

Apport du GPS au suivi en continu des mouvements de terrain. Application au glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France)

Jean-Philippe Malet^{a*}, Sybille Hartig^b, Eric Calais^b, Olivier Maquaire^a

^a Centre d'études et de recherches éco-géographiques (Cereg), UMR 7007 CNRS–ULP–ENGEES, 3, rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg cedex, France

^b Géosciences Azur, UMR 6526 CNRS, 250, rue Albert-Einstein, 06560 Valbonne, France

Reçu le 4 avril 2000 ; accepté le 13 juin 2000

Présenté par Jean Dercourt

Abstract – Contribution of GPS to continuous monitoring of landslides. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). The purpose of this work is to evaluate the potential of Global Positioning System (GPS) measurements for the continuous monitoring of landslides. The site being studied is the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). Our results show that GPS measurements allow monitoring of the three-dimensional motion of the earthflow with an hourly temporal resolution and a sub-centimeter accuracy. GPS measurements carried out in spring and autumn show spatial and temporal (seasonal and daily) variations of the landslide motion. The results presented here show that GPS measurements have the capability of surveying, continuously, the kinematics of geophysical objects with small and slow displacements ($\sim 5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$) and could thus complement conventional topometric techniques in a warning system. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

GPS / centimetric positioning / continuous monitoring / earthflow / geodesy

Résumé – L'objectif de cette recherche est d'évaluer, par une étude métrologique, le potentiel du *Global Positioning System* (GPS) pour la surveillance en continu de mouvements de terrain. Le site d'étude est le glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France). L'étude montre que le GPS permet de déterminer la cinématique de la coulée en 3-D avec une résolution temporelle horaire et une précision infracentimétrique. Des mesures GPS réalisées au printemps et en automne identifient des variations spatiales (compartmentation) et temporelles (saisonnnières et journalières) de la cinématique de la coulée. Les résultats présentés prouvent que le GPS permet de suivre en continu la cinématique d'entités géophysiques aux déplacements faibles et lents ($\sim 5 \text{ mm}\cdot\text{j}^{-1}$) et pourrait donc constituer, dans un système d'alerte, un complément aux techniques de géodésie conventionnelles. © 2000 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

GPS / positionnement centimétrique / surveillance en continu / glissement-coulée / géodésie

Abridged version

The detailed analysis of the motion of a landslide, in particular for a near real-time warning system, requires

the combination of accurate positioning in three dimensions (infra-centimetric) and fine temporal resolution (hourly or less). The monitoring of landslides with the Global Positioning System (GPS) is usually performed

* Correspondance et tirés à part : malet@geographie.u-strasbg.fr

using repeated campaigns [7], as a complement to conventional topometric methods. Continuous monitoring of landslides with GPS is usually not performed operationally, mostly because of the cost of such a system compared to conventional deformation monitoring techniques. In addition, if GPS measurements can reach a millimetre-level accuracy for long observations sessions (typically 24 h), their accuracy decreases with the duration of the observation sessions, because of errors introduced by variations of the satellite constellation and multipath effects at the sites [6]. This study aims to determine the experimental accuracy of GPS measurements for the continuous monitoring of landslides. As a matter of fact, a number of studies of the statistical properties of GPS measurements have shown that the formal error derived from the inversion of phase data underestimates the true measurement accuracy by a range of up to 11 [12, 16]. In particular, we want to calibrate the variation of the measurement accuracy as a function of the duration of the observation sessions. The results of this study are applicable to the continuous monitoring of the deformation of large man-made structures and active volcanoes.

The study was carried out on the Super-Sauze earthflow, in the Barcelonnette basin (Alpes-de-Haute-Provence, France), which evolves in a channelized flow with surface displacements reaching a few tens of centimetres to a few meters per year [2]. This earthflow has been monitored since 1991 using conventional topometric methods, multi-temporal photographs [15], geotechnical and geophysical investigations [2, 14].

The GPS data were acquired using six dual-frequency Ashtech Z-XII receivers during two campaigns, from 7 to 23 May 1999, and from 9 to 15 October 1999. In May 1999, two reference stations were installed outside the flow (MLZE and PIL2) and four 'moving' stations were distributed on the flow (COU1 to COU4, figures 1a–1d). In October 1999, one station was installed outside the flow (MLZE), a second one on the flow in the vicinity of site COU4. The GPS data was sampled at 30 s with a 10° cutoff angle. GPS code and phase measurements were processed in static mode with the GAMIT software [9]. Given the very short distance between the stations, the calculations were carried out on the L1 frequency only, without estimating tropospheric parameters [6]. 95% of the phase ambiguities were solved. The final result is one baseline vector per observation session and couple of stations. Calculations were carried out for sessions of 24, 12, 6, 3 and 1 h, in order to determine the variation of the measurement accuracy as a function of the session duration.

