détails dans le rapport d'ajustement contraint fourni par le logiciel utilisé, avec là aussi une variance de référence

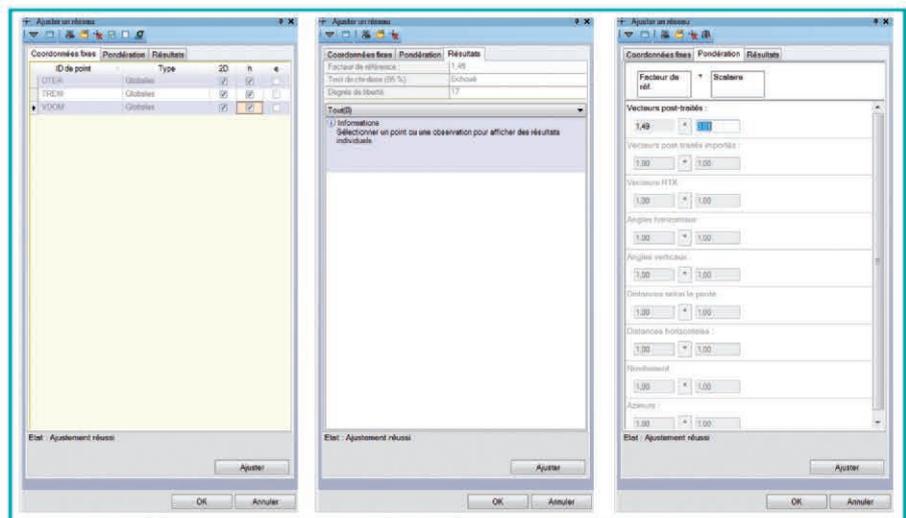


Figure 9. Facteur de référence du réseau de 1,49 après ajustement contraint dont l'effet vient s'ajouter au facteur de référence de 2,55 obtenu lors de la phase d'ajustement libre (multiplication des erreurs *a priori* par 2,55 puis par 1,49 soit un total de 3,79 pour obtenir les erreurs *a posteriori* après ajustement contraint - A noter que le facteur de référence total du réseau est affiché à 3,81 dans la mesure où les valeurs renvoyées dans l'interface du logiciel sont arrondies).

idéalement égale à 1 et traduisant de l'importance de la déformation à apporter à la figure géométrique formée par les différentes lignes de base pour "l'arrimer" aux différents points de contrôle.

Voici sur la figure 9 les résultats de cette étape dans l'exemple nous intéressant.

■ Les moyens de contrôle envisageables

Contrôles internes ou relatifs :

Il est possible de se contrôler en effectuant plusieurs déterminations indépendantes du même point, plus ce nombre de déterminations indépendantes étant important, plus les coordonnées fournies *in fine* étant fiables. Outre le fait d'utiliser des observations indépendantes, le fait d'utiliser d'autres stations de référence que celles ayant servi à la première détermination du point est un bon moyen de rendre le calcul de contrôle le plus indépendant possible du calcul initial.

Notez que dans cet ordre d'idées, la stratégie de calcul peut également être modifiée, toujours afin de rendre les deux déterminations les plus indépendantes possible [masque d'élévation, intervalle de traitement, nature des éphémérides, des constellations et/ou fréquences et des modèles externes utilisés (ionosphère et troposphère)].

Contrôles externes ou absolus et liens avec l'arrêté du 16 septembre 2003

Les moyens suivants permettent, du plus simple au plus compliqué, de procéder à un contrôle absolu de votre lever statique "multi-stations".

1. Inclusion de stations complémentaires du RGP (ne participant pas au rattachement) : comme nous l'avons déjà évoqué, le fait d'utiliser une ou plusieurs stations du RGP dans le calcul sans en contraindre les coordonnées permet de disposer d'autant de points de contrôle absolus.
2. Mise en place simultanée d'autres capteurs sur des points référence pour avoir des points de contrôle : dans le même ordre d'idées et si aucune station du RGP ne pouvait convenir comme point de contrôle car trop éloigné des points à stationner avec le mobile, l'utilisateur pourra mettre en place un ou plusieurs autres capteurs GNSS sur des points connus en coordonnées à proximité du chantier (RBF, NGF, autres...) afin de disposer d'autant de points de contrôle.
3. Détermination des points levés par PPP : les observations du pivot peuvent enfin être traitées par une méthode de calcul complètement indépendante comme le "Precise Point Positioning (PPP)". Cette indication est cependant donnée en tant



Figure 10. Résultats pour la station CHIN pour le cas évolué “en réseau” et contrôle sur la station RGP ILBO en considérant ses coordonnées publiées sur le site du RGP (<http://rgp.ign.fr/STATIONS/#ILBO>).

qu’information dans la mesure où aucun logiciel commercial ne fait du PPP “état de l’art” avec notamment une prise en compte de la surcharge océanique et des modèles fin d’estimation de la teneur en vapeur d’eau de la troposphère. Par ailleurs, le passage de l’ITRF “époque courante” dans lequel sont exprimées les éphémérides vers le RGF93 est également “délicat”, réservant la méthode à un public d’utilisateurs “avertis”.

Conclusions

Nous obtenons au final les coordonnées de la station CHIN telles que reprises *figure 10*, le contrôle sur la sta-

tion RGP ILBO montrant un écart 3D aux coordonnées publiées de 3,7 mm. Les ellipsoïdes d’erreur associés aux stations ILBO et CHIN étant similaires, il y a donc “de bonnes chances” que

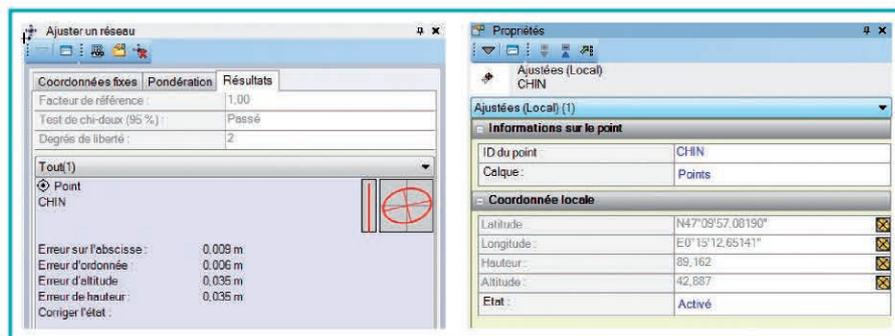


Figure 11. Résultats pour la station CHIN pour le cas simple “en étoile”.

les coordonnées RGF93 calculées pour la station CHIN aient également une classe de précision infra-centimétrique. Les coordonnées et l’ellipsoïde d’erreurs trouvés pour cette même station CHIN suivant la stratégie consistant à ne prendre que 3 stations de référence “en étoile” sont repris sur la *figure 11*. Nous constatons que les dimensions de l’ellipsoïde d’erreur sont environ 2 à 3 fois supérieures avec notamment 35 mm sur la hauteur ellipsoïdale, ce qui s’explique par le fait que l’ensemble des contraintes appliquées lors de la phase d’ajustement rejaillissent sur ce point, aucun autre point n’étant laissé libre.

La différence de coordonnées 3D avec la stratégie “évoluée” en réseau n’est cependant que de 5.1 mm, le principal inconvénient de cette méthode “en étoile” étant son absence de contrôle. Après avoir fait le tour des méthodes statiques (récepteur immobile), nous nous intéresserons dans un prochain article aux levés cinématiques, c’est-à-dire aux levés réalisés lorsque le mobile quitte son état stationnaire pour réaliser ses mesures en mouvement. ●

Contacts

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.birotd@geoaction.eu

Méthodes de travail dans les réseaux GNSS

4^e partie

Le positionnement cinématique temps-réel suivant les méthodes "NRTK" et "RTK pivot libre"

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

Après avoir abordé dans les numéros 132, 133 et 134 les méthodes du "filtrage et moyenne de positions NRTK", du "pivot central ou de la station virtuelle" et du "statique multi-stations" consistant dans les trois cas à obtenir les positions précises voire très précises de quelques points levés avec un récepteur stationnaire en mode cinématique ou statique (type de fixation des ambiguïtés entières), nous abordons dans cette quatrième partie les méthodes "NRTK" (Network Real Time Kinematic) et "RTK pivot libre" permettant de lever et surtout d'implanter rapidement et en temps réel un nombre de points très important. En reprenant le Tableau 1 de l'article introductif paru dans le numéro 129, il s'agit des méthodes de travail en réseau GNSS apparaissant en partie gauche encadrée en rouge :

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 réel		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.

A noter que le document "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS" est librement téléchargeable à l'adresse suivante : <http://geopos.netne.net/spip.php?rubrique55>

La structure de cet article reprend la trame des fiches correspondantes en y développant un exemple numérique concret afin d'étayer le propos.

Objectifs et applications

Ces méthodes de travail permettent de déterminer en temps réel et plusieurs fois par seconde (typiquement 5, 10 et 20 fois par seconde avec un récepteur

fournissant des positions à 5, 10 et 20 Hz) les coordonnées précises du récepteur mobile utilisé. Les coordonnées obtenues sont exprimées dans la référence nationale avec une classe de précision 3D comprise entre 2 et 5 cm à 1 σ .

Ces méthodes peuvent donc être utilisées pour :

- Lever des points stationnés sur quelques époques.
- Se diriger vers des points à matérialiser et les implanter en les stationnant sur quelques époques.
- Mettre en référence un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques en déterminant les coordonnées des

points d'appui d'un canevas local.

- Effectuer le contrôle absolu d'un lever obtenu par méthodes topographiques tierces (Station optique - GNSS cinématiques de type RTK pour la méthode du "NRTK", PPK, NRTK pour la méthode du "RTK pivot libre" et enfin NPPK).

Pour les deux derniers champs d'applications (mise en référence et contrôle), la frontière avec la méthode du "filtrage et moyenne de positions NRTK" est ténue et le lecteur est fortement incité, au regard des enjeux et bien entendu dans la mesure du possible, à utiliser cette dernière méthode eu égard à sa très forte "robustesse" (cf. article paru dans le n° 132).



Figure 1. Pivot ou Base RTK et récepteur mobile GNSS. A noter que dans le cadre de la méthode NRTK, seul le mobile est nécessaire.

Matériels nécessaires

- Un mobile GNSS, de préférence bifréquence, équipé d'une radio UHF et/ou d'un modem GPRS-UMTS muni d'une carte SIM DATA permettant de se connecter à Internet pour récupérer les données du pivot ou du réseau GNSS NRTK.
- Un bipode permettant de laisser le mobile en place sur le point stationné de manière suffisamment stable pendant plusieurs époques de mesure en fonction de la qualité requise pour chaque type de point du lever (point de détail permettant d'habiller le lever, points topographiques constitutifs du lever et points de contrôle).
- Dans le cadre de la méthode "NRTK", un abonnement à un service temps réel d'augmentation de précision GNSS.
- Dans le cadre de la méthode "RTK pivot libre"
 - Une base, de préférence bifréquence, équipée d'un trépied et d'une radio UHF et/ou d'un modem GPRS-UMTS muni d'une carte SIM DATA permettant de se connecter à Internet pour mettre à disposition les données du pivot.
 - Un logiciel de post-traitement permettant éventuellement d'effectuer un calcul en réseau (ajustement libre ou contraint par moindres carrés)

installé sur un poste informatique pouvant se connecter à Internet afin de récupérer les observations GNSS réalisées sur un certain nombre de stations permanentes de référence appartenant à un réseau GNSS (typiquement le RGP) ainsi que divers produits utiles (éphémérides précises, modèle ionosphérique, etc.).

Principe de la méthode et niveau de difficulté

Le mobile calcule la ligne de base le séparant d'une station de référence du réseau ou du pivot RTK en recevant des "corrections" lui permettant de limiter au maximum l'influence des erreurs spatialement corrélées.

En mode RTK, la base transmet au mobile sa position ainsi que ses observations afin que ce dernier puisse réaliser un calcul différentiel. Les "corrections" mesurées sur la base sont alors directement appliquées sur le récepteur mobile en partant du principe que les postes GNSS sont suffisamment proches l'un de l'autre (ligne de base de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres) pour que les erreurs soient quasi identiques sur les deux postes de mesure (i.e. "erreurs" spatialement très corrélées sur de très courtes lignes de bases).

En mode NRTK, ces "corrections" sont issues d'un "calcul réseau" basé sur une interpolation des erreurs géométriques (éphémérides et troposphère) et dispersives (ionosphère) à partir des erreurs effectivement mesurées sur un ensemble de stations entourant le mobile. L'ensemble de ces "corrections" peuvent servir à générer une station virtuelle à proximité du mobile (mode réseau VRS pour "Virtual Reference Station"), rendant la notion même de réseau transparente pour le récepteur mobile. Ces "corrections" peuvent également être modélisées par un plan comme dans le mode FKP, ce qui permet au mobile d'obtenir ses corrections en interpolant dans le plan dès sa réception. Dans le mode réseau MAC ("Master Auxiliary Concept") normalisé RTCM3, les observations de la station maîtresse et les corrections de différence de phase des 5 stations auxiliaires entourant l'utilisateur (cf. Figure 1 de l'article du numéro 132) sont transmises au mobile qui va pouvoir remonter aux observations de l'ensemble des stations pour calculer de manière autonome (et donc parfaitement maîtrisée) sa propre "correction" pour augmenter la précision de sa solution de positionnement. L'exemple terrain a été réalisé sur la commune d'Arpajon (91) et a consisté à relever une trentaine de points matérialisant une entrée de parking.

Les figures 2 et 3 montrent le lever en mode NRTK avec une station maîtresse (concept MAC) située à Corbeil-Essonnes (ligne de base de 17,3 km) puis le même lever réalisé avec un pivot disposé au centre de la zone relevée de manière à ce que les lignes de base n'excèdent pas 60 mètres.

Préparation de la mission

La préparation d'un lever NRTK ayant déjà été développée dans l'article du numéro 132 traitant de la méthode du "filtrage et moyenne de position NRTK" nous invitons le lecteur à procéder à une lecture croisée entre les deux articles et nous nous attacherons à décrire dans cette partie la préparation d'un levé dans le cadre de la méthode du "RTK pivot libre".

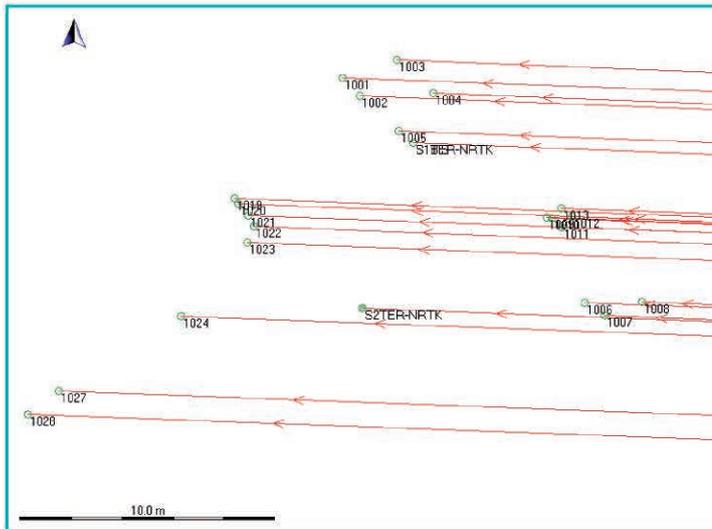


Figure 2. Lever en mode NRTK suivant le concept MAC avec une station maîtresse située à 17 km.

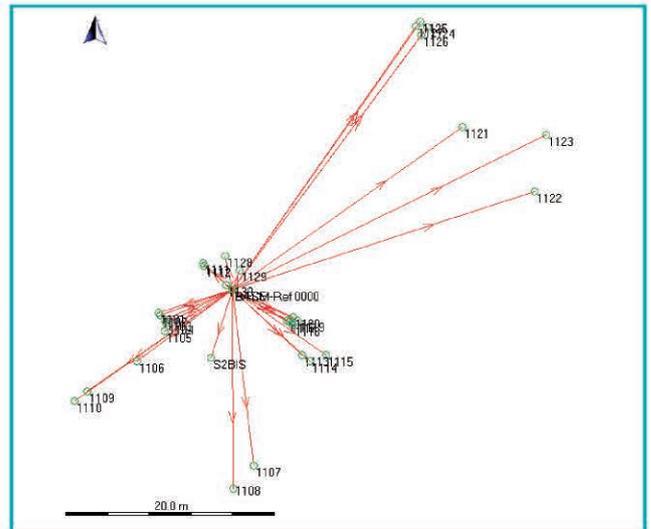


Figure 3. Même lever suivant la méthode du "RTK pivot libre".

■ Problèmes de télécommunications

Chaque époque de mesure du mobile devant être synchronisée aux informations envoyées par le pivot, il faut pouvoir disposer d'un lien de communication temps réel afin de faire communiquer les deux postes de mesure.

Sur le terrain il est donc indispensable de bien penser le système de communication à utiliser :

- Radios UHF pour des portées maximum de quelques kilomètres (jusqu'à 10 ou 20 km) en ligne de vue directe avec nécessité de s'acquitter d'une licence d'utilisation auprès de l'ANFR (Agence Nationale des Fréquences Radioélectriques) pour un coût d'environ 1100 € HT annuels au 01/02/2012 pour l'utilisation d'une des deux fréquences itinérantes 444.8375 MHz ou 444.9875 MHz à une distance maximale de 20 km.
- Internet mobile pour des portées illimitées avec des coûts assujettis aux coûts des abonnements afférents (environ 300 € HT annuels pour un abonnement GPRS-EDGE-UMTS en connexion illimitée au 01/02/12)

Dans le cas de l'utilisation d'une radio UHF, il faudra veiller à monter la radio émettrice le plus haut possible de manière à augmenter les portées, les deux antennes radio devant a priori être reliées par une ligne de vue directe. Si

les deux fréquences itinérantes étaient déjà utilisées par d'autres utilisateurs (444.8375 et 444.9875 MHz), il demeurera possible de décaler l'émission de quelques millisecondes afin de pouvoir partager une même fréquence à plusieurs utilisateurs.

