

Application de la méthode GPS de localisation par satellite à la surveillance de sites naturels instables

Jean-Paul DURANTHON

Chef de la section Télésurveillance - Mesures
Groupe Mécanique des Roches

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon

RÉSUMÉ

Parmi les moyens d'investigation utilisés pour la mesure des mouvements de la surface de la Terre (topométrie terrestre classique, photogrammétrie, extensométrie et autres outils de localisation spatiale), le système militaire américain de localisation par satellites NAVSTAR GPS est devenu, depuis de nombreuses années, un outil incontournable.

Son application à la surveillance de sites naturels instables s'est tout naturellement développée au cours des dernières années et elle offre une réponse souvent pertinente aux problèmes posés par la configuration géométrique de certains sites.

La première partie de l'article présente un bref état de l'art des solutions satellitaires GPS adaptées à la surveillance de massifs rocheux instables, puis décrit les performances actuelles du système GPS et les différents systèmes pouvant être mis en place.

La seconde partie présente un exemple d'application de cette méthode à la surveillance du site de Séchilienne (Isère) et analyse les problèmes associés à la mise en œuvre de l'outil GPS, de la méthodologie retenue et des calculs.

MOTS CLÉS : 41 - *Global positioning system - Mesure - Contrôle - Roche - Mouvement - Stabilité - Glissement (terrain).*

Introduction

En matière d'applications civiles, et plus particulièrement dans le domaine de la géodésie et de la topométrie, le système militaire américain de localisation par satellites NAVSTAR GPS est devenu, au fil des années, un outil incontournable. Son application à la surveillance des sites naturels instables s'est tout naturellement développée, comme c'est le cas au Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Lyon depuis 1992. Au côté des autres moyens d'investigation (topométrie terrestre classique, photogrammétrie, extensométrie et autres outils de localisation dans l'espace), la méthode GPS apporte une réponse souvent pertinente aux problèmes posés par la configuration de certains sites.

Cet article passe d'abord en revue les solutions de localisation satellitaire de type GPS adaptées à la surveillance des massifs rocheux instables, puis en présente une application au site de Séchilienne.

Les modes de surveillance des sites instables

Définitions

Suivant la gravité du phénomène, la surveillance des risques liés à l'instabilité des sites naturels peut prendre des formes d'importance croissante :

- la mise sous observation du site est une forme préliminaire de surveillance qui vise à confirmer la possibilité d'occurrence de l'instabilité. Son objectif est aussi de circonscrire le phénomène et d'établir un état zéro du site ;
- l'auscultation a pour but de caractériser les phénomènes ou mécanismes mis en jeu, sans gestion de la sécurité ;
- la surveillance est directement orientée vers la gestion de la sécurité. Elle s'appuie sur le recueil, l'exploitation et l'interprétation des données qualitatives et quantitatives caractérisant l'évolution du site.

Une composante fondamentale de la surveillance est la prise en compte du temps. Suivant les caractéristiques du site, les méca-

nismes en jeu et leur évolution probable, l'influence du temps peut être variable, ce qui conduit à distinguer plusieurs modes de surveillance :

- surveillance périodique pour les phénomènes évoluant lentement,
- surveillance permanente discontinue,
- surveillance permanente continue, avec un traitement des données en différé ou en temps réel.

Choix et localisation du dispositif de mesure

Le choix du système de mesure dépend de plusieurs critères :

- la fréquence des mesures,
- le bilan économique du projet de surveillance,
- les caractéristiques cinématiques du phénomène, des délais d'alarme courts impliquant des capteurs à court temps de réponse,
- la précision exigée des mesures. Par exemple, les vitesses moyennes d'évolution du glissement de la Clapière dans la vallée de la Tinée (Alpes-Maritimes) (quelques centimètres par jour) n'exigent pas *a priori* la même précision de mesure que le glissement de Salèdes (quelques centimètres par an).

Les capteurs de mesure des grandeurs cinématiques seront placés en règle générale, d'une part, sur la partie la plus active du phénomène et, d'autre part, sur une base fixe (capteurs témoins) pour mettre en évidence et éventuellement corriger une dérive du système de mesure (température, usure de l'appareil, etc.).

Les besoins de localisation pour la surveillance des sites instables

La surveillance des massifs rocheux instables requiert un repérage géométrique de précision, variable selon les sites, à effectuer par rapport à un ensemble de repères fixes.

Dans certains sites, il est possible de faire les mesures par rapport à une zone stable située à proximité. C'est le cas, par exemple, des grandes fractures, crevasses, etc. Des procédés utilisant un référentiel proche peuvent alors être utilisés pour mettre en évidence le déplacement des différentes masses. Selon les besoins, des mesures courtes unidimensionnelles ou tridimensionnelles peuvent être effectuées. On utilise alors des capteurs linéaires extensométriques (longs de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres) ou des procédés optiques (nivellement de précision ou micro-triangulation).

En revanche, dans les sites très disloqués, dont les mouvements sont complexes et ne peuvent être caractérisés par des mesures différentielles de proximité, on cherche à se rapporter à la zone stable la plus proche pour limiter les distances de mesure. Pour ces sites, il faut choisir des dispositifs de localisation adaptés, unidirectionnels ou tridimensionnels, tels que les systèmes

optiques électromécaniques ou des solutions de localisation par satellite.

Enfin, sur chaque site, il existe une précision minimale de surveillance au delà de laquelle la mesure perd toute représentativité. En général, la surveillance nécessite des solutions de précision centimétrique ou sub-centimétrique pour satisfaire ce besoin.

