

Les stations virtuelles au service de la cartographie mobile

■ Mathieu REGUL - Florian BIROT



Figure 1. Engin de surveillance de la voie (ESV) équipé d'un RiEGL NEW VMX-RAIL - Thionville.

SNCF Réseau utilise les scanners laser 3D depuis plus de dix ans. L'utilisation des nuages de points et des scanners laser (statiques et dynamiques) a permis d'augmenter les rendements des relevés et de fiabiliser bon nombre de traitements. En 2013, la division Assistance Travaux et Topographie (ATT) s'est équipée d'un scanner laser dynamique RiEGL VMX-450, devenant ainsi le premier gestionnaire d'infrastructures au monde à s'équiper de cette technologie.

En 2019, SNCF Réseau a équipé trois engins de mesures avec des systèmes scanners laser dynamique RiEGL New VMX-Rail afin de permettre une numérisation continue et cyclique du réseau ferré national (figure 1).

Les données ainsi récoltées permettent de maintenir à jour la base des obstacles du réseau ainsi que de cartographier ce dernier. Ces données forment également le socle du jumeau numérique du réseau ferré national.

Le volume de données collecté grandissant sans cesse jusqu'à atteindre 200 000 km par an depuis 2020, il a été nécessaire de faire évoluer toutes les méthodologies d'acquisition et de calcul des nuages 3D issus des systèmes de cartographie mobile.

Les méthodes de calcul des trajectoires utilisées à SNCF Réseau

L'industrialisation de trois systèmes de mesures roulant en permanence nécessite d'adapter les modes opératoires. En effet certains moyens mis en œuvre pour une acquisition ponctuelle ne peuvent pas être déployés de la même manière pour des acquisitions couvrant tout le territoire national. C'est le cas en

particulier du calcul des trajectoires qui a vu sa méthodologie évoluer au fil des années au sein de SNCF Réseau.

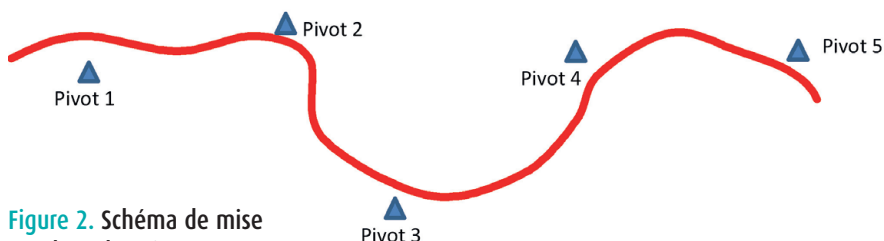


Figure 2. Schéma de mise en place des pivots.

■ La méthode traditionnelle

La méthodologie déployée par SNCF Réseau au début des acquisitions repose sur l'utilisation de pivots spécifiques mis en place le long du parcours du système avec un intervalle régulier dépendant du logiciel utilisé et de la précision souhaitée (figure 2).

Cette méthodologie nécessite une certaine organisation :

- tous les récepteurs GNSS doivent être mis en place avant le début de l'acquisition et retirés après la fin de cette dernière ;
- les pivots doivent être matérialisés de façon durable (pour pouvoir être réutilisés) ;
- les coordonnées des pivots doivent être déterminées par méthode statique avant le calcul de la trajectoire.

Bien que performante, d'un point de vue logistique cette méthode nécessite du temps et du personnel bien en amont des acquisitions. Compte tenu du volume des acquisitions faites par SNCF Réseau et des linéaires considérés (jusqu'à 450 km par jour), cette méthode n'est que très difficilement applicable. Par ailleurs si un pivot ne fonctionne pas le calcul de la trajectoire peut être compromis. Il peut être nécessaire de doubler chaque pivot pour garantir l'intégrité des données (et donc doubler le matériel GNSS déployé).

■ Les réseaux permanents

Afin de permettre une plus grande couverture et d'éviter de mettre en place des pivots GNSS, SNCF Réseau s'est appuyé sur les réseaux permanents pour traiter les trajectoires. Le logiciel



utilisé par SNCF Réseau pour le calcul des trajectoires permet d'utiliser des réseaux de stations (outil SmartBase du logiciel Applanix PosPac MMS, voir en figure 3). La France est plutôt bien dotée en matière de réseaux permanents. Nous distinguons par exemple :

- le RGP mis à disposition gratuitement en temps différé par l'IGN ;
- les réseaux des autres pays européens (gratuits ou payants) ;
- le réseau des stations Orphéon mis à disposition par GEODATA DIFFUSION et payant.