Si en UHF les données transitent dans l'air entre l'émetteur et le récepteur en quelques millisecondes, il n'en est pas de même quand lesdites données transitent dans un réseau télécom complexe comme le réseau GPRS-EDGE où la latence moyenne est de 750 ms avec un écart-type de 750 ms à un sigma.

Il est alors assez fréquent que les données arrivent avec une latence de 2 secondes d'où la nécessité de configurer le récepteur mobile utilisé en mode "interpolé" afin d'effectuer un lever en temps réel ("Low Latency" chez TRIMBLE, "Précision" chez LEICA, "Extrapolation" chez TOPCON, etc.). Ce mode est à opposer au mode "synchronisé" où le mobile attend de recevoir la correction à synchroniser à sa mesure pour générer une position. Avec de tels modèles d'interpolation, les corrections reçues par le mobile à typiquement 1 Hz (une correction par seconde) lui permettent de monter un modèle d'interpolation dans lequel il va pouvoir aller chercher les 5, 10 ou 20 corrections à synchroniser à ses 5, 10 ou 20 mesures faites chaque seconde pour calculer des solutions de positionnement à 5, 10 ou 20 Hz.

La limite de validité en extrapolation d'un tel modèle étant d'environ 3 secondes, son utilisation permet de pallier les petites coupures télécom inhérentes à l'utilisation du réseau GPRS-EDGE.

Pour faire face à des coupures plus importantes de la liaison télécom, mais aussi à toutes fins de contrôle et de traçabilité, enregistrez les données brutes en statique comme en itinérant afin de pouvoir recalculer en post-traitement (PPK "pivot libre") l'ensemble de votre chaîne cinématique à partir des données observées sur les stations de votre opérateur réseau et/ou celles du RGP tel que décrit dans le prochain article.

■ Vérification du matériel

Il est également recommandé de s'assurer, conformément aux bonnes pratiques et aux prérequis rappelés en préambule du document, que le matériel est apte à être utilisé dans le cadre d'un lever de précision (qualité de la bulle et longueur de la canne - grille de conversion altimétrique, modèles d'antennes et version du firmware du récepteur GPS/GNSS à jour).

Phase terrain

Les phases terrain afférentes à un lever NRTK ayant déjà été développées dans l'article du numéro 132 traitant de la méthode du "filtrage et moyenne de

position NRTK” nous invitons le lecteur à procéder à une lecture croisée entre les deux articles et décrivons dans cette partie la préparation et la réalisation d’un levé et de son contrôle dans le cadre de la méthode du “RTK pivot libre”.

■ Lever cinématique

1. Trouvez un point central sécurisé, stable, bien dégagé et permettant la réalisation d’observations GNSS de qualité conformément aux prérequis afin de mettre votre pivot ou base en station. Dans l’exemple nous intéressant, le pivot est installé sur une station nommée “S1”. De manière à pouvoir remettre votre pivot en station si vous aviez à démonter votre appareil (chantier durant plusieurs jours et emplacement “moyennement” sécurisé), commencez par matérialiser au sol l’endroit de votre mise en station pour réoccupation ultérieure.
2. Mettez en place la base et son moyen de communication, mesurez bien la hauteur d’antenne (3 lectures les plus indépendantes possibles), vérifiez votre mise en station (bulle et plomb optique) et allumez le récepteur. Dès que votre récepteur est en mesure de déterminer une position en mode “naturel”, fixez-la arbitrairement comme position connue de votre base via la fonction “ici” de son module de mise en station.
3. Lancez ensuite l’enregistrement des données brutes toutes les secondes (1 Hz) sur votre base pour le post-traitement des coordonnées du pivot et éventuellement sur votre mobile pour un recalcul de votre chaîne cinématique à toute fin de contrôle (*cf. prochain article*).
4. Vérifiez la bonne émission des “corrections” sur votre moyen de communication.
5. Allumez votre mobile et vérifiez la qualité du flux de “corrections” avant de vous déplacer sur la zone à lever. Les “corrections” doivent alors arriver toutes les secondes de manière très régulière et votre système doit normalement très rapidement passer en mode “RTK Fixe”, c’est-à-dire réaliser son initialisation (fixation des ambiguïtés entières).
6. Une fois sur zone, attendez que votre système initialise et vérifiez la qualité

de l’initialisation en comparant 3 fois de suite les coordonnées données par le système sur le premier point du lever après avoir retourné l’antenne de votre mobile en direction du sol jusqu’à perte complète de la poursuite des satellites (perte de la solution de positionnement).

Si votre système met plus de temps que d’habitude à fixer les ambiguïtés entières (opération typiquement de l’ordre de la minute), soyez sur vos gardes (masques, multitrajets, qualité du flux de correction, phénomènes météorologiques ionosphériques ou troposphériques, trop forte décorrélation entre les observations réalisées sur votre pivot et celles réalisées sur le mobile, etc.) et ayez plutôt tendance à “sur-contrôler” votre lever.

7. Effectuez votre lever en respectant les consignes suivantes, sans oublier l’ensemble des bonnes pratiques décrites dans les prérequis du document :

a) Stationnez les points de détails 1 seconde (habillage de votre lever), les points topo entre 3 et 5 secondes (points essentiels de votre lever) et les points de contrôle 180 secondes, le fait de moyennner les positions permettant de fiabiliser le résultat. Pour ce faire, réglez dans la configuration de votre récepteur mobile le nombre d’époques à mesurer pour lever un point en conséquence. Il faut prendre l’ensemble des points importants au moins deux fois en laissant passer au moins 20-30 minutes entre deux déterminations successives de manière à laisser suffisamment changer l’état de la constellation et l’ensemble des autres paramètres d’état du système (état ionosphérique et troposphérique). Plus vous aurez de déterminations indépendantes pour un même point, plus sa qualité sera avérée.

De manière à automatiser le plus possible ce processus de multi-détermination d’un même point, vous pouvez conserver d’une fois sur l’autre le nom du point et régler convenablement les tolérances planimétriques et altimétriques autorisées entre deux déterminations.

De manière à aller au bout de cette démarche de multi-détermination d’un même point, vous pouvez vous référer à l’article paru dans le numéro 132 traitant de la méthode de “filtrage et moyenne de positions NRTK” en généralisant le terme “NRTK” au concept de “positions obtenues sur quelques époques”.

- b) Au-delà des estimateurs de la précision horizontale et verticale fournis par votre capteur (indicateurs statistiques), ne levez pas avec un GDOP ou un PDOP de respectivement de plus de 3-4 et 2-3. Pour ce faire, vous pouvez surveiller ce paramètre en temps réel et/ou définir un masque de lever.
- c) En cas de perte du statut centimétrique de votre solution de positionnement (perte de l’initialisation), par exemple après être passé près d’un bâtiment ou sous un arbre, rendez-vous dans un endroit bien dégagé afin de reprendre une initialisation fiable en contrôlant sa qualité comme indiqué au point 6. Dans la mesure du possible, redéterminez les coordonnées du dernier point levé avec l’initialisation précédente afin de contrôler l’écart de position obtenu dans l’optique d’assurer la cohérence interne de votre lever. En cas d’impossibilité, essayez de repasser ultérieurement sur un point déjà levé avec l’initialisation précédente afin de contrôler l’écart de position obtenu. Pour ce faire, essayez de passer par un chemin libre de tout obstacle afin de ne pas perdre l’initialisation que vous cherchez à valider. En cas d’incohérence, répétez la procédure avant de remettre en cause l’initialisation antérieure.

■ Moyens de contrôle

A la fin de votre lever, terminez par la redétermination du premier point et contrôlez l’écart de position. Si vous avez respecté les recommandations ci-dessus (en cas de perte d’initialisation afin d’assurer la cohérence entre les différentes initialisations) et si cet écart est cohérent avec les spécifications de votre lever, la cohérence interne de votre lever devrait normalement être

assurée.

Le nombre de points de contrôle sera d'au moins 3 pour un levé linéaire (bien répartis sur la longueur du projet (début, milieu, fin)) ou de 4-5 (quatre coins et centre du rectangle englobant l'ensemble des points levés) pour un levé surfacique :

1. Contrôle relatif :

- a) Stationnez plusieurs fois le point de contrôle à différents moments de la journée de manière à obtenir le maximum de déterminations indépendantes du même point comme expliqué dans la partie liée au levé de point de contrôle dans la phase terrain. Plus le nombre de déterminations indépendantes du même point sera important plus la fiabilité de ce point sera avérée.
- b) Si votre chantier était amené à durer plusieurs jours, n'hésitez pas à effectuer vos différentes sessions de mesure pour un même point sur plusieurs jours à des heures bien distinctes. En effet, les constellations GPS et GLONASS se répètent de jour en jour aux mêmes heures avec respectivement des décalages de 4 et 90 minutes. Cette recommandation vous permettra d'éviter de vous retrouver avec des DOPs similaires, même si les conditions atmosphériques ont changé.
- c) Pour aller au bout de cette démarche de multi-détermination d'un même point, vous pouvez vous référer au numéro 132 traitant du "filtrage et moyenne de positions NRTK" en généralisant le terme "NRTK" au concept de "positions obtenues sur quelques époques" dans le cas de la méthode du "RTK pivot libre".
- d) Si vous disposez d'une station optique procédez à des contrôles de distances et d'azimuts (dans cet ordre de préférence).
- e) A toutes fins utiles, enregistrez les données brutes en statique comme en itinérant afin de pouvoir recalculer en post-traitement (PPK ou NPPK) l'ensemble de votre chaîne cinématique à partir des données observées sur les stations de votre opérateur réseau et/ou celles du RGP.

2. Contrôle absolu : Stationnez tous les points connus en coordonnées (RBF,

NGF, autres, etc) afin d'assurer un contrôle absolu de la qualité de votre lever ou procédez aux observations nécessaires pour un contrôle par méthodes statiques. Ce contrôle doit permettre d'obtenir des coordonnées au moins deux fois plus précises que celles obtenues en mode RTK (ou NRTK le cas échéant) pour votre point de contrôle (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003 relatif aux classes de précision). 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 possible" par méthodes GNSS, même si le coefficient de sécurité de 2 mentionné dans l'arrêté du 16 septembre 2003 sera parfois difficile à justifier. Pour ce faire, référez-vous à l'article paru dans le numéro 134 sur les méthodes "statique multi-stations" en procédant aux observations à un autre moment que celui de votre chantier (observations indépendantes) et en effectuant si possible le calcul de post-traitement avec des stations de référence différentes de celles utilisées pour mettre en place le pivot.

Idealement, revenez sur vos points de contrôle à chaque étape de votre levé, surtout si ce dernier était amené à durer plusieurs jours.

Soyez très précautionneux sur le choix des sites ainsi que sur vos mises en stations conformément aux prérequis.

Si votre levé était amené à durer plusieurs jours et si vous aviez à démonter votre pivot (conseil également valable si vous aviez à changer votre pivot de place pour des problèmes de portée radio), mettez votre pivot en place sur un point déjà levé et matérialisé en conséquence. Vous pourrez ainsi saisir ses coordonnées précédemment obtenues en mode RTK lors de votre nouvelle mise en station. Respectez ensuite le reste de la procédure à compter de l'étape 4 consistant à vérifier la bonne émission de "correction" via le média utilisé (radio UHF ou GPRS-UMTS).

La redétermination d'un certain nombre de points de votre levé est égale-

ment envisageable en utilisant un autre pivot complètement indépendant.

Dans l'exemple développé, une station nommée "S2" a été rattachée au RGF93 en post-traitement à partir des données du RGP en suivant la méthode "statique multi-station" telle que décrit dans l'article du n° 134 afin de pouvoir servir de point de contrôle absolu.

A noter que la station "S1" sur laquelle est mise en place la base RTK pourra également servir de point de contrôle dans le cadre de la méthode "NRTK".

Phase bureau

■ Positionnement du pivot dans le cadre de la méthode du "RTK pivot libre"

De retour au bureau, commencez par déterminer la position de votre pivot dans le système RGF93 en le rattachant par post-traitement à partir des données des stations du RGP et/ou de votre opérateur temps réel conformément aux recommandations parues dans le n° 134.

La figure 4 montre l'ellipsoïde d'erreur sur la station "S1" après calcul dans le système RGF93 via les stations permanentes du RGP :

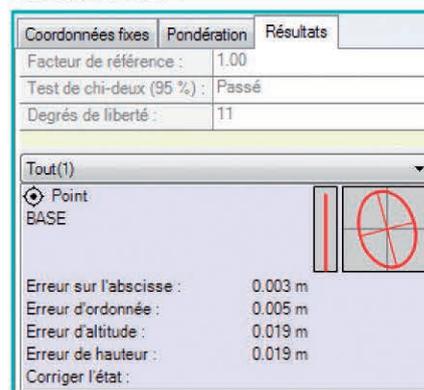


Figure 4. Paramètres de l'ellipsoïde d'erreur associé à la station "S1" sur laquelle est stationnée la base RTK.

Dans le cas où vous auriez la possibilité de vous mettre sur un point préalablement connu en coordonnées (situation hors du champ du document traitant des méthodes de travail dans les réseaux GNSS), enregistrez tout de même les observations brutes de votre pivot pour le rattacher en post-traitement et comparez les coordonnées

obtenues aux coordonnées connues comme moyen de contrôle.

■ Calcul des points de contrôle pour un contrôle absolu

La figure 5 montre l'ellipsoïde d'erreur sur la station "S2" après calcul dans le système RGF93 via les stations permanentes du RGP :

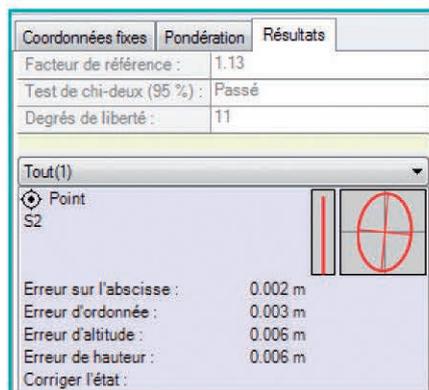


Figure 5. Paramètres de l'ellipsoïde d'erreur associé à la station "S2" servant de contrôle dans le cadre des deux méthodes.

Comme précédemment mentionné, la station "S1" pourra également servir de contrôle dans le cadre de la méthode "NRTK".

■ Traitement de la chaîne cinématique

1. Dans le cadre de la méthode du "RTK pivot libre", les lignes de base calculées en temps réel entre le pivot et l'ensemble des points de votre chaîne cinématique dans le système WGS84 (utilisation des éphémérides radiodiffusées) seront alors appliquées aux coordonnées RGF93 du pivot calculé à l'étape précédente.

La figure 6 permet de voir ce processus de "calage" du lever RTK dans la référence nationale :

Dans le cadre de la méthode "NRTK", passez directement à l'étape ci-dessous.

2. Exportez votre lever exprimé dans le RGF93 afin d'obtenir la liste des points avec leurs différents attributs (DOPs, âge de la correction, SNRs, etc.) puis effectuez un filtrage multicritères. De la sorte, vous vous assurerez, au-delà des précautions prises sur le terrain, de la qualité de votre lever.
3. Pour tous les points de contrôle relatif déterminés au moins deux fois,

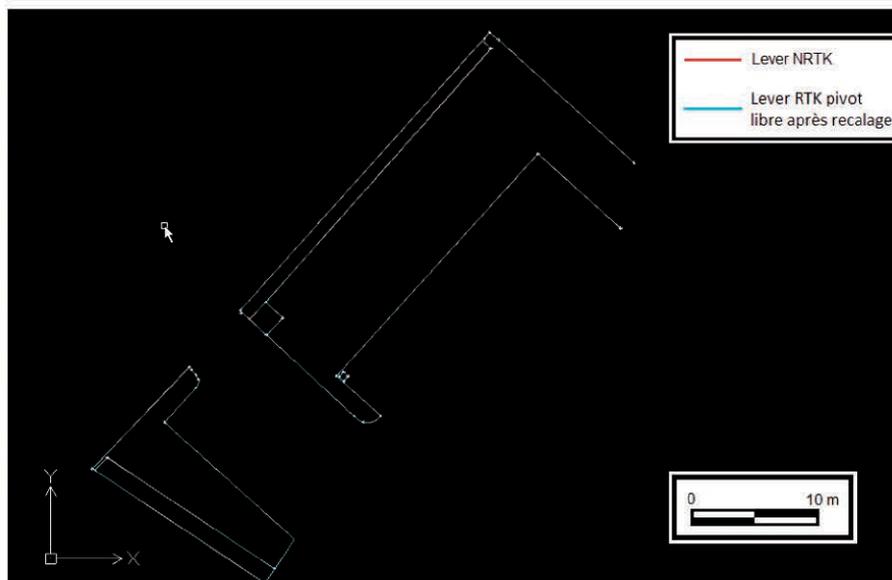
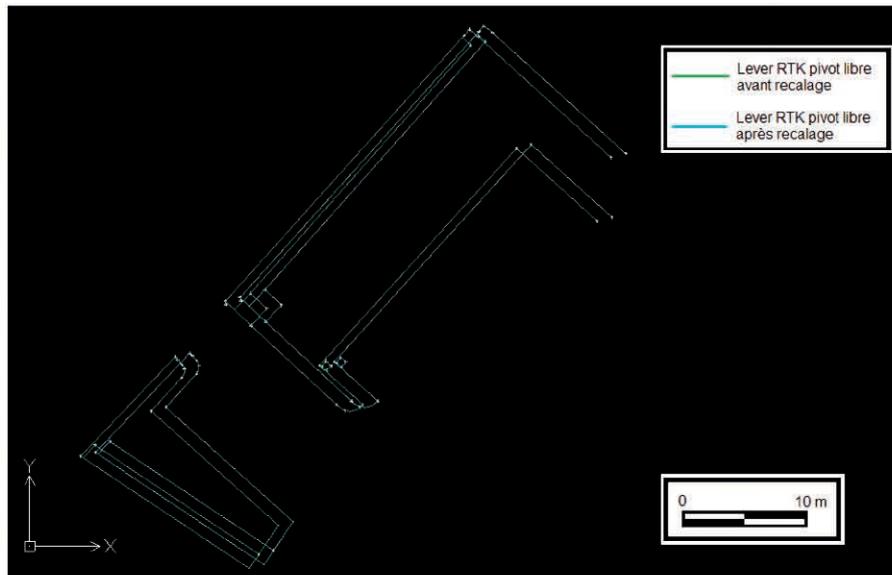


Figure 6. Comparaison entre le lever obtenu en mode "RTK pivot libre" en fixant arbitrairement une position WGS84 au pivot (en vert) et le même lever suite à la mise en référence du pivot dans le RGF93 (en bleu). A titre indicatif, le lever NRTK est également représenté (en rouge).