Parmi les nouvelles techniques de localisation, le système GPS est assurément le plus répandu. Cet article se limite aux solutions satellitaires GPS de résolution adaptée à la surveillance des massifs rocheux instables, même si d'autres techniques de localisation GPS ou satellitaires ont des performances impressionnantes.

Les possibilités du système GPS

Performances actuelles

Selon le mode de localisation utilisé (statique, statique rapide ou cinématique), la méthodologie des mesures et des calculs, les performances obtenues sont variables : de 2 mm + 2 ppm en mode statique monofréquence à courte distance, à 5 mm + 5 ppm (terme proportionnel à la distance) en mode cinématique, en temps différé ou en temps réel.

Il faut rappeler que les performances du système dépendent de nombreux facteurs :

- dégradations volontaires par les gestionnaires du système,
- sources d'erreurs inhérentes au système,
- orbite des satellites,
- délai ionosphérique,
- environnement du point,
- erreurs dues au matériel (excentrement d'antenne, par exemple),
- qualité de la constellation.

Nature des phénomènes adaptés à un suivi par la méthode GPS

La localisation GPS peut être appliquée au suivi de phénomènes présentant des vitesses d'évolution et des superficielles actives très variées :

- déformations lentes (mouvements tectoniques, affaissements, tassements d'ouvrages) quelques millimètres à centimètres par an,
- déformations rapides (glissements de terrain, déformations avant activité volcanique) : quelques millimètres à centimètres par jour ou plus.

Pour le suivi des phénomènes d'instabilité de sites naturels comme les grands versants, la méthode GPS élargit les possibilités techniques des techniques traditionnelles. En particulier :

- il n'est plus nécessaire que les repères fixes et mobiles soient mutuellement visibles,
- le système GPS permet des mesures quelles que soient les conditions météorologiques,

- la précision est bonne et compatible avec celle des mesures classiques. Elle reste cependant moins performante sur la composante verticale. Des précautions doivent être prises quant à la méthodologie d'observation et de calcul à employer,
- le système est utilisable 24h/24,
- les mesures sont faciles à mettre en œuvre grâce aux performances des matériels,
- le coût du matériel est en baisse régulière depuis de nombreuses années,
- il est possible de travailler en temps réel et en télétransmission.

Ces avantages rendent l'outil GPS intéressant pour les maîtres d'œuvre chargés de la surveillance de sites instables.

Toutefois, quelques inconvénients peuvent limiter cet intérêt :

- les qualités métrologiques du système peuvent être sacrifiées aux intérêts militaires du pays d'origine du GPS (dégradations volontaires pendant la guerre du Golfe, par exemple). Le projet civil européen Galileo ne pourra offrir une alternative que vers 2008 ;
- pour recevoir les signaux des satellites, un dégagement important est requis autour de chaque point de mesure ;
- les altitudes définies par référence à un ellipsoïde et par rapport au géoïde ne sont pas compatibles : à moins de disposer d'un modèle local précis du géoïde, le passage entre les deux altitudes n'est pas assez précis. Toutefois, pour la surveillance des sites instables, seuls des mouvements relatifs sont souvent recherchés et cette incompatibilité n'est gênante que lorsque l'on est tenu d'effectuer des comparaisons entre des dénivelés GPS et des dénivelés obtenus par nivellement direct ou indirect.

Les emplois du système GPS dans la surveillance des sites

Comme déjà indiqué, nous distinguerons la surveillance périodique discontinue, la surveillance permanente discontinue et la surveillance permanente continue.

Surveillance périodique discontinue

Dans ce type de surveillance, le système de mesure n'est pas opérationnel en permanence. Les antennes GPS sont donc mises en place périodiquement sur des repères matérialisés. Les mesures sont effectuées de manière discontinue avec une fréquence adaptée aux déplacements mis en évidence. Comme les mouvements à détecter peuvent être d'amplitude très faible, la méthode de mesure doit être adaptée à cette amplitude : mode statique classique monofréquence avec sessions longues, coefficient GODP (affaiblissement de la précision du résultat – Geometric Dilution of Precision) très faible (inférieur à 5), redondance des mesures permettant la qualification des résultats.

Surveillance permanente discontinue

Dans ce cas, le système de surveillance est opérationnel en permanence ou peut être mis en place très rapidement. Les mesures sont effectuées de façon discontinue, avec une fréquence adaptée aux déplacements mis en évidence. Ce type de surveillance est adapté à un glissement suffisamment actif pour que soient envisagées des mesures quotidiennes ou hebdomadaires. La méthode de mesure doit être adaptée aux mouvements observés : mode statique rapide avec sessions courtes et coefficient GODP très faible ou en temps réel RTK (localisation cinématique en temps réel – Real Time Kinematic) lorsque la constellation des satellites est favorable et la liaison de bonne qualité.

Surveillance permanente continue

Dans ce type de surveillance, les mesures sont recueillies en continu et transmises et traitées en temps réel (en fait avec un très court délai de réponse) ou en différé. Ces résultats peuvent ensuite être exploités dans le cadre d'un processus de gestion de la sécurité.

Conditions de mise en œuvre

La mise en œuvre de mesures GPS nécessite d'installer un système de télésurveillance comportant :

- une ou plusieurs stations GPS fixes, servant de référence,
- une ou plusieurs stations GPS d'observation des points mobiles,
- un dispositif de transmission des données du site vers le poste central de suivi, par exemple par une ligne téléphonique,
- une liaison RTK entre stations fixes et mobiles, qui peut être de différents types (UHF, VHF, GSM, satellitaire, etc.),
- l'alimentation en énergie de chacun des composants.