Figure 2 shows the north–south, east–west and vertical component and the length variation of the baseline between the two fixed stations (MLZE–PIL2) as a function of time, in May 99, for sessions of 24, 12, 6 and 1 h duration. The experimental accuracy is quantified by the weighted root mean square of the measurement scatter with respect to the weighted mean, or repeat-

ability [1, 10]. Figures 2a–2d clearly show that the scatter increases when the session duration decreases. Figure 2c shows the variation of the accuracy for the north–south, east–west, and vertical components as a function of the session duration: for a baseline of 1.1 km and 1-h sessions, the repeatability reaches 2.7, 2.2 and 5.0 mm for the north–south, east–west and vertical components respectively. These results are consistent with the values obtained by Genrich and Bock [6] and Pragnère [13]. The maximum measurement scatter gives the detectability threshold for a significant motion and a given temporal resolution: between 3.5 mm per 24 h and 8.5 mm per hour in planimetry, between 6 mm per 24 h and 19.5 mm per hour in altimetry.

As shown in figure 3, the motion of the flow is clearly detected by the GPS measurements. The cumulated displacements in 17 days (May 1999) reach 0.15 m (planimetry) and 0.01 m (altimetry) at site COU1 (bottom part of the flow), 2.04 m (planimetry) and –0.75 m (altimetry) at site COU4 (upper part of the flow). These displacements are in good agreement with measurements by conventional topometry (figure 3). The average difference is 0.8 cm, with an intrinsic precision for topometric measurements of ± 1.3 cm in planimetry and ± 2.7 cm in altimetry [2].

The GPS measurements also identify spatial variations of the landslide motion, showing compartments having different displacements (figures 3 and 4). In addition, the continuous GPS measurements identify seasonal variations, with a displacement at site COU4 that reaches 12 cm per day in May 1999, a period of snowmelt and high groundwater level, but falls to 0.2 cm per day in October 1999, a dry period with low groundwater level (figures 3 and 4). Finally, we observe in October 1999 daily periodic variations with an amplitude of the order of 1 cm during the first three days of measurements (figure 5, 1, 3 and 6 h sessions), followed on the fourth day by a step in the time series, then on the fifth and sixth days by a stabilization of the motion. The correlation of this behaviour with temperature variations (figure 5), the fact that it appears on 1, 3 and 6 h sessions, and the amplitudes larger than the GPS measurement accuracy (1.9 mm horizontally and 3.5 mm vertically for 6 h sessions, figure 2e), indicate that it results from a geophysical phenomenon (thermo-hydrological dilatation? solar heating?) rather than from a bias in the GPS measurements. The relationship between rain, groundwater level, and displacements are currently under investigation.

The use of GPS on the Super-Sauze earthflow represents a successful attempt at monitoring continuously the displacements of a landslide over a long time period. We obtained results that agree with conventional topometric measurements and reach a true accuracy of a few millimetres on short baselines (< 1 km), even for short sessions (1 h). GPS is therefore applicable to the continuous monitoring of the kinematics of geophysical objects with small and slow displacements

($\sim 5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$). This technique does not require direct line of sight between the ‘moving’ sites on the landslide and the reference stations. Measurements can be carried out in all weather and at night. Provided that data communication is available, GPS processing can be performed in near real-time without loss of accuracy. The use of GPS is however limited by the environmental characteristics of the landslide (mountains, vegetation), which

can constitute masks limiting the visibility of the sky and create multipaths. The cost of GPS equipment and its maintenance are also obstacles to the application of GPS for continuous landslide monitoring. However, for short baselines ($\sim 1 \text{ km}$ or less), less expensive single-frequency GPS receivers are sufficient to guarantee a similar accuracy as found here.

1. Introduction

Le *Global Positioning System* (GPS) est une technique de positionnement satellitaire largement utilisée en géophysique, en particulier pour la mesure des déformations actives de la croûte terrestre [1, 10]. L’utilisation de données de phase permet, en effet, de déterminer les positions relatives de points situés jusqu’à plusieurs centaines de kilomètres de distance, avec une précision de 2–3 mm en horizontal et de 5–10 mm en vertical.