Dans ce cas, les stations GNSS n'ont pas besoin d'être réparties de façon

régulière le long de la trajectoire, mais doivent encadrer celle-ci et respecter ces deux critères définis par Applanix :

- la trajectoire ne doit pas être à plus de 70 km d'une station ;
- les stations ne doivent pas être éloignées de plus de 100 km les unes des autres.

L'utilisation des réseaux permanents permet de s'affranchir des contraintes logistiques et organisationnelles de la méthode traditionnelle. C'est pourquoi cette méthode était jusqu'alors privilégiée par ATT pour le traitement de gros chantiers d'acquisitions (plusieurs milliers de kilomètres par an).

Cependant, cette méthode apporte de nouveaux problèmes spécifiques :

- aucune maîtrise de la disponibilité des stations ;
- répartition pas toujours homogène des stations (cas du RGP) ;
- aucune couverture en frontière du territoire (maritime ou terrestre) ;
- résultats du calcul fortement soumis à la qualité des mesures des stations permanentes ;
- calcul très "boîte noire".

RinexPro : les stations virtuelles à la demande

■ Présentation de RinexPro

RinexPro est un service de géolocalisation par satellites dans le cloud. Ce logiciel donne accès, par une API HTTP ou via le portail Web dédié, aux algorithmes de positionnement de précision par GNSS en temps différé : post-traitement différentiel et PPP (statique et cinématique), et génération de stations virtuelles (figure 4). Lors des calculs, les orbites et horloges précises, et les cartes de TEC ionosphérique issues des centres de calculs internationaux (IGS, SGN, CODE, NRCAN, etc) sont utilisées.

La technologie de station virtuelle est très répandue dans le positionnement NRTK. Ce genre de flux en temps réel est notamment fourni en France par les réseaux Satinfo, Teria ou Orphéon. L'avantage de simuler les observations d'un récepteur GNSS jouant le rôle d'une base à un endroit donné et à un instant donné est principalement de réduire le système à une ligne de base très courte, de l'ordre du mètre à la première époque de mesure, ce qui diminue nettement les résidus atmosphériques des termes de doubles différences et facilite d'autant la résolution des ambiguïtés entières sur le vecteur base – mobile. Dans la version en temps différé de cette technologie, les coordonnées en entrée s'accompagnent de la période de temps à couvrir et de la cadence d'enregistrement (1Hz ou 10Hz en général, suivant les applications). Il en résulte un fichier d'observations GNSS au format RINEX, à la différence que la valeur des observables donnée à chaque époque est issue d'un calcul et non d'une mesure (figure 5).