Exemples

Dans le domaine de la télésurveillance par mesures GPS, différentes applications ont été développées, avec des moyens plus ou moins importants et des résultats plus ou moins probants. On peut citer :

- le suivi de la subsidence de plates-formes pétrolières par le Centre d'Études Atomiques (CEA),
- le suivi des déformations du barrage du Mont-Cenis par Électricité de France,
- le suivi des mouvements de l'écorce terrestre par l'Institut de Physique du Globe dans des zones fortement sismiques (Californie, Japon, Réunion).

L'influence du bruit de fond sur la détermination des mouvements peut être importante. Une très bonne précision, de l'ordre du centimètre, est cependant accessible.

La figure 1 montre quelques vues de stations GPS installées dans des sites instables.



Fig. 1 - Exemples d'instrumentation pour le suivi par méthode GPS.

Commentaires

Ce bref état de l'art en matière de localisation GPS appliquée à la surveillance des sites naturels instables permet de constater l'apparition de possibilités techniques intéressantes dans le domaine du GPS en temps réel (RTK). Les précisions atteintes sont déjà prometteuses et le développement doit être orienté vers les aspects matériels et logistiques (fig. 2). Par ailleurs, les méthodologies classiques (modes statique et statique rapide avec post-traitement) répondent toujours efficacement aux besoins en termes de réponse différée. En parallèle, le matériel et les logiciels évoluent vers une plus grande souplesse et de meilleures performances.

Exemple d'application : le site de Séchilienne

Généralités

Le LRPC de Lyon a en charge depuis 1985, à la demande des ministères de l'Équipement et de l'Envi-

ronnement, la surveillance du site des ruines de Séchilienne (Isère). Il s'agit d'un massif rocheux qui surplombe la vallée de la Romanche à une vingtaine de kilomètres en amont de Grenoble et présente un risque majeur d'éboulement (fig. 3a et 3b). L'importance des volumes en jeu, plusieurs dizaines de millions de mètres cubes, interdit toute solution confortative.

La totalité de la zone en mouvement correspond sensiblement à une superficie de 70 ha. Elle a été équipée de plusieurs types de dispositifs de mesures :

- extensométrie pour la détermination de mouvements relatifs à partir d'un réseau composé d'extensomètres qui fonctionnent de manière automatique et renseignent à distance, avec un pas de temps réduit, sur les mouvements du versant. Ce type de surveillance est adapté à la gestion de la sécurité ;
- géodésie pour la détermination des xyz absolus d'un réseau de repères référencés par rapport à un canevas de points réputés stable. Ce canevas est composé de sept points, qui font régulièrement l'objet d'un contrôle de stabilité.

