

Surveillance géodésique par GPS: une approche régionale

Depuis quelques années les réseaux géodésiques nationaux sont équipés d'un certain nombre de stations GPS permanentes. Les systèmes et cadres de coordonnées sont ainsi disponibles aisément et permettent un rattachement efficace et cohérent d'autres réseaux géodésiques. C'est dans ce contexte que s'inscrit cet article qui présente une approche régionale de la surveillance géodésique avec l'étude d'un réseau pilote couvrant une partie du Valais central. Il présente notamment le rattachement à la mensuration nationale et un test de détection de mouvements.

Seit einigen Jahren sind die nationalen geodätischen Netze mit permanenten GPS-Stationen ausgerüstet. Die jeweiligen Referenzrahmen und -systeme sind somit einfach verfügbar und erlauben eine effiziente und kohärente Anbindung anderer Netze. Der Artikel präsentiert einen regionalen Ansatz zur geodätischen Überwachung aufgrund einer Studie eines Pilot-Netzwerkes im Zentralwallis. Erläutert wird insbesondere die Anbindung an das nationale Netz und die Verfahren zur Ortung von Bewegungen.

Da alcuni anni a questa parte, le reti geodesiche sono equipaggiate di stazioni GPS permanenti. I relativi ambiti e sistemi di riferimento sono quindi semplicemente disponibili e permettono un allacciamento efficiente e coerente delle altre reti. L'articolo mostra un approccio regionale della sorveglianza geodesica, basato su uno studio di una rete pilota del Vallese centrale. In particolare, ci si sofferma sulla connessione alla rete nazionale e alla procedura di localizzazione dei movimenti.

L. Rey, P.-Y. Gilliéron, A. Waegli

Contexte

Les méthodes géodésiques sont appliquées depuis longtemps pour la construction, la maintenance et le contrôle de stabilité des ouvrages d'art. Dans ce contexte, les moyens mis en œuvre s'appuient sur des méthodes topométriques comme la triangulation, la mesure électronique de distances, le nivellement et depuis peu le GPS. Les réseaux géodésiques classiques ont, jusqu'à présent, répondu aux exigences de la surveillance locale, mais de nouvelles préoccupations éveillent l'attention des responsables d'ouvrages et des autorités de surveillance. En effet, dans le contexte des Alpes, les phénomènes d'instabilité à une échelle régionale doivent être étudiés afin d'en évaluer l'impact sur les ouvrages de plus grande étendue comme les conduites for-

cées, les ponts ou les tunnels. Ce travail de recherche exploite le potentiel d'un réseau GPS permanent utilisé dans un concept de surveillance étendue [Rey L., 2006].

Concept de surveillance d'une zone étendue

La surveillance de zone étendue se situe à la jonction d'un système de surveillance locale et d'un système de surveillance régionale. Cette conception est relativement nouvelle puisque dans son principe, la surveillance ne se contente pas simplement de garantir la stabilité de l'ouvrage, mais prend aussi en compte des mouvements potentiels plus globaux.

Le but de cette conception est de pouvoir détecter et quantifier des mouvements de terrain lents, difficilement perceptibles et dont l'influence sur la stabilité à long terme de certaines constructions des réseaux

locaux est encore mal connue. De tels mouvements sont décelables que sur des périodes de plusieurs années et peuvent potentiellement s'accélérer sur une courte période. Pour répondre à cet objectif, il est primordial de mettre en place un dispositif d'observations dont la continuité et la pérennité sont garanties. De plus, la détection de ce genre de mouvements requiert une précision et fiabilité accrue des mesures. Or, on sait actuellement que pour des réseaux géodésiques comportant des distances de plusieurs kilomètres, les mesures satellitaires atteignent de meilleures précisions que les mesures terrestres. Néanmoins, la méthode GPS est soumise à certains facteurs limitants qu'il est impératif de prendre en compte pour atteindre le niveau de précision désiré.