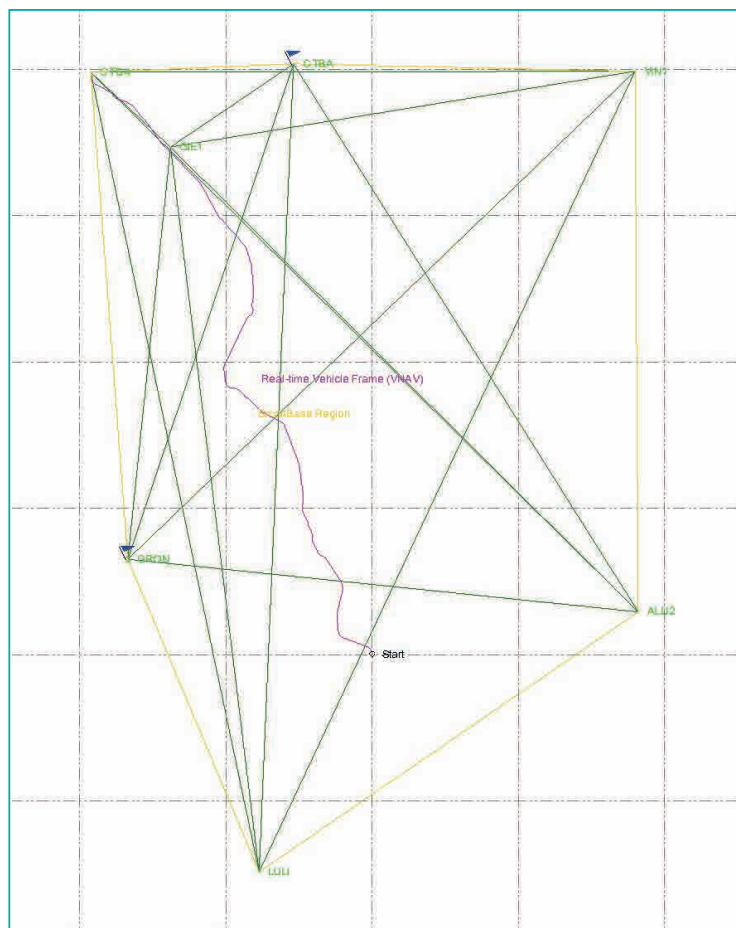


Figure 3. Schéma du calcul Smart-Base.

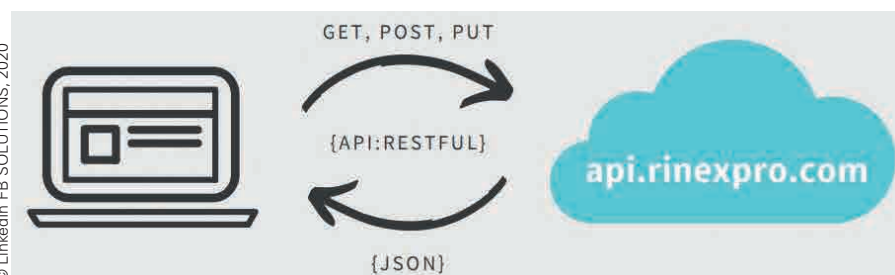


Figure 4. Fonctionnement de l'API HTTP RinexPro.

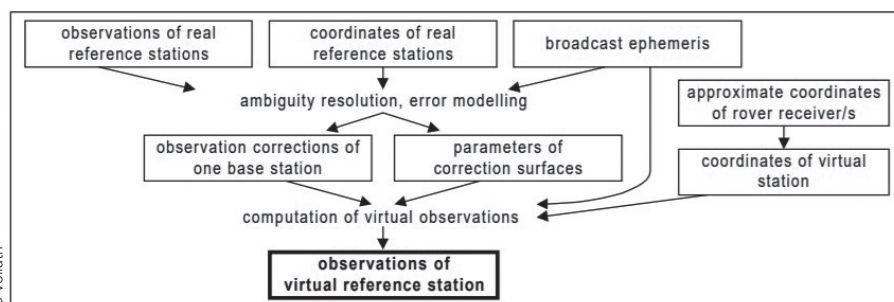


Figure 5. L'algorithme de génération d'une station virtuelle [Vollath, 2001].

Station virtuelle	Station permanente	Stations permanentes utilisées pour la simulation
SMNEv	SMNE	CT5E / SIRT / SBGS / CT52
CRHXv	CRHX	KEGA / PLGN / KONE / PNTV
RYONv	RYON	JOI2 / MACH / CHTA / ANGL
LGARv	LGAR	AGEN / CAPT / SRMG / C2CN
HOLAv	HOLA	SAFQ / AIGL / MNTP / PZNA
SISTv	SIST	MICH / MSMM / GAPC / RMZT
SJDVv	SJDV	VOUR / FEUR / RNNE / MOGN
DOULv	DOUL	BVOI / BEUG / CHLN / AMNS
LULIv	LULI	GRON / CULA / MONS / ALU2
DAGOV	DAGO	ANDE / BVS2 / LRTZ / RUPT

Table 1. Stations utilisées pour la simulation.

Cela équivaut à simuler la présence d'une station permanente sur le chantier considéré. Les observations sont a priori de haute qualité car elles sont issues des meilleures observations de stations réelles environnantes.