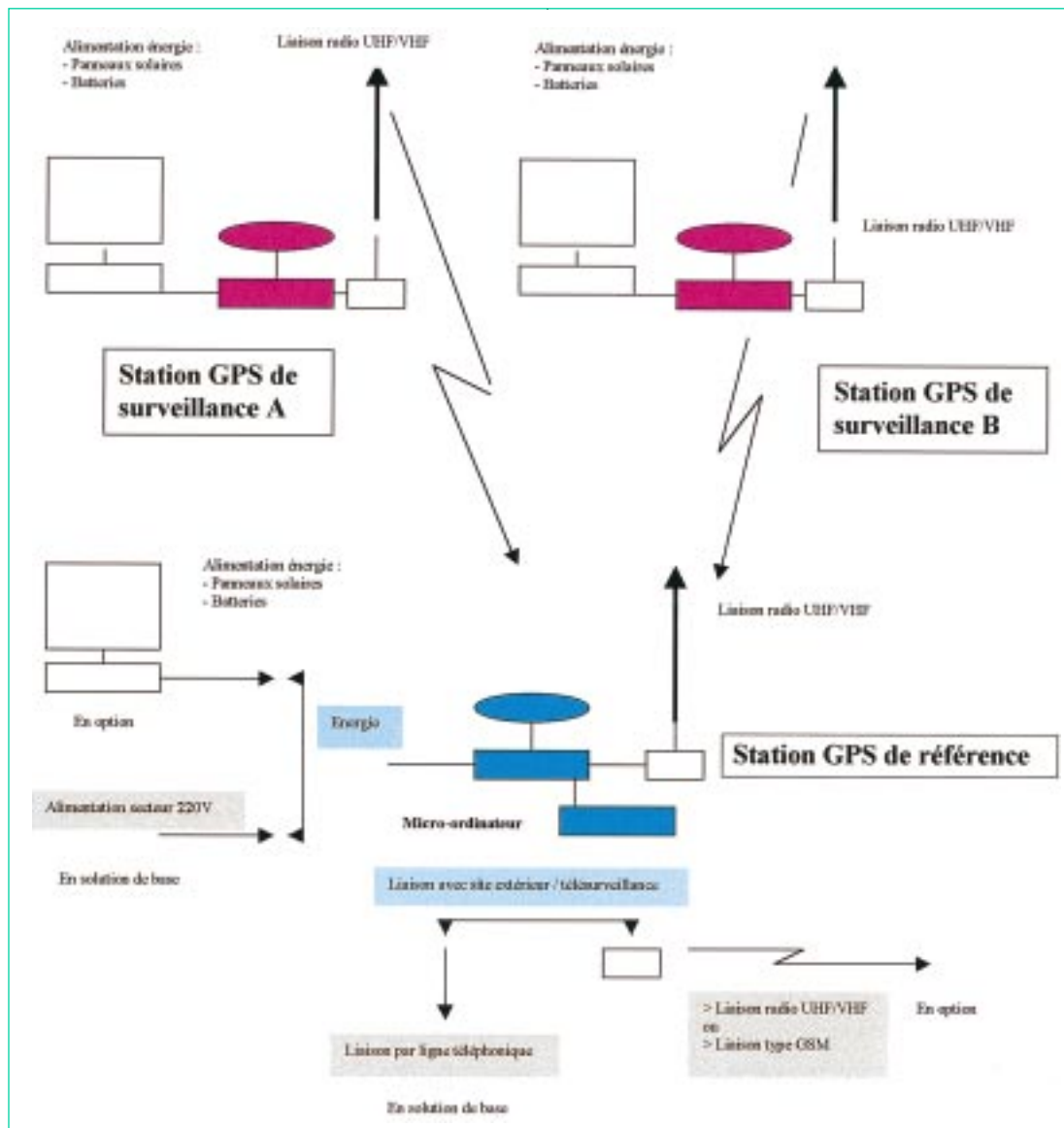


Fig. 2 - Surveillance d'un mouvement de terrain par GPS en mode continu.
Schéma de fonctionnement de principe.

Les mesures géodésiques sont de trois types :

① géodésie classique : réseau de repères dont les mouvements xyz sont déterminés en absolu par mesures de triangulation. Ces mesures sont réalisées en discontinu, périodiquement (typiquement, suivant une fréquence annuelle). Ce type de surveillance est adapté à l'étude phénoménologique de l'éboulement ;

② géodésie par mesures automatiques : réseau de repères dont les mouvements xyz sont déterminés en mode automatique, à l'aide de mesures réalisées périodiquement par un tachéomètre électronique motorisé Leica TM3000 (typiquement, suivant des cycles espacés de 2 h). Ce type de surveillance est adapté aussi bien à l'étude phénoménologique de l'éboulement qu'à la gestion de la sécurité. Un problème de fiabilité lié à l'absence de mesures en cas de mauvaises conditions météorologiques (pluie, neige, brouillard, etc.) peut

rendre ce type de télésurveillance inefficace en période de crise ;

③ géodésie par mesures GPS : réseau de repères dont les mouvements xyz sont déterminés en absolu par méthode GPS. Ces mesures sont réalisées en discontinu, périodiquement (typiquement, suivant une fréquence annuelle). Cette application GPS particulière est décrite ci-après.

Objectif et conditions de la mise en œuvre de l'outil GPS

La mise en œuvre de l'outil de localisation GPS sur le site de Séchilienne est due à la nécessité de déterminer les coordonnées xyz d'un certain nombre de repères qui ont été rajoutés au réseau initial et ne peuvent être observés par méthode optique classique (triangulation).

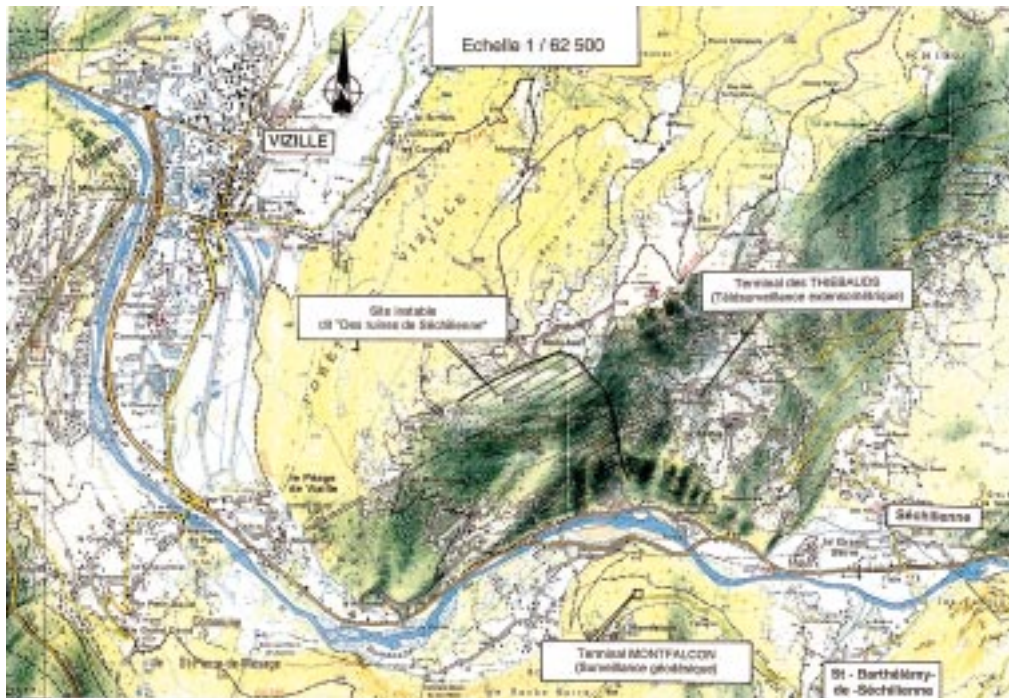
Fig. 3 - Site de Séchilienne (Isère).



a - Vue générale.



c - Canevas d'observation de base.



b - Plan de situation.

L'objectif de la surveillance géodésique étant de déterminer les mouvements des repères implantés sur le site dans un référentiel unique, les mesures GPS doivent être rattachées au réseau existant. Celui-ci intègre un certain nombre de points réputés stables constituant le référentiel (fig. 3c) :

- trois points d'appui situés en retrait et encadrant la zone à surveiller (points 206, 207 et 208),
- quatre piliers d'observation situés à proximité de la zone à surveiller et utilisés pour les observations des visées de triangulation (points 201, 203, 204 et 205).

