

Méthodes de travail dans les réseaux GNSS

Mots clés	GPS, GLONASS, GNSS, réseaux, leviers cinématiques, NRTK, RTK « Pivot libre », NPPK, PPK « Pivot libre », leviers statiques, filtrage et moyenne de position NRTK, statique « Pivot central », statique « Station virtuelle », statique « Multi-stations ».
Résumé	<p>Depuis les années 1990, le positionnement de précision par méthodes GNSS a connu une expansion constante qui s'est accélérée dans les années 2000 avec l'avènement des réseaux GNSS.</p> <p>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.</p> <p>Dans ce contexte en pleine mutation où de nouvelles constellations de satellites se mettent en place pour compléter la constellation GPS et rendre l'utilisation de tels systèmes encore plus disponible et plus fiable (GLONASS, GALILEO, COMPASS,...), nous nous proposons de faire le point sur les techniques de lever GNSS en réseau en limitant notre propos aux méthodes différentielles directes utilisant les données issues d'un réseau de stations permanentes.</p> <p>Le document débute par un tableau récapitulatif présentant toutes les méthodes de travail en réseau en présentant leurs critères d'accessibilité afin de guider l'utilisateur dans son choix</p> <p>Après avoir exposé les prérequis nécessaires à la « Réalisation d'observations GNSS de qualité », les différentes méthodes sont successivement développées en précisant leurs objectifs, prérequis nécessaires ainsi que le niveau de difficulté des tâches proposées.</p> <p>Des fiches pratiques (checklists) reprenant les points clés de chacune des méthodes sont ensuite proposées à l'utilisateur afin de faciliter les opérations de terrain.</p>

Rédacteurs	Titres	Signature
Romain LEGROS	Directeur Général de la société GEODATA-DIFFUSION	
Laurent MOREL	Maître de conférences à l'ESGT	
Flavien VIGUIER	Direction de l'ingénierie de la SNCF	
Florian BIROT	Ingénieur Système de la société GEODATA-DIFFUSION	

Date de validité du document	19/02/2013
Nombre de pages total du document	78
Nombre d'annexes	0
Identification du document	1.0.1
Mise à jour 1.0.1	Mots clés. Résumé. Liste des rédacteurs. Mise à jour de la fiche « Filtrage et moyenne de positions NRTK »

Sommaire

METHODES DE TRAVAIL DANS LES RESEAUX GNSS.....	1
TABLEAU D'ACCES AUX FICHES	9
CE QU'IL FAUT VERIFIER AVANT DE COMMENCER.....	10
PREREQUIS SUR LA REALISATION D'OBSERVATIONS GNSS DE QUALITE	12
I/ PRINCIPE GENERAL DE LA MESURE.....	12
II/ SURVEILLANCE DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES SPATIALES	13
A) L'ionosphère	13
B) La troposphère.....	14
III/ PROBLEMES DE CONSTELLATION, DE MASQUES ET DE MULTITRAJETS.....	15
A) Disponibilité et bonne répartition des satellites dans le ciel	15
B) Reconnaissance des lieux stationnables	18
IV/ SURVEILLANCE DES RAPPORTS « SIGNAL SUR BRUIT »	19
V/ SYSTEME DE REFERENCE LEGAL	19
LE POSITIONNEMENT CINEMATIQUE TEMPS-REEL A L'AIDE D'UN RESEAU DE STATIONS GNSS PERMANENT (MODE NRTK).....	21
I/ PREPARATION DE LA MISSION	22
A) Problèmes de télécommunications.....	22
B) Vérification du matériel	23
II/ PHASE TERRAIN	24
A) Acquisition des points.....	24
B) Moyens de contrôle	25
III/ PHASE BUREAU	26
LE POSITIONNEMENT CINEMATIQUE TEMPS REEL SUIVANT LA METHODE DU « PIVOT LIBRE » (MODE RTK CLASSIQUE)	27
I/ PREPARATION DE LA MISSION	28
A) Problèmes de télécommunications.....	28
B) Vérification du matériel	28
II/ PHASE TERRAIN	29
A) Lever en cinématique.....	29
B) Moyens de contrôle	30
III/ PHASE BUREAU	32
A) Positionnement du pivot	32
B) Calcul de la chaîne cinématique.....	32
LE POSITIONNEMENT CINEMATIQUE POST-TRAITE A L'AIDE D'UN RESEAU DE STATIONS GNSS PERMANENT (MODE NPPK)	33
I/ PHASE TERRAIN.....	34
A) Lever en cinématique.....	34
B) Moyens de contrôle	35
II/ PHASE BUREAU	36
LE POSITIONNEMENT CINEMATIQUE POST-TRAITE SUIVANT LA METHODE DU « PIVOT LIBRE » (MODE PPK CLASSIQUE).....	37
I/ PHASE TERRAIN.....	39
A) Lever en cinématique.....	39
B) Moyens de contrôle	41
II/ PHASE BUREAU	42
A) Positionnement du pivot	42
B) Calcul de la chaîne cinématique.....	42

LE POSITIONNEMENT STATIQUE TEMPS-REEL PAR « FILTRAGE ET MOYENNE DE POSITIONS NRTK »	43
I/ PREPARATION DE LA MISSION	44
A) Problèmes de télécommunications	44
B) Vérification du matériel	45
II/ PHASE TERRAIN	46
A) Acquisition des points	46
B) Moyens de contrôle	48
III/ PHASE BUREAU	49
LE POSITIONNEMENT STATIQUE SELON LA METHODE DU « PIVOT CENTRAL »	54
I/ PLANIFICATION DE LA MISSION	56
A) Détermination des stations de référence à utiliser pour la mise en référence du pivot central	56
B) Evaluation des temps de mesure	56
1) <i>Mesure du pivot central</i>	56
2) <i>Mesure des points du canevas</i>	56
II/ PHASE TERRAIN	57
A) Choix de l'emplacement et monumentation du point	57
B) Installation des équipements	57
III/ PHASE BUREAU	58
A) Positionnement du pivot central en RGF93	58
B) Choix des lignes de base	58
C) Masque d'élévation	58
D) Intervalle de traitement	58
E) Modèles d'antenne à utiliser	59
F) Fréquences et constellations à utiliser	59
G) Ephémérides utilisées	59
H) De l'utilité d'utiliser un modèle ionosphérique ou troposphérique	59
I) Les différents indicateurs statistiques utilisés pour qualifier la qualité du calcul d'une ligne de base	60
J) Moyens de contrôle	60
LE POSITIONNEMENT STATIQUE « MULTI-STATIONS »	61
I/ PLANIFICATION DE LA MISSION	62
A) Détermination des stations de référence à utiliser	62
1) <i>Cas à 3 stations « en étoile »</i>	62
2) <i>Cas à 3 stations « en réseau »</i>	62
B) Evaluation des temps de mesure	63
II/ PHASE TERRAIN	63
A) Choix de l'emplacement et monumentation du point	63
B) Installation des équipements	63
C) Contrôle de la cohérence des données	63
III/ PHASE BUREAU	64
A) Choix des lignes de base	64
B) Masque d'élévation	64
C) Intervalle de traitement	64
D) Modèles d'antenne à utiliser	64
E) Fréquences et constellations à utiliser	64
F) De l'utilité d'utiliser des éphémérides précises	65
G) De l'utilité d'utiliser un modèle ionosphérique	65
H) De l'utilité d'utiliser un modèle troposphérique	67
I) Les différents indicateurs statistiques utilisés pour qualifier la qualité du calcul d'une ligne de base	67

J) Ajustement libre	67
K) Fermeture de boucles	68
L) Ajustement à contraintes minimales	68
M) Ajustement contraint	69
IV/ LES MOYENS DE CONTROLE ENVISAGEABLES.....	69
A) Contrôle interne ou relatif.....	69
1) Déterminations indépendantes	69
1) Contrôles par méthodes optiques	69
B) Contrôles externes ou absolus et liens avec l'arrêté du 16 septembre 2003	70
1) Inclusion de stations complémentaires du RGP (ne participant pas au rattachement)	
70	
2) Mise en place simultanée de capteurs sur des points de référence pour avoir des	
points de contrôle.....	70
3) Détermination des points levés par PPP.....	70
CHECK-LISTS.....	71
CHECK-LIST – MODE NRTK	72
Planification de la mission.....	72
Phase terrain.....	72
Phase bureau	72
CHECK-LIST – MODE RTK “PIVOT LIBRE”	73
Planification de la mission.....	73
Phase terrain.....	73
Phase bureau	73
CHECK-LIST – MODE NPPK.....	74
Planification de la mission.....	74
Phase terrain.....	74
Phase bureau	74
CHECK-LIST – MODE PPK PIVOT LIBRE	75
Planification de la mission.....	75
Phase terrain.....	75
Phase bureau	75
CHECK-LIST – MODE NRTK MOYENNE.....	76
Planification de la mission.....	76
Phase terrain.....	76
Phase bureau	76
CHECK-LIST – METHODE DU PIVOT CENTRAL.....	77
Planification de la mission.....	77
Phase terrain.....	77
Phase bureau	77
CHECK-LIST – STATIQUE MULTI-STATIONS.....	78
Planification de la mission.....	78
Phase terrain.....	78
Phase bureau	78

Introduction

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^{ème} et XVIII^{ème} siècles avec le développement de la géodésie¹ 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 topographiques², il fut possible par méthodes topométriques³ 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 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'application 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.

¹ La géodésie a pour objet initial l'étude et la mesure de la forme générale de la Terre, de sa rotation, de son champ de pesanteur, des variations de son centre de masse et des différents systèmes de référence employables pour se repérer. Par extension de langage, le géodésien est celui qui fournit des points d'appui connus en coordonnées pour les travaux topographiques dont l'objet est de densifier considérablement ce canevas de référence.

² La topographie a pour objet la description et la représentation locale des formes de la surface de la Terre. Le topographe procède donc à des levés, soit en mesurant directement sur le terrain (mesures d'angles, de distances, ou GPS), soit en exploitant les propriétés métriques d'images aériennes stéréoscopiques du sol (photogrammétrie).

³ La topométrie représente l'ensemble des moyens géométriques employés pour effectuer des mesures de positions relatives de points par mesures d'angles et de distances. Il s'agit donc de la boîte à outils de base du topographe.

C'est précisément ici que les nouveaux développements technologiques ont révolutionné les méthodes d'acquisition de données avec la généralisation de l'utilisation opérationnelle des levés GPS à partir des années 2000. 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, 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.

Mais ce n'était là qu'une première révolution dans la mesure où la méthode GPS-RTK permet dès les années 1990 et dans certaines conditions à un seul technicien d'exécuter cette même tâche en quelques minutes.

Ceci signifie qu'en une vingtaine d'années le rendement des techniques géodésiques a considérablement augmenté. Sur la base de considérations économiques, une telle évolution ne peut évidemment pas rester sans conséquences sur le plan opérationnel.

Dès lors, la constitution et la mise à jour de nos bases de données numériques s'accéléra rapidement, de nombreuses applications comme le guidage d'engins de chantiers ou agricoles tirant également parti de cette innovation.

Cependant l'application efficace de la méthode GPS-RTK exige encore un certain nombre de compétences afin d'installer préalablement au lever et à moins de 20 km du chantier une station de référence connue très précisément en coordonnées et envoyant ses mesures de phases au mobile. Le principe consiste alors, en partant du postulat que dans un tel rayon les erreurs affectant le signal GPS sont les mêmes, à éliminer les erreurs spatialement corrélées par double différentiation. On calcule donc les coordonnées d'un vecteur connaissant l'un de ses deux points. On parle dans ce cas de figure de solution DGPS (GPS différentiel) sur la phase.

Cependant, et c'est le second axe plaidant en faveur du développement de la technique GPS-RTK, la mise en réseau d'un certain nombre de stations de référence dès les années 2000 permet de libérer les utilisateurs d'un grand nombre de contraintes opérationnelles, ne serait-ce qu'en permettant un accès fiable et précis à la référence nationale en post-traitement afin de calculer les coordonnées de la station de référence utilisée lors d'un lever GPS-RTK.

Enfin, la densification des stations du réseau permanent ainsi que la généralisation des communications temps réel permettant de relier les stations à un centre de calcul, ont permis, à partir de 2005, de démocratiser la technique en offrant à chacun la possibilité d'accéder très facilement et encore plus précisément à la référence nationale en temps réel à travers une boîte noire, qui bien qu'assez complexe, reste totalement transparente pour l'utilisateur. De la sorte, un employé technique peut désormais effectuer des levés de précision moyennant une courte formation dans la mesure où le maniement des instruments et la compréhension des phénomènes impliqués sont devenus relativement aisés. On parle alors de levés GPS-NRTK.

*

Dans ce contexte en pleine mutation où de nouvelles constellations de satellites se mettent en place pour compléter la constellation GPS et rendre l'utilisation de tels systèmes encore plus disponible et plus fiable (GLONASS, GALILEO, COMPASS,...), nous nous proposons de faire le point sur les techniques de lever GNSS en réseau en limitant notre propos aux méthodes différentielles directes utilisant les données issues d'un réseau de stations permanentes.

Le PPP (*Precise Point Positioning*) se trouve donc de facto hors du champ de cette étude.

Nous limiterons également notre propos aux applications « topographiques » et « géodésiques » sur le territoire français 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'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.

Le document débute par un tableau récapitulatif présentant toutes les méthodes de travail en réseau à savoir:

- **Pour les méthodes cinématiques**
 - ✓ **NRTK**
 - ✓ **RTK « Pivot libre »**
 - ✓ **NPPK**
 - ✓ **PPK « Pivot libre »**
- **Pour les méthodes statiques**
 - ✓ **NRTK moyenné**
 - ✓ **Statique pivot central**
 - ✓ **Statique multi-stations**

Ce tableau synthétise les différentes méthodes en présentant leurs critères d'accessibilité permettant de guider l'utilisateur dans son choix.

Après avoir exposé les prérequis nécessaires à la « **Réalisation d'observations GNSS de qualité** », les 7 méthodes sont successivement développées. Au sein de chacune de ces méthodes, nous décrirons les objectifs et prérequis nécessaires ainsi que le niveau de difficulté des tâches proposées.

Des fiches pratiques (checklists) reprenant les points clés de chacune des méthodes sont ensuite proposées à l'utilisateur afin de faciliter les opérations de terrain.

De manière à bien comprendre l'ensemble de ces fiches et bien que quelques rappels succincts soient effectués, le lecteur s'assurera de la bonne maîtrise des concepts expliqués dans l'ouvrage « GPS – Localisation et navigation par satellites, 2^e édition revue et augmentée » rédigé dans le cadre de ce groupe de travail. A défaut, les approfondissements des concepts évoqués sont fortement recommandés.

