

**Zeitschrift:** Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =  
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =  
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

**Herausgeber:** geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und  
Landmanagement

**Band:** 107 (2009)

**Heft:** 3

**Artikel:** Contrôle de l'intégrité GPS en temps réel et géoréférencement direct  
par RTK-GPS pour le levé laser aéroport

**Autor:** Stebler, Yannick

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-236592>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 08.02.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Contrôle de l'intégrité GPS en temps réel et géoréférencement direct par RTK-GPS pour le levé laser aéroporté

Le manque d'informations sur la fiabilité des données acquises durant le vol constitue l'un des problèmes majeurs des systèmes laser aéroportés (ALS) actuels. Des erreurs ou des dégradations inacceptables de la qualité des données GPS/INS/Lidar ne sont ainsi détectées que plus tard, lorsque plus aucune réaction n'est possible. En particulier, la qualité de la solution GPS utilisée pour l'intégration avec les données inertielles puis pour le géoréférencement du nuage de points est essentielle en vue de l'élaboration d'un produit final de haute qualité. Dans le contexte du levé ALS où la solution GPS finale est calculée en post-traitant la phase-porteuse différentielle, les éventuelles dégradations affectant le code et/ou la phase du signal GPS n'apparaissent que lors de l'étape du post-traitement de la phase (PT). Les solutions restantes consistent alors soit à accepter une forte dégradation de la qualité du produit final, soit à répéter le vol. Il est évident que ces deux solutions sont inacceptables d'un point de vue économique et que des solutions de détection de problèmes en amont du PT doivent être trouvées. Cet article traite de la problématique du suivi et du contrôle en temps réel (TR) de la qualité des observations GPS uniquement. En outre, il présente les premiers résultats obtenus pour le géoréférencement direct de données ALS par RTK-GPS/INS. Le contrôle de fiabilité des observations acquises par les capteurs inertiels et Lidar font l'objet d'autres recherches au sein du laboratoire de Topométrie de l'EPFL (Schaer et al., 2008).

*Ein Hauptproblem luftgestützter Lasersysteme (ALS) stellt der Mangel an Informationen über die während des Fluges erfassten Daten dar. Fehler oder Beeinträchtigungen der Qualität der GPS/INS/Lidar-Daten werden so erst später entdeckt, wenn keine Reaktion mehr möglich ist. Für die Erarbeitung eines Endproduktes hoher Qualität ist insbesondere die Qualität der für die Integration mit den Trägheitsdaten und für den Raumbezug der Punkteschar verwendeten GPS-Lösung wesentlich. Bei der ALS-Aufnahme, wo die endgültige GPS-Lösung vor der Nachbehandlung der differenziellen Trägerphase berechnet wird, erscheinen allfällige Beeinträchtigungen des Codes und/oder der Phase des GPS-Signales erst bei der Nachbehandlung der Phase (PT). Die Lösung bestünde darin, eine starke Beeinträchtigung der Qualität des Endproduktes hinzunehmen oder den Flug zu wiederholen. Beide Lösungen sind aus wirtschaftlicher Sicht unannehmbar, so dass Lösungen gefunden werden müssen, um die Probleme vor der Nachbehandlung zu entdecken. Der Artikel behandelt ausschliesslich die Problematik des Verfolgens und der Kontrolle in Echtzeit der Qualität der GPS-Beobachtungen. Zudem werden die ersten Resultate vorgestellt für den direkten Raumbezug von ALS-Daten durch RTK-GPS/INS. Die Kontrolle der Zuverlässigkeit durch Trägheitssensoren und Lidar erfasster Beobachtungen sind Gegenstand von Untersuchungen im Laboratorium für Topometrie der ETHL (Schaer et al., 2008).*

L'assenza di informazioni sull'affidabilità dei dati rilevati durante il volo costituisce uno dei principali problemi dei sistemi laser aéroportati (ALS). Gli errori o il degrado inaccettabili della qualità dei dati GPS/INS/Lidar sono individuati solo in un secondo tempo, quando non è più possibile intervenire. In particolare, la qualità della soluzione GPS utilizzata per l'integrazione con i dati inerziali a livello di georeferenziazione della nuvola di punti è fondamentale per l'elaborazione di un prodotto finale di alta qua-