Ce réseau de sept points est observé par méthode GPS, ce qui permet de contrôler sa stabilité et de rattacher les vecteurs observés sur les repères de surveillance.

Les mesures de localisation par GPS doivent respecter un certain nombre de conditions :

❶ la précision des déterminations GPS doit être compatible avec celle des déterminations issues des mesures de triangulation :

- planimétrie : écart-type de 5 à 15 mm, selon la configuration des points,
- altimétrie : écart-type de 15 à 25 mm, selon la configuration des points ;

❷ les vecteurs GPS étant déterminés par rapport au référentiel tridimensionnel WGS84, une transformation dans le référentiel local utilisé pour la surveillance du site doit être appliquée.

La différence existant entre les altitudes GPS référencées par rapport à un ellipsoïde et les altitudes locales référencées par rapport au géoïde est traitée de la manière suivante :

- compte tenu de la superficie réduite du site surveillé, une transformation de type similitude tridimensionnelle est appliquée. Les sept paramètres sont calculés à partir des coordonnées des points communs aux deux systèmes ;
- les déformations engendrées par cette transformation sont considérées comme *a priori* minimales et toujours du même ordre de grandeur d'une opération à l'autre. La grille de conversion altimétrique RAF98 (référence d'altitude française), qui permet de passer de l'altimétrie GPS à l'altimétrie du système IGN 69 et qui a été produite dans certaines régions, pourrait être utilisée afin d'améliorer la qualité de cette transformation (écart-type de l'ordre de 2 cm pour cette grille à « mailles fines »).

Parmi les contraintes inhérentes au système, certaines sont prises en compte dans les modes opératoires des mesures. Par contre, celle liée à l'environnement des points doit être plus ou moins subie. Ainsi, sur le site de Séchilienne, qui présente un boisement très important, la position des nouveaux points étant dictée par les besoins des experts, il a fallu procéder à des travaux de déboisement. Pour tous ces points, l'accès se fait à pied. Lors des campagnes de mesures périodiques, le transport du matériel constitue alors une difficulté supplémentaire.

Méthode retenue

Compte tenu de la précision requise, le mode de localisation retenu est le mode statique géodésique classique. Il s'agit du mode traditionnellement utilisé pour les déterminations de haute précision. Il est basé sur l'observation sur chaque station des phases d'au moins quatre satellites, suivant des sessions suffisamment longues pour résoudre les ambiguïtés. La longueur des sessions dépend de la longueur de la base, de la géométrie de la constellation et des conditions atmosphériques.

Pour les lignes de bases courtes observées sur le site de Séchilienne (< 10 km), des sessions de 60 min au minimum ont été jugées suffisantes.

Les calculs des vecteurs sont effectués en statique monofréquence. Suivant cette méthodologie, une précision relative de l'ordre de $2 \text{ mm} + 2 \cdot 10^{-6} \text{ ppm}$ (terme proportionnel à la distance) est attendue. Cette précision théorique est difficile à atteindre en altimétrie dès que les dénivelées sont importantes (> 150 à 200 m environ).

En ce qui concerne la qualification des résultats, la mise en œuvre de plusieurs récepteurs et l'observation de vecteurs redondants permettent l'obtention d'un réseau de vecteurs présentant une configuration de type réseau géodésique pouvant faire l'objet d'un calcul d'ajustement tridimensionnel en bloc. Cet ajustement, réalisé avec une compensation par la méthode des moindres carrés, permet une qualification des résultats en termes d'écarts-types, de résidus sur les observations et d'ellipses d'erreur.

Le réseau observé comporte, comme indiqué plus haut :

- le canevas de référence (fig. 3c) : les sept points supposés fixes qui le constituent sont observés en deux sessions de 90 minutes ;
- les repères de surveillance : chaque repère mobile fait l'objet d'une triple détermination, en une seule session, par rapport à trois points de référence (points 201/203/208). Les repères sont observés en une session de 60 minutes.

Calculs d'exploitation des mesures

Principe des calculs

Le calcul des vecteurs est réalisé au moyen du logiciel Prism d'Ashtech :

- calcul en monofréquence, avec éphémérides radiodiffusées ;
- utilisation des paramètres météo standard du logiciel (température, humidité, pression, etc.).

Le calcul de l'ajustement libre du réseau est réalisé au moyen du logiciel Fillnet d'Ashtech. L'observation des résidus permet de juger de la stabilité des points de référence et de la qualité des observations.

Pour la détermination des mouvements significatifs, le calcul d'ajustement fournit un jeu de coordonnées à