Avant de passer aux mesures, il est indispensable de définir clairement le système et le cadre de référence associés au concept de surveillance. En effet, afin de comparer l'évolution d'un réseau géodésique dans le temps, il est nécessaire de:

- choisir un système de référence permettant une interprétation aisée des coordonnées et assurant une transformation univoque et sans distorsion depuis le système de référence utilisé par GPS (WGS84);
- s'appuyer sur un système et un cadre de référence national (par ex. CHTRS95) connu et bien défini, garantissant l'étude des mouvements à long terme et assurant le lien avec d'autres réseaux de surveillance comme, par exemple, les réseaux de recherche sismique.

Dans ce concept, il est primordial que l'extension d'un réseau local se fasse en collaboration avec des gestionnaires de réseaux GPS permanents, afin de profiter de l'expérience acquise dans la réalisation d'autres projets et surtout d'utiliser les infrastructures existantes pour optimiser le dimensionnement du réseau et, le cas échéant, réduire les coûts. A ce titre, il existe en Valais plusieurs projets mettant en œuvre un réseau de stations permanentes. On trouve d'une part le réseau GPS automatique suisse (AGNES) de swisstopo et d'autre part, le réseau du projet TECVAL de l'EPFZ traitant des dé-

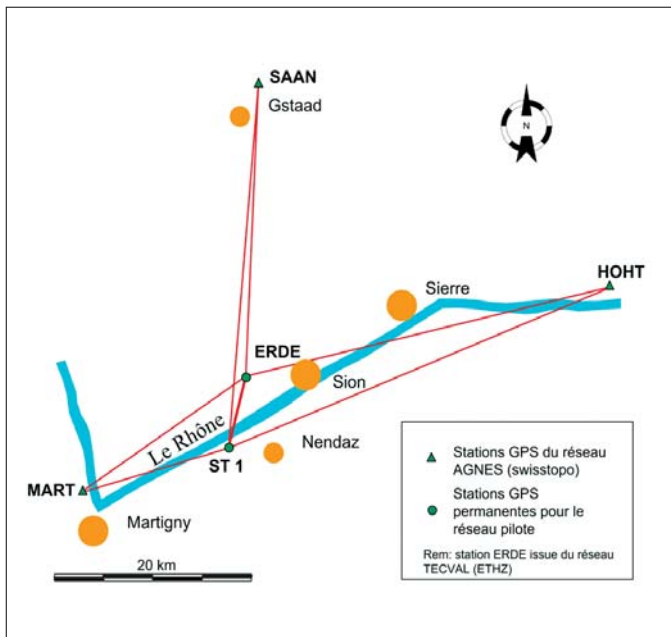


Fig. 1: Réseau de stations GPS permanentes.

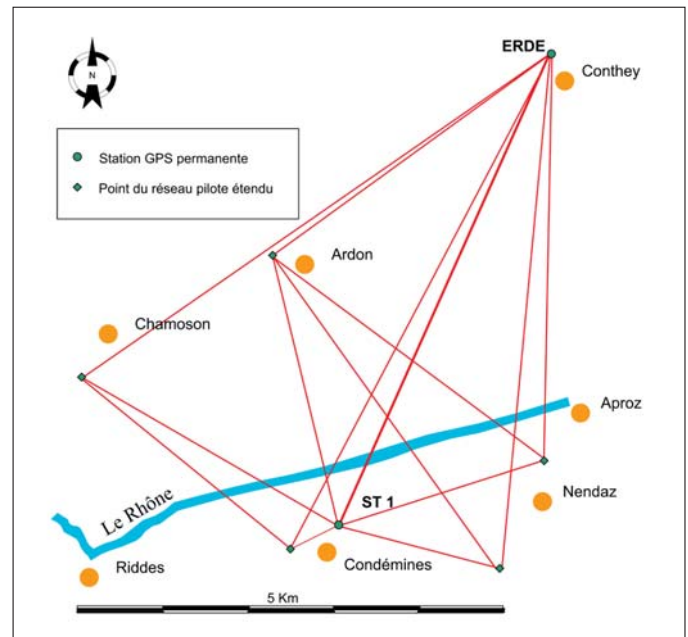


Fig. 2: Réseau pilote étendu de surveillance.

formations de la croûte terrestre et de la sismicité dans le canton du Valais [TECVAL].

