

Intégration de levés locaux au Système canadien de référence spatiale

Michael R. Craymer

Division des levés géodésiques, Géomatique Canada
615 rue Booth, Ottawa, ON K1A 0E9
Courriel : information@geod.nrcan.gc.ca
Web : www.geod.nrcan.gc.ca

Présenté lors du «*Survey Contracting and CACS Seminar*» (séminaire sur l'impartition de levés et le CACS), Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC), Edmonton, Alberta, 24 février 1998

Introduction

Les levés locaux peuvent fondamentalement être intégrés de deux manières au Système canadien de référence spatiale (CSRS)* et à son système de référence, le NAD83(CSRS). L'approche classique est basée sur des mesures (ou des rattachements) à des points de contrôle existants dont la position est connue suivant le système de référence NAD83(CSRS). Les positions des points du levé local suivant le NAD83 sont déterminées indirectement d'après les positions connues suivant le NAD83 des points de contrôle. L'autre méthode d'intégration est basée sur le positionnement GPS précis par point unique faisant intervenir des éphémérides et des corrections d'horloges du GPS précises déterminées d'après le réseau de poursuite du CACS. Dans ce cas, ce sont les satellites qui servent effectivement de points de contrôle de positions connues. Ces deux méthodes seront discutées ci-après.

Quelle que soit la méthode d'intégration utilisée, elle devrait être évaluée par des essais (comme un levé GPS de validation) afin de s'assurer qu'elle permet l'exactitude requise. De plus, la méthode retenue devrait assurer une redondance suffisante pour permettre de vérifier l'exactitude obtenue.

Intégration par positionnement par point unique précis

Le positionnement GPS par point unique basé sur l'utilisation de pseudodistances constitue la méthode de positionnement GPS la plus couramment utilisée. Bien qu'il fournisse des positions en temps réel, l'exactitude normalement attendue de ce mode

* Pour tout renseignement concernant le Système canadien de référence spatiale, le Système canadien de contrôle actif et les produits connexes, communiquer avec l'Unité des services d'information de la Division des levés géodésiques, Géomatique Canada, 615 rue Booth, Ottawa (Ontario), K1A 0E9, courriel : information@geod.nrcan.gc.ca, Web : www.geod.nrcan.gc.ca.

ordinaire de positionnement n'est que d'environ 100 m suivant l'horizontale et 150 m suivant la verticale au niveau de confiance de 95 %. Cependant, l'utilisation d'éphémérides et de corrections d'horloges du GPS précises fournies par le Système canadien de contrôle actif (CACS) permet d'obtenir une bien plus grande exactitude. Dans des environnements ne présentant que de faibles possibilités de multitrajets et avec de bonnes géométries des satellites (GDOP = 5), les positions de points individuels peuvent être déterminées avec une exactitude suivant l'horizontale supérieure à 2 m à un niveau de confiance de 95 %.

L'exactitude du positionnement par point unique est principalement limitée par les effets ionosphériques et troposphériques, par les effets de multitrajets et par l'exactitude des éphémérides des satellites ainsi que par la résolution des mesures de pseudodistances que permet le récepteur GPS. L'utilisateur peut minimiser les effets de ces sources d'erreurs en suivant les conseils fournis ci-après.

- Exactitude des éphémérides et des corrections des horloges - On devrait utiliser des éphémérides et des corrections d'horloges précises pour obtenir une exactitude d'ordre métrique. Bien que des éphémérides précises soit fournies par certains organismes participant au Service international de GPS pour la géodynamique (IGS), seuls quelques-uns d'entre eux fournissent les corrections d'horloges nécessaires pour le positionnement par point unique précis. Il faut également prendre soin de s'assurer que les positions résultantes sont obtenues suivant le système de coordonnées, ou le système de référence, requis (c.-à-d. le NAD83).

Remarque : La Division des levés géodésiques (DLG) fournit des éphémérides précises suivant le NAD83(CSRS) ainsi que suivant le Cadre international de référence terrestre (compatible avec le WGS84) en plus de corrections d'horloges précises. Les éphémérides et corrections d'horloges précises peuvent être appliquées au moyen du logiciel GPSPACE (également disponible à la DLG dans la gamme de ses produits du CACS). Quelques autres progiciels GPS commerciaux permettent également l'utilisation de cette information pour le positionnement par point unique précis.