---

Y. Stebler

---

## 1. Contrôle de la qualité du GPS

Si la sécurité est la principale motivation de l'intégrité dans le domaine de l'aviation civile, il n'en est pas ainsi dans le contexte du levé aérien où la qualité intrinsèque du signal et de la solution GPS régissent la performance du système. Le sens donné à l'intégrité dans cet article se rapporte par conséquent à la question de savoir si oui ou non la qualité du signal GPS, à un certain instant durant le vol, est suffisante pour garantir une bonne solution lors du PT. Pour cela, il est nécessaire d'obtenir une information durant le vol sur les chances de résolution correcte des ambiguïtés lors du PT grâce à un suivi de la qualité du signal.

L'évaluation de l'intégrité GPS est réalisée par l'intégration de différents indicateurs dans un environnement unique. Étant donné la redondance d'informations lors de l'évaluation, seul le meilleur indicateur de qualité disponible à chaque époque est utilisé pour le contrôle. La figure 1 présente l'ensemble des algorithmes basés sur les indicateurs ayant été implémentés pour le contrôle TR. Les sorties de chaque algorithme sont synthétisées en un unique indicateur présenté à l'opérateur durant le vol. Les paragraphes qui suivent décrivent sommairement les indicateurs les plus importants.

### 1.1 WAAS/EGNOS

Des systèmes d'augmentation tels que WAAS ou EGNOS ont été mis en place afin de combler le manque d'intégrité, de continuité et de disponibilité des systèmes satellitaires. Ils transmettent notamment des messages d'intégrité qui permettront aux utilisateurs de calculer la confiance qu'ils peuvent avoir en leur position. De plus, des messages d'intégrité spécifiques à chaque satellite GPS sont envoyés. Finalement, ils permettent d'augmenter le nombre de satellites et de contribuer à l'amélioration de la constellation. L'utilisation d'un récepteur compatible avec

lità. Nel contesto del rilevamento ALS, dove la soluzione GPS finale è calcolata col post-trattamento della fase portante differenziale, gli eventuali degradi che toccano il codice e/o la fase del segnale GPS appaiono solo durante la fase di post-trattamento (PT). Le soluzioni restanti consistono allora nell'accettare un forte degrado del prodotto finale oppure nel rifare il volo. È evidente che queste due soluzioni sono inaccettabili dal punto di vista economico e quindi bisogna trovare degli approcci di individuazione dei problemi a monte del PT. Quest'articolo illustra unicamente la problematica della verifica e del controllo in tempo reale (TR) della qualità delle osservazioni GPS. In aggiunta, presenta i primi risultati ottenuti per la georeferenziazione diretta dei dati ALS tramite RTK-GPS/INS. Il controllo dell'affidabilità delle osservazioni fatte dai captatori inerziali e dal Lidar sono oggetto di ricerche nel laboratorio di Topometria del Politecnico di Losanna (Schaer et al., 2008).

WAAS/EGNOS pour le levé ALS ouvre l'accès à l'ensemble des avantages mentionnés.

### 1.2 RAIM

RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) est un système d'augmentation basé sur les observations de code du récepteur, c'est-à-dire indépendant de toute information d'intégrité externe. Il se fonde sur un test de consistance utilisant des observations redondantes dans le but de détecter une faute au niveau d'un satellite. Deux tests sont effectués: le premier (test de disponibilité) détermine si les conditions (minimum de cinq satellites, géométrie satisfaisante) sont satisfaites pour exécuter le second test qui est la procédure de détection et d'isolation de fautes (FDI). Des détails sur les algorithmes RAIM peuvent être trouvés dans Van Diggelen et al. (1994). L'issue du test de dis-

ponibilité donne des indications sur la géométrie de la constellation ainsi que sur un nombre insuffisant de satellites. Ainsi, des époques d'indisponibilité de RAIM, causées par une très mauvaise géométrie ou des signaux dégradés, constituent des périodes qui peuvent être problématiques lors du PT. De même, des situations où RAIM n'est pas activé traduisent un nombre de satellites trop bas pour le calcul d'une solution GPS. La combinaison de ces informations avec celles issues de la détection des sauts de cycles permet de fournir une indication globale sur la qualité du signal GPS de manière autonome durant le vol.