Tableau d'accès aux fiches

	Fiche 1	Fiche 2	Fiche 3	Fiche 4	Fiche 5	Fiche 6	Fiche 7
Méthode	Cinématique				Statique		
	Temps réel		Post-traitement		Temps réel	Post-traitement	
	NRTK	RTK "pivot libre"	NPPK	PPK "pivot libre"	NRTK moyenné	Pivot central	Multi-stations
Moyens matériels (capteurs, logiciels, abonnement)	+ / ++	+++	+ / ++	+++	+ / ++	+ / ++	+++
Savoir-faire	+	++	++	++	+	++	+++
Moyens humains (personnel, temps passé)	+	+ / ++	+	+ / ++	+	++ / +++	+++
Gamme de précision (1σ)	2-5 cm				2-3 cm	< 2cm	
Types de travaux	Lever cinématique, implantation		Lever cinématique, contrôle levers temps réel		Lever, contrôle, rattachement	Canevas, contrôle	Contrôle, auscultation
Limitations	Couverture du réseau GNSS Couverture du réseau GPRS (existence de zones blanches)	Disponibilité UHF (avec possibilité de faire du GSM/GPRS)	Pas d'implantation possible Calcul du point non garanti avant traitement		Couverture du réseau GNSS Couverture du réseau GPRS (existence de zones blanches)	Pas d'implantation possible, Calcul du point non garanti avant traitement	
		Précision dépendant de la ligne de base Stabilité du pivot durant le lever Surveillance éventuelle du pivot	<u>Lors du lever</u> : Surveillance poussée des conditions d'acquisition (sauts de cycle, constellation)			Calcul de courtes lignes de base uniquement (<5km)	
			Stabilité et surveillance du pivot	<u>Lors du lever</u> : Mise en station irréprochable et surveillance de la stabilité des équipements			
Avantages	Simplicité de mise en œuvre	Fonctionne partout en UHF	Pas de limitations télécoms		Bon compromis simplicité de mise en œuvre / précision	Temps d'occupation réduit	Précision et exactitude "ultimes"

Ce qu'il faut vérifier avant de commencer

La réalisation d'observations GNSS de qualité nécessite l'application des mêmes principes de précaution qu'en topographie classique. Ainsi, il est indispensable de disposer d'instruments et d'accessoires étalonnés et d'être précautionneux sur les opérations de mise en station:

- Bullage: L'opérateur veillera à ce que la bulle de sa nivelle sphérique soit correctement réglée et positionnée dans ses repères. L'opérateur vérifiera notamment qu'en tournant la canne autour de son axe vertical, la bulle reste bien positionnée dans ses repères.
- Centrage de l'embase (vérification du plomb optique) ou utilisation d'une canne droite et rigide: La vérification du plomb optique devra alors régulièrement être réalisée en utilisant un fil à plomb par exemple.

Des contrôles réguliers du matériel au bureau sont indispensables relativement à ces deux aspects.

L'opérateur veillera également à surveiller les points suivants durant la phase de terrain:

- Hauteur d'antenne: La hauteur d'antenne sera mesurée et vérifiée à chaque début et fin de session (il est à noter que les problèmes de hauteur d'antenne sont résolus lors de l'utilisation de cannes topographiques de hauteur standard). L'opérateur veillera alors, au-delà de la lecture des graduations de sa canne, à ce que sa pointe ne soit pas trop émoussée, un contrôle indépendant de la hauteur totale de la canne devant être réalisé à échéance régulière.
- Stabilité de l'antenne durant la mesure: Utilisation de bipodes ou de jalons en positionnement cinématique et utilisation de trépieds pour du positionnement statique



Figure 1 : Dispositifs de stabilisation de l'antenne pour du positionnement cinématique et statique

Relativement au récepteur GNSS, les points suivants devront attirer l'attention des utilisateurs:

- Configurations à jour: Lors de la préparation d'une mission, assurez-vous que les modèles d'antennes que vous utilisez ainsi que les grilles de conversion altimétriques sont bien à jour dans votre mobile GNSS et dans votre logiciel de post-traitement.

Vous pouvez vous référer au site de l'IGN qui met à disposition du grand public ces informations à partir du site du RGP : <http://rgp.ign.fr> ou contacter votre fournisseur (fichier antennes : « ngs08.atx », grille de conversion altimétrique : RAF09).

Vérifier également dans les notes de version du firmware de votre récepteur GNSS que la version que vous utilisez, à défaut d'être à jour, ne présentent pas de bugs connus.

- Calibration ZERO BASELINE: Afin de vérifier l'intégrité du dispositif « Antenne, câble d'antenne, récepteur GNSS », l'utilisateur pourra réaliser le calcul d'une ligne de base nulle en utilisant un seul et même jeu d'observation réalisé sur une période de quelques heures. Le fait que le vecteur issu du calcul soit nul permettra de s'assurer que le dispositif de mesure est stable dans le temps. La stabilité de la mise en station devra particulièrement être soignée durant cette procédure.

Prérequis sur la réalisation d'observations GNSS de qualité

I/ Principe général de la mesure

Le principe général de la mesure consiste à réaliser une multilatération dans l'espace sur un minimum de 4 satellites connus en coordonnées. On peut alors calculer l'intersection de 4 sphères donnant un point unique dans l'espace. En effet, la mesure du temps de propagation du signal entre chaque satellite et le récepteur de l'utilisateur permet de calculer le rayon de chacune des sphères car la vitesse de propagation du signal est connue.

Un certain nombre de postes d'erreurs existent, faisant qu'une mesure non corrigée ne permet que de se positionner en « *mode naturel* » à une dizaine de mètres près.

Pour réduire l'influence de différents postes d'erreurs, nous allons travailler en « *mode différentiel* » en utilisant deux capteurs de mesure au sol. Le principe est alors le suivant : A partir des observations d'un récepteur mobile, des observations d'une station de référence et de sa position connue avec précision, le logiciel de post-traitement ou le récepteur mobile en temps réel vont synchroniser les données afin de calculer les coordonnées du mobile. Le principe consiste ainsi à calculer les coordonnées d'un vecteur appelé ligne de base dont une des extrémités est parfaitement connue dans une réalisation du système géodésique dans lequel nous souhaitons nous positionner.

En faisant une simple différence, pour un satellite donné entre la station de référence et le mobile, toutes les erreurs liées au satellite s'annulent (erreur d'horloge et bruits d'électronique du satellite) ou tendent à s'annuler (erreur de centre de phase de l'antenne du satellite, résultante de l'erreur d'orbite du satellite), d'autant plus que la longueur de la ligne de base est faible.

En introduisant un second satellite dans le calcul pour former une double différence (différence de deux simples différences), les erreurs liées au récepteur mobile vont s'annuler (erreur d'horloge et bruits d'électronique du récepteur mobile) ou tendre à s'annuler (erreur de centre de phase de l'antenne du récepteur mobile), d'autant plus que la longueur de la ligne de base est faible.

Par différentiation multiple (simple ou double), les erreurs spatialement corrélées comme la réfraction ionosphérique ou troposphérique vont également tendre à s'annuler, d'autant plus que la longueur de la ligne de base est faible, les mêmes causes créant les mêmes effets.

Pour simplifier l'explication (notamment en temps réel), on peut dire que l'on détermine la somme des erreurs sur une station de référence connue en coordonnées et que l'on applique au mobile ces « corrections » (qui sont nécessaires) pour réduire l'influence des erreurs. Il est à noter que ces erreurs affectent les deux postes de mesure de manière similaire, la station de référence et le mobile observant le même ensemble d'au moins 4 satellites.

Les signaux GNSS sont donc transmis depuis la constellation visible afin de calculer par doubles différences la position d'un réseau de points utiles à la réalisation de travaux topographiques.

La justesse des observations et leur bonne corrélation spatiale est soumise à un grand nombre de paramètres dont une bonne partie peut être rendue négligeable si l'on respecte soigneusement les indications développées par la suite.

II/ Surveillance des conditions météorologiques spatiales

A) L'ionosphère

La réfraction ionosphérique est la principale source d'erreur affectant l'exactitude des observations GNSS, le retard atmosphérique pouvant atteindre 100 mètres.

La réfraction ionosphérique est proportionnelle à la quantité d'électrons rencontrés par l'onde électromagnétique émise par un satellite au cours de son trajet vers le récepteur GNSS, et donc à la densité électronique de cette haute couche atmosphérique.

La densité électronique de l'ionosphère dépend de la quantité de particules émises par le soleil et donc du cycle d'activité solaire ayant une période de 11 années comme illustré ci-dessous:

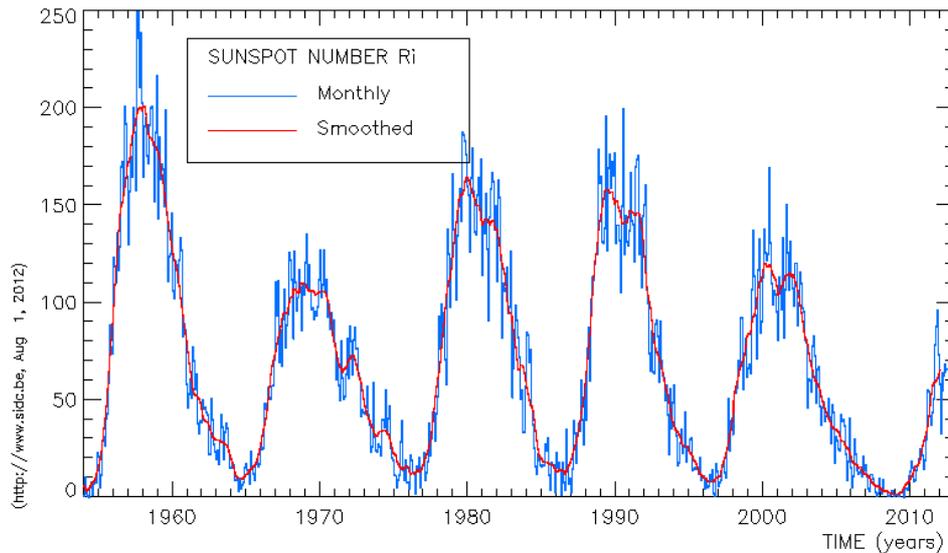


Figure 2 : Cycles d'activité solaires de 1954 à nos jours (<http://sidc.oma.be/html/wolfmms.html>).

Le détail du cycle d'activité solaire en cours est représenté ci-dessous :

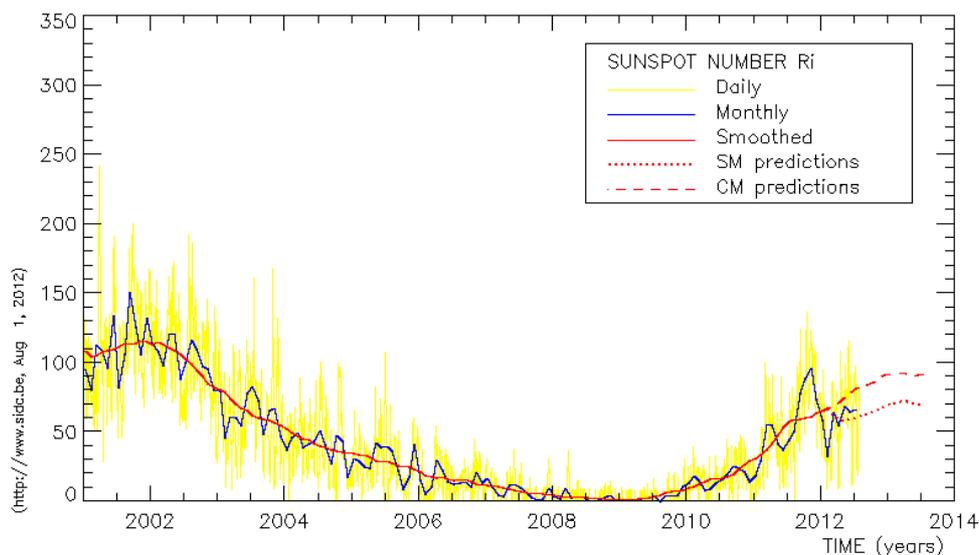


Figure 3 : Dernier cycle d'activité solaire (<http://sidc.oma.be/html/wolfjms.html>).

Il est alors à retenir que l'activité solaire varie au cours de la journée et est maximale entre 10h00 et 14h00 heure solaire (c'est-à-dire autour du zénith).

L'ionosphère est un milieu dispersif pour les signaux GNSS : En d'autres termes, le retard ionosphérique dépend de la fréquence des signaux utilisés, d'où l'intérêt de travailler avec des récepteurs bi (L1, L2) ou multifréquences (L1, L2 et L5) pour mesurer et éliminer le retard ionosphérique par combinaisons linéaires des signaux mesurés sur ces différentes fréquences.

Pour que l'erreur ionosphérique s'annule par doubles différences, il faut que le mobile soit relativement proche de la (des) station(s) de référence utilisée(s) ou que le réseau permanent temps réel servant à modéliser l'erreur ionosphérique sur le chantier de l'utilisateur soit suffisamment dense pour bien prendre en compte la dynamique spatiale de la ionosphère.

Différents indicateurs caractérisant l'état ionosphérique sont consultables sur le site Web du Space Weather Prediction Center (SWPC), la nature des différents indicateurs étant consultable à l'adresse suivante : <http://www.swpc.noaa.gov/NOAAscales/index.html#SolarRadiationStorms>.

Outre les radiations solaires, certaines conditions extraordinaires peuvent détériorer l'exactitude des mesures au sol, à savoir :

- Tempêtes géomagnétiques
- « Trous noirs » radio

Différents indicateurs sont fournis sur la page <http://www.swpc.noaa.gov/SWN/index.html> et peuvent être avantageusement consultés avant chaque mission.

B) La troposphère

Le ralentissement des signaux qui traversent cette couche atmosphérique sous l'effet du phénomène de réfraction dépend des conditions de température, pression et humidité relative tout au long du trajet. Pour le prendre en compte dans le traitement lié aux applications topographiques, les logiciels modélisent le délai troposphérique en fonction des paramètres météo au sol, paramètres eux-mêmes issus de valeurs standards ou d'un modèle global.

Cela est suffisant pour des applications classiques de topographie sur des zones limitées à une dizaine de km² en terrain peu accidenté, où les erreurs dues à la troposphère s'élimineront presque totalement lors de la construction des doubles différences. La collecte de données météorologiques sur site n'est alors pas utile et s'avère en général trop imprécise. En réseau (NRTK, NPPK, statique avec temps d'observation courts et/ou logiciel de post-traitement commerciaux), la densité des stations utilisées a alors son importance, particulièrement en zones montagneuses ou une forte dénivelée peut exister entre les stations de références et le mobile, voire entre stations permanentes.