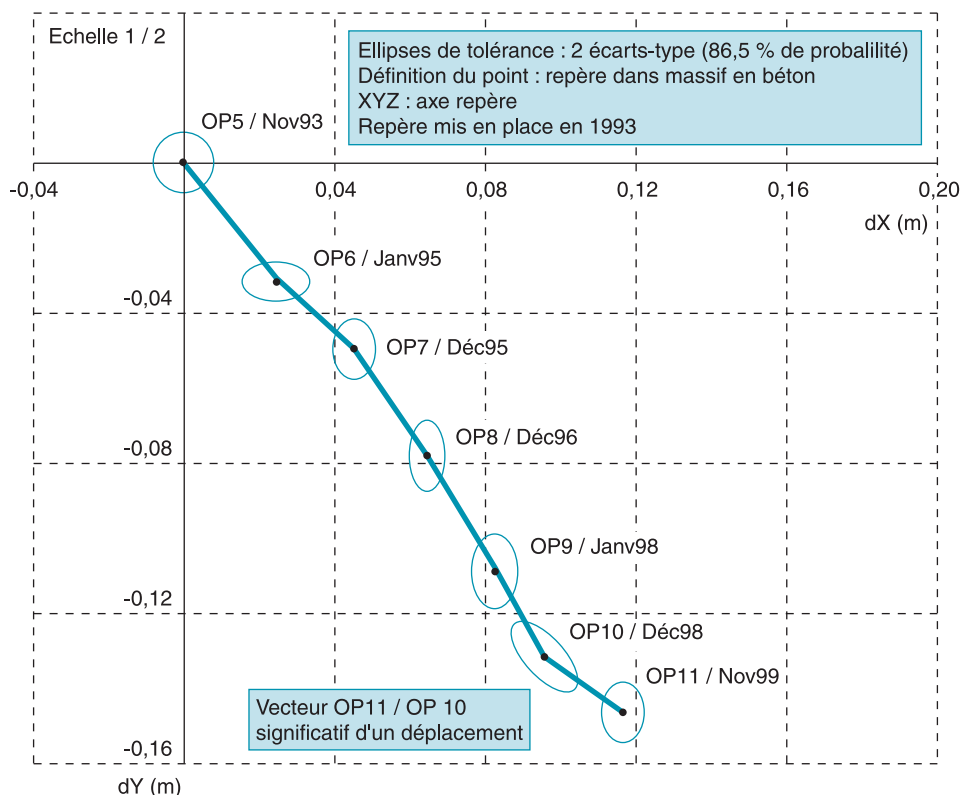


Fig. 4 - Graphe des mouvements XY avec les ellipses de tolérance et la mention de la signification des vecteurs (mouvements significatifs).

l'issue de chaque opération. La comparaison de celui-ci avec le jeu de coordonnées de l'opération précédente fournit un jeu de vecteurs pouvant correspondre à des mouvements significatifs. Toutefois, ces vecteurs peuvent représenter un bruit de mesure. Afin de mettre en évidence uniquement des mouvements significatifs, des seuils de confiance différents des enveloppes d'incertitude données par les calculs d'ajustement (ellipses d'erreur) sont utilisés.

Traditionnellement, des ellipses de confiance correspondant à deux écarts-typés sur leurs axes sont retenues (probabilité de 86,5 % pour que le point se trouve à l'intérieur). Seuls les vecteurs calculés dont le module sort des ellipses de confiance sont déclarés significatifs de mouvements.

Pour chaque repère, on obtient finalement les éléments suivants :

- résultats du calcul d'ajustement par la méthode des moindres carrés,
- tableau des mouvements en x, y et z,
- graphe des mouvements en x et y, avec les ellipses de tolérance (fig. 4), avec indication des mouvements significatifs,
- graphe des mouvements en z et xy, avec les intervalles de tolérance (fig. 5) et l'indication des mouvements significatifs,
- graphe des déplacements planimétriques (horizontaux) en fonction du temps,
- graphe des déplacements altimétriques (verticaux) en fonction du temps,