### 1.3 Qualité de la phase

Les indicateurs se rapportant à la qualité des observations de phase sont d'une grande importance. L'utilisation des mesures de phase pour le calcul de positions

est soumise à un problème d'ambiguïté devant être résolu. En cas d'obstruction du signal, la procédure de résolution des ambiguïtés doit être réinitialisée, ce qui est une opération coûteuse en temps et en ressources de calcul. Ce phénomène induit un saut de cycle, impliquant que des mesures de phases adjacentes «sautent» d'un nombre entier de cycles. La détection de sauts de cycles sur la phase fournit donc une indication pertinente sur la qualité de cette dernière. Il existe plusieurs méthodes pour détecter la présence d'un saut de cycle.

#### 1.3.1 Contrôle de la sortie du circuit de poursuite du récepteur

Une bonne solution GPS pour le géoréférencement du nuage de points est fortement dépendante de la qualité du signal L2. Ce dernier est beaucoup plus affecté par des sauts de cycles que L1 en raison de la puissance de transmission plus basse et l'absence de code à cette fréquence. Par conséquent, le suivi de la disponibilité de mesures de phase sur L2 à la sortie du circuit de poursuite permet de détecter de manière suffisante et fiable une mauvaise qualité du signal.

#### 1.3.2 Dérivée du retard ionosphérique

Estey et Meertens (1999) proposent une méthode de détection de sauts de cycles basée sur le retard ionosphérique:

$$I_{(2)}OD = \frac{\alpha}{\alpha - 1} \frac{\Delta_t(\phi_1 - \phi_2)}{\Delta t}$$

où  $\alpha = \frac{f_1^2}{f_2^2}$

avec  $\Delta_t$  l'opérateur de différence de temps,  $\Phi_i$  l'observation de la phase pour la fréquence  $i$  avec  $i = 1, 2$ ,  $f_i$  la fréquence et  $t$  le temps. La quantité IOD (Issue Of Data - dérivée du retard ionosphérique) peut être calculée à chaque époque et comparée à un seuil défini au préalable. Cela signifie que si la différence temporelle est supérieure à ce seuil, la présence d'un saut de cycle peut-être supposée. Cette méthode peut aisément être utilisée pour le signal L1.

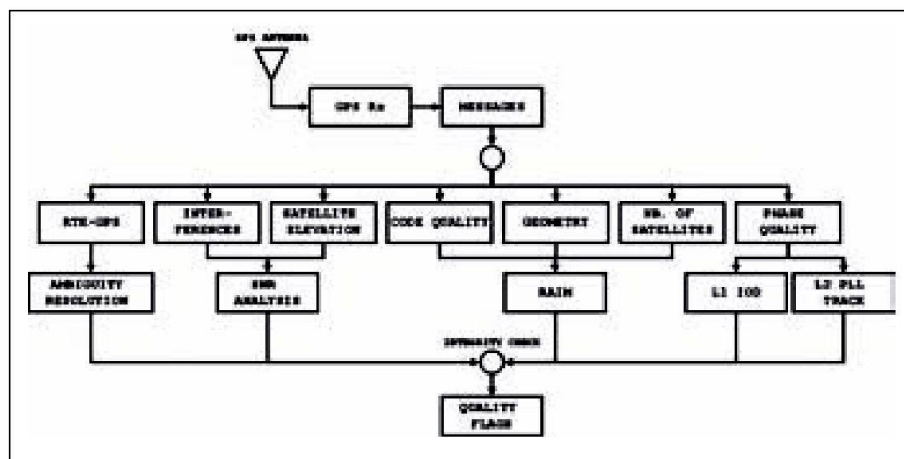


Fig. 1: Architecture de l'environnement de contrôle de qualité GPS.