Pour des chantiers plus vastes ou présentant de plus fortes dénivelées, un traitement avec estimation des délais troposphériques humides est recommandé en utilisant des logiciels scientifiques dédiés au GNSS pour la géodésie. Des modèles récents qui utilisent une intégration de profils verticaux de pression et température variant toutes les 6h sont alors employés.

III/ Problèmes de constellation, de masques et de multitrajets

A) Disponibilité et bonne répartition des satellites dans le ciel

Le principe de base du positionnement par méthodes GNSS reposant sur une multilatération dans l'espace sur un minimum de 4 satellites connus en coordonnées, il va falloir, pour déterminer une position précise, que les satellites soient suffisamment bien répartis dans l'espace de manière à ce que le calcul d'intersection des 4 sphères ainsi formées soit le moins ambigu possible.

Pour des applications de type RTK ou NRTK, un minimum de 5 satellites en GPS seul et 6 satellites en GPS et GLONASS (4 GPS et 2 GLONASS) est nécessaire.

Pour aborder cette notion de bonne répartition des satellites dans l'espace, il existe différents indicateurs de DOP (Dilution Of Precision ou coefficients d'affaiblissement de la précision) traduisant notamment l'influence de la répartition des satellites sur la précision du positionnement d'un récepteur GNSS.

Le plus complet de ces indicateurs est le **GDOP** (*Global Dilution Of Precision*) traduisant l'affaiblissement global de la précision. Il peut être lié par exemple à une mauvaise répartition des satellites dans l'espace ou à un problème de mauvaise synchronisation temporelle entre les temps satellite pour une constellation donnée et le temps récepteur.

Le **PDOP** (*Position Dilution of Precision*) peut également être utilisé tout en sachant que cet indicateur n'intègre pas le TDOP (influence de la répartition des satellites sur la bonne synchronisation temporelle).

Ces indicateurs, idéalement égaux à 1, doivent être le plus petit possible afin de garantir un positionnement de qualité et ne jamais dépasser, pour les classes de précision recherchées, des valeurs de 3-4 pour le GDOP et à 2-3 pour le PDOP.

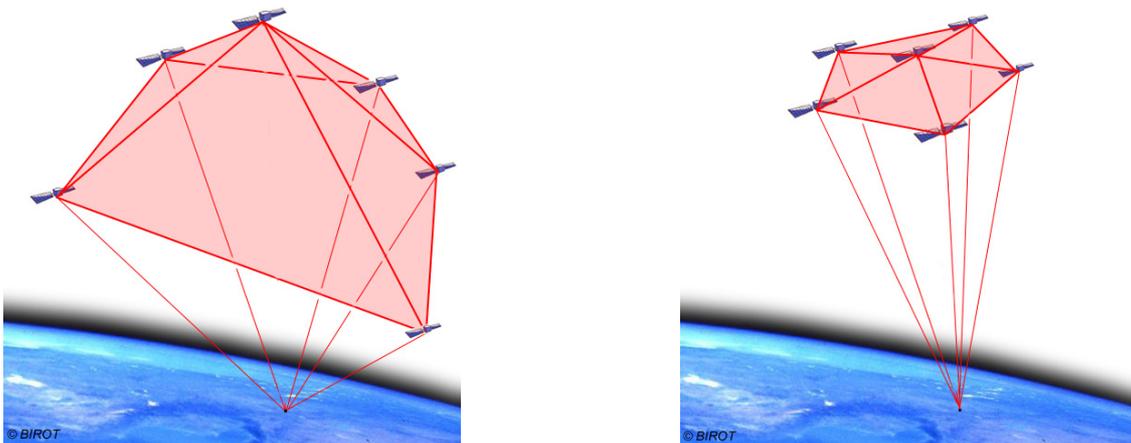


Figure 4 : Configuration géométrique des satellites impliquant un bon GDOP (inférieur à 3, image de gauche) ou un mauvais GDOP (supérieur à 5, image de droite)

Ces indicateurs « globaux » que sont le GDOP ou le PDOP se décomposent en plusieurs indicateurs que sont le HDOP, le VDOP ou le TDOP.

Le HDOP et le VDOP traduisent respectivement l'influence de la répartition des satellites dans l'espace sur la précision horizontale et verticale du positionnement. Ils peuvent être combinés pour former le PDOP (coefficient d'affaiblissement sur le positionnement 3D).

Le TDOP traduit quant à lui un affaiblissement de la précision lié à une mauvaise synchronisation temporelle entre le temps du récepteur et le temps de la constellation utilisée (temps dans lequel sont calées les différentes horloges des satellites utilisés, lesdites horloges servant à générer les signaux émis).

Un aspect pratique du GDOP est qu'il suffit de multiplier ce coefficient par l'« erreur théorique » de mesure de distance (ou UERE (*User Equivalent Range Error*) formée des erreurs d'éphémérides (erreurs d'orbites et d'horloges des satellites), des erreurs de centres de phase des antennes des satellites, des erreurs atmosphériques (ionosphère et troposphère), des multitrajets, des erreurs de centre de phase de l'antenne du mobile et des erreurs de synchronisation d'horloge et d'électronique du récepteur mobile) pour obtenir une estimation de l'erreur réelle sur la position. On a alors :

$$\text{Erreur globale de position} = (\text{GDOP}) * (\text{erreur théorique})$$

Les remarques suivantes peuvent alors être retenues par l'utilisateur:

- Plus la valeur de DOP est petite, meilleure est la précision. L'erreur de mesure n'est alors pas amplifiée par la mauvaise répartition des satellites ou la mauvaise synchronisation temporelle du récepteur mobile.
- La valeur de DOP est généralement supérieure à 1 mais si plus de 8 satellites sont utilisés, elle peut devenir inférieure à 1.
- Le PDOP (et donc par construction le HDOP et le VDOP et indirectement le GDOP) peut être calculé sans mesures GNSS dans la mesure où seules les positions des satellites obtenues dans des fichiers d'éphémérides ou d'almanachs ainsi que la position approximative du mobile sont requises. Il est donc possible de prévoir le meilleur moment pour un lever donné, y compris en simulant les masques locaux.
- Les valeurs de DOPs peuvent être utilisées pour sélectionner manuellement les satellites qui pourraient être enlevés de la solution de positionnement. Cette démarche trouve son intérêt lorsque les mesures réalisées sur ces satellites sont mauvaises à un instant donné.
- Le PDOP (et donc par construction le HDOP et le VDOP et indirectement le GDOP) varie avec l'heure et la position du mobile et se répète chaque jour avec 4 minutes d'avance du fait du paramètre de renouvellement de la constellation GPS.
- Le PDOP (et donc par construction le HDOP et le VDOP et indirectement le GDOP), varie avec le nombre de satellites considéré dans un mode de positionnement donné. S'il varie en fonction de l'angle de coupure utilisé par le mobile, il variera également en passant du mode « naturel » en mode « DGPS Code » puis « RTK Flottant » et « RTK Fixe » lors d'une chaîne de fixation des ambiguïtés entière en fonction du nombre de satellites communs et « suffisamment bien observés » entre le mobile et la (les) station(s) de référence utilisée(s).
- Le PDOP (et donc par construction le HDOP et le VDOP et indirectement le GDOP) a un rôle limité en mode différentiel, ce rôle étant d'ailleurs d'autant plus limité que le mobile est proche de la station de référence (i.e. que les biais géométriques liés à la mauvaise répartition des satellites sont très corrélés entre les deux postes et s'annulent quasi intégralement par double différence), d'où la notion de RDOP (*Relative Dilution of Precision*). En mode réseau, le PDOP reprend de l'importance, d'autant plus que le réseau est peu dense en stations permanentes.
- Pour les applications qui nous intéressent et plus particulièrement dans un contexte réseau où l'utilisateur peut se retrouver à une trentaine de kilomètres de la station de référence la plus proche (i.e. décorrélation entre PDOP ou le GDOP sur le mobile et la/les référence(s) utilisées, voire différence du nombre de satellites visibles), le PDOP ou le GDOP donné par le mobile une fois passé en mode « RTK Fixe » (ambiguïtés entière fixées) ne doit respectivement pas excéder 2-3 ou 3-4.

Cependant, même si une estimation du PDOP ou du GDOP est pratique pour déterminer à partir des almanachs si le positionnement sera d'une précision acceptable, d'autres paramètres restent à prendre en compte. En effet, les satellites peuvent être très bien placés dans le ciel sans pour autant qu'une mesure puisse être effectuée, notamment pour des questions de reliefs et/ou obstacles entre le satellite et le récepteur. La plupart des logiciels de simulation de DOPs permettent alors à l'utilisateur de saisir les masques affectant son chantier (cf. partie B) ci-dessous)

Dans le même ordre d'idée et afin de s'assurer que la prévision de DOP réalisée à partir d'almanachs (valides 60 jours à compter de leur création) ne différera pas trop de la réalité terrain lors de la mission, l'utilisateur pourra vérifier avant chaque mission l'état de santé des constellations utilisées sur les sites suivants :

- <http://cgls.uscg.mil/pipermail/nanu/> & <http://cgls.uscg.mil/mailman/listinfo/nanu> pour la constellation GPS.
- <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/pls/htmldb/f?p=202:20:5214465750545183::NO> pour la constellation GLONASS.

Il est alors important de noter que la période de révolution orbitale des satellites GPS étant de 11 heures 58 minutes 02 secondes, la constellation se répète, pour un utilisateur situé au sol toutes les 23 heures 56 min 04 secondes compte tenu de la rotation de la Terre, c'est-à-dire avec une avance de l'ordre de 4 minutes de jour en jour. Pour un utilisateur au sol la constellation se répète donc environ tous les jours avec 2 révolutions parcourues.

La période de révolution orbitale des satellites GLONASS étant de 11 heures 15 minutes 44 secondes, la constellation se répète, pour un utilisateur situé au sol toutes les 22 heures 31 min 28 secondes compte tenu de la rotation de la Terre, c'est-à-dire avec une avance de l'ordre de 90 minutes de jour en jour. Pour un utilisateur situé au sol, la constellation se répète donc environ tous les 8 jours avec 17 révolutions parcourues.

Il n'est donc 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.

Vérifiez enfin une fois pour toutes que votre récepteur mobile :

1. Affiche bien des DOPs relatifs aux satellites utilisés pour le calcul de sa solution de positionnement et non des DOPs relatifs à l'ensemble des satellites observés. Pour ce faire, désactivez sur votre station de référence un certain nombre de satellites bien positionnés contribuant à la définition d'un bon DOP et observez le résultat côté mobile. En mode réseau temps réel, les DOPs doivent augmenter lorsque le nombre de satellites communs entre l'infrastructure réseau et le récepteur mobile diminue.
2. Prenne bien en compte les satellites de la constellation GPS avec le même poids que les satellites de la constellation GLONASS. En effet, GLONASS ayant longtemps été perçu comme une augmentation de GPS, ces satellites n'ont pas le même poids dans la détermination d'une solution de positionnement que ceux de la constellation GPS. Un bon moyen pour détecter cette différence de précision est de constater qu'il n'est pas possible de déterminer une position uniquement à partir de la constellation russe.

Lors de l'utilisation de récepteurs GNSS, l'utilisateur veillera à ne pas se faire abuser par des DOPs artificiellement bons du fait de la présence d'un ou deux satellites GLONASS bien positionnés alors que les satellites GPS sont tous alignés sur un axe ou tous regroupés dans une même portion de l'espace sans qu'au moins 4 d'entre eux ne soient bien répartis dans l'espace.

B) Reconnaissance des lieux stationnables

Afin de permettre la réalisation d'observations GNSS de qualité, les points stationnés doivent être choisis dans des endroits avec un minimum d'obstacles (masque GNSS comme la végétation, les bâtiments...). En effet, ces obstacles peuvent soit interdire la mesure soit perturber voire fausser les observations en raison du phénomène de multitrajets.

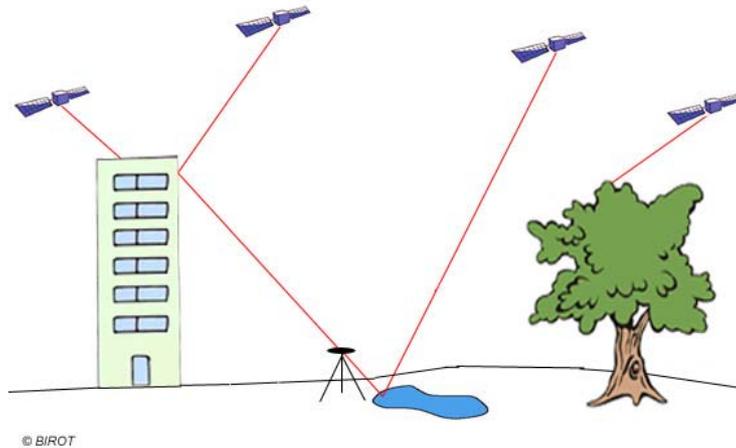


Figure 5 : Choix du lieu de l'observation et erreurs associées.

Il peut être judicieux de connaître la disponibilité satellitaire d'un lieu afin de prévoir la période d'intervention sur site. Il peut éventuellement être utile de réaliser un relevé de masque à l'aide d'une boussole et d'un clisimètre (ou clinomètre) afin d'optimiser les observations.