Méthodes GPS de haute précision en milieu alpin

Le concept de surveillance préconise l'usage de GPS afin de remplir les exigences et les besoins de la surveillance étendue. Des précautions particulières doivent toutefois être prises pour atteindre la précision requise dans cette optique d'extension d'un réseau. En effet, cette méthode est soumise à plusieurs facteurs limitants (erreurs d'horloge, réfraction atmosphérique, multi-trajets, excentricités d'antenne, etc.) qui peuvent influencer de manière considérable la qualité du positionnement. Le milieu dans lequel on envisage d'appliquer ce concept de surveillance joue aussi un rôle prépondérant. Les mesures GPS dans un environnement alpin revêtent un caractère particulier pour plusieurs raisons [Gurtner W. et al., 1989]:

- La faiblesse de la géométrie de la constellation est accentuée. En effet, l'obstruction de l'horizon est plus importante en zone montagneuse et surtout pour les satellites à basse éléva-

tion. La composante altimétrique s'en trouve donc fortement affaiblie et sa précision par rapport à la planimétrie est fortement dégradée.

- Le contexte topographique des points situés aux extrémités de la ligne de base peut être considérablement différent. La constellation observée peut ainsi fortement varier et les satellites observés simultanément peuvent être différents. Ce phénomène est classique dans le cas d'un réseau comprenant des points sur les versants opposés d'une vallée.
- Les dénivelées entre les points de plusieurs centaines de mètre sont fréquentes en milieu alpin. Ce phénomène ne facilite pas l'usage du mode différentiel, notamment pour la correction du retard troposphérique. En effet, des biais troposphériques relatifs de 2 à 5 mm pour 100 m de dénivelée peuvent se produire. Ces biais perturbent sensiblement la composante altimétrique.
- Les conditions météorologiques à chaque extrémité de la ligne de base peuvent être très différentes dans l'environnement alpin. Ceci induit donc des biais relatifs importants dans les corrections troposphériques perturbant la composante altimétrique.

Etablissement d'un réseau étendu de surveillance

Cadre d'application

Pour l'application pratique du concept de surveillance étendue, nous avons choisi une région de montagne (Valais central) répondant aux caractéristiques de l'étude et permettant une vérification in-situ des hypothèses. Ce choix s'est porté sur l'extension d'un réseau de surveillance d'une installation hydro-électrique avec son insertion dans le cadre de la mensuration nationale. Ce réseau pilote étendu couvre ainsi les deux versants de la vallée du Rhône (figure 1) avec des points situés dans la région de Nendaz (rive gauche) et des points situés près de Chamoson (rive droite). La mise en place du concept se fait selon deux échelles et deux modes de surveillance:

- Une surveillance permanente garantie, d'une part par l'installation d'une station GPS permanente (ST 1) située au centre du réseau existant et d'autre part par l'intégration d'une deuxième station permanente (ERDE) située en rive droite du Rhône, issue du réseau TECVAL (fig. 1). Ces deux stations sont rattachées au cadre de coordonnées suisse par l'intermédiaire du réseau GPS permanent AGNES. En suivant l'évolu-