## 1.3.3 Intégration des observations Doppler

La différence temporelle de l'ambiguïté  $\Delta_i N_i$  peut théoriquement être calculée par la différence entre les observations de phase et les observations Doppler selon la relation suivante:

$$\Delta_i N_i = \Delta\phi_i - \int_{t_{i-1}}^{t_i} D_i dt + \varepsilon$$

avec  $\Delta_i \Phi_i$  la différence temporelle des observations de phase pour la fréquence  $i$ ,  $D_i$  l'observation Doppler et  $\varepsilon$  l'erreur résiduelle. Cette relation fournit une bonne alternative pour la détection d'un saut de cycle entre deux époques. Des détails sur cette méthode ainsi que la présentation d'autres alternatives peuvent être trouvés dans Xu (2007).

## 1.4 Rapport signal-sur-bruit

Les récepteurs GPS sont sensibles aux interférences causées par les radiofréquences. Ces dernières peuvent causer une forte dégradation de la précision de navigation, voire même une perte complète de signal. Leur détection est particulièrement importante dans le contexte du lever aéroporté étant donné que l'avionique, la rotation du rotor ou encore les

équipements de communication dégradent le signal GPS. Le rapport signal-sur-bruit (SNR) est un moyen de détecter des interférences car ces dernières ont des effets sur la corrélation du code et les fonctions de filtrage des circuits. Ces effets se traduisent par une baisse générale du SNR de tous les signaux. Un algorithme basé sur une moyenne mobile a été développé afin de détecter ces décroissances.

## 1.5 Surveillance intégrale de la qualité GPS en vol

Les procédures de détection de sauts de cycles, l'analyse des résultats issus de la fonction RAIM ainsi que les indicateurs de qualité classiques (nombre de satellites, SNR,...) ont été implémentés dans une procédure d'analyse en C++. Cette dernière est l'application du contrôle de qualité du GPS fonctionnant en TR implémentée dans le système d'analyse de qualité en cours de développement dans le laboratoire (Schaer et al., 2008). Elle analyse la qualité de chaque solution GPS ainsi que des signaux satellitaires et fournit un niveau de qualité GPS (bon, suffisant, critique, mauvais) à l'opérateur (fig. 2). En fonction de ces résultats, l'opérateur décide si une répétition de la ligne de vol est nécessaire ou non. Ainsi, tout problème

affectant le signal ou la solution GPS qui se traduisait auparavant par des difficultés lors du PT est à présent détecté durant le vol où une réaction rapide est possible.

## 2. Géoréférencement direct par RTK-GPS

Le système d'analyse (Schaer et al., 2008) possède la capacité d'effectuer l'intégration GPS/INS grâce à un filtre de Kalman (FK) et de générer le nuage de points laser en TR. La précision de ce nuage dépend directement de celle de la trajectoire. L'utilisation d'un positionnement RTK-GPS pourrait significativement améliorer la précision et mener ainsi à l'abolition du PT. De plus, les effets de solutions float ou standalone isolées peuvent être atténués par le FK en utilisant un modèle stochastique réaliste. Le RTK-GPS possède également un gros potentiel en termes de contrôle de qualité puisque des solutions fix indiquent une bonne qualité des observations de phase. Un vol d'essai a été mené en équipant le système ALS développé à l'EPFL, nommé Scan2map (Skaloud et al., 2006), d'un système de positionnement GPS-RTK où les corrections sont transmises via radio. Le but de ce vol a été entre autre de fournir une évaluation du nuage acquis en TR. Tout au long du vol, aucun obstacle majeur ne s'est trouvé entre la base et l'hélicoptère. Malgré cela, une mauvaise réception radio a été constatée dans les portions de transfert où les vitesses sont hautes ainsi que dans les virages serrés. Ceci est dû à l'obstruction de l'antenne (qui était une antenne souple) par le châssis de l'hélicoptère ainsi qu'à l'orientation et la stabilité de l'antenne radio. Des améliorations sont prévues à l'avenir pour remédier à ce problème.