Le test classique pour contrôler la qualité de l'algorithme de génération d'observations virtuelles est de simuler une station aux coordonnées publiées d'une station permanente, sans utiliser les observations de cette station dans

la simulation, puis de calculer la ligne de base entre la station virtuelle et la station réelle, comme a pu le pratiquer [Häkli, 2006]. Dans le cas du RGP et pour apporter un éclairage dans le cadre de cet article, nous avons fait le test pour 10 stations permanentes (table 1), à 10 endroits différents du territoire (figure 6), sur une session de 1 heure cadencée à 1 seconde, le 01/03/2020 de 7 h à 8 h GPS.

Le vecteur déterminé entre la station virtuelle et la station permanente peut être évalué comme le biais de positionnement issu de la modélisation des observations. Les composantes planimétriques du vecteur sont comprises entre -10 et +10 mm dans notre exemple et -20 et +20 mm en altimétrie (figure 7). Les valeurs montrées sont sub centimétriques à centimétriques, ce qui est du même ordre de grandeur que la précision absolue du rattachement d'un pivot GNSS dans les règles de l'art, comme l'ont montré [Legros et al., 2013].

Dans un cas où des pivots seraient installés spécialement pour un chantier, ils garantiraient donc la même précision de trajectoire, mais demanderaient à l'entreprise d'assurer la logistique de déploiement et le calcul de leurs coordonnées.

■ Cas d'usages et perspectives à SNCF Réseau

Les stations virtuelles (VRS ou *Virtual Reference Station*) sont depuis longtemps très employées pour les relevés

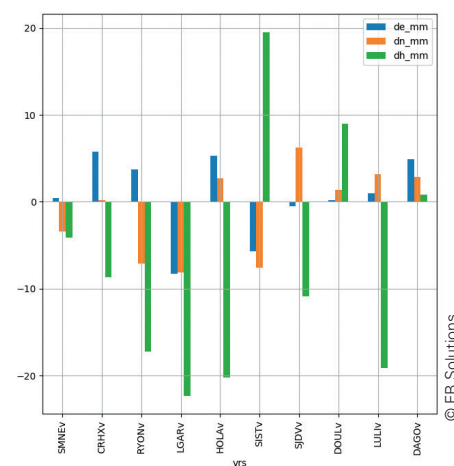


Figure 7. Simulation, vecteur entre la station virtuelle et la station permanente.