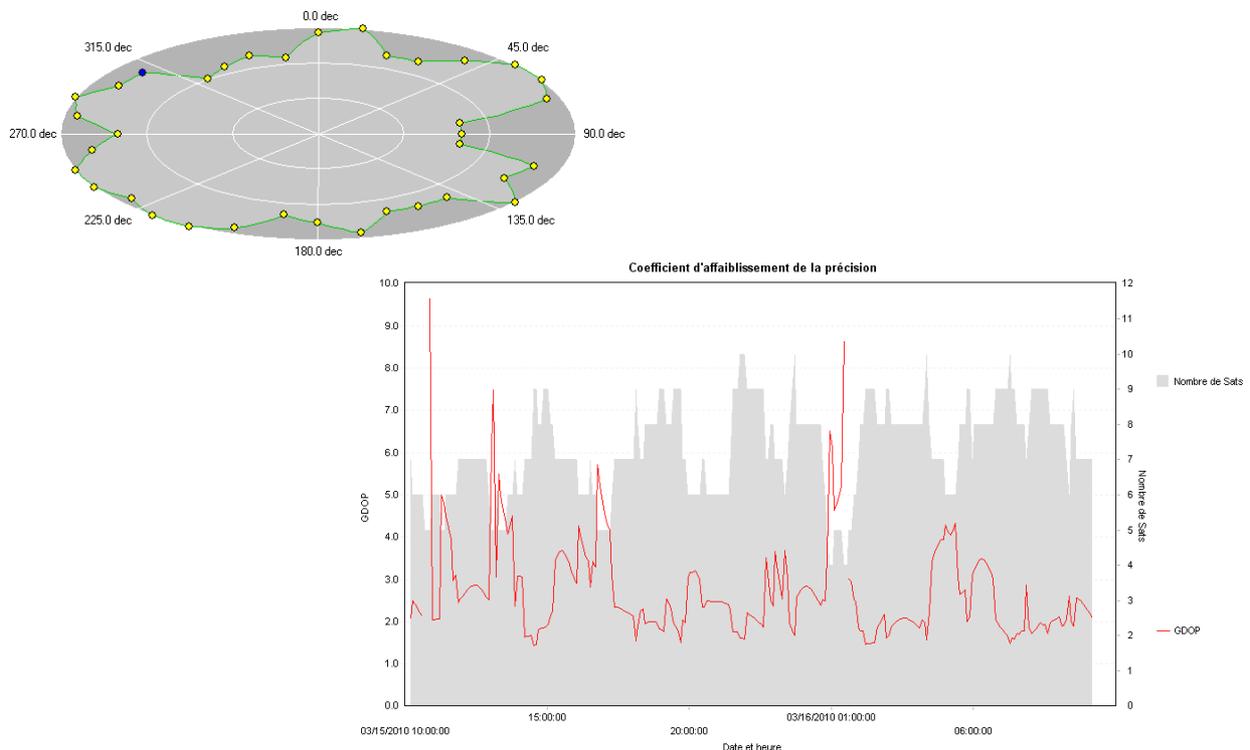


Figure 6 : Relevé des masques et calcul de la disponibilité satellitaire (GDOP) en un lieu donné.

Il est toutefois important de noter que le nombre croissant de satellites permet de plus en plus de s'affranchir de ce type de relevé de masques. Cet outil est néanmoins très utile pour les opérations de mesure en cinématique dans la mesure où il est possible de planifier au mieux la mission en sachant à quel moment de la journée un endroit a priori délicat à lever devient potentiellement mesurable.

IV/ Surveillance des rapports « Signal sur Bruit »

Plus le rapport signal sur bruit (exprimé en dB/Hz) est important pour un satellite donné meilleur est sa réception.

Généralement plus un satellite est haut en élévation meilleur est son rapport signal sur bruit.

Les rapports signaux à bruits sur L2 sont toujours plus bas que sur L1.

Bien que ces valeurs ne soient pas normalisées, l'utilisateur pourra retenir comme ordres de grandeurs que:

1. La valeur maximum pour L1 est de 52 dB/Hz et pour L2 de 45 dB/Hz.
2. Des valeurs normales pour du positionnement de précision (applications topographiques) sont comprises entre 45-50 dB/Hz sur L1 et entre 40-45 dB/Hz sur L2.
3. La valeur minimale acceptable sur L2 ne doit descendre en dessous de 30-35 dB/Hz.

On remarquera également qu'un satellite qui subit du multi-trajet verra son rapport signal sur bruit se réduire : Il s'agit donc d'une information qui permet de détecter cette source d'erreur.

SAT	ELEV	AZI	S/N L1	S/N L2
G23	70	61	50	44
G24	70	212	50	40
G13	66	232	51	41
G04	47	299	49	38
G20	44	95	49	37
G02	18	316	45	30
G17	15	233	44	34

Figure 7 : Surveillance des rapports Signal sur Bruit.

VI/ Système de référence légal

Afin de réaliser des travaux GNSS de qualité, il est indispensable de travailler dans le système de référence légal. Les systèmes légaux en France Métropolitaine et dans les DOM-TOM sont présentés dans le décret 2000-1276. Le tableau ci-dessous fournit les systèmes, les ellipsoïdes, les projections et les grilles de conversion altimétrique légales en France et dans les Département d'Outre Mer.

Dans la suite du document, nous faisons référence la plupart du temps au système de référence RGF93 et à la grille de conversion altimétrique RAF09 pour la métropole. Ces mentions seront remplacées par un autre système de référence et une autre grille de conversion altimétrique selon les cas en se référant au tableau suivant.

Territoire	Système de référence	Ellipsoïde	Projection	Grille de conversion altimétrique	Système altimétrique
France Métropolitaine	RGF93 (ETRF2000 époque 2009.0)	IAG-GRS80	Lambert 93 et CC 9 zones	RAF09 pour la France Métropolitaine et RAC 09 pour la Corse	IGN69 pour la France Métropolitaine et IGN78 pour la Corse
Guadeloupe	WGS84-RRAF prochainement remplacé par RGAF09 (IGS05 époque 2009.0)	IAG-GRS80	UTM20N	gg10_XXX XXX faisant référence à l'île concernée	IGN 1988 XX XX faisant référence à l'île concernée
Martinique	WGS84-RRAF prochainement remplacé par RGAF09 (IGS05 époque 2009.0)	IAG-GRS80	UTM20N	gg10_mart	IGN 1987
Guyane	RGFG95 (ITRF93 époque 1995.0)	IAG-GRS80	UTM22N	ggguy00	NGG 1977
Réunion	RGR92 (ITRF91 époque 1993.0)	IAG-GRS80	UTM40S	RAR07	IGN 1989
Mayotte	RGM04 (ITRF2000 époque 2004.0)	IAG-GRS80	UTM38S	ggm04v1	SHOM 1953

Le positionnement cinématique temps-réel à l'aide d'un réseau de stations GNSS permanent (mode NRTK)

Objectifs

Etre capable de déterminer par méthodes GNSS les coordonnées précises (classe de précision comprise entre 2 et 5 centimètres) directement en RGF93 de quelques centaines voire milliers de points stationnés pour la plupart durant quelques époques de mesure seulement.

Prérequis

Pour atteindre cet objectif, il est impératif de se référer aux prérequis sur les observations GNSS de qualité.

Applications

- Lever.
- Implanter.
- Mettre en place des points d'appui pour un canevas local. Mise en référence d'un pivot RTK ou d'un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques.

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 bipode permettant de laisser le mobile en place lors de la mesure des points de contrôle de manière suffisamment stable pendant plusieurs minutes.

Niveau de difficulté

1

Principe de la méthode

Le mobile calcule la ligne de base le séparant d'une station de référence du réseau en recevant 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 entourant le mobile. L'ensemble de ces corrections peuvent également servir à générer une station virtuelle à proximité du mobile, rendant la notion même de réseau transparente pour le mobile.

*

I/ Préparation de la mission

A) Problèmes de télécommunications

Cette méthode de travail nécessite la réception de données provenant des serveurs centraux des réseaux temps réel, acheminées par communication GPRS (2.5G), EDGE (2.75G) ou UMTS (3G) jusqu'à l'utilisateur.

Afin de préparer sa mission, il est donc indispensable de connaître la couverture 2G du chantier à réaliser pour qu'à minima la transmission GPRS puisse être assurée, la couverture GPRS étant identique à la couverture 2G du territoire (http://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-bilan-couverture-QoS-2g-3g-nov2012.pdf). Cette consultation pourra être réalisée sur le site de l'ARCEP (<http://www.arcep.fr/index.php?id=11557>), notamment en utilisant l'atlas « zoomable » par département, daté du 1^{er} juillet 2012.

Le rapport d'analyse sur la couverture et la qualité de service mobiles en France métropolitaine précise par ailleurs les chiffres suivants : « Orange France est l'opérateur disposant de la couverture la plus étendue. Celle-ci correspond à 99,9% de la population et 97,3% de la surface du territoire. SFR couvre 99,6% de la population et 93,3% de la surface du territoire. Enfin, Bouygues Telecom couvre 99,1% de la population et 89,6% de la surface du territoire. ... En termes de surface, 82 départements sont couverts à plus de 95% par Orange France, et 87 départements sont couverts à plus de 90%. En ce qui concerne SFR, 77 départements sur 96 sont couverts à plus de 90% en termes de surface, et 87 départements sont couverts à plus de 85%. Enfin, pour Bouygues Telecom, 62 départements sur 96 sont couverts à plus de 90% en termes de surface, et 72 départements sont couverts à plus de 85%. » (http://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-bilan-couverture-QoS-2g-3g-nov2012.pdf).

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 envoyer à l'infrastructure une position en mode naturel afin de recevoir en retour les corrections correspondant à sa zone de travail.

Les réseaux Internet mobiles permettent 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).

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, « *Prévision* » 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 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, enregistrez les données brutes en statique comme en itinérant afin de pouvoir recalculer en post-traitement (NPPK) l'ensemble de votre chaîne cinématique à partir des données observées sur les stations de votre opérateur réseau et/ou celles du RGP.

B) Vérification du matériel

Assurez-vous conformément aux prérequis que votre matériel est apte à être utilisé dans le cadre d'un lever de précision (qualité de la bulle de votre canne, longueur de la canne, grilles de conversion altimétriques et modèles d'antennes à jour, version du firmware de votre appareil).

II/ Phase terrain

A) Acquisition des points

1. Placez-vous sur un point bien dégagé.
2. Allumez votre récepteur et obtenez une position en mode « naturel ».
3. Vérifiez l'état de la connexion GPRS.
4. 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 partie I/A).
5. 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 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.

6. Effectuez votre lever ou votre implantation en respectant les consignes suivantes, sans oublier l'ensemble des bonnes pratiques décrites dans les prérequis.
 - 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 moyenniser les positions permettant de fiabiliser le résultat. Pour ce faire, régler 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 la fiche sur le filtrage et moyenne de positions NRTK.

- 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 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.
- c) Vérifiez régulièrement la qualité du lien temps réel en suivant l'âge de la dernière correction reçue (cf. point 4 ci-dessus).

- d) 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 5 ci-dessus. 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.

B) 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 (quatre coins et centre du rectangle englobant l'ensemble des points levés) pour un levé surfacique :

a) Contrôle relatif :

- i. 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 au point 6) a) ci-dessus. Plus le nombre de déterminations indépendantes du même point sera important plus la fiabilité de ce point sera avérée.

Conformément à l'explication donnée partie III/A) page 15, 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.

Pour aller au bout de cette démarche de multi-détermination d'un même point, vous pouvez vous référer à la fiche sur le filtrage et moyenne de positions NRTK.

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

- 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 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 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 effectuez si possible le calcul de post-traitement avec des stations de référence différentes de celles utilisées dans le calcul NRTK.

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 sur vos mises en stations conformément aux prérequis.

III/ Phase bureau

1. 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.) afin d'effectuer un filtrage multicritères et vous assurer, outre les précautions prises sur le terrain, de la qualité de votre lever.
2. Pour tous les points déterminés au moins deux fois, vérifiez la moyenne obtenue ainsi que les écarts de chaque point à la moyenne.
3. Pour tous les points de contrôle absolus stationnés et afin de contrôler l'exactitude de votre lever, vérifiez les écarts 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 NRTK (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003)).

Le positionnement cinématique temps réel suivant la méthode du « pivot libre » (mode RTK classique)

Objectifs

Etre capable de déterminer par méthodes GNSS les coordonnées précises (classe de précision comprise entre 2 et 5 cm) de quelques centaines voire milliers de points stationnés pour la plupart durant quelques époques de mesure seulement.

Prérequis

Pour atteindre cet objectif, il est impératif de se référer aux prérequis sur les observations GNSS de qualité.

Applications

- Lever.
- Implanter.
- Mettre en place des points d'appui pour un canevas local. Mise en référence d'un pivot RTK ou d'un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques.

Matériels et logiciels nécessaires

- Deux récepteurs GNSS permettant de mesurer la phase, de préférence bifréquence, capables de communiquer entre eux par UHF sous licence valide, par GSM ou par Internet mobile (GPRS-UMTS) sous abonnement valide.
- Un trépied permettant de laisser le pivot en place lors du lever.
- Un bipode permettant de laisser le mobile en place lors des stations des points de contrôle de manière suffisamment stable pendant plusieurs minutes.
- 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.).

Niveau de difficulté

2

Principe de la méthode

Le mobile calcule en temps réel la ligne de base le séparant de sa station de référence appelée base ou pivot, le dit pivot étant placé sur le chantier dans un endroit stationnable aux vues des critères prérequis. Le pivot envoie en temps réel ses corrections sur la ligne de base (observations de phase en plus de ses coordonnées) au mobile qui les reçoit en temps réel et les synchronise à chaque époque à ses propres observations pour déterminer sa position centimétrique.

Au bureau le pivot doit être rattaché en RGF93 en post-traitement afin que l'ensemble du chantier le soit également.

Le rattachement est inutile si le pivot est déjà connu en RGF 93 (rattachement préalable ou mise en station sur un point géodésique) mais cette solution nommée RTK classique ne fait pas partie du champ du document qui se concentre sur les méthodes de travail en réseau.

*

I/ Préparation de la mission

A) 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 palier 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, 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.

B) Vérification du matériel

Assurez-vous conformément aux prérequis que votre matériel est apte à être utilisé dans le cadre d'un lever de précision (qualité de votre embase et de la bulle de votre canne, efficacité des vis de serrage de votre trépied et longueur de la canne, grilles de conversion altimétrique et modèles d'antennes à jour, version du firmware de vos appareils).

II/ Phase terrain

A) Lever en 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.

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 le pivot et son moyen de communication, 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. Dès que votre récepteur sera en mesure de déterminer une position en mode « naturel », fixez-la arbitrairement comme position connue de votre pivot.
3. Lancez ensuite l'enregistrement des données brutes toutes les secondes (1 Hz) sur votre pivot et votre mobile pour le post-traitement des coordonnées du pivot et un éventuel recalcul de votre chaîne cinématique à toute fin de contrôle.
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 toute les secondes de manière très régulière et votre système doit normalement très rapidement passer en mode « RTK Fixe ».
6. Une fois sur zone, 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 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 :
 - 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 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 la fiche sur le 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.

B) 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 (quatre coins et centre du rectangle englobant l'ensemble des points levés) pour un levé surfacique :

a) Contrôle relatif :

- i. 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 au point 7) a). Plus le nombre de déterminations indépendantes du même point sera important plus la fiabilité de ce point sera avérée.

Conformément à l'explication donnée partie III/A) page 15, 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.

Pour aller au bout de cette démarche de multi-détermination d'un même point, vous pouvez vous référer à la fiche sur le filtrage et moyenne de positions NRTK en généralisant le terme « NRTK » au concept de « positions obtenues sur quelques époques ».

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

- 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 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 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 effectuez si possible le calcul de post-traitement avec des stations de référence différentes de celles utilisées pour mettre en place le pivot.

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. Si votre lever 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), remettez votre pivot en place sur un point déjà levé et matérialisé en conséquence avant de saisir ses coordonnées RTK lors de votre mise en station puis respectez le reste de la procédure à compter de l'étape 4.
4. La redétermination d'un certain nombre de points de votre levé est également envisageable en utilisant un autre pivot complètement indépendant.