- Effets ionosphériques - Ces effets varient en fonction de l'activité des taches solaires et sont plus prononcés sous les latitudes septentrionales et à l'équateur. Actuellement, la seule manière fiable de minimiser ces effets consiste à utiliser des récepteurs GPS bifréquences pour tenir compte de la plus grande partie de l'erreur. D'importants effets ionosphériques peuvent également entraîner la perte du «verrouillage» des signaux GPS, ce à quoi il n'y a aucune manière de remédier. Il est toujours conseillé de surveiller les bulletins de prévisions de l'activité ionosphérique et d'éviter les périodes d'intense activité ionosphérique.
- Effets troposphériques - Les modèles ordinaires de la troposphère permettent de réduire en grande partie ces effets. Des essais indiquent que les erreurs résiduelles qui persistent sont de manière caractéristique inférieures à un décimètre environ. Au besoin, les erreurs résiduelles peuvent être randomisées par l'utilisation de longues périodes

d'observation ou en occupant les points de manière répétée à différentes heures du jour ou des jours différents.

- Effets de multitrajets - Ces effets dépendent de la géométrie des configurations des satellites observés. Puisque cette géométrie change de manière systématique en fonction du temps, l'erreur peut être randomisée et «répartie» dans le temps. Toutefois, la durée nécessaire pour la répartition dépend des conditions locales de multitrajets et est difficile à prévoir. Il est donc préférable d'éviter les environnements favorables aux multitrajets et de calculer des moyennes pour des occupations multiples à différentes heures.
- Résolution des mesures - Cette erreur est faible et considérée aléatoire. Au besoin, elle peut être réduite par le calcul de moyennes en fonction du temps.

Les levés locaux peuvent être intégrés au NAD83(CSRS) en utilisant des positions par point unique estimées à titre d'observations de position, pondérées par leurs écarts-types estimés dans une compensation de réseau avec contraintes supplémentaires. Afin de vérifier l'existence des effets systématiques ci-haut énumérés et d'obtenir des estimations réalistes des écarts-types des positions estimées des points, la méthode d'intégration devrait assurer un niveau suffisant de redondance. En général, cela exige l'occupation à plusieurs reprises de plusieurs stations du réseau local. Par exemple, un nombre minimum de trois stations suffit habituellement pour l'obtention de vérifications indépendantes d'une erreur sur la position déterminée par point unique en l'une ou l'autre des stations, alors que des réoccupations des stations à des heures du jour différentes peuvent être utilisées pour randomiser d'éventuelles erreurs systématiques (p. ex. multitrajets) et obtenir des estimations de l'exactitude plus réalistes. Des essais ont montré que des estimations réalistes de l'exactitude peuvent habituellement être obtenues avec 2 heures de données.

Le levé local peut également être utilisé pour vérifier l'exactitude relative des positions estimées par point unique pour différents points du projet. Les différences de coordonnées entre les positions établies par point unique devraient être statistiquement compatibles avec les différences de coordonnées dans le levé local. La compatibilité peut être évaluée en comparant les positions estimées par point unique à celles dérivées d'une compensation avec contraintes minimales du levé local dans laquelle une des positions établies par point unique est maintenue fixe. Tout écart statistique incompatible devrait également être révélé sous forme de «valeurs aberrantes» lors d'une compensation (avec contraintes supplémentaires) combinée englobant le levé local et les positions estimées par point unique. Les valeurs aberrantes ou écarts importants peuvent être attribuables à des erreurs sur les positions estimées par point unique, à des erreurs dans le levé local ou à une pondération incorrecte des positions obtenues par point unique ou dans le cadre du levé local.

Intégration par rattachements directs à des points de contrôle

La méthode classique d'intégration de levés locaux au NAD83 consiste à les rattacher directement à des points de contrôle existants dont les coordonnées sont connues suivant le système de référence NAD83. Les positions levées dans le cadre du levé local sont déterminées indirectement d'après les positions connues des points de contrôle. Il faut cependant s'assurer que les points de contrôles sont définis dans le bon système de référence et d'une exactitude suffisante.

Bien qu'il puisse être possible d'occuper physiquement des points de contrôle à proximité, les positions de ceux-ci peuvent ne pas avoir été déterminées avec une exactitude suffisante (en particulier dans les régions éloignées) ou même suivant le bon système de référence. Il est souvent plus pratique et exact de calculer des lignes de base GPS directement aux stations du CACS exploitées en continu et d'en utiliser les observations de phase des porteuses GPS. Les données sur la phase des porteuses observées à toutes les stations du CACS sont disponibles à la DLG en format Rinex à un échantillonnage des données aux 30 s. Bien que l'exactitude du positionnement par cette méthode soit généralement nettement supérieure à celle du positionnement par point unique précis, elle est limitée principalement par les mêmes effets que le positionnement par point unique ainsi que par l'exactitude du canevas connu. L'utilisateur peut minimiser les effets de ces sources d'erreurs en suivant les conseils fournis ci-après.

- Erreurs sur les orbites - L'effet d'erreurs dans les éphémérides GPS diffusées courantes sur les vecteurs de lignes de base peut généralement être réduit à l'ordre du décimètre par traitement de phase des porteuses par «double différences». Des résultats plus exacts peuvent être obtenus au moyen d'éphémérides précises comme celles disponibles à la DLG ».