S2 – RGF 93 projection Lambert93 / IGN69	Début de lever (temps t)	Fin de lever (temps t+30min)	Ecarts
E (m)	644005.514	644005.515	+0.001
N (m)	6833416.722	6833416.721	-0.001
H (m)	86.838	86.843	+0.005

Tableau 1. Coordonnées de la station "S2" obtenues suivant la méthode du "RTK pivot libre" en début et fin de lever après recalage du pivot dans le RGF93.

vérifiez la moyenne obtenue ainsi que les écarts de chaque point à la moyenne afin de juger de la cohérence interne du lever. Dans le cadre de notre exemple numérique, voici ce que cela donne

- pour la station "S2" déterminée suivant la méthode du "RTK pivot libre" (Tableau 1).
4. Pour tous les points de contrôle absolus stationnés lors de votre lever afin de contrôler son exactitude et sa précision dans le but d'évaluer leur



S2 – RGF 93 projection Lambert93 / IGN69	Post-traitement état de l'art	RTK pivot libre (moyenne début et fin de lever)	Ecart
E (m)	644005.541	644005.515	-0.026
N (m)	6833416.722	6833416.722	0.000
H (m)	86.825	86.841	+0.016

Tableau 2. Coordonnées de la station "S2" obtenues suivant la méthode du "RTK pivot libre" après recalage du pivot dans le RGF93 et coordonnées de cette même station après post-traitement RGP.

cohérence absolue, vérifiez leur écart entre les coordonnées obtenues en temps réel et les coordonnées des points de contrôle telles que publiées sur les fiches géodésiques (ou les coordonnées obtenues par une méthode de travail au moins deux fois plus précise que l'estimation de la classe de précision de votre lever "RTK pivot libre" ou "NRTK" (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003).

Dans le cadre de notre exemple numérique, voici ce que cela donne pour la station "S2" déterminée suivant la méthode du "RTK pivot libre" (Tableau 2).

- Pour tous les points de contrôle relatifs obtenus en déterminant plusieurs dizaines ou centaines de fois le même point en RTK (afin de valider la précision interne de votre lever), calculez les différents indicateurs statistiques tels qu'explicités dans l'article paru dans le numéro 132 traitant du "filtrage et moyenne de positions NRTK" en généralisant le terme "NRTK" au concept de "positions obtenues sur quelques époques".
- Enfin et dans le cadre de notre exemple, la comparaison entre les points obtenus suivant la méthode du "RTK pivot libre" en utilisant les stations du RGP permet également

de contrôler les coordonnées obtenues suivant la méthode "NRTK" sur l'ensemble du lever tel que repris dans le tableau 3.

Conclusion

L'exemple considéré montre bien l'équivalence des deux méthodes de travail en terme de classe de précisions atteignables pour la réalisation de levers cinématiques temps réel et d'implantations.

La méthode du "RTK pivot libre" présente certains désavantages en termes de moyens matériels et logiciel à mettre en œuvre sur le terrain (2 récepteurs GNSS et un logiciel de post-traitement) et de temps passé au bureau pour réaliser le post-traitement du pivot et la translation du lever. La stabilité de la base doit enfin être assurée durant toute la durée du lever, ladite base devant parfois être surveillée dans des endroits peu sûrs. Il s'agit cependant de la seule méthode qui fonctionnera strictement partout en mode de transmission UHF lorsque la méthode "NRTK" restera assujettie à la bonne couverture GPRS du chantier (97 % du territoire).

Nous aborderons justement dans le prochain article les méthodes cinématiques post-traitées qui pourront être

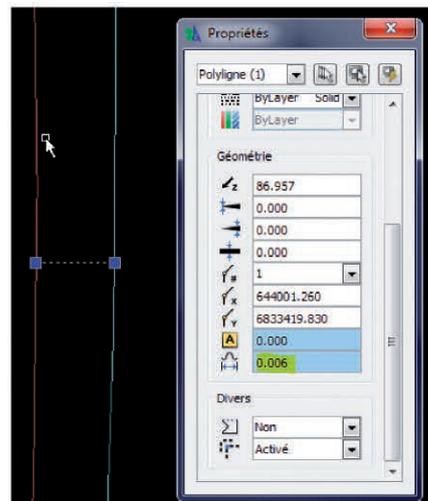


Figure 7. Comparaison entre le lever obtenu suivant la méthode "RTK pivot libre" après mise en référence du pivot dans le RGF93 (en bleu) et le lever obtenu suivant la méthode "NRTK" (en rouge) montrant un écart planimétrique de 6 mm entre deux déterminations d'un même point terrain.

utilisées pour du lever lorsque le mobile sortira de la zone de couverture de la radio UHF de la base (méthode PPK) ou lorsque le mobile arrivera dans une zone non suffisamment couverte par le ou les réseaux. ●

Contacts

Romain LEGROS Directeur Général de la société GEODATA DIFFUSION
romain.legros@geoaction.eu

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.birot@geoaction.eu

Point NRTK	E (m) NRTK	ΔE avec le lever "RTK pivot libre" (m)	N (m) NRTK	ΔN avec le lever "RTK pivot libre" (m)	H (m) NRTK	ΔH avec le lever "RTK pivot libre" (m)
1006	644014.191	+0.004	6833416.942	+0.007	86.636	-0.013
1007	644014.963	+0.009	6833416.424	+0.011	86.620	-0.011
1008	644016.416	-0.002	6833416.963	+0.016	86.614	-0.010
1009	644012.723	+0.005	6833420.307	+0.017	86.479	-0.013

Tableau 3. Coordonnées et écarts entre points homologues déterminés suivant les méthodes "NRTK" et "RTK pivot libre".

Méthodes de travail dans les réseaux GNSS 5^e partie

Le positionnement cinématique post-traité suivant les méthodes "NPPK" et "PPK pivot libre"

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

Dans la continuité de l'article sur les méthodes "NRTK" et "RTK pivot libre" paru dans le numéro 135, nous allons terminer cette série d'articles par leur pendant "temps différé" avec les méthodes "NPPK" (Network Post Processing Kinematic) et "PPK pivot libre" (Post Processing Kinematic). Ces méthodes, si elles ne permettent plus l'implantation de points de par la perte de leur caractère "temps réel", peuvent avantageusement être utilisées pour lever un nombre de points important, voire très important, en mode cinématique, y compris en topographie continue, c'est-à-dire par intervalles fixes de temps et/ou de distance. Elles deviennent même indispensables dans les éventuelles portions d'un chantier non couvertes par le lien radio UHF associé à une base RTK ou dans des zones mal couvertes par les réseaux GPRS/UMTS dans le cadre de la mise en œuvre de la méthode NRTK. En reprenant le Tableau 1 de l'article introductif paru dans le numéro 129 d'XYZ, il s'agit des méthodes de travail en réseau GNSS apparaissant en partie gauche encadrée en rouge :

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 réel		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.

A noter que le document "Méthodes de travail dans les réseaux GNSS" est librement téléchargeable à l'adresse suivante : <http://geopos.netne.net/spip.php?rubrique55>

La structure de cet article reprend la trame des fiches correspondantes en y développant un exemple numérique concret afin d'étayer le propos.

Objectifs et applications

Ces méthodes de travail permettent de déterminer en temps réel et plusieurs fois par seconde (typiquement 5, 10 et

20 fois par seconde avec un récepteur fournissant des positions à 5, 10 et 20 Hz) les coordonnées précises du récepteur mobile utilisé. Les coordonnées obtenues sont exprimées dans la référence nationale avec une classe de précision 3D comprise entre 2 et 5 cm à 1 σ .

Ces méthodes peuvent donc être utilisées pour :

- Lever des points stationnés sur quelques époques.

- Mettre en référence un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques en déterminant les coordonnées des points d'appui d'un canevas local.
- Effectuer le contrôle absolu d'un lever obtenu par méthodes topographiques tierces (Station optique - GNSS cinématiques de type "RTK" ou "NRTK" d'autant plus qu'un jeu de stations de référence différent de celui utilisé dans le calcul temps réel sera utilisé pour le post-traitement).

Pour les deux derniers champs d'applications (mise en référence et contrôle),

le lecteur est incité, au regard des enjeux et bien entendu dans la mesure du possible, à généraliser les concepts développés dans la méthode "filtrage et moyenne de positions NRTK" pour effectuer du "filtrage et moyenne de positions PPK/NPPK" eu égard à leur très forte "robustesse" (cf. article paru dans le numéro 132).

Matériels nécessaires

- Un mobile GNSS, de préférence bifréquence, équipé d'un bipode permettant de laisser le mobile en place sur le point stationné de manière suffisamment stable pendant plusieurs époques de mesure ; la durée d'observation pourra varier en fonction de la qualité requise pour chaque type de point du lever (point de détail permettant d'habiller le lever, points topographiques constitutifs du lever et points de contrôle).
- Dans le cas de la méthode PPK, un second récepteur GNSS, de préférence bifréquence, équipé d'un triépide permettant de laisser le pivot ainsi formé en place lors du lever.
- Un logiciel de post-traitement permettant éventuellement d'effectuer un calcul en réseau (ajustement libre ou contraint par moindres carrés) installé sur un poste informatique pouvant se connecter à Internet afin de récupérer les observations GNSS réalisées sur un certain nombre de stations permanentes de référence appartenant à un réseau GNSS (typiquement le RGP) ainsi que les divers produits utiles (éphémérides précises, modèles ionosphériques, etc.).

Principe de la méthode

Le lever est réalisé à partir de données brutes observées sur le mobile. Les ambiguïtés entières sont fixées lors du post-traitement. Il faut alors calculer au bureau :

1. Les lignes de base entre le mobile et les stations du réseau GNSS dans le cas de la méthode NPPK.
2. La ligne de base entre le mobile et un pivot dans le cas de la méthode PPK. Le pivot est placé sur le chantier dans un endroit stationnable selon les cri-

tères prérequis. Ses coordonnées dans le RGF93 sont déterminées en post-traitement suivant la méthode "statique multi-stations" (cf. article du numéro 134), "pivot central" (cf. article du numéro 133) ou en temps réel suivant la méthode "filtrage et moyenne de positions NRTK" (cf. article du numéro 132).

Il est également à noter qu'une station virtuelle peut être utilisée comme pivot. 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 du pivot que nous aurions eu à mettre en place. 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 obtenues 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.

Il est alors à noter que cette station virtuelle, pourvu que le réseau de stations permanentes utilisé soit suffisamment dense (stations tous les 60 km), permettra de bien prendre en compte les erreurs géométriques (éphémérides, troposphère) et dispersives (ionosphère) affectant le chantier, et donc de maximiser les résultats, aussi bien en terme de précision que de disponibilité (pourcentage d'époques fixées) : en effet, dans le pire des cas de la méthode NPPK, il faudra être capable, dans le

même contexte réseau, de fixer les ambiguïtés entières à une trentaine de kilomètres des 3 stations les plus proches, les résidus sur de telles lignes de base pouvant potentiellement être très importants, d'autant plus que les points peuvent être calculés sur une seule époque de mesure (résidus accentués en cas de positionnement à plus de 1 Hz par l'utilisation d'un modèle d'interpolation des "corrections" appelé "Low Latency" chez TRIMBLE, "Prévision" chez LEICA, "Extrapolation" chez TOPCON, etc.)

D'un point de vue formel, il s'agit de PPK puisque nous ne calculons qu'une seule ligne de base, mais d'un point de vue plus fondamental, cette station virtuelle étant produite par un réseau, cette manière de faire peut s'apparenter à du NPPK "indirect". Dans le reste du document, nous effectuerons le distinguo entre NPPK "direct" et "indirect".

Quoi qu'il en soit et pour chaque ligne de base, qu'il s'agisse de PPK ou de NPPK, les coordonnées et les observations de la base sont synchronisées aux observations du mobile afin d'effectuer un calcul différentiel à ambiguïtés fixées : les "corrections" mesurées sur la base sont alors directement appliquées sur le récepteur mobile en partant du principe que les postes GNSS sont suffisamment proches l'un de l'autre (ligne de base de quelques centaines de mètres à moins de 30 kilo-



Figure 1. Mobile utilisé pour développer l'exemple NPPK proposé.



mètres dans le cas NPPK "direct" extrême) pour que les erreurs s'annulent bien par doubles différences (i.e. "erreurs" spatialement corrélées, voire très corrélées, sur des lignes de base courtes, voire très courtes).

L'exemple terrain a été réalisé sur la commune d'ARPAJON (91) et a consisté à relever quelques milliers de points en topographie continue en laissant le récepteur immobile pendant 1 heure et demie en prenant un point par seconde en topographie continue.

Préparation de la mission

■ Détermination des stations de référence à utiliser dans le cas du NPPK

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

1. Par intersection de deux lignes de base si votre logiciel de post-traitement est capable de réaliser un ajustement
2. Par moyenne pondérée sur la longueur de la ligne de base 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'im-

précision 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 mobile au barycentre d'un triangle quasi équilatéral. Une quatrième station située à proximité du mobile 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 pourrions vérifier la qualité du calcul réalisé sur le mobile.

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 possible s'interceptant 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, qui seront calculées en mode cinématique, ne doivent normalement pas excéder 30 km. Encore faut-il à de telles distances, prendre toutes les précautions nécessaires afin de pouvoir fixer les ambiguïtés entières et obtenir des résultats sans trop de rési-

lus (éphémérides, modèles ionosphériques, modèles troposphériques, modèles d'antennes, etc.). Le lecteur est alors incité à relire l'article paru dans le numéro 134 traitant de la méthode "statique multi-stations" pour laquelle tous les paramètres d'un calcul en post-traitement sont décrits.

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 RGF93 étant lui-même compatible avec l'ETRF2000 époque 2009.00).

Le RGP apporte une couverture dense sur le territoire français (plus de 359 stations au 01/08/13). 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/>).

Dans le cas de la méthode NPPK "indirect", la station virtuelle sera placée au milieu du chantier de manière à avoir des lignes de base n'excédant pas les 2 à 3 km.

■ Vérification du matériel

Il est également recommandé de s'assurer, conformément aux bonnes pratiques et aux prérequis rappelés en préambule du document, que le matériel est apte à être utilisé dans le cadre d'un lever de précision (qualité de la bulle et longueur de la canne - grille de conversion altimétrique, modèles d'antennes et version du firmware du récepteur GPS/GNSS à jour).

Phase terrain

■ Lever cinématique

Dans le cas de la méthode NPPK, passez directement à l'étape 4 :

1. Trouvez un point central sécurisé, stable, bien dégagé et permettant la réalisation d'observations GNSS de qualité (conformément aux prérequis) afin de mettre votre pivot ou base en station.

De manière à pouvoir remettre votre

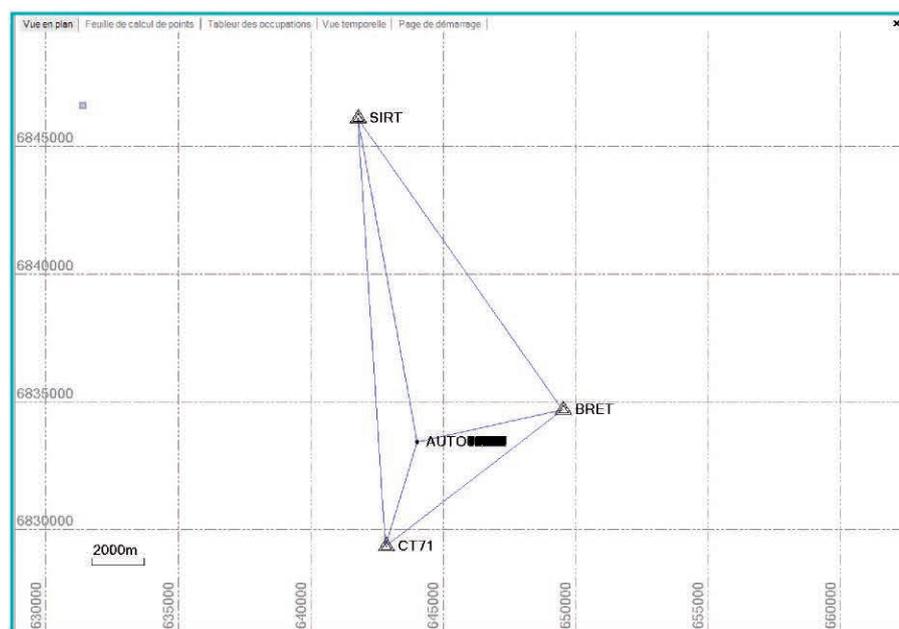


Figure 2. Figure géométrique formée avec les 3 stations du RGP encadrant le chantier.

pivot en station si vous aviez à démonter votre appareil (chantier durant plusieurs jours et emplacement "moyennement" sécurisé), commencez par matérialiser au sol l'endroit de votre mise en station pour réoccupation ultérieure.