Le GPS est utilisé lors de campagnes de mesures ponctuelles répétées pour surveiller le déplacement de mouvements de terrain [7], en complément de méthodes d’auscultation géodésique conventionnelles (triangulation, distancemétrie). En revanche, la surveillance en continu des mouvements de terrain par GPS sur de longues périodes n’est pas utilisée à ce jour. La raison principale, outre le coût de l’équipement, en est que, si le GPS permet d’atteindre des précisions millimétriques pour des sessions longues de 24 h, la précision se dégrade lorsque la durée des sessions diminue, à cause des biais introduits par les multitrajets et les variations de la constellation satellitaire au cours du temps [6]. Or, pour analyser en détail la cinématique d’un mouvement de terrain, et à plus forte raison pour en inclure la surveillance dans un système d’alerte en temps réel, il est nécessaire de disposer d’une position précise (infacentimétrique) dans les trois dimensions et d’une résolution temporelle fine (horaire ou infra-horaire). De plus, une précision millimétrique nécessite un traitement a posteriori sophistiqué des données GPS. Les méthodes classiques de topométrie (automatisées ou non), qui permettent d’atteindre des précisions de quelques millimètres sur de courtes lignes de base ($< 1 \text{ km}$) avec une résolution temporelle fine, restent donc très compétitives pour la surveillance des mouvements de terrain [4]. Afin d’évaluer la capacité de la technique GPS à conjuguer précision spatiale et résolution temporelle, une étude métrologique a été réalisée dans le but de déterminer la précision expérimentale qu’il est possible d’atteindre dans la surveillance de mouvements de terrain, en particulier, la variation de la précision en fonction de la durée des sessions de mesure. Plusieurs études des propriétés statistiques de mesures GPS ont, en effet, montré que l’erreur formelle déduite de l’inversion des données de phase n’est pas suffisante, car elle sous-estime l’incertitude réelle par un facteur pouvant aller

jusqu’à 11 [12, 16]. Les résultats obtenus permettent d’évaluer les avantages et inconvénients du GPS pour la surveillance en continu dans le but d’envisager un dispositif adapté au temps réel. Les résultats de cette étude peuvent aussi s’appliquer à la surveillance de la déformation d’ouvrages ou à celle des volcans actifs, par exemple.

2. Site d’étude

Cette étude pilote a été réalisée sur le glissement-coulée de Super-Sauze, dans le bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France). Ce glissement-coulée se développe dans les marnes noires callovo-oxfordiennes, sur une longueur d’environ 800 m, entre 2 105 m d’altitude (couronne) et 1 740 m (base de la coulée). Il occupe une superficie de 17 ha (*figures 1a et 1b*). Le glissement structural [11] évolue en une coulée de débris, chenalisée par une paléotopographie d’échines et de ravines, dont les vitesses atteignent, selon les compartiments, quelques dizaines de centimètres à quelques mètres par an [2]. Il fait l’objet de mesures topométriques depuis 1991, de photo-intéprétations multi-dates [15], d’une investigation géotechnique [2] et de prospections géophysiques [14]. Les déplacements de la coulée sont suivis actuellement à l’aide d’un réseau d’une cinquantaine de repères, dont la position est relevée ponctuellement par tachéométrie et distancemétrie, à partir de deux piliers d’observation fixes, situés sur le versant opposé au mouvement de terrain. En outre, les déplacements sont suivis en continu depuis juin 1999, dans la partie médiane de la coulée, par un système à câble sur roue potentiométrique. Les mesures continues des déplacements et des conditions hydro-météorologiques qui gouvernent le comportement de la masse en mouvement ont pour objectif la détermination de la dynamique d’écoulement et la validation des modèles de propagation de ce type de coulée.