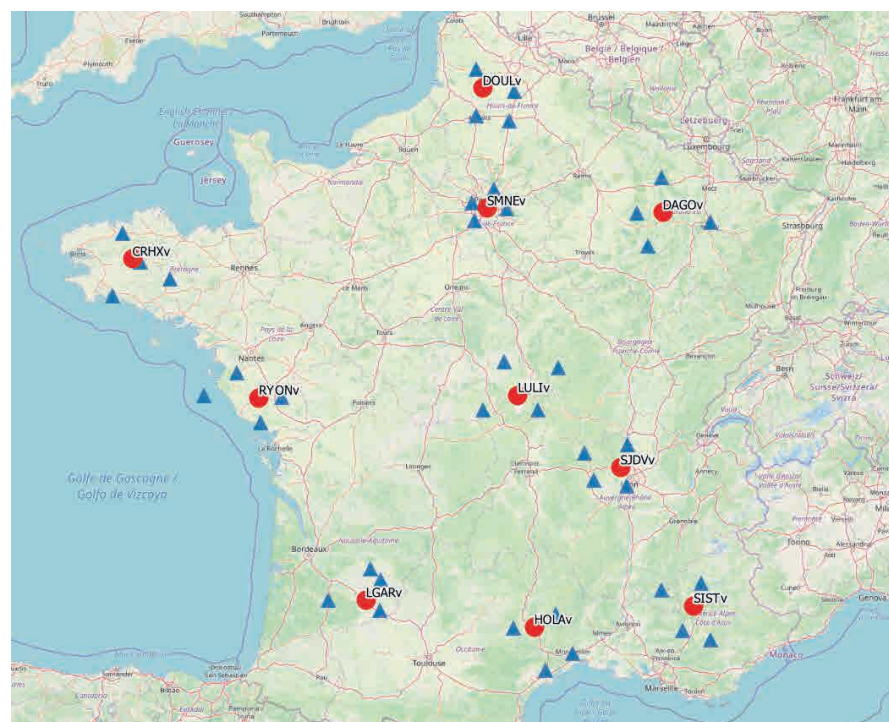
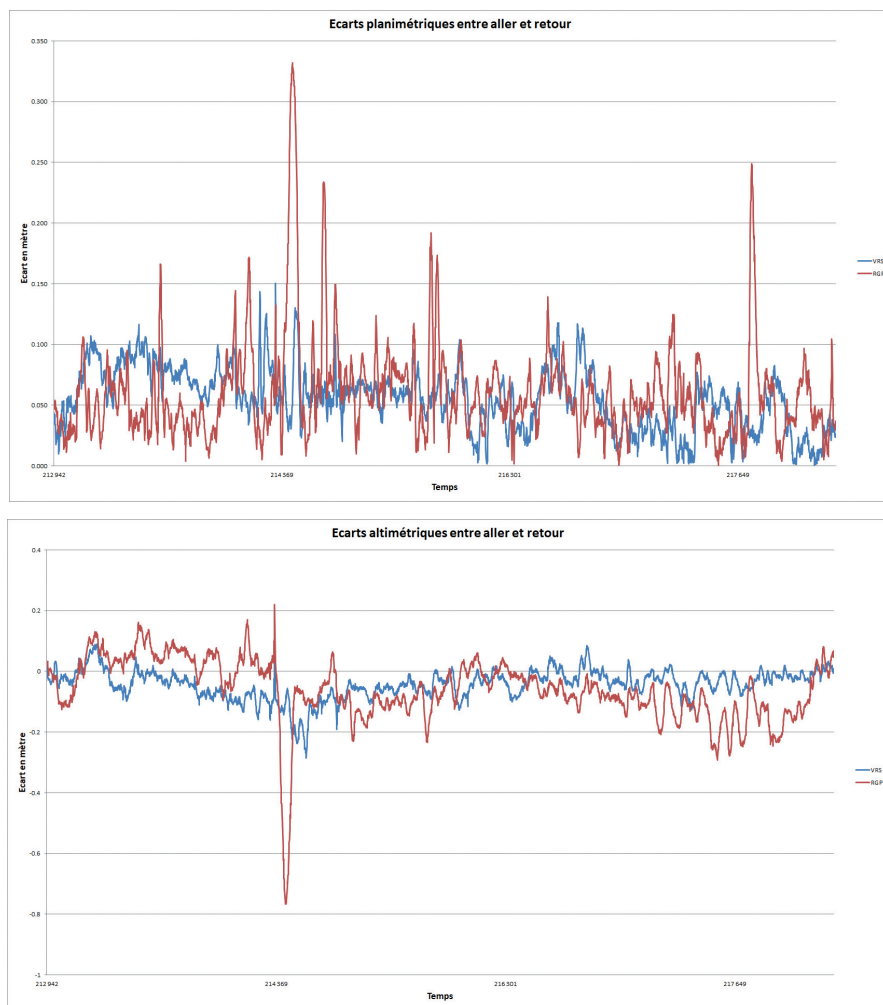


Figure 6. Carte des stations utilisées lors de la simulation.



Figures 8.1 et 8.2. Fluctuations entre trajet aller et trajet retour en conditions normales (planimétrie en haut altimétrie en bas, calcul VRS en bleu et calcul RGP en rouge).



GNSS temps réel réseau (réseaux Orphéon, Téria, Sat Info). SNCF Réseau utilise ces méthodes depuis plusieurs années pour certains relevés. L'utilisation des VRS n'est donc pas inconnue bien que souvent masquée derrière les services NRTK.

L'utilisation des VRS pour le calcul des trajectoires est connu, cependant SNCF Réseau n'avait jusqu'alors pas évalué cette méthodologie en termes de qualité ni en termes de gain.

Dans le cadre de la mise en place d'acquisitions massives et compte tenu de l'évolution des outils à disposition, il a été décidé de mener une analyse des gains liés à l'utilisation des stations virtuelles pour le traitement des trajectoires des systèmes dynamiques. Cette analyse a été réalisée par ATT avec l'aide de la société FB Solutions qui propose un service de génération de stations virtuelles via son outil RinexPro.