2. Mettez en place le pivot, mesurez bien la hauteur d'antenne (3 lectures les plus indépendantes possible), vérifiez votre mise en station (bulle et plomb optique) et allumez le récepteur.
3. Lancez ensuite l'enregistrement des données brutes toutes les secondes (1 Hz) sur votre pivot pour le post-traitement des coordonnées du pivot.
4. Lancez alors l'enregistrement des données brutes toutes les secondes (1 Hz) sur votre mobile pour le recalcul en post-traitement de votre chaîne cinématique.
5. Une fois sur zone, effectuez votre lever en respectant les consignes suivantes, sans oublier l'ensemble des bonnes pratiques décrites dans les prérequis.
 - a) De manière à pouvoir post-traiter votre lever, vous devrez procéder à une ou plusieurs phases d'initialisation afin de pouvoir disposer, pour chacune de ces phases, du volume de données continues suffisant à la fixation des ambiguïtés entières.
Ce volume minimal de données continues est spécifié dans le guide

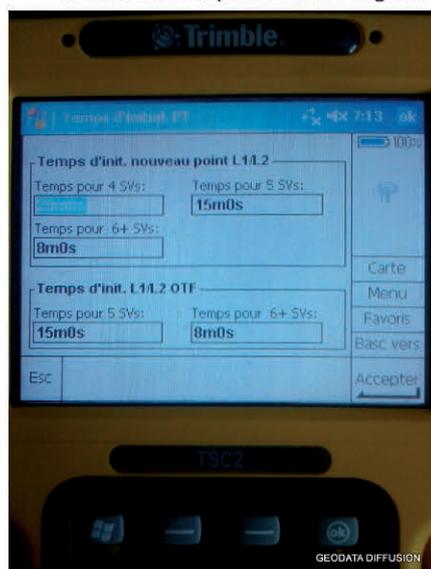


Figure 3. Configuration du mobile TRIMBLE R4 utilisé (logiciel TRIMBLE SURVEY CONTROLLER).



Figure 4. Affichage du statut du mode PPK sur le mobile et temps d'initialisation restant afin de pouvoir traiter la chaîne cinématique suivant les modalités des éléments de configuration repris Figure 3.

d'utilisation de votre récepteur mobile ou de votre logiciel de post-traitement, 8 minutes sans sauts de cycles pour 6 satellites étant une valeur minimale recommandée assez répandue.

Votre calcul de post-traitement pouvant se faire avec des stations assez éloignées, il est plus prudent de considérer un volume de données GNSS sans coupure d'au moins une vingtaine de minutes. En effet, actuellement avec des stations permanentes distantes d'une soixantaine de kilomètres dans le cas des réseaux NRTK, 40 minutes d'observations peuvent être nécessaires si l'on se situe au centre d'un triangle de stations ayant une altitude sensiblement similaire à l'altitude du mobile : l'équation empirique suivante permet de donner une idée de la durée à respecter pour recueillir le volume de données nécessaire à la fixation des ambiguïtés entières :

$$\text{temps de station} = 10 \text{ minutes} + 1 \text{ minute par kilomètre de ligne de base} + 1 \text{ minute par } 100 \text{ mètres de dénivelée}$$

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

Soyez précautionneux lors de vos déplacements entre les points à lever afin de ne pas perdre la poursuite des satellites ce qui vous contraindrait à repartir pour une

phase d'initialisation. Pour ce faire :

- Tenez votre canne la plus verticale possible lors de vos déplacements
- Choisissez si possible des trajets dégagés de tous masques entre les points à stationner

Lorsque vous commencerez votre lever, votre récepteur mobile vous indiquera si vous avez atteint le volume minimal d'observations pour pouvoir fixer les ambiguïtés sur votre chaîne cinématique en vous affichant un message du type "PPK Flottant" avec le temps restant pour passer en "PPK Fixe" comme illustré Figure 4, le volume minimal d'observation étant défini lors du réglage de vos récepteurs (cf. Figure 3) :

- b) Stationnez les points de détails 1 seconde (habillage de votre lever), les points topo entre 3 et 5 secondes (points essentiels de votre lever) et les points de contrôle 180 secondes, le fait de moyenner les positions permettant de fiabiliser le résultat. Pour ce faire, réglez dans la configuration de votre récepteur mobile le nombre d'époques à mesurer pour lever un point en conséquence. Il faut prendre l'ensemble des points importants au moins deux fois en laissant passer au moins 20-30 minutes entre deux déterminations successives de manière à laisser suffisamment changer l'état de la constellation et l'ensemble des autres paramètres d'état du système (état ionosphérique et troposphérique). Plus vous

aurez de déterminations indépendantes pour un même point, plus sa qualité sera avérée.

De manière à automatiser le plus possible ce processus de multi-détermination d'un même point, vous pouvez conserver d'une fois sur l'autre le nom du point et régler convenablement les tolérances planimétriques et altimétriques autorisées entre deux déterminations.

De manière à aller au bout de cette démarche de multi-détermination d'un même point, vous pouvez vous référer à l'article paru dans le numéro 132 traitant de "filtrage et moyenne de positions NRTK" en généralisant le terme "NRTK" au concept de "positions obtenues sur quelques époques".

c) Au-delà des estimateurs de la précision horizontale et verticale fournis par votre capteur (indicateurs statistiques), ne levez pas avec un GDOP ou un PDOP de respectivement plus de 3-4 ou 2-3.

Pour ce faire, vous pouvez surveiller ce paramètre en temps réel et/ou définir un masque de lever.

d) En cas de perte du suivi d'un satellite ou d'un saut de cycle, par exemple après être passé près d'un bâtiment

ou sous un arbre, rendez-vous dans un endroit bien dégagé afin de mettre toutes les chances de votre côté pour pouvoir reprendre une initialisation fiable lors de la phase de post-traitement (minimum de 8 minutes continues sans sauts de cycles pour 6 satellites). Dans la mesure du possible, et afin de pouvoir contrôler la qualité de votre initialisation, toujours lors de la phase de post-traitement, restationnez le dernier point levé avant la perte de suivi ou le saut de cycle, afin de pouvoir contrôler l'écart de position obtenu. Cette démarche vous permettra d'assurer la cohérence interne de votre lever. En cas d'impossibilité, essayez de repasser ultérieurement sur un point déjà levé avec la chaîne d'initialisation précédente afin de contrôler l'écart de position obtenu. En cas d'incohérence, répétez la procédure avant de remettre en cause la chaîne d'initialisation antérieure.

■ Moyens de contrôle

1. A la fin de votre lever, terminez par la redétermination du premier point et contrôlez l'écart de position. Si vous avez respecté les recommandations ci-dessus (en cas de perte d'initialisation afin d'assurer la cohérence entre

les différentes initialisations) et si cet écart est cohérent avec les spécifications de votre lever, la cohérence interne de votre lever devrait normalement être assurée.

2. Le nombre de points de contrôle sera d'au moins 3 pour un levé linéaire (bien répartis sur la longueur du projet (début, milieu, fin)) ou de 4-5 pour un levé surfacique (quatre coins et centre du rectangle englobant l'ensemble des points levés) :

a. Contrôle relatif :

- Stationnez plusieurs fois le point de contrôle à différents moments de la journée de manière à obtenir le maximum de déterminations indépendantes du même point comme expliqué précédemment (point 5) b) ci-dessus). Plus le nombre de déterminations indépendantes du même point sera important, plus la fiabilité de ce point sera avérée.

Si votre chantier était amené à durer plusieurs jours, n'hésitez pas à effectuer vos différentes sessions de mesure pour un même point sur plusieurs jours à des heures bien distinctes. En effet, les constellations GPS et GLONASS se répètent de jour en jour aux mêmes heures avec respectivement des décalages de 4

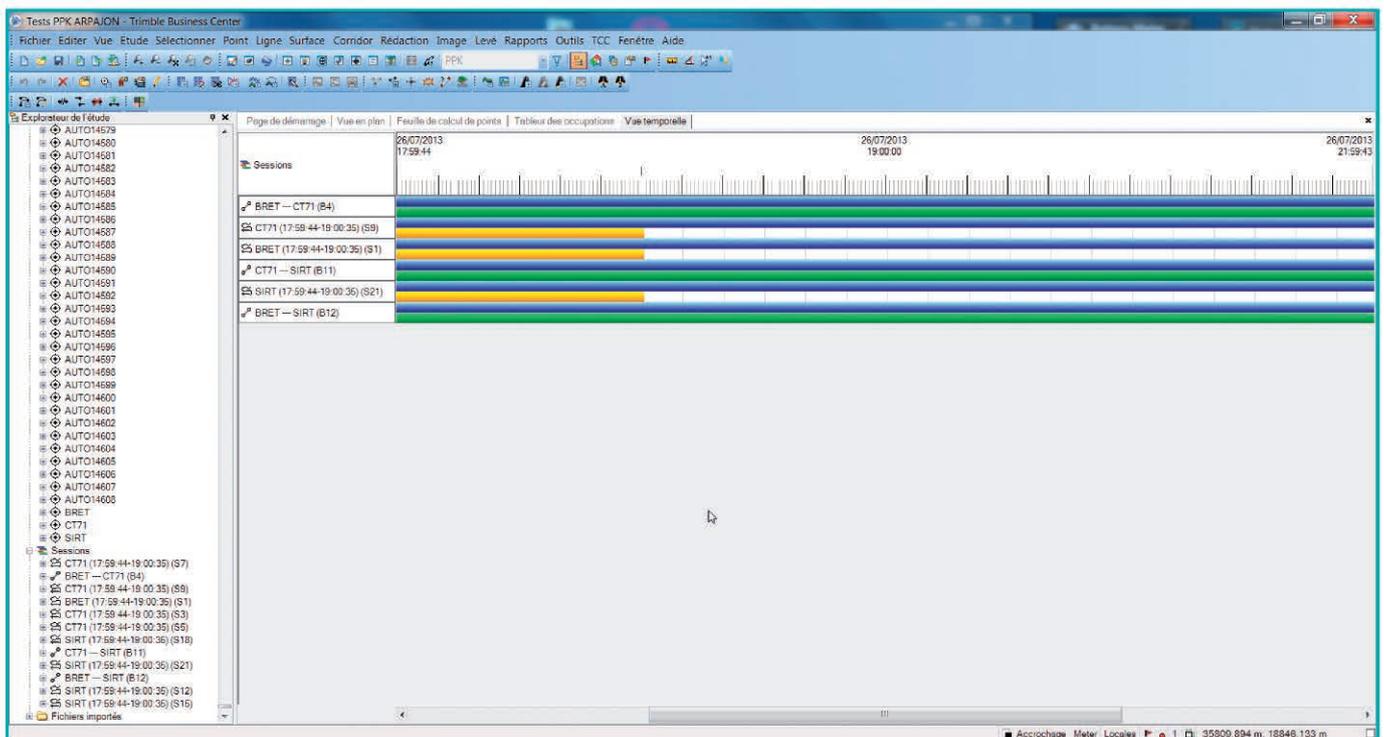


Figure 6. Vue temporelle du projet.

et 90 minutes. Cette recommandation vous permettra d'éviter de vous retrouver avec des DOPs similaires, même si les conditions atmosphériques ont changé.

Pour aller au bout de cette démarche de multi-détermination d'un même point, vous pouvez vous référer au numéro 132 traitant du "filtrage et moyenne de positions NRTK" en généralisant le terme "NRTK" au concept de "positions obtenues sur quelques époques".

- Si vous disposez d'une station optique procédez à des contrôles de distances et d'azimuts (dans cet ordre de préférence).

b. Contrôle absolu : Stationnez tous les points connus en coordonnées (RBF, NGF, autres, etc.) afin d'assurer un contrôle absolu de la qualité de votre levé ou procédez aux observations nécessaires pour un contrôle par méthodes statiques. Ce contrôle doit permettre d'obtenir des coordonnées au moins deux fois plus précises que celles obtenues en mode PPK/NPPK pour votre point de contrôle (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003). En d'autres termes et si aucun point de contrôle

n'était disponible, utilisez la méthode statique "multi-stations" telle que décrite dans l'article du numéro 134 en prenant toutes les précautions nécessaires permettant d'obtenir les coordonnées "les plus précises possible" par méthodes GNSS, même si 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 effectuez si possible le calcul de post-traitement avec des stations de référence différentes de celles utilisées pour le calcul NPPK ou pour la mise en référence du pivot dans le cas de la méthode PPK.

Idéalement, revenez sur vos points de contrôle à chaque étape de votre levé, surtout si ce dernier était amené à durer plusieurs jours.

Soyez très précautionneux sur le choix des sites ainsi que vos mises en stations conformément aux prérequis.

3. Pour la méthode PPK, si votre levé était amené à durer plusieurs jours et si vous aviez à démonter votre pivot, remettez votre pivot en place sur un point déjà levé et matérialisé en consé-

quence puis respectez le reste de la procédure à compter de l'étape 2 : de la sorte, vous assurerez et pourrez contrôler la cohérence interne de votre levé et de ses différentes parties.

4. Toujours dans le cadre de la méthode PPK, la redétermination d'un certain nombre de points de votre levé est également envisageable en utilisant un autre pivot complètement indépendant.

Phase bureau

■ Positionnement du pivot dans le cadre de la méthode du "PPK pivot libre"

De retour au bureau, commencez par déterminer la position de votre pivot dans le système RGF93 en le rattachant par post-traitement à partir des données des stations du RGP et/ou de votre opérateur temps réel conformément aux recommandations parues dans le n° 134 d'XYZ. Dans le cas où vous auriez la possibilité de stationner un point préalablement connu en coordonnées (situation hors du champ du document traitant des méthodes de travail dans les réseaux GNSS), enregistrez tout de même les

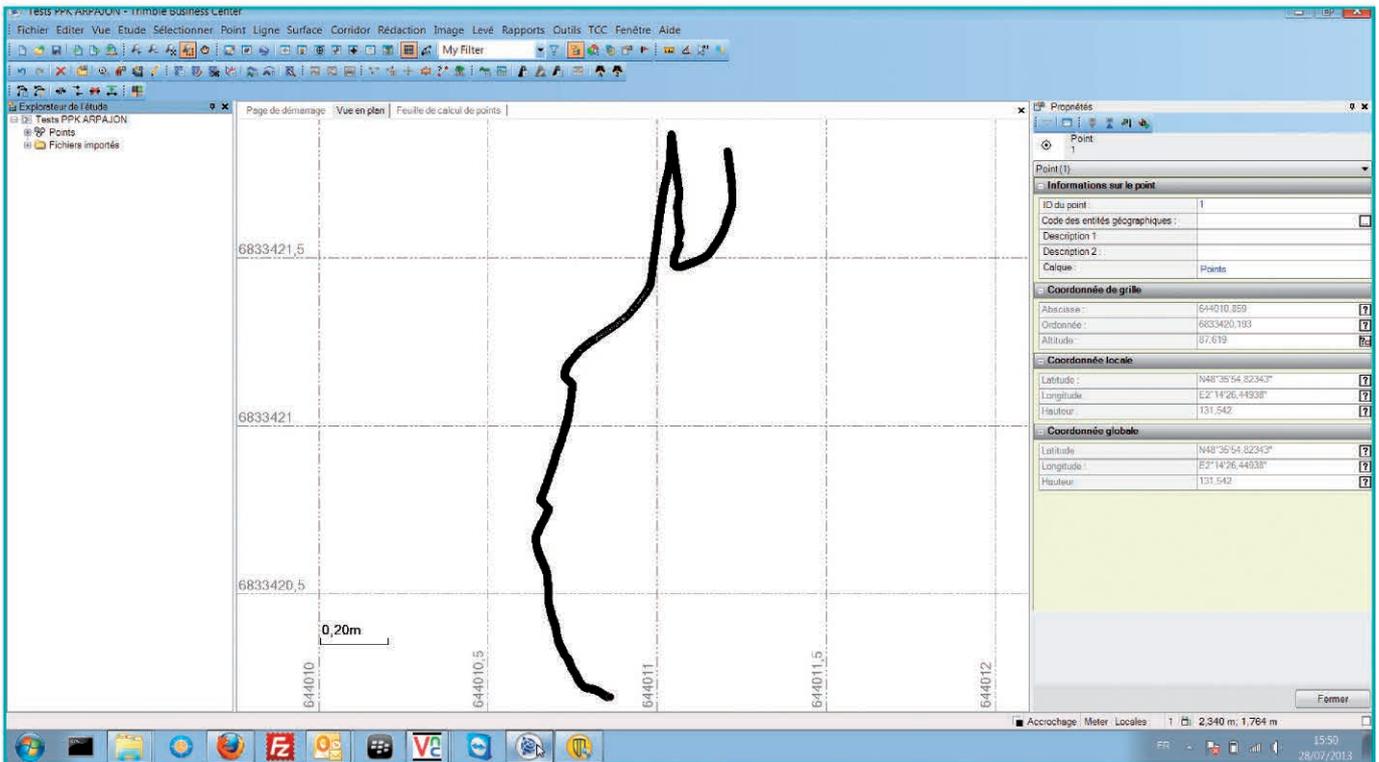


Figure 5. Trace dans le plan des points levés avant le calcul de la chaîne cinématique en post-traitement.