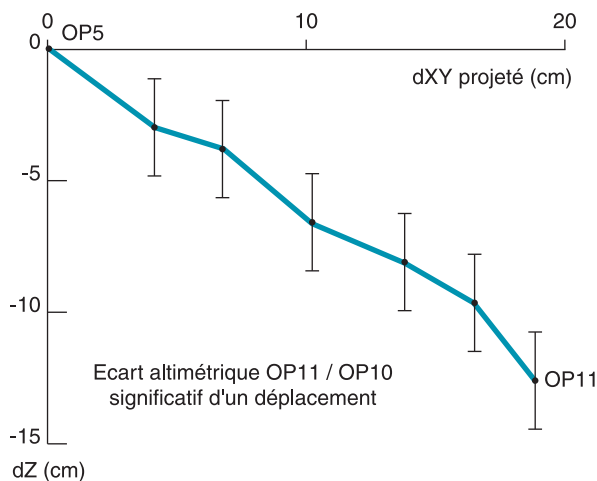
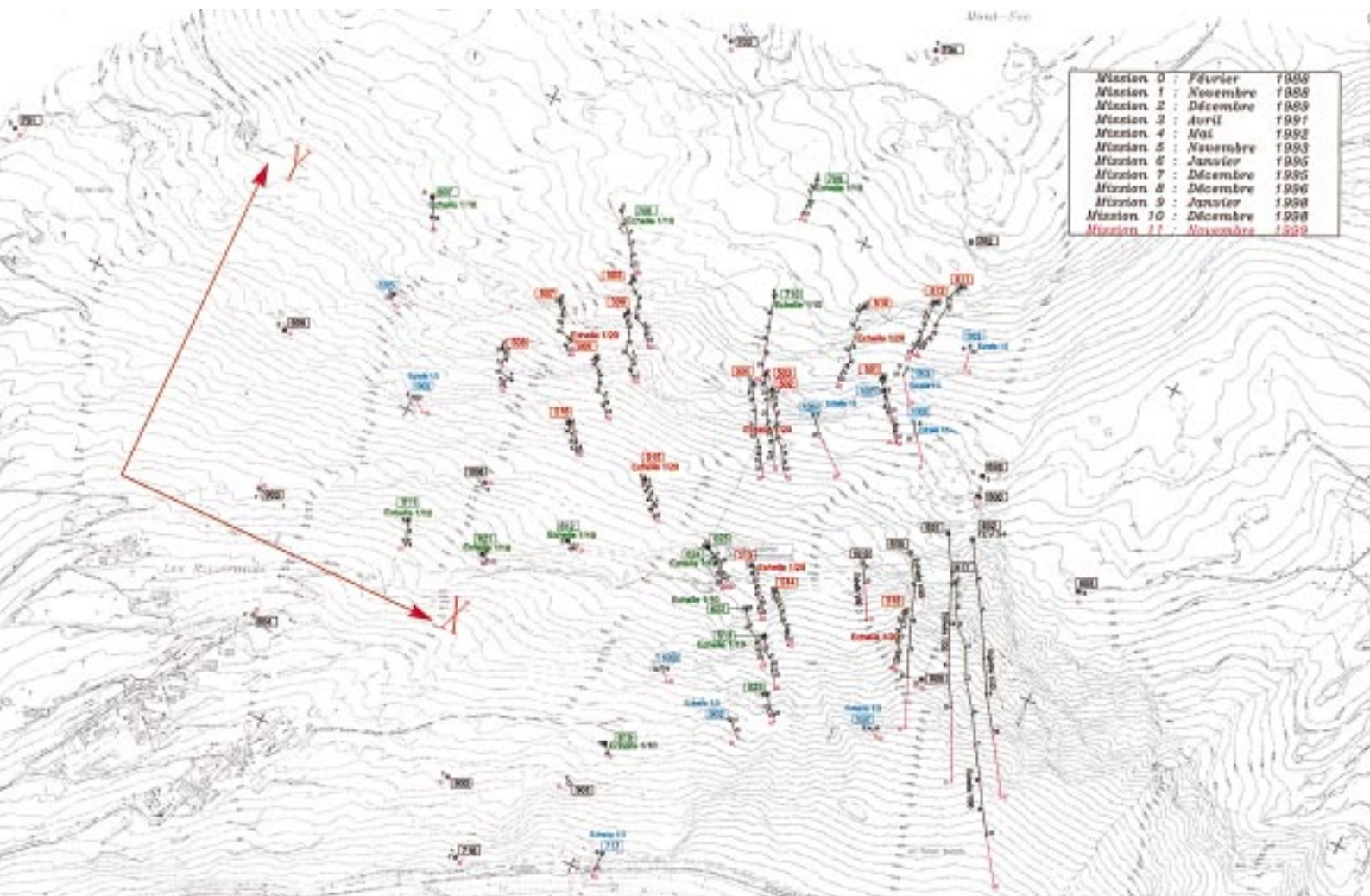


Fig. 5 - Graphe des mouvements dZ/dXY avec les intervalles de tolérance et la mention de la signification des vecteurs (mouvements significatifs).

- graphe d'ensemble des mouvements planimétriques (fig. 6).

Exemple de calculs

Cet exemple porte sur le contrôle de la stabilité des piliers d'observation (canevas de référence) par analyse des résidus de l'adaptation du réseau d'une opération n sur les coordonnées de l'opération n-1. Les valeurs des résidus calculés sont données dans le tableau I.



Echelle du plan topographique : 1/5000

Echelle des déplacements :

- 1/30 pour les points
 - 1010 (repère 1997), 517, 631, 632, et 635 (prismes anciens)
- 1/20 pour les points
 - 501 à 506 (repères mis en place en 1988)
 - 518 (prisme ancien)
- 1/10 pour les points
 - 607 à 625 (repères mis en place en 1993)
 - 708, 709, 710 (repères surveillés par GPS depuis 1993)
- 1/5 pour les points
 - 717 (repère surveillé par GPS depuis 1990)
 - 902 (repère surveillé par GPS depuis 1995)
 - 1000 à 1009 (repères mis en place en 1997)

LEGENDE :

- POINT D'APPUI SECONDAIRE : PILIER EN BÉTON
- △ POINT D'APPUI PRIMAIRE : SOCLE EN BÉTON
- ▲ SPHERE DE SURVEILLANCE GÉODÉSIQUE CLASSIQUE TERRESTRE (RÉSEAU DE 1988) OU PRISME (RÉSEAU DE 1991)
- SPHERE DE SURVEILLANCE GÉODÉSIQUE CLASSIQUE TERRESTRE (RÉSEAU DE 1993) OU PRISME (RÉSEAU DE 1981)
- REPERE DE SURVEILLANCE GPS (RÉSEAU DE 1995, 1999 et 1997)
- SPHERE DE SURVEILLANCE GÉODÉSIQUE CLASSIQUE TERRESTRE (RÉSEAU DE 1997)



Fig. 6 - Graphe d'ensemble des mouvements planimétriques.

Au vu des faibles résidus obtenus lors de l'adaptation du réseau de cette opération n sur les coordonnées de l'opération n-1, on peut conclure à la stabilité de l'ensemble des sept points d'appui. Les coordonnées des quatre points d'appui (201, 203, 204, 205) utilisées pour le calcul des points géodésiques classiques sont donc les mêmes que celles de l'opération précédente.

Pour le contrôle du triangle de base, l'ajustement du triangle de base 201-203-208 mesuré lors d'une opération n par rapport aux coordonnées utilisés lors de l'opération n-1 donne les écarts indiqués dans le tableau II.

Au vu des faibles écarts constatés, on conclut à la stabilité de ces points et on fixe dans un premier temps les coordonnées définitives de ces trois points d'appui dans le système WGS84.