Remarque : Il est important de s'assurer que les vecteurs de lignes de base calculés sont définis dans le bon système de coordonnées (c.-à-d. celui du NAD83). La plupart des logiciels GPS calculent les vecteurs de lignes de base dans le système de coordonnées utilisé pour les éphémérides diffusées par les satellites. Ainsi, si les éphémérides diffusées sont utilisées, les lignes de base seront calculées suivant le système de référence WGS84. Selon la longueur, l'orientation et l'emplacement de la ligne de base, et dépendamment de l'exactitude requise, il peut être nécessaire de transformer au NAD83 les lignes de base calculées. Par exemple, dans le Grand Nord, où les lignes de base aux stations du CACS peuvent être d'une longueur de plus de 2000 km, les différences entre les lignes de base suivant le NAD83(CSRS) et suivant le WGS84/ITRF94 peuvent atteindre l'ordre de quelques centimètres. Il est généralement plus pratique d'utiliser plutôt des éphémérides précises exprimées dans le système de référence NAD83(CSRS). Dans ce cas, les lignes de base doivent être calculées directement dans le NAD83 et aucune transformation ne sera nécessaire. La DLG offre des éphémérides précises suivant le NAD83(CSRS) et suivant l'ITRF. À l'intention de ceux qui utilisent des éphémérides suivant le WGS84 ou l'ITRF, la DLG peut également fournir les paramètres nécessaires pour la transformation des lignes de base résultantes au NAD83(CSRS).

- Effets ionosphériques - Comme dans le cas du positionnement par point unique, la seule manière fiable de minimiser les effets de l'ionosphère consiste à utiliser des récepteurs GPS bifréquences pour tenir compte de la plus grande partie de l'erreur. Il est également souhaitable de surveiller les bulletins de prévisions de l'activité ionosphérique et d'éviter les périodes d'intense activité.
- Effets troposphériques - Sur des lignes de base dont la longueur est inférieure à environ 30 à 50 km, les effets de la troposphère peuvent être en grande partie réduits par traitement de phase des porteuses par double différences. Sur des lignes de base plus longues les effets peuvent devenir importants, selon les conditions météorologiques, mais ils sont généralement faibles et de peu de conséquences pour l'intégration. Au besoin, l'erreur résiduelle peut être en partie randomisée et éliminée par le calcul de moyennes pour de multiples occupations des points à des heures différentes du jour.
- Effets multitrajets - Comme dans le cas du positionnement par point unique, il vaut mieux éviter les environnements qui pourraient engendrer des multitrajets et tenter d'éliminer en partie ces effets en calculant des moyennes sur de plus longs intervalles ou pour de multiples occupations à différentes heures du jour pour les données recueillies sur les lignes de base.
- Résolution des mesures - Dans le cas des récepteurs GPS de qualité géodésique, l'erreur sur les mesures de phase des porteuses est généralement considérée aléatoire et négligeable (de l'ordre du mm) comparativement aux erreurs systématiques décrites ci-haut.
- Levée de l'ambiguïté - Pour des lignes de base d'environ 30 à 100 km de longueur, il est de pratique courante de tenter de lever l'ambiguïté et de déterminer le nombre entier de cycles de la porteuse afin d'améliorer la précision du vecteur de ligne de base estimé. Dans différentes techniques de levés GPS (p. ex. statique rapide, cinématique, statique) on applique différentes méthodes pour lever les ambiguïtés de manière fiable et exacte. La technique particulière utilisée devrait être adéquatement évaluée dans le cadre d'un levé GPS de validation. Sur des lignes de base plus longues, mesurant jusqu'à environ 100 km, seule la technique statique permet généralement de solutionner et de lever l'ambiguïté entière. Pour les lignes encore plus longues (p. ex. jusqu'aux stations du CACS), il n'est pas recommandé de tenter de lever l'ambiguïté.
- Exactitude du canevas connu - L'exactitude des positions des points de contrôle connus dépend principalement de la qualité du canevas existant. Depuis toujours, les canevas planimétriques ont tendance à accumuler les erreurs sur les centaines de milliers de mesures nécessaires pour constituer les canevas nationaux et régionaux classiques. Par exemple, on sait maintenant que le canevas planimétrique national suivant le NAD83 renferme des erreurs variant entre 0,25 m à plus de quelques mètres dans les régions éloignées comme le Grand Nord. Il est fortement recommandé d'utiliser plutôt les canevas 3D contemporains constituant le CSRS dans l'établissement desquels des techniques GPS de grande précision appliquées sur des lignes plus longues permettent de réduire

l'accumulation des erreurs et d'améliorer considérablement l'exactitude. Parmi ces canevas 3D, mentionnons le CACS, le réseau de base canadien (CBN) et les canevas provinciaux et régionaux de grande précision (HPN). Par exemple, les positions des stations du CACS sont exactes à un cm près environ, alors que dans le cas du CBN cette valeur passe à environ 2 à 5 cm. On s'attend à des exactitudes de l'ordre de 5 à 10 cm pour les positions des stations des HPN.