Analyse comparative

Cette analyse a été menée afin d'évaluer l'utilisation des stations virtuelles et de quantifier les gains possibles. En premier abord, l'utilisation des stations virtuelles doit permettre de pallier à tous les problèmes de logistique rencontrés lors d'une acquisition par méthode traditionnelle et doit également permettre de pallier aux problèmes rencontrés lors de l'utilisation des réseaux permanents. Cependant seule une analyse comparative peut permettre de vérifier ces points.

Plusieurs chantiers tests ont été utilisés pour évaluer la méthode de calcul par VRS. Chaque chantier a fait l'objet d'un passage aller et d'un passage retour (pas nécessairement acquis à la même date). Chacun de ces chantiers a été calculé à l'aide des méthodes réseaux permanent et VRS (la méthode tradi-

tionnelle n'étant plus utilisée elle n'a pas été comparée). Enfin, les écarts planimétriques et altimétriques entre l'aller et le retour de chaque projet (fluctuations) ont été déterminés et analysés. En effet, bien que ces contrôles ne permettent pas d'évaluer l'exactitude des résultats, elle permet de contrôler leur répétabilité.

Sur la plupart des projets, nous constatons des fluctuations similaires entre l'aller et le retour pour les deux méthodes de calcul. Cependant, nous pouvons constater une répartition plus homogène des écarts avec moins de pics dans le cas d'un calcul à l'aide de VRS. Nous les appellerons des projets en conditions normales (*figures 8.1. et 8.2.*

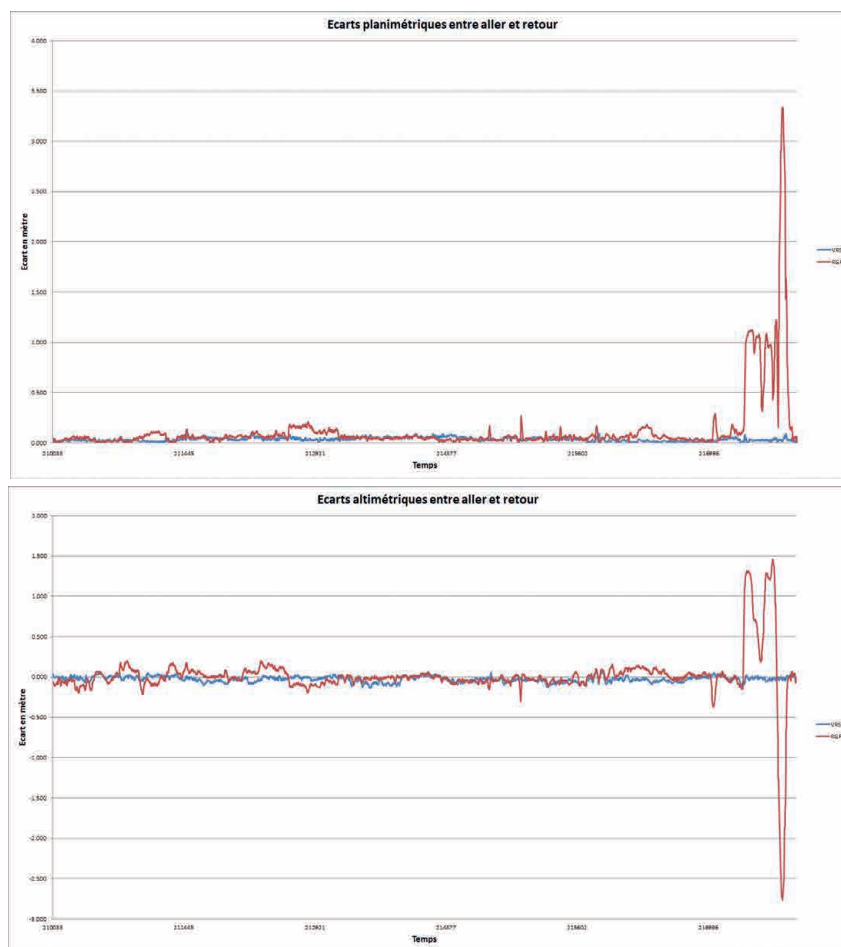
Par contre, dans certains projets les résultats de l'analyse sont tout autres. Il arrive que de grosses fluctuations soient constatées entre l'aller et le retour de projets déterminés à l'aide des réseaux permanents (écarts pouvant atteindre plusieurs mètres). Ces importantes variations sont souvent localisées géographiquement et temporellement. De tels écarts ne sont pas constatés avec un calcul à l'aide de stations virtuelles. Nous les appellerons des projets en conditions dégradées (*figures 9.1. et 9.2.*