III/ Phase bureau

A) Positionnement du pivot

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

Dans le cas où vous auriez la possibilité de vous mettre sur un point préalablement connu en coordonnées (situation hors du champ de ce document), 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.

B) Calcul de la chaîne cinématique

1. Exportez votre lever afin d'obtenir la liste des points avec leurs différents attributs (DOPs, âge de la correction, SNRs, etc.) afin d'effectuer un filtrage multicritères et vous assurer, outre les précautions prises sur le terrain, de la qualité de votre lever.
2. Pour tous les points déterminés au moins deux fois, vérifiez la moyenne obtenue ainsi que les écarts de chaque point à la moyenne.
3. 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 tel qu'expliqué dans la fiche sur le filtrage et moyenne de position NRTK en généralisant le terme « NRTK » au concept de « positions obtenues sur quelques époques ».
4. 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 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 (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003)).

Le positionnement cinématique post-traité à l'aide d'un réseau de stations GNSS permanent (mode NPPK)

Objectif

Etre capable de déterminer par méthodes GNSS les coordonnées précises (classe de précision comprise entre 2 et 5 cm) de quelques centaines ou milliers de points stationnés pour la plupart durant quelques époques de mesure seulement.

Cette méthode de lever est à réserver, par le risque intrinsèque qu'elle comporte, pour les zones de travail où le GPRS (NRTK) ou la radio (RTK) ne sont pas disponibles (zones rurales et/ou très vallonnées, batterie d'un téléphone externe déchargée, etc.).

Prérequis

Pour atteindre cet objectif, il est impératif de se référer aux prérequis sur les observations GNSS de qualité.

Applications

- Lever.
- Mettre en place des points d'appui pour un canevas local. Mise en référence d'un pivot RTK ou d'un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques.
- Contrôler des levers RTK ou NRTK.

Matériels et logiciels nécessaires

- Un récepteur GNSS, de préférence bifréquence, équipé d'un bipode permettant de le laisser en place lors des phases d'initialisation de manière suffisamment stable pendant plusieurs minutes.
- 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.).

Niveau de difficulté

3

Principe de la méthode

Le lever est fait à partir de données brutes observées sur le mobile. Les ambiguïtés entières sont fixées lors du post-traitement. On calcule au bureau les lignes de base entre le mobile et les stations du réseau GNSS.

*

I/ Phase terrain

A) Lever en cinématique

1. Assurez-vous conformément aux prérequis que votre matériel est apte à être utilisé dans le cadre d'un lever de précision (qualité de la bulle de votre canne, longueur de la canne, grilles de conversion altimétriques et modèles d'antennes à jour, version du firmware de votre appareil).
2. Lancez ensuite l'enregistrement des données brutes toutes les secondes (1 Hz) sur votre mobile pour le recalcul en post-traitement de votre chaîne cinématique.
3. 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 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 :

temps de station = 10 minutes + 1 minute par kilomètre de ligne de base + 1 minute par 100 mètres de dénivellée

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
- 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 la fiche sur le 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.

B) 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 (quatre coins et centre du rectangle englobant l'ensemble des points levés) pour un levé surfacique :

a) Contrôle relatif :

- i. 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 au point 3) b) ci-dessus. Plus le nombre de déterminations indépendantes du même point sera important plus la fiabilité de ce point sera avérée.

Conformément à l'explication donnée partie III/A) page 15, 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, 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 à la fiche sur le filtrage et moyenne de positions NRTK en généralisant le terme « NRTK » au concept de « positions obtenues sur quelques époques ».

- ii. 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 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 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 » 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.

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.

II/ Phase bureau

1. 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.) afin d'effectuer un filtrage multicritères et vous assurer, outre les précautions prises sur le terrain, de la qualité de votre lever.
2. Calculez ensuite votre chaîne cinématique à partir des stations du RGP et/ou de votre opérateur temps réel.
3. Pour tous les points déterminés au moins deux fois, vérifiez la moyenne obtenue ainsi que les écarts de chaque point à la moyenne.
4. Pour tous les points de contrôle absolus stationnés et afin de contrôler l'exactitude de votre lever, vérifiez les écarts entre les coordonnées obtenues en temps différé et les coordonnées des points de contrôle telles que publiées sur les fiches géodésiques ou les coordonnées obtenues par la méthode statique au moins deux fois plus précise que l'estimation de la classe de précision de votre lever NPPK (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003).

Le positionnement cinématique post-traité suivant la méthode du « pivot libre » (mode PPK classique)

Objectif

Etre capable de déterminer par méthodes GNSS les coordonnées précises (classe de précision comprise entre 2 et 5 cm) de quelques centaines ou milliers de points stationnés pour la plupart durant quelques époques de mesure seulement.

Cette méthode de lever est à réserver, par le risque intrinsèque qu'elle comporte, pour les zones de travail où le GPRS (NRTK) ou la radio (RTK) ne sont pas disponibles (zones rurales et/ou très vallonnées, batterie d'un téléphone externe déchargée, etc.).

Prérequis

Pour atteindre cet objectif, il est impératif de se référer aux prérequis sur les observations GNSS de qualité.

Applications

- Lever.
- Mettre en place des points d'appui pour un canevas local. Mise en référence d'un pivot RTK ou d'un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques.
- Contrôler des levés RTK ou NRTK.

Matériels et logiciels nécessaires

- Deux récepteurs GNSS permettant de mesurer la phase, de préférence bifréquence, l'un servant de pivot et l'autre de mobile.
- Un trépied permettant de laisser le pivot en place lors du lever.
- Un bipode permettant de laisser le mobile en place lors des phases d'initialisation de manière suffisamment stable pendant plusieurs minutes.
- 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.).

Niveau de difficulté

3

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 sur le chantier, dans un endroit stationnable selon les critères prérequis. Les ambiguïtés entières sont fixées lors du post-traitement. Au bureau l'opérateur détermine les coordonnées RGF93 du pivot à partir des données des stations du RGP par méthodes statiques (à partir d'observations suffisamment longues tel que décrit dans les fiches sur le positionnement statique suivant la méthode du pivot central ou la méthode multi-stations). Il peut alors calculer les lignes de base entre le mobile et le pivot sur quelques époques d'observation par point (chaîne cinématique), toujours en post-traitement.

Le rattachement est inutile si le pivot est déjà connu en RGF 93 (rattachement préalable ou mise en station sur un point géodésique) mais cette solution nommée PPK classique ne fait pas partie du champ du document qui se concentre sur les méthodes de travail en réseau.

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.

*

I/ Phase terrain

A) Lever en cinématique

1. Assurez-vous conformément aux prérequis que votre matériel est apte à être utilisé dans le cadre d'un lever de précision (qualité de votre embase et de la bulle de votre canne, efficacité des vis de serrage de votre trépied et longueur de la canne, grilles de conversion altimétriques et modèles d'antennes à jour, version du firmware de votre appareil).
2. 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 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.

3. 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.
4. Lancez ensuite l'enregistrement des données brutes toutes les secondes (1 Hz) sur votre pivot et votre mobile pour le post-traitement des coordonnées du pivot et 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 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.

Si la longueur de votre ligne de base commence à devenir significative (plus d'1 kilomètre), l'Équation 1 (de la fiche « Le positionnement cinématique post-traité à l'aide d'un réseau de stations GNSS permanent (mode NPPK) ») permet de donner une idée de la durée à respecter pour recueillir le volume de données nécessaire à la fixation des ambiguïtés entières.

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.

Notez alors que l'intérêt de cette méthode relativement au NPPK est de réduire le volume minimum de données nécessaires à la fixation des ambiguïtés entières, et donc d'augmenter significativement la productivité du chantier, d'autant plus si ce dernier n'est pas en zone parfaitement dégagée et que de nombreuses pertes de poursuite sont à envisager.

- 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 la fiche sur le 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.

B) 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 (quatre coins et centre du rectangle englobant l'ensemble des points levés) pour un levé surfacique :

a) Contrôle relatif :

- i. 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 au point 5) b) ci-dessus. Plus le nombre de déterminations indépendantes du même point sera important plus la fiabilité de ce point sera avérée.

Conformément à l'explication donnée partie III/A) page 15, 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, 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 à la fiche sur le filtrage et moyenne de positions NRTK en généralisant le terme « NRTK » au concept de « positions obtenues sur quelques époques ».

- ii. 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 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 PPK 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 effectuez si possible le calcul de post-traitement avec des stations de référence différentes de celles utilisées pour la mise en référence du pivot.

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 station conformément aux prérequis.

3. Si votre lever 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 conséquence avant de saisir ses coordonnées RTK lors de votre mise en station puis respectez le reste de la procédure à compter de l'étape 4.
4. La redétermination d'un certain nombre de points de votre levé est également envisageable en utilisant un autre pivot complètement indépendant.

II/ Phase bureau

A) Positionnement du pivot

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.

Dans le cas où vous auriez la possibilité de vous mettre sur un point préalablement connu en coordonnées, 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.

B) Calcul de la chaîne cinématique

1. Exportez ensuite votre lever afin d'obtenir la liste des points avec leurs différents attributs (DOPs, SNRs, etc.) afin d'effectuer un filtrage multicritères et s'assurer, outre les précautions prises sur le terrain, de la qualité de votre lever.
2. Calculez ensuite votre chaîne cinématique à partir de ce pivot.
3. Pour tous les points déterminés au moins deux fois, vérifiez la moyenne obtenue ainsi que les écarts de chaque point à la moyenne.
4. Pour tous les points de contrôle relatif 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 tel qu'expliqué dans la fiche sur le filtrage et moyenne de position NRTK en généralisant le terme « NRTK » au concept de « positions obtenues sur quelques époques ».
5. Pour tous les points de contrôle absolu stationnés et afin de contrôler l'exactitude de votre lever, vérifiez les écarts entre les coordonnées obtenues en temps différé et les coordonnées des points de contrôle telles que publiées sur les fiches géodésiques ou les coordonnées obtenues par la méthode statique au moins deux fois plus précise que l'estimation de la classe de précision de votre lever NPPK (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003).

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

Objectifs

Etre capable de déterminer par méthodes GNSS les coordonnées précises (classe de précision 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.

Prérequis

Pour atteindre cet objectif, il est impératif de se référer aux prérequis sur les observations GNSS de qualité.

Applications

- Effectuer le contrôle absolu d'un lever obtenu par méthodes topographiques tierces (GNSS cinématique de type RTK, NRTK, NPPK, PPK, station optique).
- Mettre en place des points d'appui pour 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.

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.

Niveau de difficulté

2

Principe de la méthode

Le mobile calcule la ligne de base le séparant d'une station de référence du réseau en recevant 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 entourant le mobile. 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 méthode va se baser sur la répétition de la mesure permettant d'obtenir un nombre important de mesures indépendantes et d'en traiter la répartition statistique, la moyenne de positions permettant de fiabiliser le résultat.

Après avoir détecté les éventuelles fautes de mesures, la moyenne des coordonnées obtenues permettra de déterminer le jeu de coordonnées du point stationné, l'écart à la moyenne permettant de juger de la fiabilité du point.

Deux variantes de la méthode seront développées en fonction de la charge de travail statistique laissée à l'utilisateur.

*

I/ Préparation de la mission

A) Problèmes de télécommunications

Cette méthode de travail nécessite la réception de données provenant des serveurs centraux des réseaux temps réel, acheminées par communication GPRS (2.5G), EDGE (2.75G) ou UMTS (3G) jusqu'à l'utilisateur.

Afin de préparer sa mission, il est donc indispensable de connaître la couverture 2G du chantier à réaliser pour qu'à minima la transmission GPRS puisse être assurée, la couverture GPRS étant identique à la couverture 2G du territoire (http://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-bilan-couverture-QoS-2g-3g-nov2012.pdf). Cette consultation pourra être réalisée sur le site de l'ARCEP (<http://www.arcep.fr/index.php?id=11557>), notamment en utilisant l'atlas « zoomable » par département, daté du 1^{er} juillet 2012.

Le rapport d'analyse sur la couverture et la qualité de service mobiles en France métropolitaine précise par ailleurs les chiffres suivants : « Orange France est l'opérateur disposant de la couverture la plus étendue. Celle-ci correspond à 99,9% de la population et 97,3% de la surface du territoire. SFR couvre 99,6% de la population et 93,3% de la surface du territoire. Enfin, Bouygues Telecom couvre 99,1% de la population et 89,6% de la surface du territoire. ... En termes de surface, 82 départements sont couverts à plus de 95% par Orange France, et 87 départements sont couverts à plus de 90%. En ce qui concerne SFR, 77 départements sur 96 sont couverts à plus de 90% en termes de surface, et 87 départements sont couverts à plus de 85%. Enfin, pour Bouygues Telecom, 62 départements sur 96 sont couverts à plus de 90% en termes de surface, et 72 départements sont couverts à plus de 85%. » (http://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/rapport-bilan-couverture-QoS-2g-3g-nov2012.pdf).

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 envoyer à l'infrastructure une position en mode naturel afin de recevoir en retour les corrections correspondant à sa zone de travail.

Les réseaux Internet mobiles permettent 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 01/09/12).

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, « *Prévision* » 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 télécoms inhérentes à l'utilisation du réseau GPRS-EDGE.

Pour faire face à des coupures plus importantes de la liaison télécom, mais aussi dans un but de contrôle et de traçabilité, enregistrez les données brutes en statique comme en itinérant afin de pouvoir recalculer en post-traitement (NPPK) l'ensemble de votre chaîne cinématique à partir des données observées sur les stations de votre opérateur réseau et/ou celles du RGP.

B) Vérification du matériel

Assurez-vous conformément aux prérequis que votre matériel est apte à être utilisé dans le cadre d'un lever de précision (qualité de la bulle de votre canne, longueur de la canne, grilles de conversion altimétrique et modèles d'antennes à jour, version du firmware de vos appareils).

II/ Phase terrain

A) Acquisition des points

1. Placez-vous sur un point bien dégagé.
2. Allumez votre récepteur et obtenez une position en mode « naturel ».
3. Vérifiez l'état de la connexion GPRS.
4. 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 partie I/A) 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 %.
5. 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). Vous pouvez également demander à votre système une nouvelle initialisation si ce dernier le permet dans la mesure où votre mobile, fixé à un bipode ou en position sur un trépied n'est pas facilement retournable.

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.

6. Effectuez votre lever en respectant les consignes suivantes, sans oublier l'ensemble des bonnes pratiques décrites dans les prérequis.
 - a) 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.

Mesurez 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 qui 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, les constellations GPS et GLONASS se répétant de jour en jour aux mêmes heures avec respectivement 4 et 90 minutes d'avance conformément à l'explication donnée partie III/A) page 15, au risque de se retrouver avec des DOPs similaires, mêmes 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 par le point. La répartition statistique 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 sur 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 de la sorte pour 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. Ces deux déterminations devant être réalisées avec au moins 20 à 30 minutes d'intervalle.