Les levés locaux peuvent être intégrés au NAD83(CSRS) en les combinant à des lignes de base jusqu'aux stations de contrôle dans une compensation avec contraintes supplémentaires en utilisant les positions publiées des stations de contrôle et leur écart-type comme observations de position (contraintes). Il faut cependant prendre soin de s'assurer qu'il existe un niveau de redondance suffisant pour obtenir des vérifications sur ces lignes de base et que la pondération appropriée leur est attribuée par rapport à celles du levé local. Comme dans le cas de la méthode du positionnement par point unique, cela exige généralement l'occupation à différentes heures du jour de lignes de base entre plusieurs stations du réseau local et plusieurs points de contrôle. Par exemple, au moins trois points du réseau local, chacun rattaché à au moins trois points de contrôle définis suivant le NAD83(CSRS), suffisent habituellement pour la détection de toute erreur sur l'une des lignes de base rattachant le levé local au canevas. Le calcul de lignes de base à des stations du CACS constitue généralement la méthode la plus pratique pour relier un levé local au NAD83(CSRS). Dans ce cas, un minimum de seulement deux rattachements au CACS pour chacun des points du levé local peuvent être nécessaires en raison de la plus grande fiabilité des données et des positions du CACS, pourvu qu'il y ait des rattachements redondants au CACS depuis d'autres points du réseau local. Des essais ont montré qu'une exactitude de l'ordre du décimètre peut être obtenue sur des lignes de base à des stations du CACS situées à des distances atteignant jusqu'à 2000 km par la technique de traitement statique de phase des porteuses avec une heure de données.

Le levé local peut également être utilisé pour vérifier l'exactitude des rattachements de la ligne de base aux points de contrôle si il existe un nombre suffisant de rattachements redondants au canevas. Toute incompatibilité statistique entre le levé local et les rattachements au canevas devrait être révélée sous forme de «valeurs aberrantes» dans les résidus pour la ligne de base lors d'une compensation avec contraintes minimales ou d'une compensation avec contraintes supplémentaires de toutes les lignes de base. Des valeurs aberrantes importantes peuvent être attribuables à des erreurs sur les lignes de base jusqu'aux points de contrôle, à des erreurs dans le levé local ou à une pondération incorrecte des lignes de base. On devrait prendre soin d'attribuer la bonne pondération aux lignes de base jusqu'aux points de contrôle par rapport à celles du levé local lors de la compensation avec contraintes supplémentaires. Les facteurs de pondération dérivés d'écart-types ou de matrices de covariance trop optimistes peuvent déformer le réseau local.

Approche combinée

Les deux méthodes d'intégration décrites ci-haut ne sont pas mutuellement exclusives. En fait, puisqu'elles sont basées sur des variables observables différentes (pseudodistances versus phase des porteuses), les positions absolues des points peuvent être utilisées avec des lignes de base jusqu'à des points de contrôle pour obtenir des vérifications les unes des autres et améliorer la redondance sans coûts additionnels en termes d'observations.

Validation de la méthode d'intégration

Quelle que soit la méthode d'intégration utilisée, elle devrait faire l'objet d'essais et d'évaluations rigoureux sur un réseau dont les positions des points sont connues avec exactitude suivant le NAD83(CSRs) afin de s'assurer qu'elle offre une exactitude et une fiabilité suffisantes. Cela s'effectuerait normalement lors de la validation de la méthodologie utilisée pour le levé local. Il est très important que les essais soient effectués dans des conditions similaires à celles dans lesquelles sera en pratique effectuée l'intégration. Par exemple, les distances entre le levé local et les points de contrôle connus (p. ex. des stations du CACS) devraient être représentatives de celles qui existeront réellement dans le cadre du levé.

Renseignements supplémentaires

Pour tout autre renseignement concernant le CSRS, les produits du CACS ou des problèmes d'intégration de réseaux, veuillez communiquer avec la Division des levés géodésiques de Géomatique Canada. Les présentes recommandations sont constamment mises à jour afin de refléter les changements technologiques et les résultats d'essai courants. Les utilisateurs sont priés de communiquer avec la DLG pour obtenir la version la plus récente.

Remerciements

Le présent document est basé sur une version antérieure intitulée «Application of Canadian Active Control System Products for the Integration of Local Survey Networks» rédigée par Robert Duval et Susan Blackie en avril 1995.