Analyse des résultats

Les graphiques présentés montrent deux choses :

- en conditions normales, les deux méthodes de calcul donnent des résultats cohérents ; la solution VRS semble donner des résultats plus homogènes ;
- en conditions dégradées, la méthode réseaux permanents donne des écarts très importants qui ne sont pourtant pas détectés par le logiciel de traitement de la trajectoire ; la solution VRS, elle, n'est pas impactée par ce phénomène.

Nous avons donc cherché à comprendre la source de ce phénomène que nous constatons dans les calculs en conditions dégradées. Une analyse sur ces anomalies a été menée et a montré qu'elles sont dues à des perturbations des mesures GNSS au niveau des stations permanentes sur la plage horaire des mesures du scanner laser



Figures 9.1 et 9.2. Fluctuations entre trajet aller et trajet retour en conditions dégradées (planimétrie en haut et altimétrie en bas, calcul VRS en bleu et calcul RGP en rouge).

Méthode	Avantages	Inconvénients
Méthode classique	Maitrise de toute la chaîne d'acquisition Maîtrise de la distance pivot-mobile Résultats éprouvés et fiables	Nécessite de déployer beaucoup de récepteurs avec du personnel (coût élevé) Nécessite une mise en œuvre avant le début des mesures scanners Difficile à mettre en œuvre à grande échelle
Méthode réseau	Couverture nationale Coût faible des données Pas de préparation nécessaire Automatisation possible	Aucune maîtrise de la disponibilité Nécessite de coupler les réseaux pour bien couvrir le territoire Disponibilité limitée des données (sur certains réseaux) Aberrations constatées lors des traitements Calcul "boîte noire"
Méthode VRS	Couverture nationale Coût faible des données Pas de préparation nécessaire Automatisation possible Maîtrise de la distance pivot-mobile Filtre les aberrations constatées sur la méthode réseau	Résultats basés sur des mesures virtuelles

Table 2. Avantages et inconvénients de chaque méthode.

dynamique (généralement sur un seul des passages). Les raisons de ces perturbations restent cependant indéterminées. Une étude plus poussée devrait être menée. Le logiciel RinexPro développé par FB Solutions exclut automatiquement ces stations permanentes lorsque le calcul d'ambiguïtés ne fonctionne pas lors de la génération des VRS. C'est pourquoi le calcul des trajectoires par VRS n'est pas affecté par ce phénomène.

Lorsque nous reprenons le traitement par méthode des réseaux permanents en retirant les stations défectueuses, les écarts constatés retombent dans le cas du premier exemple en conditions normales.

Plusieurs méthodes ont été menées pour essayer de détecter ces anomalies sans passer par l'utilisation de VRS (calcul du réseau des stations par le logiciel LGO, calcul de chacune des stations en mode PPP statique et cinématique). Aucune de ces méthodes n'a permis de mettre en avant des stations perturbées (aucune corrélation trouvée entre les résultats des calculs et une perturbation des mesures). Une meilleure connaissance de la source exacte de ce phénomène permettrait certainement de mieux le détecter. Toutefois pour être pertinente, cette détection doit être automatique.

Avantages – Inconvénients de chaque méthode

Le *tableau 2* donne pour chaque méthode les avantages et les inconvénients du point de vue de SNCF Réseau.

En conclusion nous pouvons dire que l'utilisation de stations virtuelles pour le calcul des trajectoires n'améliore pas significativement la précision finale des données (dans l'ensemble), mais permet d'obtenir des données plus homogènes et assure un contrôle qualité des données issues des stations permanentes (qui sont utilisées pour générer les VRS).