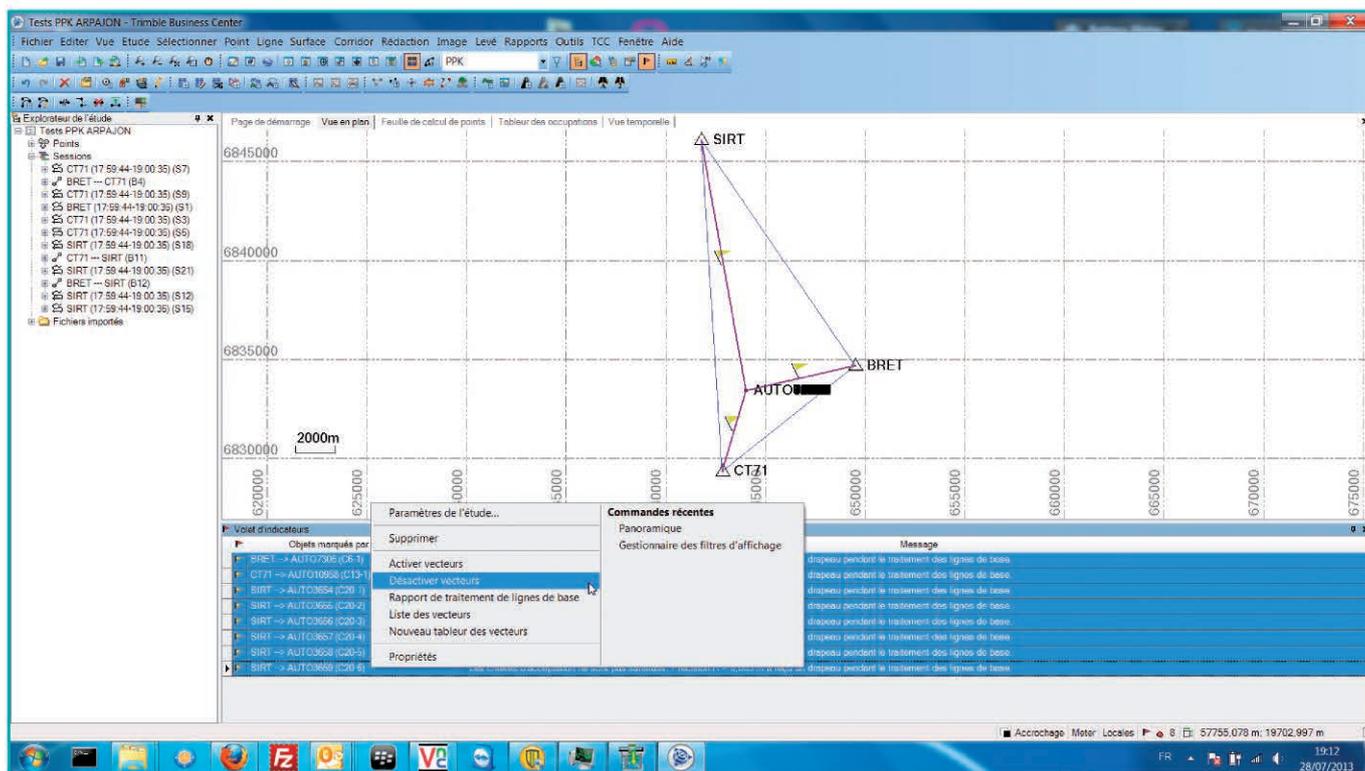


Figure 7. Contrôle des résultats du calcul des lignes de base et désactivation des vecteurs ayant des résidus hors tolérance.

observations brutes de votre pivot pour le rattacher en post-traitement et comparez les coordonnées obtenues aux coordonnées connues comme moyen de contrôle.

■ Calcul de la chaîne cinématique

Exportez ensuite votre lever exprimé dans le RGF93 afin d'obtenir la liste des points avec leurs différents attributs (DOPs, SNRs, etc.) afin d'effectuer un filtrage multicritères. De la sorte, vous vous assurerez, outre les précautions prises sur le terrain, de la qualité de votre lever.

Comme le montre la Figure 5, les points initialement levés dérivent sur plus d'un mètre en 01 h 30 alors que le récepteur est maintenu stationnaire : Calculez ensuite votre chaîne cinématique à partir de votre pivot (méthode PPK) ou des stations du RGP et/ou de votre opérateur temps réel (méthode NPPK).

La Figure 6 montre alors la vue temporelle du projet :

- les observations en bleu correspondent aux sessions statiques effectuées par le récepteur de base,
- les observations en verte correspon-

dent aux sessions statiques effectuées par le récepteur dont on cherche à déterminer les coordonnées,

- les observations en jaune correspondent aux sessions cinématiques à segments continus (à différencier des segments mobiles représentés en blanc dans le logiciel utilisé (TRIMBLE BUSINESS CENTER), ces segments mobiles correspondant aux données cinématiques enregistrées lors du déplacement du mobile sans prise de point).

La Figure 7 montre les résultats du calcul : bien que les lignes de base soient relativement courtes (chantier à environ 12,8 km de la station SIRT, 5,6 km de BRET et 4,2 km de CT71), 8 lignes de base ne peuvent être utilisées en l'état en raison de trop forts résidus (supérieurs à 5 cm en planimétrie) et ce malgré l'utilisation des éphémérides précises rapides et de récepteurs bifréquences.

Au final et après ajustement en réseau, nous obtenons le nuage de points représenté sur la Figure 8. 95% des points s'inscrivent dans un rayon de 4 cm autour de la moyenne (précision à 2 sigmas).

Pour tous les points déterminés au moins deux fois, vérifiez la moyenne obtenue ainsi que les écarts de chaque point à la moyenne afin de juger de la cohérence interne du lever. Pour tous les points de contrôle absolu stationnés lors de votre lever et afin de contrôler leur exactitude et leur précision dans le but d'évaluer leur cohérence absolue, vérifiez pour chaque point les écarts entre les coordonnées obtenues en temps différé et les coordonnées publiées sur les fiches géodésiques ou les coordonnées obtenues par une méthode statique au moins deux fois plus précise que l'estimation de la classe de précision de votre lever PPK/NPPK (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003).

Pour tous les points de contrôle relatif (obtenus en déterminant plusieurs dizaines ou centaines de fois le même point en PPK) et afin de valider la précision interne de votre lever, calculez les différents indicateurs statistiques tel qu'expliqué dans l'article paru dans le numéro 132 traitant du "filtrage et moyenne de positions NRTK" en généralisant le terme "NRTK" au concept de "positions obtenues sur quelques époques".

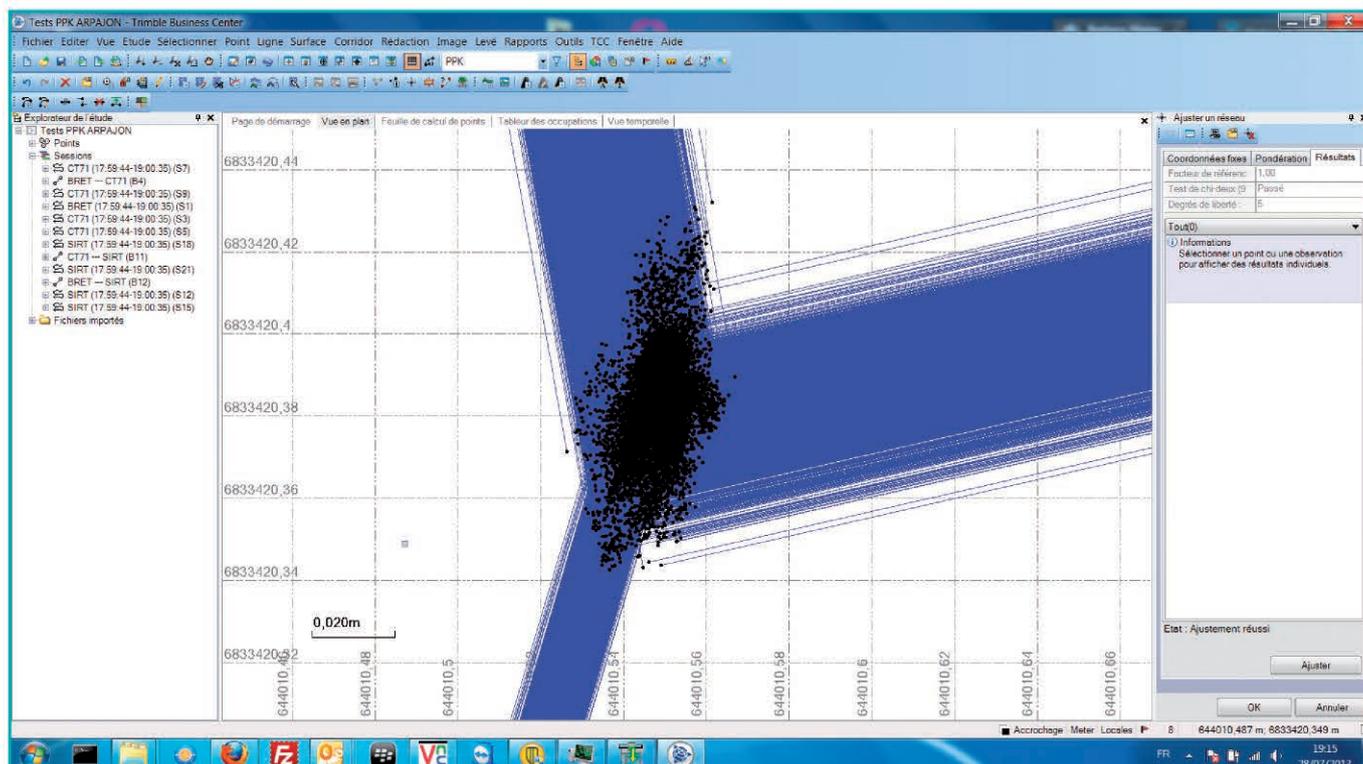


Figure 8. Résultats du calcul après ajustement en réseau. Notez que chaque point mesuré sur le terrain est dupliqué autant de fois qu'il y a de stations de référence (3 dans cet exemple) dans la mesure où la chaîne cinématique est traitée séquentiellement, base après base, avec une numérotation automatique des points la constituant. Sur le terrain, en nommant vos points, cet "artéfact" n'apparaîtra pas et chacun de vos points sera relié à l'ensemble des stations permanentes utilisées vous permettant, dans ce type de configuration réseau (au moins 3 stations permanentes), de procéder à un calcul de fermeture de boucle pour chaque point levé en mode cinématique.

Conclusion

La méthode du "PPK pivot libre" présente certains désavantages en termes de moyens matériels et logiciel à mettre en œuvre sur le terrain (2 récepteurs GNSS). De plus, la stabilité de la base doit également être assurée durant toute la durée du lever, la base devant parfois être surveillée durant toute la durée du lever dans des endroits peu sûrs. Néanmoins, cette méthode permettra de maximiser les chances d'obtenir de bons résultats, c'est-à-dire à ambiguïtés entières fixées et faibles résidus : en effet, les "corrections" sont alors issues d'observations locales forcément très cohérentes et corrélées avec celles réalisées sur le mobile, ce qu'une station virtuelle (méthode NPPK "indirecte") ne sera pas toujours en mesure d'apporter, notamment si la densité de stations permanentes ayant servi à son calcul est insuffisante. Le calcul de l'intersection de plusieurs lignes de base (méthode NPPK "directe") permet de travailler avec des

observations tant côté base que mobile, la longueur des lignes de base utilisées pouvant être problématique en terme de productivité : dans l'exemple développé, 8 points n'ont par exemple pas pu être convenablement déterminés, leurs résidus excédant les 5 centimètres. Quoi qu'il en soit, les méthodes cinématiques post-traitées sont réellement à considérer lors d'opérations de lever dans la mesure où elles vous permettront, à n'en pas douter, de vous sortir d'un mauvais pas lorsque le lien télécom sur lequel vous comptiez pour faire du RTK ou du NRTK ne sera plus disponible. Une bonne conclusion globale serait alors de dire qu'à chaque contexte sa méthode de travail ! N'hésitez donc pas à télécharger le document de référence et à consulter le tableau de synthèse proposé de manière à choisir en toute connaissance de cause la méthode la plus adaptée à votre chantier et pourquoi pas la méthode qui vous permettra de continuer d'avancer en cas d'impondé-

nable en fonction des équipements dont vous disposez (matériels, logiciels) et de vos compétences, en somme de votre contexte d'utilisateur. Un seul lien pour toutes vos problématiques GNSS : <http://geopos.netne.net/spip.php?rubrique55> En cas de remarques, questions, etc. n'hésitez pas à faire un retour aux rédacteurs du groupe de travail afin que la prochaine version du document ne soit que meilleure ! ●

Contacts

Romain LEGROS Directeur Général
de la société GEODATA DIFFUSION
romain.legros@geoaction.eu

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

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

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

PPP, la maturité ?

Laurent MOREL - François FUND - Romain LEGROS - Stéphane DURAND - Bernard FLACELIÈRE

La géolocalisation par GNSS (Global Navigation Satellite Systems) se développe régulièrement avec de nouvelles infrastructures comme les réseaux permanents, avec les nouvelles constellations, avec les nouveaux signaux et l'implémentation de nouveaux algorithmes. L'accumulation de ces progrès a récemment permis au PPP (Precise Point Positioning) de devenir une technique offrant une localisation de qualité centimétrique. Il ne s'agit pas d'une technique nouvelle mais elle s'affiche aujourd'hui comme une alternative au positionnement différentiel. Il est donc légitime de se demander quelle place elle occupera demain en topographie.

Afin de mettre en lumière les avantages et les inconvénients du PPP, nous présenterons dans un premier temps l'historique et les principes de cette technique. Nous nous intéresserons ensuite aux possibilités et à la qualité du positionnement en temps différé proposées par les logiciels de recherche et par les services disponibles gratuitement sur Internet. Enfin nous nous intéresserons au positionnement PPP en temps réel avant de discuter de son intérêt pour la topographie et de ses futures évolutions. Historiquement, cette technique a été employée dans des logiciels de recherche et notamment au JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) avec le logiciel GIPSY/OASIS depuis les années 1990 (Zumberge et al, 1997). Elle a montré qu'elle pouvait apporter des précisions quasi équivalentes aux méthodes différentielles lorsque la durée d'observation dépassait plusieurs heures. Son efficacité réside dans sa simplicité qui lui confère un temps de calcul très court en regard de celui des techniques différentielles. Pour les réseaux présentant des lignes de base de plus de 500 km, le gain de temps est tel qu'elle a été adoptée par de nombreux scientifiques dans leurs applications géophysiques. La mise à disposition fréquente de produits toujours plus précis pour les orbites et horloges des satellites par l'IGS (*International GNSS Service*) a soutenu le PPP jusqu'à rendre cette technique applicable en mode cinématique

et quasi-temps réel. Cette technique est devenue incontournable pour le suivi des glaces (King et al, 2003) ou la déformation des volcans (Larson et al, 2001), où les méthodes différentielles imposent des bases se trouvant parfois très éloignées du ou des mobiles. A partir des années 2000, des services commerciaux qui proposaient déjà des systèmes d'augmentation GPS différentiels ont complété leurs offres avec des solutions PPP temps réel principalement dans l'agriculture pour guider et auto-guider les machines agricoles (services Omnistar XP et G2 et Starfire SF2 par exemple) mais aussi les services Starfix de Fugro et C-Nav de C&C Technology utilisés dans l'exploration et la production d'hydrocarbures. Enfin, très récemment, l'IGS a poursuivi son effort vers le PPP en mettant en place le service RTS (*Real Time - IGS*) qui délivre en temps réel des produits formatés précis d'orbites et horloges (<http://www.rtgs.net>) qui favorisent le développement d'applications PPP en temps réel.

Principe

■ Généralités

Dans le cadre du positionnement par GNSS, plusieurs types de mesures rentrent en œuvre mais on utilise essentiellement les mesures de pseudo-distance (R) et de déphasage (ϕ). Les mesures de pseudo-distance sont réalisées sur les codes envoyés

■ MOTS-CLÉS

Positionnement - Géolocalisation - PPP - Précis - Différentiel - Post traitement - Temps réel - GNSS - ITRF - ETRS - RGF93 Différentiel - Post traitement - Temps réel - GNSS - ITRF - ETRS - RGF93

par le satellite et permettent un positionnement d'une précision comprise entre 5 et 10 m à l'aide d'un seul récepteur. Il s'agit de la technique dite de SPP (*Single Point Positioning*). Ce type de positionnement s'apparente fortement au PPP mais n'atteint pas son niveau de précision car les mesures de pseudo-distance sur le code présentent un bruit de mesure de l'ordre du mètre.

La mesure de déphasage ϕ_i^j (en cycles) est convertie en unité de longueur par multiplication par la longueur d'onde. Sa modélisation simplifiée, pour un récepteur i et un satellite j est la suivante :

$$\Phi_i^j = \lambda \phi_i^j = \rho_i^j + c(dt^j - dt_i) - \lambda N_i^j + \rho_i^{j,tropo} - \rho_i^{j,iono}$$

Avec :

Φ_i^j : observation de pseudodistance (en m) entre satellite j et récepteur i
 ρ_i^j : distance géométrique entre le récepteur i et le satellite j
 dt^j : décalage horloge satellite par rapport au temps GPS
 dt_i : décalage horloge récepteur par rapport au temps GPS
 $\rho_i^{j,iono}$: correction de distance due à la traversée de l'ionosphère
 $\rho_i^{j,tropo}$: correction de distance due à la traversée de la troposphère
 N_i^j : ambiguïté entière entre satellite j et récepteur i

L'utilisation combinée des mesures de pseudo-distance et de déphasage permet de réaliser un positionnement précis à condition de lever le problème d'ambiguïté (N), paramètre qui est par définition entier. En effet, avec la mesure de déphasage les récepteurs GNSS mesurent précisément les variations de la distance entre le satellite et le récepteur mais ce dernier ignore le nombre entier de cycles initial que le signal a parcouru entre le satellite et le récepteur. L'estimation de ce paramètre est donc fondamentale pour se positionner à l'échelle du centimètre. Cependant, déterminer la valeur exacte des ambiguïtés entières impose une connaissance précise de la modélisation des erreurs de mesure. Le *tableau 1* résume les principaux termes de la modélisation, leur ordre de grandeur ainsi que les solutions pour les prendre en compte dans les traitements GNSS.