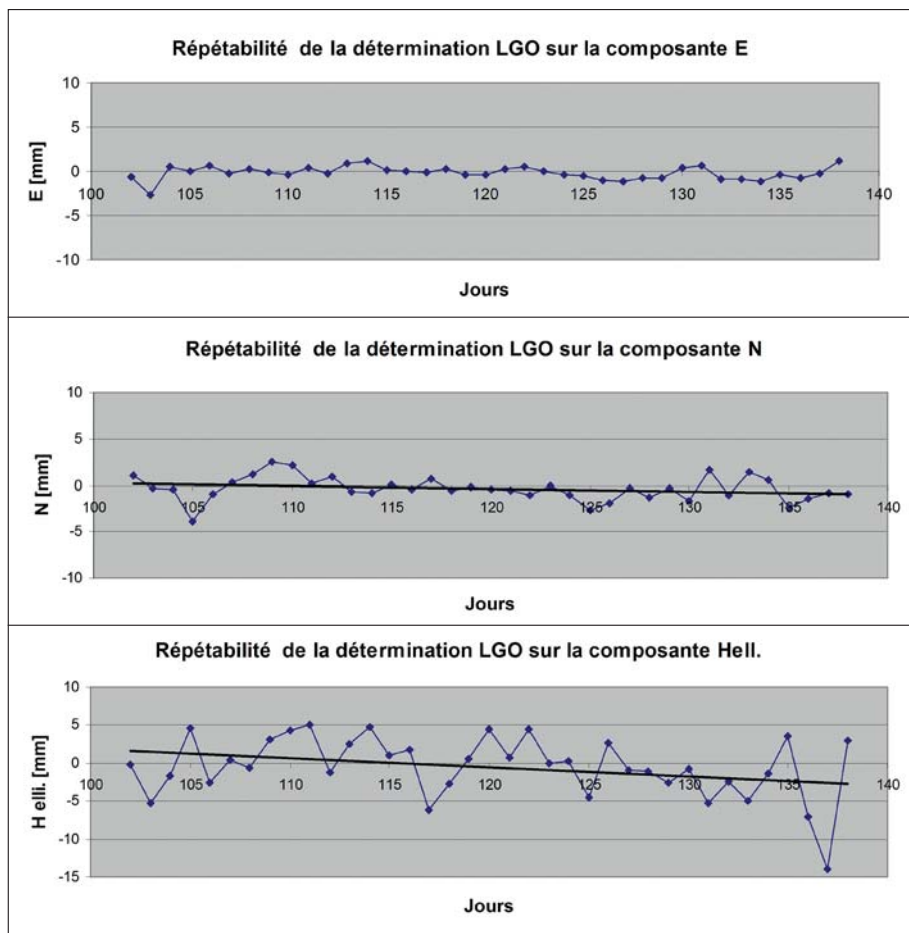


Fig. 3: Répétabilité des composantes N, E et H.

tion réciproque des positions de ces points, il est possible d'estimer leur répétabilité et de détecter d'éventuels mouvements relatifs, susceptibles de déclencher une campagne de mesures de l'ensemble des points le réseau.

- Une surveillance périodique garantie par un réseau étendu composé de dix points situés sur les deux versants de la vallée du Rhône (fig. 2). Ce réseau pilote contient les deux stations permanentes, considérées comme points fixes de contrôle lors de l'ajustement des sessions GPS et assurant un rattachement conforme au cadre de référence suisse. Il constitue une densification locale et temporaire de la surveillance permanente. L'extension par trois points en rive droite permet une meilleure interprétation de mouvements potentiels de versant. En effet, avec cette configuration, on dispose de lignes de base parallèles à un mouvement présumé (rap-

prochement des flancs de vallée). En revanche, si tous les points sont localisés en rive gauche, il devient difficile de mettre en évidence un mouvement global du flanc, car ceux-ci se déplacent tous de la même manière et leurs mouvements relatifs ne sont ainsi pas détectables

Rattachement au cadre de la mensuration nationale

Le rattachement de la nouvelle station ST1 au réseau AGNES est calculé à partir d'une série d'observations GPS de plusieurs jours. Ce calcul de référence, effectué avec le logiciel scientifique BERNESE de l'Université de Bern, a permis d'atteindre une précision de l'ordre de 1 mm en planimétrie et de 3,5 mm en altimétrie. En parallèle, un rattachement est calculé avec le logiciel commercial LGO de Leica-Geosystems avec les mêmes jeux de données. Une comparaison des résultats

montre que la différence en planimétrie est très faible (2 mm pour une longueur de base de 7 km), par contre la composante altimétrique diffère d'environ 10 mm, ce qui provient principalement de la modélisation de la troposphère.

L'avantage de l'installation d'une station permanente, au cœur d'un réseau de surveillance, réside dans l'analyse d'observations GPS en continu avec une cadence prédéfinie. Ce monitoring continu permet de quantifier les effets systématiques que subissent les mesures GPS tout au long de l'année. Cette connaissance des incertitudes a priori permet, d'une part de mieux estimer l'exactitude des mesures GPS lors d'une campagne ponctuelle et d'autre part de contrôler en permanence une ligne de base reliant deux flancs de la vallée.