Ensuite, chaque point ausculté est déterminé à partir des vecteurs GPS tridimensionnels issus des trois points d'appui 201, 203, 208. On obtient ainsi leurs coordonnées géographiques dans le système WGS84. Puis ces coordonnées sont transformées par une projection conforme Lambert locale permettant ainsi de déterminer les écarts par rapport à l'opération origine dans le système de coordonnées local utilisé.

TABLEAU I
Exemple de résidus de l'adaptation du réseau d'une opération n sur les coordonnées de l'opération n-1

Point	dX (mm)	dY (mm)	dZ (mm)	Poids XY	Poids Z
201	-1	+4	-5	1	1
203	+2	0	0	1	1
204	+3	+2	+10	1	1
205	0	-3	+3	1	1
206	+1	-3	-3	1	1
207	-5	-1	-4	1	1
208	0	+2	0	1	1

TABLEAU II
Exemple d'écart d'une opération n par rapport aux coordonnées utilisées lors de l'opération n-1

Point	dX (mm)	dY (mm)	dZ (mm)
201	-1	+1	0
203	+2	+1	0
208	0-1	-1	-1

Pour la détermination des mouvements significatifs, au sens défini plus haut, on opère de la façon suivante (fig. 4 et 5).

■ En **planimétrie**, l'ellipse d'erreur est caractérisée par ses deux demi-axes $n\sigma_X$, $n\sigma_Y$, avec σ_X écart-type de la composante X et σ_Y écart-type de la composante Y. La probabilité pour deux variables $n\sigma_X$ et $n\sigma_Y$ est donnée par :

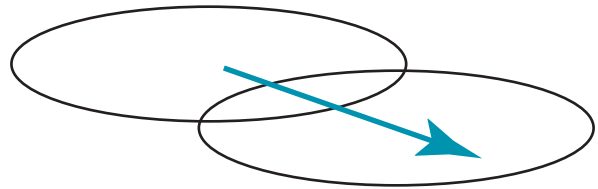
$$P(x) = 1 - \exp\left(\frac{-n^2}{2}\right).$$

Ainsi, on obtient pour :

n = 1, une probabilité P de 39,3 %,
n = 2, une probabilité P de 86,5 %,
n = 3, une probabilité P de 98,9 %.

Les ellipses d'erreur sont données avec une probabilité de 86,5 % (soit deux écarts-types).

Pour confirmer le déplacement planimétrique d'une cible, il faut vérifier que les ellipses d'erreur ne se chevauchent pas : si elles chevauchent, il est impossible de conclure avec certitude à un mouvement. Par exemple, si l'on obtient :



Il y a un déplacement probable mais qui nécessite une vérification ultérieure.

■ En **altimétrie**, l'intervalle de tolérance dans le plan vertical a pour écart-type σ_Z . Connaissant la précision des écarts mesurés entre chaque opération, un intervalle de tolérance de 95,4 %, égal à deux fois l'écart-type, peut être calculé sur les ΔXY et ΔZ . Tout déplacement calculé supérieur à ces intervalles de tolérance est déclaré significatif.

Conclusion

La méthode de localisation GPS peut être appliquée efficacement à la surveillance des massifs de terrains instables à condition d'adopter un mode de mesure adapté à l'amplitude et à la vitesse des mouvements attendus. L'application de cette méthode à la surveillance du site des ruines de Séchilienne a conduit à l'observation annuelle d'un réseau de bases réputées immobiles et d'un réseau de repères mobiles, dont le déplacement doit être repéré par rapport aux bases fixes. Ces observations, nécessitées par l'implantation de repères dans des zones du site incompatibles avec les contraintes de la géodésie classique, se sont intégrées harmonieusement dans le dispositif de surveillance globale du site. Cette expérience confirme le caractère prometteur de l'utilisation de la méthode GPS pour la surveillance des risques de mouvements de terrain en site difficile.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les travaux de préventions des risques naturels : mouvements de versants de grande ampleur, séminaire de Nainville-Les-Roches, juin 1991.

LCPC (1994), *Surveillance des pentes instables*, Guide technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 125 pages.

BOTTON S., DUQUENNE F., EGELS Y., EVEN M., WILLIS P. (1996), *GPS localisation et navigation*, Éditions Hermes.

LASSIAZ P. (1999), *Auscultation géodésique annuelle du site dit des ruines de Séchilienne* (Isère), Cabinet SINTEGRA.

ANTOINE P., CAMPOROTA P., GIRAUD A., ROCHET L. (1987), La menace d'écroulement aux ruines de Séchilienne (Isère), *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **150-151**, juillet-août, pp. 55-64.

EVARD H., GOUIN Th., BENOIT A., DURANTHON J.-P. (1990), Séchilienne. Risques majeurs d'éboulements en masse. Point sur la surveillance du site, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **165**, janvier-février, pp. 7-16.

Le GPS et les métiers du génie civil, Journées GPS 2000 du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2000.

ABSTRACT

Application of the Navstar Global Positioning System to the monitoring of unstable natural sites

J.-P. DURANTHON

The American military satellite-based NAVSTAR Global Positioning System (GPS) has for many years been an indispensable addition to techniques for investigating movements on the earth's surface (conventional terrestrial topometry, photogrammetry, strain measurements and other spatial measurement techniques).

Use of the system to monitor unstable natural sites has increased in recent years and it is frequently able to solve the problems posed by the geometrical configuration of some sites.

The first part of the paper provides a brief survey of the GPS-based systems which are suitable for monitoring unstable rock masses and then describes the current performance of the GPS system and the various systems which could be introduced.

The second part presents the application of this technique to monitoring a site at Séchilienne (Département of Isère) and describes the problems encountered in implementing the GPS tool, the methodology adopted and some calculations.