Ainsi les principaux problèmes rencontrés jusqu'à présent sont résolus. Les VRS peuvent être réparties de façon homogène le long du parcours même aux abords des zones frontalières,





aucune intervention terrain n'est nécessaire en amont ou durant les acquisitions de cartographie mobile et aucune organisation logistique particulière n'est à mettre en place. Enfin les résultats finaux sont plus homogènes. Le coût de la méthode VRS est très faible (quelques centaines d'euros par mois sans limites d'utilisation). La méthode réseau nécessite de coupler les réseaux et donc d'utiliser des données payantes, mais le coût reste très faible en moyenne. Enfin, la méthode traditionnelle est très coûteuse puisqu'elle nécessite beaucoup de récepteurs GNSS ainsi que du personnel et des véhicules pour les déployer.

■ Une génération automatique des VRS

Afin de faciliter et d'automatiser l'utilisation des stations virtuelles, un applicatif a été développé par SNCF Réseau pour automatiser la génération des VRS. Cet outil détermine la position des stations virtuelles ainsi que leur plage horaire de mesure à partir des données de navigation de la trajectoire brute enregistrée par le système de mesure. Enfin, il lance la génération des stations sous l'API RinexPro et télécharge les fichiers Rinex ainsi que le fichier de rapport de génération.

À la suite de cette étape, les traitements sous l'application PosPac MMS sont exécutés automatiquement. Un contrôle humain reste nécessaire pour valider le traitement de la trajectoire.

Conclusion

Les systèmes de cartographie mobile sont des outils performants qui peuvent faire gagner beaucoup de temps d'acquisition. Cependant ils peuvent nécessiter de nombreuses ressources lors de leur utilisation.

SNCF Réseau, qui utilise ces systèmes depuis 2013, s'efforce de trouver des solutions pour rendre leur déploiement plus simple sur le terrain tout en conservant des résultats conformes aux besoins de notre entreprise.

La simplification et l'automatisation sont les axes principaux d'amélioration sur lesquels SNCF Réseau travaille afin de permettre une acquisition moins coûteuse et un traitement plus rapide. ●

Contacts

Mathieu REGUL - Chef de la section Méthodes et Mesures Topographiques 3D - mathieu.regul@reseau.sncf.fr

Florian BIROT - Directeur de FB Solutions - florian@fb-solutions.tech

Références

Regul et al., *SNCF Réseau : de l'acquisition 3D à la diffusion de la donnée*, XYZ n°153.

Choquart Q., *Intégration des systèmes d'acquisition de données topographiques par scanner laser dynamique dans les processus de mesure et de contrôle des gabarits de la SNCF*, Projet de Fin d'Études, 2014.

Häkli P., *Quality of Virtual Data Generated from the GNSS Reference Station Network*, XXIII FIG Congress, 2006.

Vollath, U., A. Deking, H. Landau, Chr. Pagels (2001) *Long Range RTK Positioning using Virtual Reference Stations*, Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada, June 2001.

Legros R., Morel L., Viguier F., Birot F., *Méthode du statique multi-stations*, XYZ n° 134, 2013.

ABSTRACT

SNCF Réseau uses 3D scanners from over 10 years. The use of point cloud and scanners (statics and mobile) allowed to increase the volume of acquisitions and to make processing more reliable.

In 2013 the Land Survey Department of SNCF Réseau bought a mobile mapping system RiEGL VMX-450 and became the first Infrastructure Manager in the world to have such a system.

In 2019 SNCF Réseau equipped three measuring trains with mobile mapping systems RiEGL New VMX-Rail in order to make permanent and cyclical mapping of the National Railway Network.

As the volume of data is permanently growing up to 200 000 km of acquisitions per year since 2020 it was necessary to adapt the acquisition and processing procedure of the mobile mapping systems.



COMMANDEZ "LE MARÉGRAPHE" au prix de 85,50 €

640 pages, 400 illustrations
frais de port inclus (France)

M/Mme Nom : _____

Prénom : _____

Société ou organisme : _____

Adresse : _____

Code postal :

Ville : _____

Tél. :

Fax :

Courriel : _____

Date : _____

Signature _____

Bulletin de commande à retourner accompagné d'un chèque à l'Association francophone de topographie
73, avenue de Paris - 94165 SAINT-MANDÉ
Cedex - Tél. : +33 (0) 1 43 98 84 80

**Achat également sur Internet :
www.aftopo.org**