Ainsi, nous avons procédé à l'analyse de la répétabilité journalière avec une série d'observations de plus d'un mois. Ce calcul, effectué avec LGO a permis d'obtenir des résultats similaires à ceux du calcul BERNESE. En effet, la composante E (est) est d'une grande stabilité avec un écart-type sur toute la série temporelle (35 jours) de 0.8 mm. La composante N (nord) est sensiblement moins bonne avec un écart-type de 1.3 mm. Cette différence est principalement due à la faiblesse de la constellation GPS au nord et à l'obstruction importante au sud du site. Enfin, la composante altimétrique est la plus fluctuante avec un écart-type de 4.1 mm (fig. 3).

Calcul du réseau pilote étendu

Le calcul du réseau étendu est effectué selon deux stratégies:

- Un calcul automatique des lignes de base et ajustement dans le logiciel LGO qui propose une gamme de tests statistiques permettant la détection de fautes sur les observations. Cette automatisation du traitement des mesures GPS est très productive lors du calcul de grandes séries d'observations. Cependant une approche plus détaillée de certaines parties de calcul n'est pas possible car les algorithmes ne sont pas forcément documentés.

- Un calcul avec LGO des lignes de base indépendantes pour chaque session et ajustement des jeux de coordonnées des sessions dans le logiciel de compensation LTOP de swisstopo.

Afin d'obtenir la meilleure détermination du réseau pilote, on traite uniquement les sessions de nuit, car les conditions atmosphériques (troposphère et ionosphère) y sont en principe plus stables. Les résultats présentent des ellipses d'erreur petites et homogènes, prouvant la bonne configuration du réseau mis en place. L'ajustement de quatre sessions nocturnes d'une durée de sept heures permet d'atteindre une bonne fiabilité avec des ellipses de confiance à 99% de l'ordre de 3 mm en planimétrie et de 10 mm en altimétrie. L'ajustement dans LTOP est choisi comme référence car il permet une meilleure maîtrise des paramètres et des modèles statistiques lors du calcul et de l'analyse des résultats. En outre, il permet aussi l'insertion de mesures terrestres et peut intégrer dans son calcul autant les réseaux locaux que globaux. Ceci trouve toute son importance dans ce concept de surveillance qui considère la combinaison de réseaux d'observation à différentes échelles (locale, régionale) en préconisant un rattachement à la mensuration nationale.

Test de détection de mouvements

L'analyse de répétabilité a montré l'avantage d'observer en continu une ligne de

base reliant deux parties d'une vallée. A cette échelle, la question qui se pose est d'estimer l'ordre de grandeur d'un mouvement détectable compte tenu de la configuration du réseau et des différentes sources d'erreurs.

Pour cela, nous avons mis en place un test de détection de mouvements sur le réseau pilote étendu afin d'en démontrer l'efficacité. Le concept du test se base en grande partie sur une étude expérimentale entreprise par [Betti B., et al., 1999] qui consiste à simuler des déplacements horizontaux et verticaux. Ceci est réalisé par l'intermédiaire d'un chariot de mesures de précision, placé sous l'antenne GPS et permettant de la déplacer horizontalement et verticalement avec exactitude (fig. 4). Lors de chaque session GPS du réseau pilote, on applique un déplacement exact de l'antenne selon un scénario prédéfini. Ainsi, on dispose de sessions GPS indépendantes (S1, S2, S3), chacune avec son déplacement théorique propre. Ces sessions sont ensuite comparées, afin de détecter les variations de position mesurées par GPS.

L'antenne, prévue pour le test, est située en rive gauche proche de la station permanente ST1. On peut donc estimer ces mouvements avec l'ensemble des points du réseau pilote, sachant qu'il y a des bases courtes (env. 1 km) et des bases plus longues, jusqu'à 7 km pour la station ERDE.

Dans ce concept on recherche à répondre à deux questions:



Fig. 4: Montage de l'antenne pour le test de détection de mouvements.

1. Est-il possible de détecter une variation de position de niveau centimétrique voir sub-centimétrique?
2. Est-ce que la variation détectée correspond au déplacement théorique imposé?

La première question concerne la précision de la méthode GPS et implique un test de signification de Fisher, alors que la deuxième question traite de l'exactitude de ce qui est détecté et implique une analyse de congruence. Ces tests se basent donc sur des méthodes statistiques classiques.