	Erreur	Ordre de grandeur	Solution
Satellite	Orbites	1 m en temps réel 2.5 cm en temps différé	Produits IGS
	Horloges	5 ns en temps réel 0.2 ns en temps différé	Produits IGS
	Effet relativiste	[0.15 – 0.45] m	Modèle
	Centre de phase	3 m et variations de +/- 5 mm	IGS - Fichier ANTEX de calibration
	Phase Wind-up	[2 – 4] cm	Modèle
Propagation	Troposphère	2.3 m au zénith	Modélisation et estimation
	Ionosphère	14 m au zénith	Produits externes ou combinaison linéaire
Récepteur	Centre de phase	Jusque 20 cm et variations de +/- 10 mm	IGS - Fichier ANTEX de calibration
	Marée solide	12 cm en vertical	Modèle (IERS 2010)
	Marée polaire	2.5 cm en vertical	Modèle (IERS 2010)
	Surcharge océanique	5 cm en vertical	Modèle (IERS 2010)
	Rotation de la Terre	3 cm	Modèle (IERS 2010)

Tableau 1. Principaux termes de la modélisation des mesures GNSS, ordre de grandeur et méthodes de prise en compte dans les traitements GNSS. A noter que plus un satellite sera bas sur l’horizon, plus la quantité de signal traversant l’atmosphère sera importante.

■ Approche différentielle

Le positionnement différentiel est une technique qui permet de s’affranchir d’une connaissance précise de chaque terme d’erreur. En appliquant le principe des doubles différences à une paire de satellites j, k et une paire de récepteurs référence et mobile, certains termes de la modélisation sont réduits voire éliminés. Ceci permet alors d’"isoler" les ambiguïtés et de les résoudre à des valeurs entières :

$$\Delta \nabla \phi_{ref,mob}^{j,k} = \Delta \nabla \rho_{ref,mob}^{j,k} + \lambda \Delta \nabla N_{mob,ref}^{j,k} + \Delta \nabla \rho_{ref,mob}^{j,k,iono} + \Delta \nabla \rho_{ref,mob}^{j,k,tropo}$$

Ce procédé implique d’abord la réalisation de simples différences, c’est-à-dire la différence entre les observations communes à une base et un mobile sur un même satellite. Cette première différence permet l’élimination des erreurs liées à la dérive de l’horloge du satellite et une forte réduction des erreurs atmosphériques et géométriques, inversement proportionnelles à la longueur de la ligne de base (distance base-mobile). Puis, la différence de ces simples différences réalisées sur deux satellites différents réduit les erreurs liées aux antennes et récepteurs, ce qui

permet alors d’isoler les ambiguïtés (ici des ambiguïtés de doubles différences) et de les résoudre en même temps que les positions du mobile après avoir modélisé (ligne de base longue) ou négligé (ligne de base courte) les doubles différences d’allongement ionosphérique et troposphérique. Les méthodes GNSS différentielles pour la topographie impliquent systématiquement l’utilisation d’au moins deux récepteurs relativement proches afin que les erreurs d’allongements atmosphériques des signaux GNSS lors de la traversée de l’atmosphère s’annulent par doubles différences. En résumé, pour bénéficier de la précision des mesures de déphasage, la résolution des ambiguïtés qui s’en trouve induite impose de réaliser un positionnement différentiel entre une base et un mobile. Cependant, il est possible de profiter des mesures de déphasage et d’obtenir un positionnement précis en ne mettant en œuvre qu’un seul récepteur, c’est la méthode PPP (*Precise Point Positioning* ou Positionnement Ponctuel Précis).

■ Approche zéro différence

Dans le cas du PPP, on ne procède à aucune différence des mesures. On

parle aussi de positionnement zéro-différence. Cette technique impose que toutes les erreurs affectant le positionnement par méthodes GNSS qui s’éliminaient par différence soient prises en compte de manière optimale, soit par l’utilisation de produits externes, soit par modélisation. La technique PPP est alors dite de type "SSR" pour "State Space Representation", soit littéralement "Représentation des paramètres d’état du système" par opposition à l’approche différentielle dite "OSR" pour "Observation Space Representation" consistant à prendre en compte sur la base la résultante globale de toutes ces erreurs dans le "champ ou espace des observations" sans être capable de les dissocier, avant de les appliquer au mobile.

Erreurs liées aux satellites

Pour un traitement PPP en temps différé, plusieurs produits d’orbites des satellites sont disponibles en ligne sur le site Internet de l’IGS (<http://igs.csb.jpl.nasa.gov/>). Ces produits sont issus d’une combinaison des orbites calculées par plusieurs centres d’analyse de l’IGS permettant de disposer des valeurs les plus fiables et les plus précises existantes. Les produits de meilleure qualité (produits finaux) atteignent des précisions centimétriques pour un échantillonnage de 900 s. Cependant, ces produits sont diffusés avec une latence minimum de 12 jours. Les produits diffusés les plus rapidement sont les produits ultra-rapides diffusés avec une latence minimum de 3 h et une précision de 5 cm.

On notera que le PPP ne s’affranchit pas complètement des méthodes GNSS différentielles puisque certains centres d’analyses estiment les paramètres orbitaux des satellites en utilisant des mesures de doubles différences.

Pour les décalages d’horloge satellite, la qualité et la fréquence de ces décalages sont cruciaux dans la technique PPP puisqu’ils ne s’éliminent plus par différence. Les décalages d’horloge ultra-rapides de l’IGS ont une précision de 0.1 ns et sont échantillonnés à 900 s. Pour les applications en temps différé, on peut récupérer des décalages d’horloge échantillonnés à 30 s depuis la





semaine GPS 1406 (17/12/2006) mais avec une latence de 12 jours minimum. Pour toutes les applications PPP en temps réel, la qualité, l'échantillonnage et la latence devront être optimales. Pour les décalages et les variations du centre de phase de l'antenne satellite, on utilise le fichier ANTEX de l'IGS (igs08.atx) qui contient les valeurs calibrées absolues de ces paramètres.

Erreurs liées à la traversée de l'atmosphère

Ionosphère : en l'absence de modèle ionosphérique précis permettant de corriger les mesures, la combinaison des mesures réalisées sur les deux fréquences permet d'obtenir une mesure dite lono-Free et de réaliser un positionnement de qualité. Cette méthode est applicable en temps différé comme en temps réel. Cependant, en temps réel et en présence d'un récepteur mono-fréquence, l'utilisation du modèle ionosphérique radiodiffusé avec les orbites ne permet pas d'obtenir un positionnement centimétrique. Une source de correction ionosphérique plus précise doit être utilisée. Les cartes ionosphériques globales produites par l'IGS ne peuvent être utilisées qu'en temps différé mais elles permettent d'atteindre des précisions de l'ordre de 10 cm en planimétrie et 40 cm en altimétrie (Choy et al, 2009).

Troposphère : les logiciels utilisent des modèles évolués pour la partie hydros-tatique, qui est alors corrigée *a priori*. Cependant, la partie humide de la troposphère étant difficilement modélisable car très variable dans le temps et dans l'espace, elle est considérée comme un paramètre supplémentaire à estimer.

Erreurs liées au récepteur

L'erreur dominante au niveau du récepteur est son décalage d'horloge. Etant difficilement prédictible, elle est estimée. Pour les erreurs d'antenne, on récupère les décalages et les variations de centre de phase absolues des antennes existantes dans le fichier ANTEX de l'IGS. Enfin, il faut tenir compte des mouvements naturels du mobile liés aux phénomènes de marées et à leurs effets qui peuvent représenter plusieurs centimètres d'amplitude au cours d'une journée.

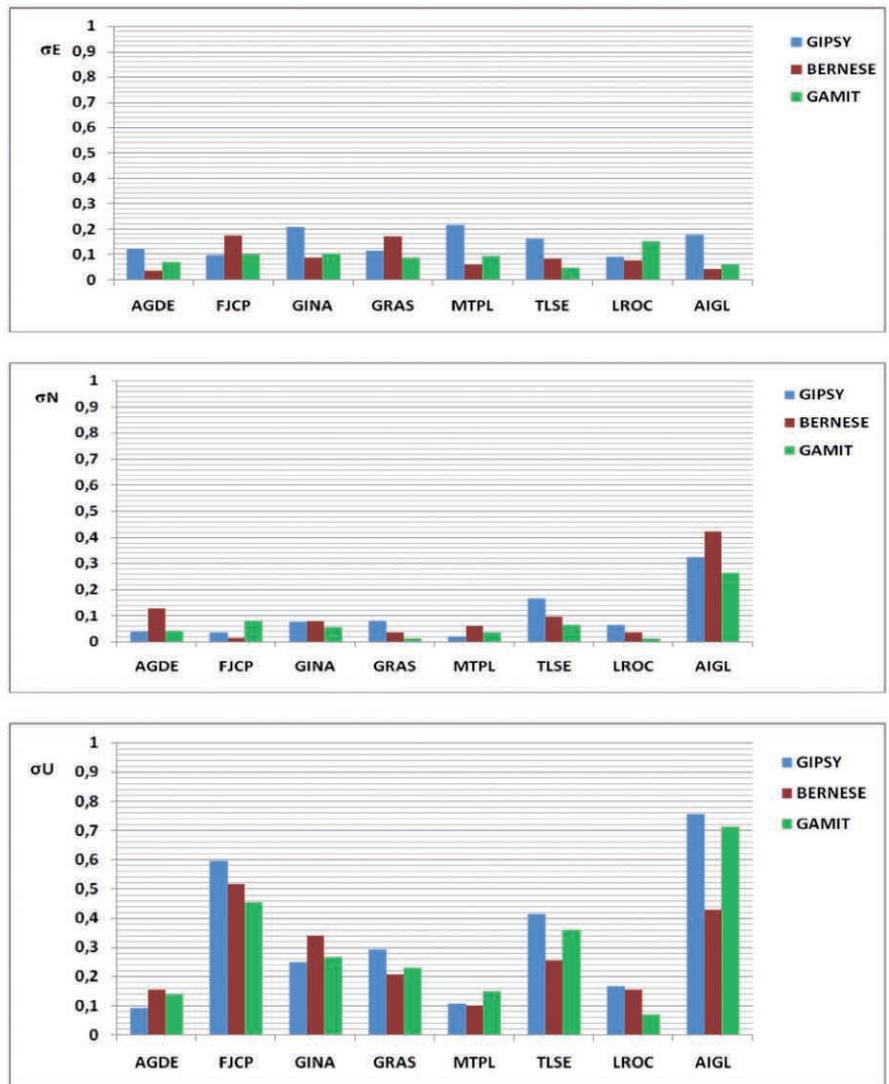


Figure 1. Répétabilités sur les composantes Est, Nord et hauteur en centimètres obtenues sur l'année 2008 avec les logiciels GIPSY (PPP), BERNESE et GAMIT (méthodes différentielles).

En pratique, les logiciels utilisent les modèles recommandés dans les conventions internationales de l'IERS (*International Earth Rotation Service*, <http://www.iers.org>).

Une fois que tous ces termes d'erreurs ont été pris en compte, la position, la dérive de l'horloge du récepteur, les retards troposphériques résiduels et les ambiguïtés peuvent être estimés. Les logiciels de recherche qui furent les premiers à mettre en œuvre des traitements PPP en temps différé se distinguent les uns des autres par leur manière d'estimer le décalage d'horloge du récepteur et les biais troposphériques résiduels. Le principe de leurs estimations repose sur l'utilisation de contraintes temporelles. Une méthode classique intégrant de telles

contraintes est le filtre de Kalman. Les ambiguïtés sont quant à elles estimées dans un premier temps comme des réels et éventuellement fixées à des valeurs entières dans un second temps par des méthodes sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

■ Comparaison en post-traitement des performances du PPP avec les méthodes différentielles

Huit stations du RGP ont été traitées en PPP par session de 24 h sur l'année 2008 avec le logiciel GIPSY/OASIS du JPL lors d'un stage de Master à l'ESGT (Sahli, 2009). Les répétabilités de ces stations ont été comparées à celles obtenues avec des logiciels scientifiques utilisant les doubles différences,

BERNESE (Hugentobler et al, 2007) et GAMIT (Herring et al, 2010), pour des lignes de base de l'ordre de 1 000 km maximum. Les résultats sont présentés sur la *figure 1*. Notons qu'ici les traitements PPP ont résolu les ambiguïtés à des valeurs réelles tandis que les traitements différentiels les ont résolues à des valeurs entières.

Les résultats montrent la qualité comparable du PPP (GIPSY) par rapport aux méthodes différentielles (BERNESE et GAMIT) avec des sessions de 24 h. Même si l'on observe des résultats légèrement meilleurs avec le logiciel GAMIT, les valeurs de répétabilité en PPP restent inférieures à 4 mm en planimétrie et inférieures à 8 mm en altimétrie.

Ces résultats illustrent la qualité reconvenue de la technique PPP depuis plus d'une dizaine d'années en post-traitement avec des durées d'observation supérieures à 12 h. De nombreux articles publiés dans des revues internationales ont utilisé cette méthode alternative pour des applications géodynamiques notamment lorsque la mise en œuvre d'un calcul réseau s'avérait délicate lorsque les lignes de bases sont très grandes.

■ Résolution des ambiguïtés entières en PPP

Les progrès permanents de la communauté géodésique internationale permettent aujourd'hui de disposer de produits géodésiques (orbites, horloges, biais d'antenne, systèmes de référence...) d'une qualité remarquable. Le raffinement de ces produits a ainsi augmenté notre connaissance de la modélisation des mesures GNSS, si bien que la fixation entière des ambiguïtés zéro-différence est devenue réalisable ces dernières années.

La résolution entière (fixation à des valeurs entières) avec zéro-différence est une tâche difficile car des biais électroniques satellites et récepteurs affectent les mesures de déphasage. Avec l'approche différentielle ces biais électroniques s'éliminent lors de la formation des doubles-différences rendant la résolution entière des ambiguïtés possible. En zéro-différence, la méconnaissance de ces délais conduit à une résolution flottante (fixation à des

valeurs réelles) des ambiguïtés. Pour résoudre les ambiguïtés entières, il est donc nécessaire de s'affranchir de ces biais. Plusieurs méthodes permettant la fixation des ambiguïtés entières zéro-différence en temps différé puis en temps réel sont apparues depuis, faisant progresser considérablement la technique PPP (la technique PPP avec ambiguïtés entières est appelée *Integer PPP* (IPPP)). Ces progrès expliquent le renouveau de la technique et son apparition dans le champ de la topographie car ils améliorent aussi bien la précision que les délais pour y parvenir.

Les méthodes de résolution des ambiguïtés entières sont résumées dans la thèse de Shi (2012). Il existe des méthodes qui utilisent les ambiguïtés réelles estimées pour les corriger ensuite : certaines sont basées sur des simples différences sur satellite (Ge et al, 2006 ; Geng et al, 2009) et d'autres reforment des doubles différences à partir des observations non différenciées de l'utilisateur et des observations non différenciées issues d'un réseau et fournies à l'utilisateur (Bertiger et al, 2010). Une autre méthode a été mise au point par les équipes du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales ; Laurichesse et al, 2009). Ici, la résolution des ambiguïtés entière zéro-différence est rendue possible grâce à 1) la connaissance des biais électroniques satellites et 2) l'utilisation d'horloges satellites cohérentes avec la nature entière des ambiguïtés. Ces horloges sont calculées après estimation de ces biais et simultanément à la résolution des ambiguïtés entières zéro-différence d'un réseau global. Ces deux produits sont diffusés périodiquement (www.igsac-cnes.cls.fr). D'un point de vue utilisateur, le logiciel GINS du CNES permet d'utiliser ces deux produits pour réaliser un positionnement en mode IPPP, en

temps différé comme en temps réel. Un démonstrateur est consultable en ligne (www.ppp-wizard.fr).

■ Avantages et inconvénients du PPP

Cette technique PPP présente des avantages opérationnels pour les utilisateurs par rapport aux techniques différentielles :

- Mise en place d'une station de base inutile (pas d'observations simultanées, pas besoin de récupérer les données de la base).
- Positionnement directement dans le système de référence ITRF.
- Aucun problème lié à la stabilité des stations de base et à leur géoréférencement.

Néanmoins cette technique possède des inconvénients importants :

- Temps de convergence des ambiguïtés important, indispensable pour obtenir un positionnement de l'ordre du centimètre.
- Récepteurs bifréquences indispensables pour les applications sub-décimétriques afin de corriger les délais ionosphériques.
- Conversion des coordonnées dans la référence nationale.

PPP en temps différé (PP-PPP pour Post Processing PPP)

Au-delà des progrès techniques et des avantages opérationnels, une autre raison explique le renouveau du PPP et plus particulièrement son arrivée dans le monde de la topographie : la mise à disposition gratuite sur Internet d'outils de positionnement PPP. Auparavant, seuls quelques logiciels de recherche permettaient la mise en œuvre du PPP ce qui confinait cette technique au seul champ de la recherche. A présent, un

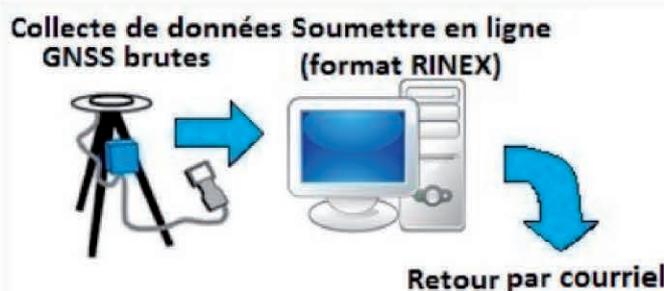


Figure 2. Fonctionnement des services Web PPP.