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 conformément à l'explication donnée partie III/A) page 15, au risque de se retrouver avec des DOPs similaires, mêmes si les conditions atmosphériques ont changé.

- 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 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.

- c) Vérifiez régulièrement la qualité du lien temps réel en suivant l'âge de la dernière correction reçue (cf. point 4 ci-dessus).
- d) 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 au point 5 ci-dessus. Vérifiez que les coordonnées fournies par votre système sont cohérentes avec les dernières coordonnées calculées avec l'initialisation précédente (contrôle de l'écart en position). Ce contrôle vous permettra d'assurer la cohérence interne de votre lever.

B) Moyens de contrôle

1. Contrôle relatif :

- a) A toutes fins utiles, enregistrez les données brutes en statique comme en itinérant afin de pouvoir recalculer en post-traitement l'ensemble de votre chaîne cinématique (NPPK) ou les coordonnées du point en mode statique (statique multi-station) à partir des données observées sur les stations de votre opérateur réseau et/ou celles du RGP.
- b) Si vous disposez d'une station optique, procédez à des contrôles de distances et d'azimuts (dans cet ordre de préférence).

2. Contrôle absolu :

Stationnez tous les points connus en coordonnées (RBF, NGF, 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 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 effectuez si possible le calcul de post-traitement avec des stations de référence différentes de celles utilisées pour le calcul NRTK.

III/ Phase bureau

1. 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.) afin d'effectuer un filtrage multicritères et vous assurer, outre les précautions prises sur le terrain, de la qualité de votre lever.
2. Affichez les points levés et vérifiez qu'ils forment bien dans le plan un nuage homogène de forme « pseudo circulaire » tel que figuré ci-dessous :

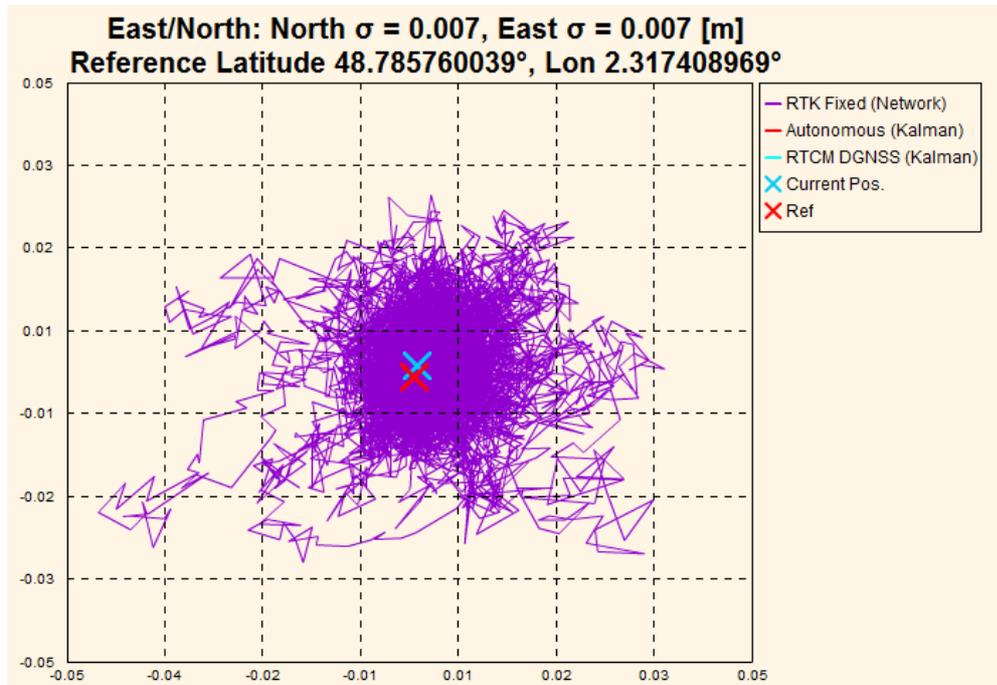


Figure 8 : Répartition planimétrique d'un lever NRTK de 8640 points (24 heures).

3. Pour le cas évolué de la méthode, considérez chacune des composantes Est, Nord et Altitude comme autant de variables aléatoires au calcul des paramètres de statistique descriptive suivants :

a) 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 valeur considéré.

L'avantage de la médiane est qu'elle n'est pas sensible aux valeurs extrêmes ou aberrantes, contrairement à la moyenne.

b) 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 probabilité, 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 chance de suivre une loi de probabilité dont la distribution est « normale » ou « gaussienne » et 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 en raison 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, on peut considérer que la variable aléatoire va suivre une loi de probabilité dont la distribution est gaussienne.

- c) 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.

- d) 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 1000-Quantile correspond à chacune des 999 valeurs qui divisent les données triées en 1000 parts égales, de sorte que chaque partie représente 1/1000 de l'échantillon.

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

Nous travaillerons sur les 1000-Quantiles appelés milles. Le 25^{ième} mille que nous noterons $Q_{2.5}$ sépare les 2,5% inférieurs des données et le 975^{ième} mille que nous noterons $Q_{97.5}$ sépare les 97.5% inférieurs des données.

Les quantiles sont des mesures utiles parce qu'elles sont moins 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 situe 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.

- e) Déviations 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 9 à 11.

Eliminez 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. La densité de probabilité une fois tracée forme une « courbe de Gauss » avec sa forme « en cloche » si caractéristique, comme nous venons de l'évoquer, d'un grand nombre de mesures d'un phénomène. Le théorème central limite, parfaitement adapté aux mesures GNSS, stipule en effet 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.

Pour ce faire :

- i. Calculez les valeurs associées à une distribution normale : A partir de l'écart type non biaisé de la population que nous noterons σ , calculez l'erreur due à la dispersion statistique en présupposant que l'échantillon suive une loi de probabilité dont la répartition est normale. Avec une telle loi,
 - 68% des points sont situés dans une plage $[\bar{X} - \sigma, \bar{X} + \sigma]$
 - 95% des points sont situés dans une plage $[\bar{X} - 1.960 \sigma, \bar{X} + 1.960 \sigma]$
 - 99% des points sont situés dans une plage $[\bar{X} - 2.576 \sigma, \bar{X} + 2.576 \sigma]$
- ii. 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 sujet à la taille de l'échantillon), vérifiez « à l'œil » que la densité de probabilité réelle de l'échantillon statistique et sa densité de répartition 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). Un exemple d'utilisation de cette méthode est représenté sur les figures suivantes avec calcul de l'écart aux coordonnées post-traitées « multi-station » suivant les recommandations de la fiche afférente.

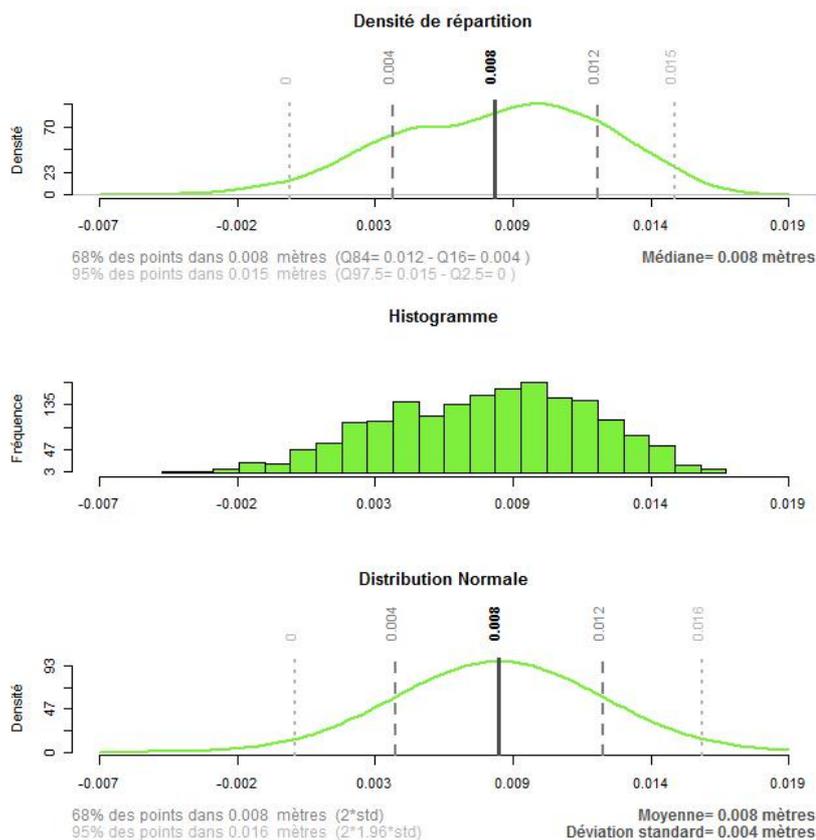


Figure 9 : Statistique descriptive de l'écart d'implantation sur la composante Est RGF 93 projection LAMBERT 93 d'un lever NRTK de 1800 points (30 minutes). En assimilant la répartition statistique à une distribution normale, l'exactitude est de 8 mm avec une précision à un sigma (écart type) de 4 mm.

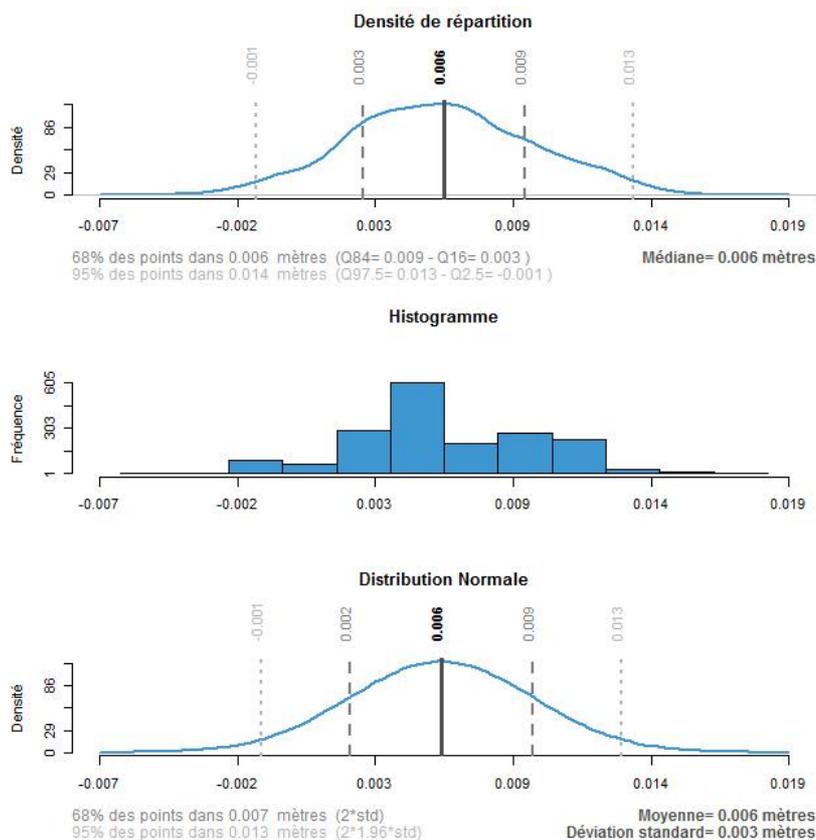


Figure 10 : Statistique descriptive de l'écart d'implantation sur la composante Nord RGF 93 projection LAMBERT 93 d'un lever NRTK de 1800 points (30 minutes). En assimilant la répartition statistique à une distribution normale, l'exactitude est de 6 mm avec une précision à un sigma (écart type) de 3 mm.

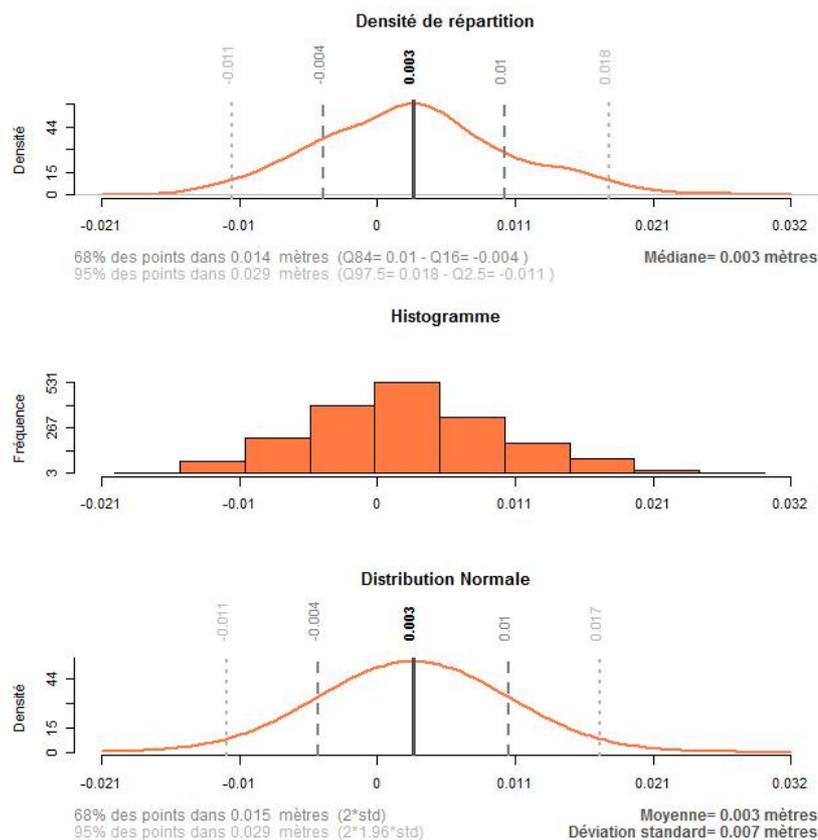


Figure 11 : Statistique descriptive de l'écart d'implantation sur la composante Altitude NGF IGN69 d'un lever NRTK de 1800 points (30 minutes). En assimilant la répartition statistique à une distribution normale, l'exactitude est de 3 mm avec une précision à un sigma (écart type) de 7 mm.

4. Pour tous les points de contrôle absolus stationnés et afin de contrôler l'exactitude de votre lever, vérifiez les écarts entre les coordonnées obtenues par moyenne de positions 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 NRTK (conformément aux modalités de l'arrêté du 16 septembre 2003)).

Le positionnement statique selon la méthode du « pivot central »

Objectif

Etre capable de déterminer par méthodes GNSS les coordonnées précises (classe de précision entre 2 et 3 cm à 1σ), 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.