Un nuage de référence a été calculé en utilisant la solution GPS post-traitée (fig. 3). La distribution de la différence entre ce dernier et le nuage acquis en TR grâce à la solution RTK-GPS pour chaque axe est présentée dans la figure 4. L'exactitude planimétrique est comprise entre 1 et 4 [cm] alors que l'exactitude altimétrique

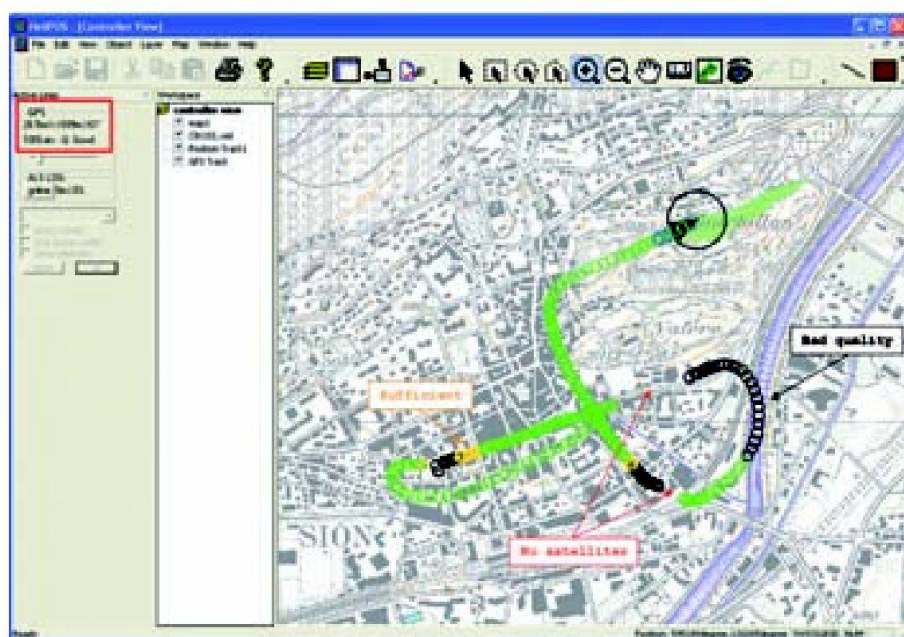


Fig. 2: L'information de qualité est traduite sous la forme de quatre couleurs, permettant ainsi une interprétation directe.

est affectée par un biais de 10 [cm] qui est dû à certaines imprécisions connues lors de la mesure de la hauteur de l'antenne de référence. Cette précision est suffisante pour la majorité des applications du système. Néanmoins, des améliorations au niveau de la configuration des capteurs et filtres sont prévues afin d'augmenter encore la qualité du produit final (MNS/MNT) dans le périmètre défini par la portée de la radio.

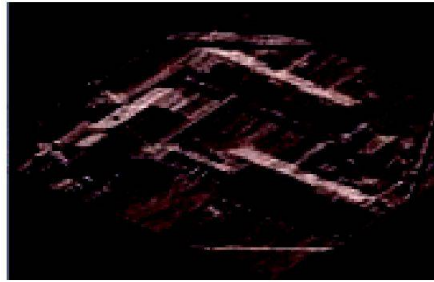


Fig. 3: Comparaison entre le nuage de référence (blanc) et celui acquis en TR (rouge).

### 3. Conclusions et perspectives

Le contrôle de la qualité GPS durant le vol est d'une grande importance. L'environnement développé dans lequel sont intégrés les différents algorithmes effectués le contrôle à plusieurs niveaux: le système, les observations de code et le récepteur, et les observations de phase. RAIM transmet implicitement plusieurs informations (nombre de satellite, qualité de signal GPS, géométrie de la constellation satellitaire). La combinaison de toutes ces informations complétées par les indicateurs classiques permet de fournir une évaluation sur la qualité du positionnement, et ainsi de diminuer le risque de toute mauvaise surprise lors du PT. La détection de sauts de cycle et le contrôle de la sortie du circuit de poursuite de la phase four-

nissent une indication sur la qualité des observations de phase. Les informations d'intégrité fournies par WAAS/EGNOS ainsi que la surveillance des SNR procurent une vérification du système et de son environnement globalement.