[source : <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/index.php>]



utilisateur peut envoyer ses observations au format RINEX par courriel et recevoir quelques minutes plus tard les coordonnées précises de sa station (cf. figure 2). Plusieurs services de ce type existent :

- APPS (<http://apps.gdgps.net/>) : service basé sur le logiciel GIPSY du JPL.
- CSRS-PPP (<http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>) : service des Ressources Naturelles du Canada (NRCAN, Mireault et al, 2007).
- GAPS (<http://gaps.gge.unb.ca/>) : service de l'Université du New Brunswick (UNB, Leandro et al, 2007).
- Magic-GNSS (<http://magicgnss.gmv.com/ppp>) : service proposé par le groupe GMV (Piriz et al, 2008).

• Trimble Center Point RTX Post Processing (<http://www.trimblertx.com/Home.aspx>) : solution de positionnement proposé par Trimble en post-traitement (Doucet et al, 2011).

Par ailleurs, le site canadien, PPP online (<http://gge.unb.ca/Resources/PPP/SubmitData.html>) permet de recevoir les solutions des quatre services PPP : APPS, CSRS-PPP, GAPS et MagicGNSS. Leurs conditions d'utilisation étant différentes, il peut arriver que seuls certains de ces logiciels renvoient une solution.

Rappelons qu'il existe également des services Web proposant un calcul GNSS basé sur le positionnement différentiel à partir d'un réseau international

de stations. On peut notamment citer le service australien AUSPOS (<http://www.ga.gov.au/earth-monitoring/geodesy/auspos-online-gps-processing-service.html>), le service SCOUT proposé par la SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) aux Etats – Unis (<http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/SCOUT.cgi>) et le service OPUS (*Online Positioning User Service*) proposé par le NGS (*National Geodetic Survey* des Etats-Unis) qui est basé sur des stations de références CORS (*Continuously Operating Reference Stations*) localisées aux Etats-Unis, Amérique Centrale, Antilles, Bénin, Ethiopie, Irak et Afghanistan, <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/> et http://www.ngs.noaa.gov/CORS_Map/.

Afin d'illustrer la qualité typique des solutions PPP des services Web, les coordonnées de la station permanente MAN2 ont été déterminées à partir du site CSRS-PPP pour différentes durées d'observation (cf. figure 3).

Sur la figure 3, on observe une dégradation significative de la qualité du positionnement de la station MAN2 lorsque la durée d'observation est inférieure à 40 min. Toutefois cette dégradation reste inférieure à 10 cm avec seulement 10 min d'observation. Des travaux plus complets de Ginter et Janssen (2012) ont montré, à l'aide d'une vingtaine de stations, que le PPP en temps différé via le service CSRS-PPP atteint une précision de 2.5 cm en planimétrie et 3.5 cm sur la composante verticale avec des durées de 4 h d'observation. Ils ont également montré que le gain de précision entre des durées d'observation de 12 h et de 24 h n'était pas significatif.

On a constaté dans l'exemple précédent que l'on obtenait une qualité utile pour la topographie à partir d'au moins 40 min d'observations. La figure 4 illustre les écarts de coordonnées entre les déterminations du service Web CSRS-PPP avec des sessions horaires et les coordonnées ITRF de cinq stations IGS du RGP.

On constate sur la figure 4 que les écarts entre les résultats du service Web CSRS-PPP et les coordonnées ITRF publiées de cinq stations IGS françaises sont inférieurs à 5 cm sur les

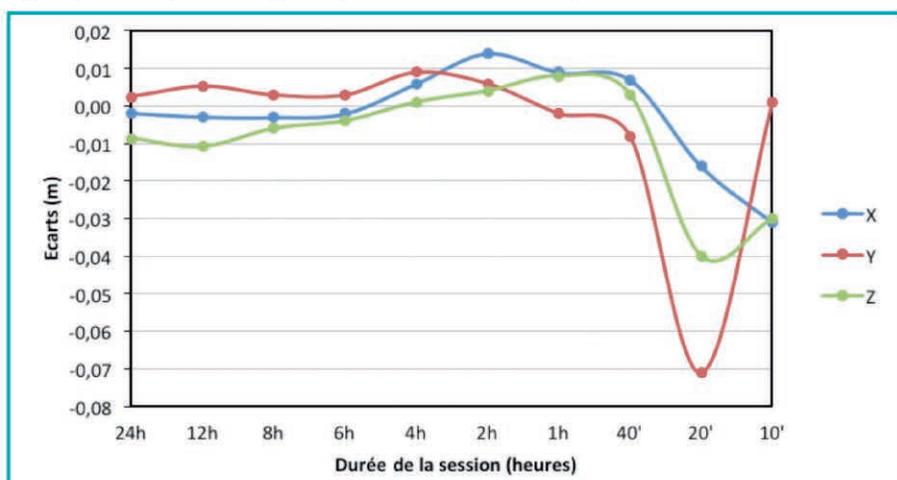


Figure 3. Écarts en mètres entre les coordonnées cartésiennes X, Y et Z de la station MAN2 calculées par l'IGN (solution IGS08 cumulée) et les coordonnées ITRF2008 obtenues par le service Web CSRS-PPP le 21 juin 2013 pour des durées d'observations variables.

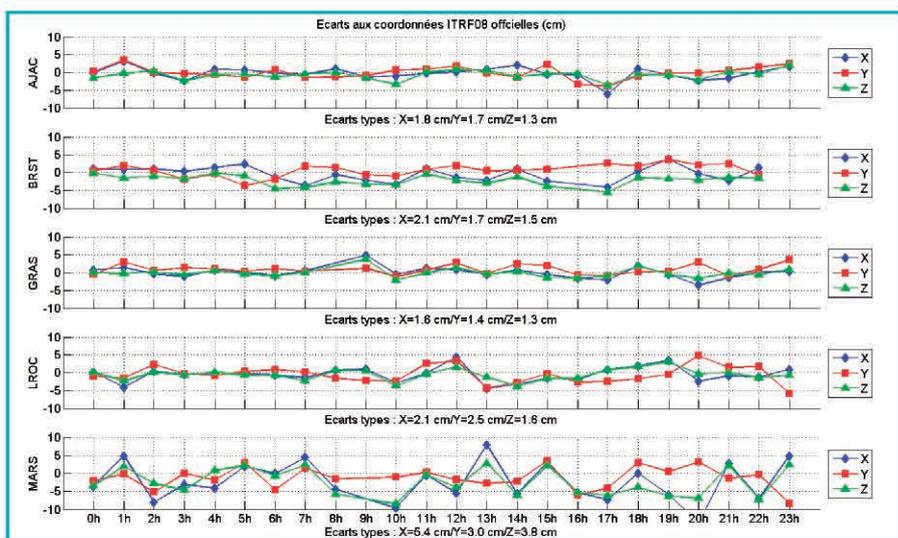


Figure 4. Écarts en centimètres entre les coordonnées cartésiennes X, Y et Z des stations IGS du RGP (AJAC, BRST, GRAS, LROC, MARS) calculées par l'IGN (solution ITRF2008) et les coordonnées ITRF2008 fournies par le service Web CSRS-PPP. Réalisé au cours de la journée du 21 juin 2013 avec des durées d'observations de 1 h.



trois composantes sauf pour la station de Marseille (MARS) qui présente des écarts plus importants mais inférieurs à 10 cm. Ce résultat illustre la capacité des services Web PPP à produire des résultats de qualité avec seulement une heure d'observation. Néanmoins, il ne s'agit que d'un exemple sur une journée qui ne permet pas une évaluation exacte du PPP en temps différé avec une seule heure d'observation.

D'autres travaux similaires comme ceux d'Ebner et Featherstone (2008) en Australie ont montré des différences non significatives entre les résultats CSRS-PPP et des calculs différentiels avec le logiciel BERNESE pour des durées d'observation supérieures à 24 h. Ces travaux confirment la capacité du PPP et plus particulièrement celle des solutions online à produire des résultats précis de positionnement à condition de respecter des temps d'observation suffisants.

Les comparaisons précédentes ont été calculées à partir de coordonnées en ITRF2008 car les résultats renvoyés par le service Web CSRS-PPP ainsi que par les autres sites sont la plupart du temps dans ce système de référence. En effet, il s'agit du système des orbites fixées dans le calcul. L'utilisateur topographe en Europe doit par conséquent convertir ces coordonnées en ETRS89 avec la transformation appropriée, le RGF93 correspondant à la réalisation française du système européen ETRS89. Ce passage est très bien expliqué dans un mémo technique (Boucher and Altamimi, 2011) et le site de l'EPN (EUREF Permanent Network) permet de le réaliser en ligne (cf. figure 5). Quelques précautions s'avèrent nécessaires lors de l'utilisation de cet outil, on doit renseigner :

- Le repère de référence (*Frame*) de départ. Actuellement il s'agit de l'ITRF2008 si les coordonnées sont issues d'un calcul récent d'un service Web PPP.
- L'époque des coordonnées de départ qui correspondra souvent à l'époque des données sauf si les coordonnées ont déjà subi une transformation.
- Le repère de référence (*Frame*) d'arrivée. On portera attention au fait que l'on doit utiliser la réalisation ETRF2000

de l'ETRS89. En effet de nombreuses réalisations (repères) d'un même système sont disponibles car la détermination des coordonnées de station (réalisation) peut être obtenue avec plus ou moins de durée d'observation, plus ou moins de stations et des techniques de calculs et de combinaison différente. Il est préconisé d'utiliser la réalisation ETRF2000 pour l'ETRS89, d'autant plus que le RGF93 est aujourd'hui cohérent avec cette réalisation.

- L'époque des coordonnées finales qui correspondra à l'époque des données. Dans ce cas le calcul utilisera un modèle de vitesses européennes. On peut raffiner le calcul si l'on a connaissance de vitesses estimées par ailleurs pour ce point. On peut alors les saisir en précisant l'époque 2009,0 pour les coordonnées finales (époque exacte de la réalisation du RGF93).

En plus de ces solutions en ligne et des logiciels de recherche, il existe des logiciels commerciaux comme Grafnav qui permettent également le traitement différentiel. Par ailleurs il existe de nombreux programmes développés par les universités à travers le monde et surtout une librairie ouverte très connue et simple d'utilisation : RTKLib (<http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm>), y compris pour le calcul différentiel. Le PPP en post-traitement peut donc

être considéré comme une technique très pertinente que tout bon topographe se doit désormais de considérer.

PPP en temps réel (PPP-RTK ou RT-PPP)

Les techniques temps réel précises que l'on peut utiliser en topographie sont des techniques différentielles qui mettent en œuvre une ou plusieurs stations de référence. Selon les méthodes, ces stations de référence transmettent leurs observations, leurs corrections ou un sous-produit issu de ces corrections au mobile de l'utilisateur. Les moyens de transmission peuvent être par VHF/UHF, par GSM, par GPRS et même par satellite géostationnaire. Ces méthodes, RTK et NRTK, ont précédemment été décrites dans cette revue (Legros et al, 2013). Depuis peu, la technique PPP émerge également dans le positionnement précis en temps réel avec une qualité proche des 10 cm, voire meilleure pour certaines solutions. Comme en temps différé, le récepteur doit posséder les corrections d'orbites et d'horloge suffisamment précises des satellites (meieux que 10 cm, pour les orbites et inférieur à 1 ns pour les horloges). Un service temps réel PPP doit minimiser le temps entre les observations réalisées dans le réseau (transférées au centre de

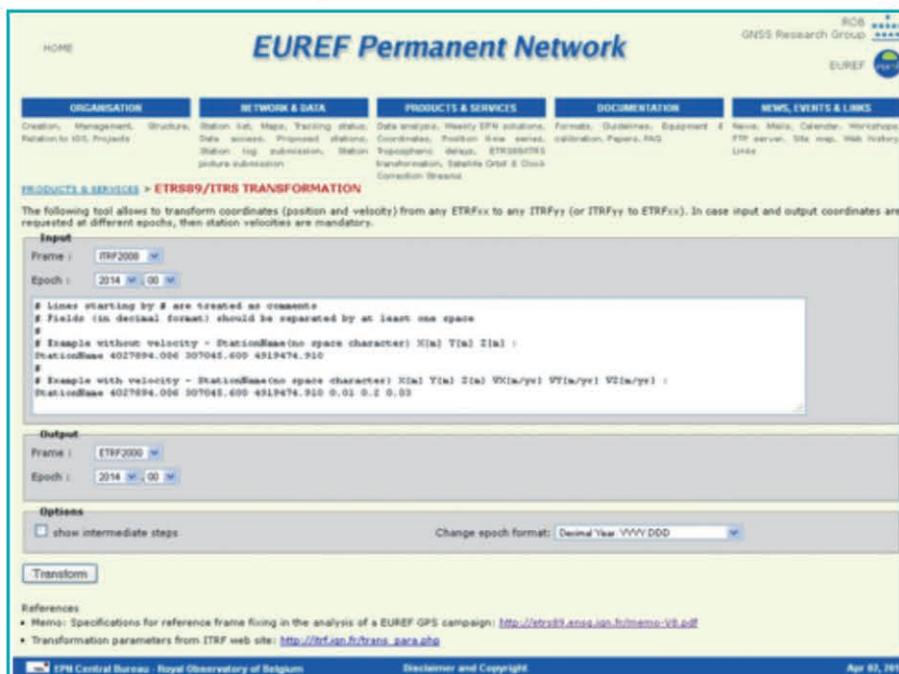


Figure 5. Outil en ligne de l'EPN pour la transformation de coordonnées (http://www.epncb.oma.be/_productservices/coord_trans).

calcul du service pour l'estimation des corrections d'orbites et d'horloges des satellites) et la mise à disposition de ces produits aux utilisateurs : en moins de quelques secondes.

Les sociétés commerciales qui proposaient des solutions d'augmentation du GPS basées sur la diffusion de corrections par satellites géostationnaires ont élargi leur offre initialement DGPS grâce au PPP. Différentes sociétés développent et commercialisent des services PPP-RTK. On peut citer entre autres les services :

- OMNISTAR XP et G2 (<http://www.omnistar.com/>).
- C-Nav (1 et 2) de C&C Technology (<http://www.cnavgss.com/site.php>).
- Starfire de Navcom (<http://www.navcomtech.com>).
- Starfix de Fugro (<http://www.starfix.com>).
- PP-RTK de Nexteq Navigation (<http://www.nexteqnav.com>).
- Trimble CenterPoint RTX (<https://www.trimble.com/positioning-services/centerpoint-RTX.aspx>).
- Apex2 et Ultra2 de Veripos (<http://www.veripos.com>).

Ces services sont basés sur des réseaux mondiaux de stations permanentes dont ils peuvent être propriétaires ou non. Les précisions annoncées sont de l'ordre du décimètre environ et les temps de convergence sont variables : entre 30 et 60 min. Pour leurs calculs PPP, ils utilisent les orbites et horloges précises calculées par des centres comme le JPL mais peuvent également selon les cas les calculer eux-mêmes à partir de leur propre réseau de stations. La diffusion de ces produits et d'autres corrections additionnelles (augmentation régionale constituée de modèles ionosphérique et troposphérique) s'effectue par Internet via NTRIP ou la plupart du temps par satellite géostationnaire. Il est nécessaire d'acquérir les récepteurs spécifiques pouvant fonctionner avec ces services.

Par ailleurs, depuis 2012, l'IGS a mis en place un service temps réel après avoir mené un projet pilote pendant plusieurs années (<http://rtigs.igs.org>). Ce service assure la diffusion des produits nécessaires au PPP dans un format standardisé (RTCM) et rend

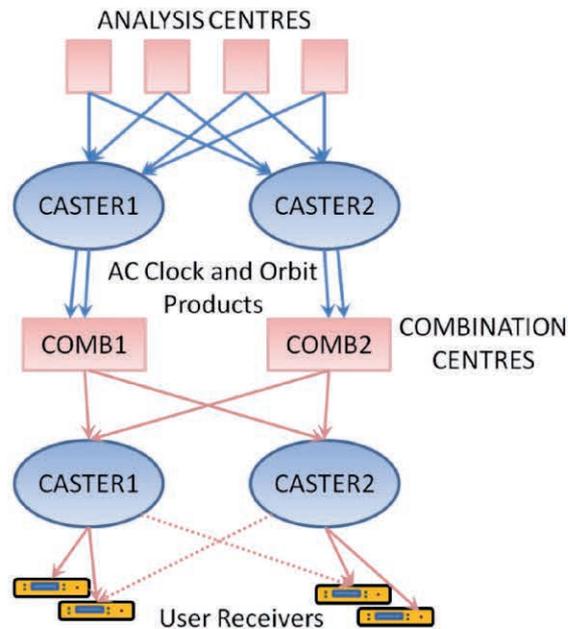


Figure 6. Organisation simplifiée du service temps réel de l'IGS.

possible un positionnement zéro-différence. Huit centres d'analyse calculent des corrections d'orbites et d'horloge (à appliquer aux éphémérides radio-diffusées) à l'aide de données provenant d'un réseau global de stations permanentes. Ces produits sont alors combinés par trois centres : le BKG (*Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*), l'ESA (*European Space Agency*) et le NRCAN. Trois principaux produits sont ensuite diffusés auprès des utilisateurs par différents NTRIP Caster (cf. figure 6) : IGS01/IGC01, IGS02 et IGS03. Ils diffèrent par la méthode de combinaison mais ils présentent dans tous les cas des précisions inférieures à 5 cm pour les corrections d'orbites et inférieures à 0.5 ns pour les corrections d'horloges. D'un point de vue utilisateur, trois flux sont nécessaires au positionnement zéro-différence :

- le flux des observations d'un récepteur,
- le flux des éphémérides des satellites,
- le flux des corrections d'orbites et d'horloges (par rapport aux éphémérides).