Prérequis

Pour atteindre cet objectif, il est impératif de se référer aux prérequis sur la réalisation d'observations GNSS de qualité.

Applications

- Effectuer le contrôle absolu d'un lever obtenu par méthodes topographiques tierces (GNSS cinématiques de type RTK, NRTK, NPPK, PPK, Station optique).
- Mettre en référence une station de référence pseudo-permanente (base ou pivot) afin de réaliser un lever suivant la méthode RTK ou PPK « pivot libre » (se référer aux deux fiches afférentes du document).
- Mettre en place des points d'appui pour 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 bifréquence, équipés d'un trépied ou a minima d'un bipode permettant de les laisser en place sur le point stationné de manière suffisamment stable pendant plusieurs dizaines de minutes.
- Un logiciel de post-traitement permettant le calcul de lignes de base GPS par multi-différentiation installé sur un poste informatique pouvant se connecter à Internet. Cette connexion permettra la récupération (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 être 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).

Niveau de difficulté

3

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 proche 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 (stations qui encadrent le chantier). Une fois ces coordonnées déterminées nous pouvons calculer les lignes de base entre le « mobile » et le « pivot » par post-traitement (au bureau).

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 des choses (stations RGP à moins de 100 km les unes des autres au 01/01/13), 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 (cette méthode peut par exemple être employée dans les agglomérations équipées). En milieu rural, l'utilisation d'un pivot libre 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.

*

I/ Planification de la mission

A) 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 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 sera également requise pour effectuer un contrôle des travaux (les coordonnées de cette station ne seront pas fixées lors de la phase d'ajustement). En effet en comparant les coordonnées calculées pour ce point avec les coordonnées publiées nous pourrions vérifier la qualité de mise en référence du pivot.

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.

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 déterminées (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 01/01/13). 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/>). Le cas échéant, vous pouvez également utiliser les stations permanentes de votre opérateur temps réel.

B) 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.

1) Mesure du pivot central

Vous ne devez prendre aucun risque quant à la détermination du pivot 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.

2) Mesure des points du canevas

L'Équation 1 page 34 permet de donner une idée de la durée à respecter lorsque vous stationnez sur un point du canevas. On observe que 10 minutes représentent le temps minimum d'acquisition requis. On privilégiera néanmoins des durées d'observation d'environ 20 minutes afin de limiter les erreurs liées à la propagation des signaux (multitrajets par exemple, on estime que le temps moyen nécessaire à l'identification d'un multi trajet est d'environ 20 minutes).

II/ Phase terrain

A) 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 permettant la réalisation d'observations GNSS de qualité conformément aux prérequis.

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.

B) 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 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.



Figure 12 : Exemple d'installation d'un récepteur GNSS en mode statique.

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.

III/ Phase bureau

A) Positionnement du pivot central en 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.

Pour ce faire, vous pouvez vous référer à la fiche sur le positionnement statique « multi-stations ».

B) Choix des lignes de base

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. Avec la méthode du pivot central il suffit donc de former des lignes de base « en étoile » autour du pivot.

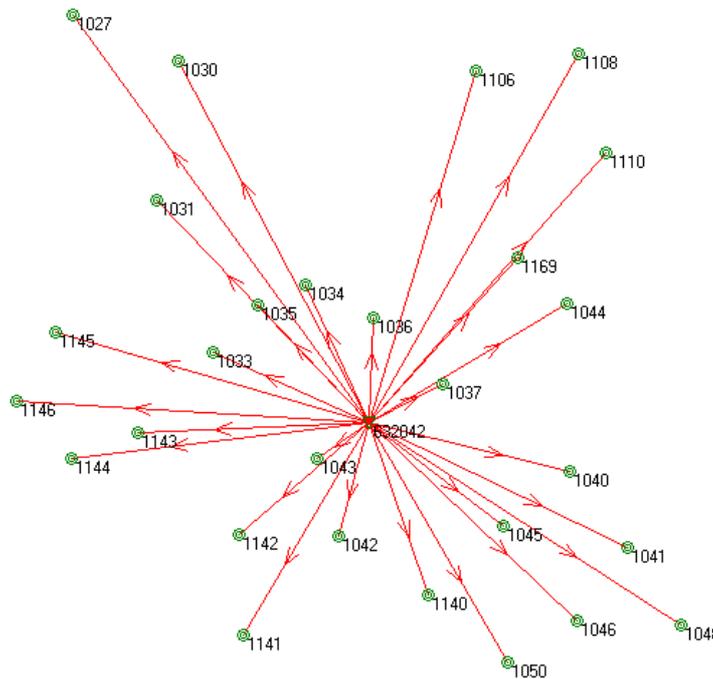


Figure 13 : Construction des lignes de base dans la méthode du pivot central.

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

D) 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 artéfacts 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 disposer de mesures indépendantes est un prérequis de base pour tous les traitements statistiques réalisés lors du calcul des positions.

E) 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 ces décalages s'annulent par doubles différences.

F) 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 inter fréquences 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).

Les lignes de base formées étant courtes par la nature même de la méthode (inférieures à 15 km), 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 « iono free » L3 (encore parfois notée LC).

G) 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, vous pouvez vous référer à la partie III/F) page 62.

H) 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, vous pouvez vous référer à la partie III/G) et III/H) page 62.

I) 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 ligne de base 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 définis dans les prérequis, 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 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.

J) Moyens de contrôle

1. Contrôle relatif :
 - a) Vous calculez une seule ligne de base pour chaque point, à savoir la ligne entre le point 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. Laissez s'écouler 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 à l'explication donnée partie III/A) page 15, 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.

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

2. Contrôle absolu :

Stationnez tous les points connus en coordonnées (RBF, NGF, etc.) 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).

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. 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 effectuez si possible le calcul de post-traitement avec des stations de référence différentes de celles utilisées pour mettre en référence le pivot central.

Le positionnement statique « multi-stations »

Objectif

Etre capable de déterminer par méthodes GNSS les coordonnées précises, voire extrêmement précises (pouvant aller jusqu'à une classe de précision infra-centimétrique en prenant certaines précautions et avec des logiciels bien particuliers) d'un point ou des quelques points stationnés de plusieurs dizaines de minutes à quelques heures afin de matérialiser très exactement la référence nationale sur un chantier.

Prérequis

Pour atteindre cet objectif, il est impératif de se référer aux prérequis sur la réalisation d'observations GNSS de qualité.

Applications

- Effectuez le contrôle absolu d'un lever obtenu par méthodes topographiques tierces (GNSS cinématiques de type RTK, NRTK, NPPK, PPK, station optique).
- Mettre en référence une station de référence pseudo-permanente (ou base ou pivot) afin de réaliser un lever suivant la méthode RTK ou PPK « pivot libre » (se référer aux deux fiches afférentes pour de plus amples informations).
- Mettre en place des points d'appui pour un canevas local. Mise en référence d'un pivot RTK ou d'un lever obtenu par méthodes optiques (topométriques) ou photogrammétriques.
- Suivre très précisément l'évolution des coordonnées d'un point.

Matériels et logiciels nécessaires

- Un récepteur GNSS permettant de mesurer la phase, de préférence bifréquence, 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 à plusieurs heures.
- Un logiciel de post-traitement permettant 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.).

Niveau de difficulté

4

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 stations de référence.

*

I/ Planification de la mission

A) Détermination des stations de référence à utiliser

Choisissez au moins trois stations de référence plaçant le mobile au barycentre d'un triangle le plus équilatéral possible afin de calculer la position du mobile par intersection de ces trois lignes de base. Les erreurs portées par chaque ligne de base seront alors réparties sur le mobile à l'aide de la méthode des moindres carrés.

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 le calcul des coordonnées du 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 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 sauf à prendre 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 déterminées (système ETRS89 et réalisations associées ETRF) permettant une transformation fiable et précise.

Une quatrième station de référence à proximité du mobile pour laquelle les coordonnées ne seront pas fixées lors de la phase d'ajustement pourra servir de contrôle en comparant les coordonnées issues du calcul à celles publiées pour cette station.

A noter que cette stratégie à 4 stations de référence permet également, outre le fait de pouvoir contrôler les résultats obtenus, de s'affranchir de la panne d'une station permanente (voire de 2 stations permanentes si on accepte de calculer les coordonnées du mobile par intersection de 2 lignes de base seulement) pendant la réalisation de votre lever.

Le RGP apporte une couverture dense sur le territoire français (plus de 300 stations au 01/01/13). 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/>). Le cas échéant, vous pouvez également utiliser les stations permanentes de votre opérateur temps réel.

1) Cas à 3 stations « en étoile »

Une première variante, la plus simple d'accès, consiste à calculer les lignes de base joignant les 3 stations au mobile. On peut alors procéder au calcul de compensation (par la méthode des moindres carrés) de notre réseau. Nous réaliserons ici directement un ajustement contraint en sautant les étapes d'ajustement libre (III/J), de fermetures de boucles (III/K) et d'ajustement à contraintes minimales (III/L).

2) Cas à 3 stations « en réseau »

Une seconde variante consiste à calculer :

- Les lignes de base joignant les 3 stations au mobile.
- Les lignes de base reliant les stations permanentes entre elles. Ces lignes de base nous permettent de définir l'enveloppe convexe de la figure.

La triangulation réalisée répond alors aux critères de Delaunay (formation des triangles les plus équilatéraux possibles permettant de couvrir l'espace considéré).

Il est à noter que ce cas de figure peut être complexifié par l'utilisation de stations permanentes supplémentaires (1, 2 ou 3 stations complémentaires). Ainsi nous disposerons de points de contrôle tout en nous affranchissant de la panne d'une des stations initialement retenues.

B) 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 1 page 34 permet de donner une idée de la durée à respecter lorsque vous stationnez sur un point du canevas. On observe que 10 minutes représentent le temps minimum d'acquisition requis. On privilégiera néanmoins des durées d'observation d'environ 20 minutes afin de limiter les erreurs liées à la propagation des signaux (multitrajets par exemple, on estime que le temps moyen nécessaire à l'identification d'un multi trajet est d'environ 20 minutes).

II/ Phase terrain

A) Choix de l'emplacement et monumentation du point

Cette phase de planification réalisée, les points stationnés avec votre mobile devront être stables, bien dégagés et permettre la réalisation d'observations GNSS de qualité conformément aux prérequis en la matière.

Une fois l'emplacement choisi, matérialisez au sol le point à stationner à l'aide d'un repère stable (clou, borne, etc.).

B) Installation des équipements

Procédez ensuite à l'installation de l'équipement GNSS 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'équipementier choisi, soit de manière inclinée à l'aide de la règle fournie soit orthogonalement à l'aide du mètre à ruban.

N'oubliez pas de noter 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.

C) Contrôle de la cohérence des données

Afin de contrôler la cohérence des mesures, il peut être intéressant de vérifier sur le terrain que toutes les lignes de base sont calculables. En effet, dans le cas contraire une réoccupation sera nécessaire et pourra engendrer des coûts de ré-intervention terrain importants.

Ce contrôle ayant uniquement pour but de vérifier la cohérence des données ne doit en aucun cas être validé comme calcul définitif. En effet, ce processus n'assure pas le principe d'indépendance linéaire au sein du réseau que nous expliciterons ultérieurement.

Pour ce faire, téléchargez l'ensemble des observations et données externes nécessaires (éphémérides précises, modèles ionosphériques, etc.) et procédez au calcul de l'ensemble des lignes de base.

Une fois le contrôle de cohérence des données effectué, supprimez toutes les lignes de base précédemment calculées et établissez le réseau définitif.

III/ Phase bureau

A) Choix des lignes de base

De retour au bureau, sélectionnez les lignes de base 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 sur le site du RGP (<http://rgp.ign.fr/DONNEES/diffusion/>) les observations des stations de référence utilisées. Ces données vous seront indispensables pour le calcul des lignes de base « station permanente – mobile » et/ou « station permanente – station permanente ».

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

C) 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.

D) 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 ces décalages s'annulent par doubles différences.

E) 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 interféquences 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.

F) De l'utilité d'utiliser des éphémérides précises

Les éphémérides radiodiffusées sont transmises dans le message de navigation des satellites. Elles donnent la position avec une précision de l'ordre de 100 cm en temps réel pour chaque satellite ainsi que le décalage de l'horloge du satellite dans le temps de la constellation considérée à 5 ns, soit une erreur de pseudo distance de 1,5 m. Avec un rayon orbital de l'ordre de 20000 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 prédites, les ultra-rapides observées, les rapides et les finales tel que décrit sur cette page : <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>.

Elles proposent 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 pseudo-distance de 4,5 cm. 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. Néanmoins, ces éphémérides ne contiennent pas la position du point de référence de l'antenne émettant le signal (ARP pour Antenna Reference Point) par rapport au centre de masse du satellite car les paramètres d'orientation du satellite sont inconnus. L'intérêt de ces éphémérides réside donc principalement dans l'amélioration de la qualité du temps fourni par les horloges.

Ainsi, afin d'obtenir la meilleure précision possible pour la détermination des coordonnées du pivot, il est recommandé d'utiliser les éphémérides précises téléchargeables sur le site du RGP à l'adresse suivante : <ftp://rgpdata.ign.fr/pub/products/ephemerides/>.

G) De l'utilité d'utiliser un modèle ionosphérique

Il est possible d'utiliser un modèle ionosphérique précis pour ce type de calcul car on cherche à obtenir la précision « ultime ». En effet, les effets ionosphériques 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 <http://rgp.ign.fr/PRODUITS/iono.php>.

H) De l'utilité d'utiliser un modèle troposphérique

Il est possible d'utiliser un modèle troposphérique précis pour ce type de calcul car on cherche à obtenir la précision « ultime ». En effet, les effets troposphériques ne peuvent être 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 <http://rgp.ign.fr/PRODUITS/tropo.php>.

A défaut de pouvoir utiliser ces modèles numériques, les logiciels commerciaux utilisent généralement 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.).

I) 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 ligne 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 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 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.

J) Ajustement libre

Vous venez à cette étape de calculer un certain nombre de lignes de base vous permettant d'accéder aux jeux de coordonnées des points uniquement à partir des observations. Aucune coordonnée n'est donc fixée à cette étape.

Vous allez procéder maintenant 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 ne sont pas prises en compte dans le rattachement, d'où la notion d'ajustement libre.

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 »).

Un rapport d'ajustement libre est fourni par le logiciel utilisé afin de présenter les points compensés avec leurs écarts types dans un système local en projection, ce système étant basé sur une projection cartographique standard dont l'origine coïncide avec le premier point de la liste interne de stations. Il est alors important de noter que ce point n'est utilisé que pour visualiser le réseau et n'a aucune signification pour la compensation.

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 est doit être le plus proche possible de 1.