Les résultats (fig. 5) montrent que les déplacements horizontaux sont mesurés de manière significative à partir de 5 mm et que leur grandeur est en général semblable à la valeur théorique. En revanche, les déplacements altimétriques sont identifiés de manière significative qu'à partir de 15 mm et leur grandeur n'est bien mesurée que dans 67% de cas.

Finalement, si l'on ne considère que la ligne de base mesurée depuis ERDE, les déplacements horizontaux ne sont significatifs qu'à partir de 10 mm. Ce résultat démontre l'intérêt d'un réseau étendu de surveillance et sa complémentarité aux observations faites dans un réseau local.

Intervalle de confiance à 95%				
Session	EMA [mm]	EMB [mm]	Dplan. [mm]	Diff. valeur théo. [mm]
S2-S1	5	5	7	0
S3-S1	4	4	22	1
S3-S2	5	5	15	1
Session	EMH (95%) [mm]		DH [mm]	Diff. valeur théo. [mm]
S2-S1	6		-3	2
S3-S1	6		18	3
S3-S2	6		21	1

Légende	
	significatif
	non significatif
	congruent
	non congruent

Fig. 5: Tests de signification et de congruence pour des déplacements horizontaux et verticaux.

Conclusion et perspective

L'application pratique du concept de surveillance a montré les avantages de la mise en œuvre de stations GPS permanentes. En effet, elles garantissent un rattachement robuste au cadre de référence de la mensuration nationale, un suivi des erreurs systématiques liés à la méthode GPS et une identification de mouvements significatifs anormaux. La perspective d'un traitement automatisé doit encore être étudiée.

Une campagne de mesures GPS a permis de réaliser les objectifs décrits dans le concept de surveillance et d'établir un réseau pilote fiable, permettant entre autre la détection de mouvements. Ce test a montré la bonne capacité du réseau à mettre en évidence des mouvements horizontaux de l'ordre du demi-centimètre. Par contre, les mouvements verticaux sont moins bien perçus, ce à quoi on pouvait s'attendre.

Les problèmes plus complexes relatifs aux excentricités d'antenne, à l'influence du radôme et à l'influence de la couverture neigeuse des antennes doivent encore faire l'objet de plus amples recherches, afin

d'améliorer la compréhension des comportements systématiques et de renforcer la qualité de la détermination des coordonnées des points du réseau.

Enfin ce projet pilote a montré l'intérêt d'une collaboration entre différents acteurs du domaine de la surveillance géodésique. La synergie avec le projet TECVAL a en effet permis une amélioration substantielle de la qualité du réseau pilote par une densification des stations permanentes. Dans la perspective d'une approche régionale du monitoring de l'environnement naturel et construit, la mise en place de telles infrastructures de mesures devraient être coordonnée et encouragée. La surveillance est une préoccupation collective qui devrait inciter les autorités et les responsables d'ouvrages d'art à unir leurs moyens, tant financiers que techniques, dans un intérêt commun.

Remerciements

Le Laboratoire de Topométrie tient à remercier swisstopo et l'Institut de géodésie de l'ETHZ pour la mise à disposition de données GPS et pour leurs conseils dans ce projet.

Références:

Betti B., Biagi L., Crespi M., Riguzzi F., 1999: GPS sensitivity analysis applied to non-permanent deformation control networks, *Journal of Geodesy* (1999) no 73, p. 158–167.

Gurtner W., Beutler G., Botton S., Rothacher M., Geiger A., Kahle H.-G., Schneider D. et Wiget A., 1989: The Use of the Global Positioning System in mountainous areas, *Manuscripta Geodaetica*, 14: 53–60 1989.

Rey L., 2006: L'impact de l'atmosphère sur la localisation GPS pour la surveillance étendue d'ouvrage d'art, travail de master EPFL.

TECVAL: GPS based determination of crustal deformation, and seismicity in the canton of Valais, Switzerland, Project, Institut für Geodäsie and Photogrammetrie, ETHZ.

Ludovic Rey
Pierre-Yves Gilliéron
Adrian Waegli
Ecole polytechnique fédérale
de Lausanne
Laboratoire de Topométrie
Station 18
CH-1015 Lausanne
pierre-yves.gillieron@epfl.ch