Le géoréférencement direct par RTK-GPS possède un énorme potentiel dans le sens où l'ensemble du traitement menant à la génération du nuage de points peut être fait en TR avec la précision requise. Cette capacité ouvre la voie vers de nouveaux domaines d'application tels que la cartographie rapide ou encore la surveillance de zones à risque (glissements de terrain, éboulements, accumulations de neige,...).

#### Remerciements

Le laboratoire de Topométrie tient à remercier GEOSAT S.A. pour la mise à dis-

position de radios pour les essais RTK à Sion ainsi que pour leurs conseils.

#### Bibliographie:

- Estey, L.H. and Meertens, C.M., 1999. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solution*, vol. 3, no. 1, pp. 42–49.
- Schaer, P., Skaloud, J. and Tomé, P., 2008. Vers une analyse de qualité des données de laser aéroporté en temps réel. *Geomatik Schweiz*, 9/2008: 460–464.
- Skaloud, J., Vallet, J., Veyssiere, G. and Koelbl, O., 2006. An Eye for Landscape – Rapid Aerial Mapping with Handheld Sensors. *GPS World* (May):7.
- Stebler, Y., 2008. GPS/INS integrity in airborne mapping. Master thesis. EPFL.
- Van Diggelen, F. and Brown, A., 1994. Mathematical aspects of GPS RAIM. NAVSYS Corporation, Colorado Springs.
- Xu, G. 2007. GPS: Theory, algorithms and applications. Berlin: Springer, 2<sup>nd</sup> edition.

Yannick Stebler  
ing. dipl. EPF, PhD student  
Swiss Federal Institute of Technology (EPFL)  
Geodetic Engineering Laboratory (TOPO)  
Bâtiment GC, Station 18  
CH-1015 Lausanne  
yannick.stebler@epfl.ch

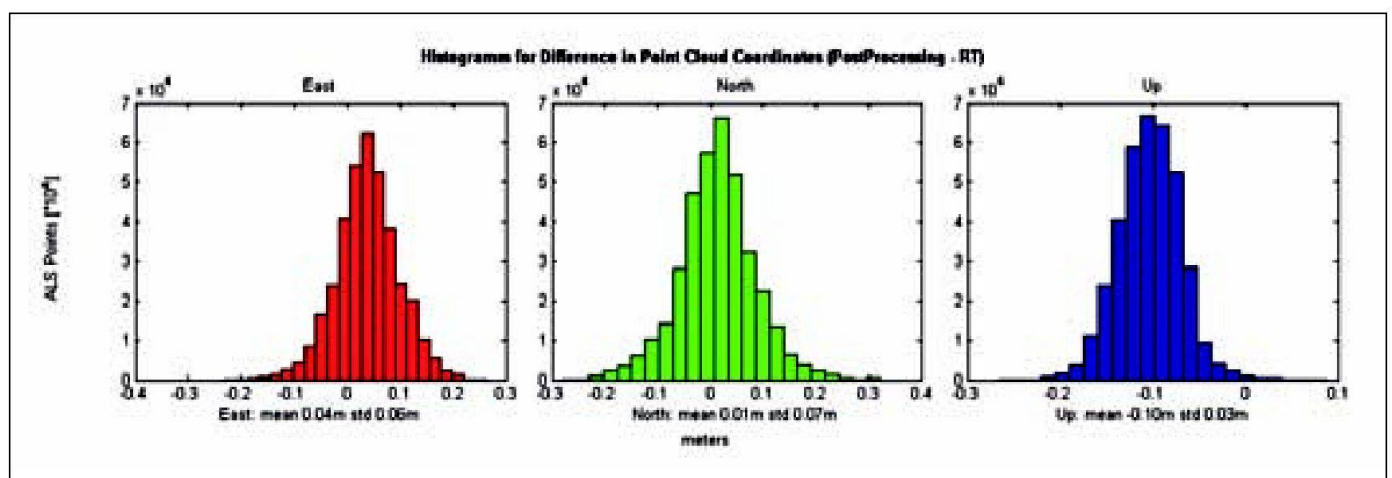


Fig. 4: Distributions des différences entre le nuage de référence et celui acquis en TR.