Vous avez alors :

$$Var_{référence} = \frac{Var_{observée}}{Var_{estimée}}$$

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 permet donc d'estimer avec quel degré de succès les erreurs d'ajustement a priori (pré-ajustement) correspondent aux erreurs a posteriori (post-ajustement).

K) Fermeture de boucles

Cette première grande étape de validation des observations se termine par l'analyse de la fermeture des boucles joignant l'ensemble des points de votre réseau. Cette étape qui n'est réalisable que si les lignes de base retenues pour le calcul forment des triangles permet de juger la cohérence des coordonnées calculées.

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 (principe du cheminement GPS).

Les résultats de fermeture de boucles sont alors 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.

L) Ajustement à contraintes minimales

La figure géométrique formée par les vecteurs de votre réseau va maintenant être « translaturée » sur un seul et unique point de référence afin d'évaluer la correspondance de votre solution avec le réseau géodésique de référence.

Par comparaison des coordonnées obtenues (pour les stations permanentes) avec les coordonnées publiées vous pourrez directement analyser la qualité de vos travaux.

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.

L'analyse de ce tableau permet de se faire une idée assez juste des points que vous pourrez utiliser comme points de contrôle dans la prochaine étape.

M) Ajustement contraint

Cette étape réalisée, vous allez 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 vous faut ainsi un minimum de 3 points (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 idéalement égale à 1 et traduisant l'importance de la déformation à apporter à la figure géométrique formée par les différentes lignes de bases pour « l'arrimer » aux différents points de contrôle.

IV/ Les moyens de contrôle envisageables

A) Contrôle interne ou relatif

1) Déterminations indépendantes

Procédez à plusieurs déterminations indépendantes. Laissez s'écouler 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 à l'explication donnée partie III/A) page 15, 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.

Outre le fait d'utiliser des observations indépendantes, le fait d'utiliser d'autres stations de référence que celle ayant servi à la détermination initiale 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'idée, 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 utilisées (ionosphère et troposphère)).

1) Contrôles par méthodes optiques

Si vous disposez d'une station optique, procédez à des contrôles de distances et d'azimuts (dans cet ordre de préférence) entre plusieurs points déterminés suivant cette méthode statique « multi-station ».

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

Les moyens suivants permettent, du moins coûteux au plus coûteux, 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 précisé dans la partie I/A) ci-dessus, 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 de capteurs sur des points de référence pour avoir des points de contrôle

Dans le même ordre d'idée et si aucune station du RGP ne pouvait convenir comme point de contrôle (station trop éloignée des points à stationner par exemple), l'utilisateur pourra mettre en place un ou plusieurs autres capteurs GNSS sur des points connus en coordonnées à proximité du chantier (RBF, NGF, etc.) afin de disposer d'autant de points de contrôle.

3) Détermination des points levés par PPP

D'autres observations sur le même point peuvent enfin être traitées par une méthode de calcul complètement indépendante comme le Precise Point Positioning (PPP).

Cette indication est donnée en tant qu'information dans la mesure où aucun logiciel commercial ne permet des calculs PPP « état de l'art » avec notamment prise en compte de la surcharge océanique et des modèles fins 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 encore un peu plus la méthode à un public d'utilisateurs « avertis ».

Check-lists

Check-list – Mode NRTK

Planification de la mission

- Vérifier la couverture télécom du chantier (cf. fiche détaillée)
- Vérifier la conformité du matériel (cf. prérequis)
- Vérifier le bon fonctionnement du réseau de stations GNSS permanent utilisé et notamment des stations proches du chantier

Phase terrain

- Se placer sur un point dégagé
- Allumer le récepteur et obtenir une position en mode naturel
- Vérifier l'état de la connexion GPRS
- Auditer la qualité du flux en s'assurant d'un âge de corrections inférieur à 3s (cf. fiche détaillée)
- S'assurer que le système fixe les ambiguïtés entières
- Contrôler cette fixation en procédant à plusieurs initialisations par renversement de canne (cf. fiche détaillée) ou en utilisant une option équivalente proposée par les récepteurs
- Centrer, buller, vérifier la hauteur d'antenne et sa stabilité (cf. prérequis)
- Effectuer les travaux de mesure en s'assurant des conditions de mesure GNSS : nombre suffisant de satellites, GDOP < 3 – 4, SNR > 50 (sur L1) ou 40 (sur L2)
- En cas de perte de la solution de positionnement, revenir à l'étape de fixation des ambiguïtés et lever de nouveau le dernier point
- Par sécurité, enregistrer les données brutes pour un éventuel recalcul de la chaîne cinématique en post-traitement
- Réoccuper le premier point en fin de lever
- Réoccuper au moins une fois les points importants au bout de 20 minutes au moins
- Occupation de tous les points connus en coordonnées (RBF, NGF)

Phase bureau

- Effectuer un filtrage multicritères afin d'assurer la qualité du lever
- Vérifier la cohérence interne du lever
- Vérifier la cohérence absolue du lever

Check-list – Mode RTK “pivot libre”

Planification de la mission

- Vérifier la couverture télécom du chantier si la liaison entre le pivot et le mobile se fait par téléphone (cf. fiche détaillée)
- Vérifier la conformité du matériel (cf. prérequis)

Phase terrain

- Se placer sur un point dégagé, stable, sécurisé, pour mettre le pivot en station (cf. prérequis)
- Matérialiser le point au sol
- Une fois le pivot mis en station, mesurer la hauteur d’antenne
 - Installer son moyen de communication avec le mobile (connexion radio ou télécom)
 - Allumer le récepteur du pivot et obtenir une position en mode naturel. La fixer comme position connue en procédant à une mise en station “ICI” (ou HERE) (cf. fiche détaillée) ou entrer les coordonnées du point si celui-ci est connu.
 - Démarrer l’enregistrement des données brutes après avoir choisi la période d’acquisition (cf. fiche détaillée)
 - Allumer le mobile et vérifier l’état de la connexion avec le pivot
 - Auditer la qualité du flux en s’assurant d’un âge de corrections régulier de 1 seconde (cf. fiche détaillée)
 - S’assurer que le système fixe les ambiguïtés entières
 - Contrôler cette fixation en procédant à plusieurs initialisations par renversement de canne (cf. fiche détaillée) et comparer les coordonnées du premier point à lever obtenues après chaque renversement
 - Centrer, buller, vérifier la hauteur d’antenne et sa stabilité (cf. prérequis)
 - Effectuer les travaux de mesure en s’assurant des conditions de mesure GNSS : nombre suffisant de satellites, GDOP < 3 – 4, SNR > 50 (sur L1) ou 40 (sur L2)
 - En cas de perte de la solution de positionnement, revenir à l’étape de fixation des ambiguïtés et lever de nouveau le dernier point
 - Par sécurité, enregistrer les données brutes pour un éventuel recalcul de la chaîne cinématique en post-traitement
 - Réoccuper le premier point en fin de lever (cf. fiche contrôle)
 - Réoccuper au moins une fois les points importants au bout de 20 minutes au moins (cf. fiche contrôle)
 - Occupation de tous les points connus en coordonnées (RBF, NGF) (cf. fiche contrôle)

Phase bureau

- Déterminer les coordonnées RGF93 du pivot
- Effectuer un filtrage multicritères afin d’assurer la qualité du lever
- Calculer la chaîne cinématique
- Vérifier la cohérence interne et absolue du réseau

Check-list – Mode NPPK

Planification de la mission

- Vérifier la conformité du matériel (cf. prérequis)

Phase terrain

- Allumer le mobile et se placer sur un point dégagé
- Démarrer une première session d'initialisation (8 minutes sans sauts de cycles pour 6 satellites étant une valeur minimale recommandée assez répandue) pour la fixation ultérieure des ambiguïtés entières (cf. fiche détaillée)
- Centrer, buller, vérifier la hauteur d'antenne et sa stabilité (cf. prérequis)
- Effectuer les travaux de mesure en s'assurant des conditions de mesure GNSS : nombre suffisant de satellites, GDOP < 3 – 4, SNR > 50 (sur L1) ou 40 (sur L2)
- En cas d'avertissement de coupure par le récepteur ou en cas de lever dans un lieu propice aux coupures de signal (près des arbres, des bâtiments, etc.), refaire une session d'initialisation
- Réoccuper le premier point en fin de lever
- Réoccuper au moins une fois les points importants au bout de 20 minutes au moins (cf. fiche contrôle)
- Occupation de tous les points connus en coordonnées (RBF, NGF) (cf. fiche contrôle)

Phase bureau

- Effectuer un filtrage multicritères afin d'assurer la qualité du lever
- Calculer la chaîne cinématique à partir des données du RGP ou d'un opérateur temps réel
- Vérifier la cohérence interne et absolue du lever

Check-list – Mode PPK pivot libre

Planification de la mission

- Vérifier la conformité du matériel (cf. prérequis)

Phase terrain

- Se placer sur un point dégagé, stable, sécurisé, pour mettre le pivot en station (cf. prérequis)
- Une fois le pivot mis en station, mesurer la hauteur d'antenne
- Démarrer l'enregistrement des données brutes après avoir choisi la période d'acquisition (cf. fiche détaillée)
- Allumer le mobile et se placer sur un point dégagé
- Démarrer une première session d'initialisation (8 minutes sans sauts de cycles pour 6 satellites étant une valeur minimale recommandée assez répandue) pour la fixation ultérieure des ambiguïtés entières (cf. fiche détaillée)
- Centrer, buller, vérifier la hauteur d'antenne et sa stabilité (cf. prérequis)
- Effectuer les travaux de mesure en s'assurant des conditions de mesure GNSS : nombre suffisant de satellites, GDOP < 3 – 4, SNR > 50 (sur L1) ou 40 (sur L2)
- En cas d'avertissement de coupure par le récepteur ou en cas de lever dans un lieu propice aux coupures de signal (près des arbres, des bâtiments, etc.), refaire une session d'initialisation
- Réoccuper le premier point en fin de lever
- Réoccuper au moins une fois les points importants au bout de 20 minutes au moins
- Occupation de tous les points connus en coordonnées (RBF, NGF)

Phase bureau

- Déterminer les coordonnées RGF93 du pivot
- Effectuer un filtrage multicritères afin d'assurer la qualité du lever
- Calculer la chaîne cinématique
- Vérifier la cohérence interne et absolue du lever

Check-list – Mode NRTK moyenné

Planification de la mission

- Vérifier la couverture télécom du chantier (cf. fiche détaillée)
- Vérifier la conformité du matériel (cf. prérequis)
- Vérifier le bon fonctionnement du réseau de stations GNSS permanent utilisé et notamment des stations proches du chantier

Phase terrain

- Se placer sur un point dégagé
- Allumer le récepteur et obtenir une position en mode naturel
- Vérifier l'état de la connexion GPRS
- Auditer la qualité du flux en s'assurant d'un âge de corrections inférieur à 3s (cf. fiche détaillée)
- S'assurer que le système fixe les ambiguïtés entières
- Contrôler cette fixation en procédant à plusieurs initialisations par renversement de canne (cf. fiche détaillée)
- Centrer, buller, vérifier la hauteur d'antenne et sa stabilité (cf. prérequis)
- Effectuer les travaux de mesure en s'assurant des conditions de mesure GNSS : nombre suffisant de satellites, GDOP < 3 – 4, SNR > 50 (sur L1) ou 40 (sur L2). Occuper le point pendant au moins 1 minute en utilisant un bipode ou un autre moyen de stabilisation.
- Par sécurité, enregistrer les données brutes pour un éventuel recalcul de la chaîne cinématique en post-traitement
- Réoccuper les points au moins une fois au bout de 20 minutes au moins
- Occupation de tous les points connus en coordonnées (RBF, NGF)

Phase bureau

- Effectuer un filtrage multicritères afin d'assurer la qualité
- Vérifier la cohérence interne et absolue

Check-list – Méthode du pivot central

Planification de la mission

- Déterminer les stations de référence à utiliser pour calculer la position du pivot (cf. fiche détaillée)
- Evaluer les temps de mesure
- Vérifier la conformité du matériel (cf. prérequis)

Phase terrain

- Se placer sur un point dégagé, stable, sécurisé, pour mettre le pivot en station (cf. prérequis)
- Une fois le pivot mis en station, mesurer la hauteur d'antenne et démarrer l'enregistrement des données brutes après avoir choisi la période d'acquisition pendant au moins une dizaine de minutes (cf. fiche détaillée)
- Installer un second récepteur sur le point de canevas à calculer, mesurer sa hauteur d'antenne et effectuer les travaux de mesure en s'assurant des conditions de mesure GNSS : nombre suffisant de satellites, GDOP < 3 – 4, SNR > 50 (sur L1) ou 40 (sur L2). L'occupation du point dure au moins une dizaine de minutes (cf. fiche détaillée)
- Réoccuper tous les points au moins une fois (cf. fiche détaillée)

Phase bureau

- Déterminer la position du pivot central à partir des données du RGP
- Effectuer un filtrage multicritères pour assurer la qualité du lever
- Estimer les coordonnées des points mesurés par un calcul de lignes de base « en étoile » autour du pivot central.

Check-list – Statique Multi-stations

Planification de la mission

- Déterminer les stations de référence à utiliser pour calculer la position du pivot (cf. fiche détaillée)
- Evaluer les temps de mesure
- Vérifier la conformité du matériel (cf. prérequis)

Phase terrain

- Se placer sur un point dégagé, stable, sécurisé, pour mettre le pivot en station (cf. prérequis)
- Installer les différents récepteurs sur les points de canevas à calculer et mesurer leurs hauteurs d'antenne
- Démarrer l'enregistrement des données brutes après avoir choisi la période d'acquisition (cf. fiche détaillée)
- Effectuer les travaux de mesure en s'assurant des conditions de mesure GNSS : nombre suffisant de satellites, GDOP < 3 – 4, SNR > 50 (sur L1) ou 40 (sur L2)
- Effectuer les différentes rotations des capteurs comme programmé lors de la planification des travaux
- Réoccuper tous les points au moins une fois (cf. fiche détaillée)

Phase bureau

1^{er} traitement :

- Réaliser un premier calcul en déterminant l'ensemble des lignes de bases afin de contrôler la cohérence des données acquises (cf. fiche détaillée).

2^{ième} traitement :

- Effectuer un filtrage multicritères pour assurer la qualité du levé
- Effectuer le calcul de toutes les lignes de base en assurant l'indépendance linéaire au sein du réseau
- Réaliser un ajustement libre pour vérifier la cohérence interne du levé
- Effectuer un ajustement à contraintes minimales en fixant un seul point d'appui afin de contrôler l'homogénéité du levé par rapport aux points d'appui connus en coordonnées
- Réaliser un ajustement contraint en fixant l'ensemble des points connus pour obtenir les coordonnées finales de l'ensemble des points nouveaux