Le logiciel BNC du BKG (téléchargeable à l'adresse <http://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>) permet de rapatrier ces flux et de calculer une solution de positionnement PPP en temps réel. Une table des sources pour les flux

de stations permanentes est visible à l'adresse igs-ip.net, port 2101. La table des sources de correction contient également le flux des éphémérides (RTCM3EPH).

Cependant, d'autres centres d'analyse comme le CNES diffusent d'autres produits permettant de fixer les ambiguïtés à des valeurs entières. Le CNES propose une version modifiée du logiciel BNC permettant de réaliser un positionnement avec ambiguïtés entières (www.ppp-wizard.net). Cette version utilise un flux RTCM spécifique de corrections contenant les corrections d'orbites, les corrections d'horloges "entières" et les biais électroniques de phase, indispensable pour déterminer les valeurs entières des ambiguïtés. Le site Internet de ce service permet de visualiser les performances du positionnement sur quelques stations IGS.

Pour illustrer les performances dans des conditions opérationnelles, une station a été déployée sur un point RBF durant 90 min (cf. figure 7). Les observations de cette station ont été récupérées par BNC en utilisant le protocole TCP. En même temps, BNC récupérait les éphémérides et le flux de corrections CLK9B généré par le CNES. La figure 8 illustre les performances obtenues.

Le logiciel BNC en mode "Initialisation" fixe les ambiguïtés entières au bout

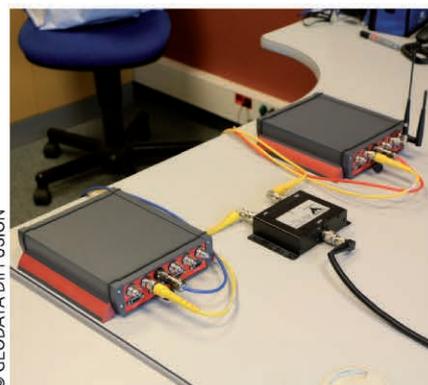
de 1 h. Une fois ces ambiguïtés fixées, l'algorithme passe en régime cinématique. Les répétabilités obtenues en mode cinématique ont été de 0.4 cm, 1.0 cm et 4.9 cm sur les composantes Est, Nord et Hauteur respectivement.

Futur

A travers les services récents proposés par les sociétés commerciales citées précédemment, on peut suivre l'évolution de cette technique en temps réel. Ainsi Trimble proposait initialement une solution globale Trimble CenterPoint RTX pour un positionnement PPP temps réel en annonçant une précision de 4 cm pour un temps de convergence de 30 min. Récemment cette société propose pour des utilisateurs situés dans 4 états des USA un service local plus performant annoncé avec une durée de convergence de 1 min. Ce résultat est obtenu grâce à l'utilisation conjointe d'horloges et d'orbites



précises et de corrections supplémentaires liées à l'atmosphère obtenues via un réseau dense de stations (75 stations espacées de 120 km). Nul doute que ce type d'offre viendra compléter prochainement les méthodes de travail en réseau GNSS utilisées en topographie (Legros et al, 2013) d'autant que l'architecture existante des réseaux denses de



© GEODATA DIFFUSION

Figure 7. Antenne Trimble déployée sur un point RBF (à gauche) et récepteurs utilisés (à droite).

stations permanentes pour le NRTK s'y prête totalement.

Par ailleurs, l'utilisation des satellites Glonass peut s'avérer précieuse dans des zones masquées ou dans des situations avec une configuration géométrique médiocre des satellites. Des centres comme l'IAC et l'ESOC ont déjà fourni des produits d'horloge des satellites Glonass suffisamment précis (1.5 ns) mais leur échantillonnage, 5 min, impliquait une interpolation pour toutes les applications cinématiques. Il a été montré que l'ajout de Glonass améliorerait le temps de convergence à condition que cette interpolation soit inférieure à 30 s (Hesselbarth and Wanninger, 2008).

Conclusion

Les récentes évolutions du PPP (résolution des ambiguïtés, services Web, temps de convergence de plus en plus rapide en temps réel) et les futures évolutions de cette technique l'amènent sur le devant de la scène du positionnement par GNSS ces dernières années et en font une technique mature (Rizos et al, 2012). Néanmoins cette technique s'appuie sur les réseaux de stations permanentes car elle utilise des produits d'orbite et d'horloge issus des observations de ces réseaux. D'autre part la résolution des ambiguïtés en PPP passe par l'utilisation d'un réseau quelle que soit la méthode. Ceci permet la réduction du temps de convergence et les applications cinématiques et temps réel précises.

Dans le futur, il est probable que l'arrivée de la troisième fréquence

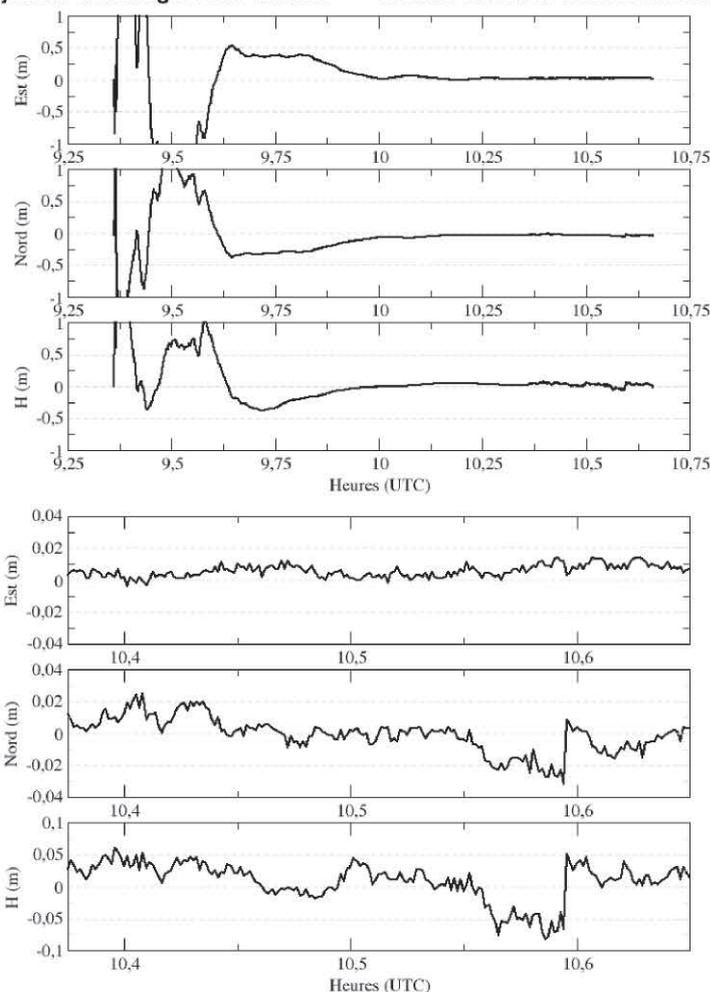


Figure 8. Composantes Est, Nord et Hauteur obtenues sur 90 min (en haut) et zoom sur les séries temporelles après résolution des ambiguïtés entières (en bas).



améliorera aussi ce temps de convergence mais seulement à condition que les quatre constellations soient pleinement opérables sur ces trois fréquences.

Finalement, le PPP en temps différé constitue déjà un outil supplémentaire pour les applications topographiques et il ne demande qu'à être un peu plus démocratisé. Le PPP temps réel trouvera peut-être sa place dans un futur proche en complément des techniques actuelles mais ne les remplacera pas dans la mesure où les infrastructures nécessaires sont très similaires. ●

Contacts

Laurent MOREL

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

François FUND

Ingénieur système à GEODATA DIFFUSION
francois.fund@geoaction.eu

Romain LEGROS

Directeur Général de la société GEODATA
DIFFUSION
romain.legros@geoaction.eu

Stephane DURAND

Maître de conférences à l'ESGT
stephane.durand@esgt.cnam.fr

Bernard FLACELIÈRE

Ingénieur topographe EGEOPOS
bernard.flaceliere@orange.fr

Bibliographie

Bertiger W, Desai S.D., Haines B., Harvey N., Moore A.W. (2010). *Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data*. J Geod 84(5):327-337.

Boucher C. and Z. Altamimi (2011). *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign* (<http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-8.pdf>).

Choy S.L. (2009). *An investigation into the accuracy of single frequency PPP*, Ph.D. Thesis, School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne, Australia.

Collins P. and S. Bisnath (2011). *Issues in ambiguity resolution for Precise Point Positioning*, Proc. ION GNSS 2011, Portland, Oregon, 19-23 September, 679-687.

Doucet K., Herwig M., Kipka A., Kreikenbohm P., Landau H., Leandro R., Moessmer M., Pagels C. (2011). *Introducing Ambiguity Resolution in Webhosted Global Multi-GNSS Precise*

Positioning with Trimble RTX-PP. Trimble TerraSat GmbH, Germany.

Ebner R. and W.E. Featherstone (2008). *How well can online GPS PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks?* Journal of Applied Geodesy, 2(3), 149-157.

Ge M., Gendt G., Rothacher M., Shi C., Liu J. (2006). *Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations*, Journal of Geodesy, 82(7), 389-399.

Geng J., Meng X., Dodson A.H., Teferle F.N. (2009). *Integer ambiguity resolution in Precise Point Positioning: Method comparison*, Journal of Geodesy, 84(9), 569-581.

Grinter T., Janssen V. (2012). *Post-processed Precise Point Positioning: A viable alternative?* Proc. APAS2012, Wollongong, Australia, 19-21 March, 83-92 (e.g. accessible from http://www.lpi.nsw.gov.au/surveying/corsnet-nsw/education_and_research).

Herring T.A., R.W. King, S.C. McKlusky (2010). *Reference manual for the GAMIT GPS software, release, 10.3.*, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Boston, U.S.A., 182 pp.

Hesselbarth A, Wanninger L. (2008). *Short-term stability of GNSS satellite clocks and its effects on Precise Point Positioning*, Proc. ION GNSS 2008, Savannah, Georgia, 16-19 September, 1855-1863.

Hugentobler U., Dach R., Fridez P., Meindl M. (2007). *Bernese GPS Software, Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern.

King, M. and S. Aoki (2003). *Tidal observations on floating ice using a single GLP receiver*. G.R.L. (Geophysical Research Letters) 30 (3), 1138, doi:10.1029/2002GL016182.

Larson K.M., Cervelli P., Lisowski M., Miklius A., Segall P., and Owen S. (2001). *Volcano monitoring using the Global Positioning System: Filtering strategies*. Journal of Geophysical Research 106, NO. 0 (0), 1-12.

Laurichesse D., Mercier F., Berthias J.P., Broca P., Cerri L. (2009). *Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination*, Navigation, Journal of the institute of Navigation, Vol. 56, N° 2.

Leandro R.F., Santos M.C., Langley R. B. (2007). *GAPS: The GPS Analysis and*

Positioning Software – A Brief Overview. Proc. ION GNSS 2007, 1807-1811.

Legros R., L. Morel, F. Viguier, F. Birot. (2013). *Méthodes de travail dans les réseaux GNSS*. Rapport de la commission Geopos du CNIG. Téléchargeable sur <http://geopos.netne.net/spip.php?rubrique55>.

Mireault Y., Tetreault P., Lahaye F., Heroux P., Kouba J. (2007). *“Online Precise Point Positioning”*. GPS World, pp. 59-64.

Piriz R., Mozo A., Navarro P., Rodriguez D. (2008). *“magicGNSS: Precise GNSS products out of the box.”* Proceedings ION GNSS 2008, 1242-1251.

Rizos C., Janssen V., Roberts C. and Grinter T. (2012). *Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning drawing to an End ?* FIG Working Week. Rome, Italy.

Sahli M. (2009). *Analyse du traitement GPS du RENAG avec les logiciels BERNESE, GIPSY et la solution GAMIT*. Rapport de Projet Pluridisciplinaire. Mastère spécialisé Photogrammétrie, Positionnement et Mesures de Déformations (PPMD).

Shi J. (2012). *Precise Point Positioning Integer Ambiguity Resolution with Decoupled Clocks*. University of Calgary. Ph. Thesis.

Zumberge J.F., Hefflin M. B., Jefferson D.C., Watkins M.M., Webb F.H. (1997). *Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks*, J. Geophys. Res., Vol. 102, pp. 5005-5017.

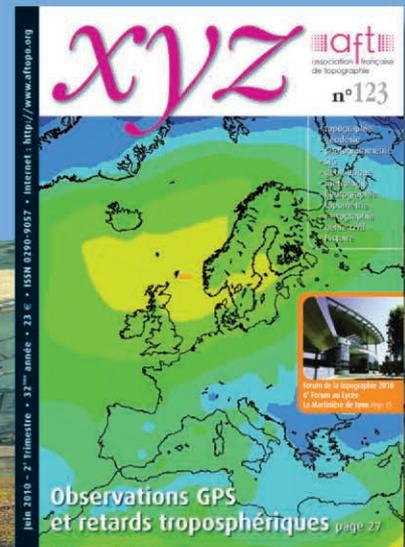
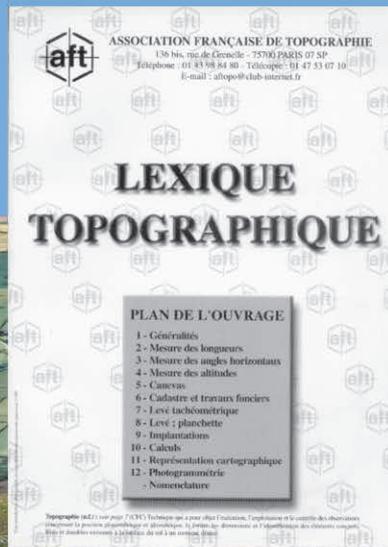
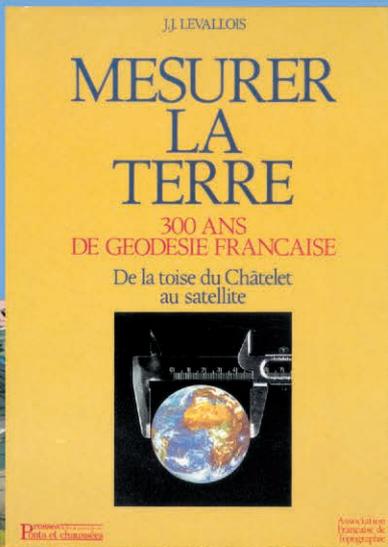
ABSTRACT

Does PPP (Precise Point Positioning) reach maturity ? Geolocation using GNSS (Global Navigation Satellite Systems) is constantly in development through new infrastructure such as permanent networks, thanks to new constellations and new signals and also the implementation of new algorithms. This paper investigates the improvements accumulated that have recently allowed the PPP becoming a technology offering an advanced positioning accuracy at a centimeter level, both in post-processed and real-time modes. It is shown that is not a new technology but now PPP appears as an alternative to differential positioning. Finally the question is asked by the authors: how will PPP used in the near future?



L'AFT rapproche tous les professionnels de la topographie et de la géomatique (producteurs, utilisateurs, enseignants...) pour :

- Diffuser les évolutions de l'instrumentation, de la saisie et du traitement de la géolocalisation aux moyens de publications et de sa revue XYZ,
- Encourager la recherche scientifique au service du progrès technique dans tous les domaines impliquant la topographie,
- Promouvoir une formation scientifique et technique de qualité,
- Faciliter l'actualisation des connaissances de ses membres,
- Faire connaître la profession et défendre son renom tant en France qu'à l'étranger.



173, avenue de Paris - 94165 Saint-Mandé Cedex
Tél. : 01 43 98 84 80
Courriel : info@aftopo.org
Site Internet : <http://www.aftopo.org>



FORUM DE LA TOPOGRAPHIE 2014

organisé par l'Association française de topographie (AFT)

L'ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES (ESGT)



accueille



le 10^e Forum de la topographie

le jeudi 10 avril 2014 de 9h00 à 17h30

1, boulevard Pythagore au Mans (Sarthe)

MÉTHODES GNSS POUR LA TOPOGRAPHIE

PROGRAMME

9 h 00 / 9 h 30 Ouverture du Forum et café de bienvenue sur les stands

9 h 30 / 9 h 45 Accueil des participants par
par Laurent Polidori (directeur de l'ESGT)
et Françoise Duquenne (présidente de l'AFT)

9 h 45 / 10 h 30 "Méthodes GNSS en topographie"
par Laurent Morel (ESGT)

10 h 30 / 10 h 45 La parole aux exposants

10 h 45 / 11 h 15 Visite des stands

11 h 15 / 12 h 00 "Apports et contraintes des GNSS pour déterminer la composante verticale en bathymétrie"
par Yves-Marie Tanguy (SHOM)
et Paul-Henri Faure (CNR)

12 h 00 / 12 h 15 La parole aux exposants

Pause repas

14 h 00 / 14 h 30 Café sur les stands

14 h 30 / 14 h 45 Remise des prix de l'AFT 2013

14 h 45 / 15 h 15 La parole aux exposants

15 h 15 / 16 h 00 "Le GNSS au service du BTP"
par Yohann Rabot (Vinci/Atlas3D)

16 h 00 / 16 h 15 La parole aux exposants

16 h 15 / 17 h 00 Visite des stands

17 h 00 Cocktail

17 h 30 Fin du Forum