3. Méthodologie

Les fondements de la technique GPS sont développés, par exemple, dans la référence [8]. L’acquisition des données GPS a été réalisée à l’aide de six récepteurs bi-fréquence Ashtech Z-XII équipés d’antennes *choke-ring* (limitant les multi-trajets), au cours de deux campa-

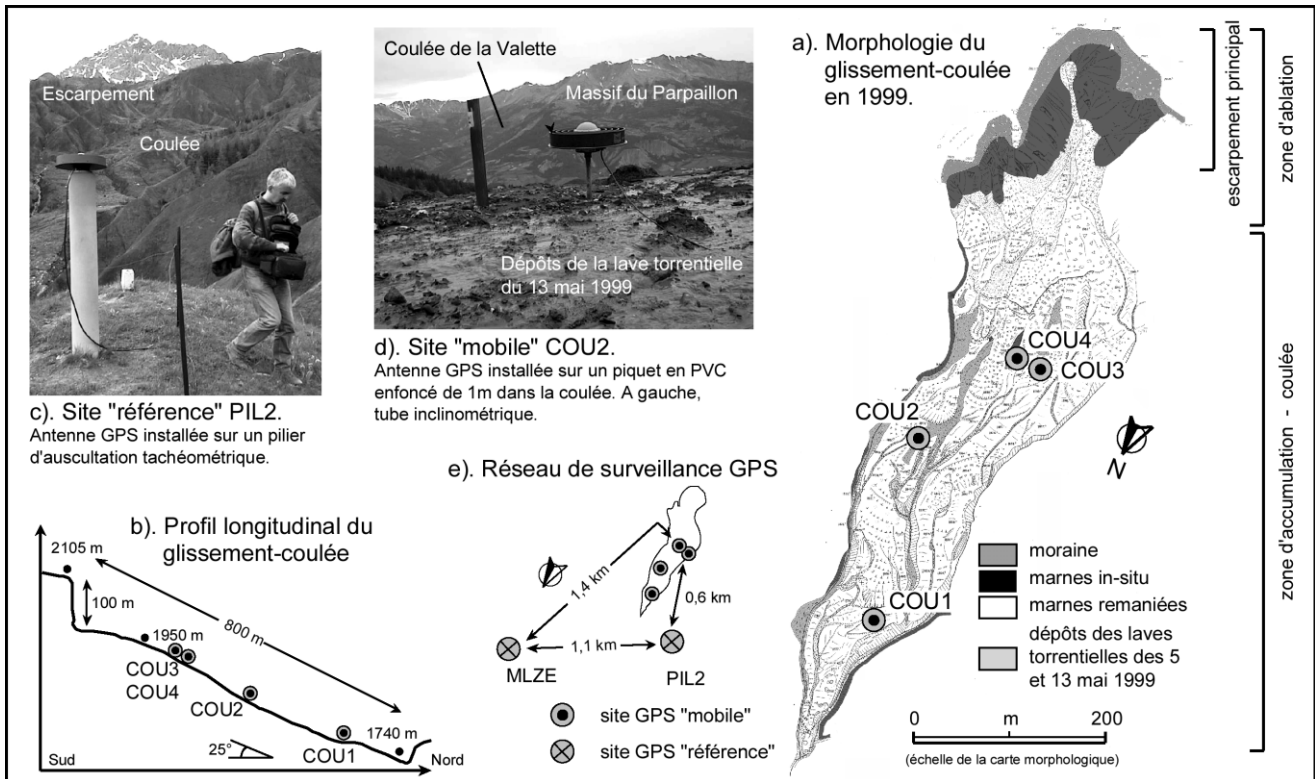


Figure 1. Morphologie du glissement-coulée de Super-Sauze et localisation des sites de mesure.

Figure 1. a. Morphology of the Super-Sauze earthflow. b. Longitudinal profile of the earthflow. c. Reference site PIL2. d. Moving site COU2. e. GPS network.

gnes, du 7 au 23 mai 1999 et du 9 au 15 octobre 1999. En mai 1999, deux stations étaient installées en dehors de la coulée pour servir de référence (MLZE et PIL2), quatre stations « mobiles » étant réparties de l'amont à l'aval de la coulée, dans des secteurs dont le comportement cinématique (influencé par la paléotopographie et le niveau de la nappe) est différent (COU1 à COU4 ; figures 1a–1d). En octobre 1999, une station était installée en dehors de la coulée sur l'un des sites déjà occupés en mai (MLZE), une autre sur la coulée à proximité du site COU4. La longueur maximale des lignes de base atteint 1,4 km (figure 1e), le dénivelé maximal 200 m. La fréquence d'échantillonnage était fixée à 30 s et l'angle de coupure à 10°. Les récepteurs GPS étaient alimentés par des panneaux solaires. Le manque d'ensoleillement pendant la première moitié de la campagne de mai 1999 a entraîné plusieurs arrêts dans les enregistrements. En outre, plusieurs mesures topométriques de contrôle ont été effectuées parallèlement aux mesures GPS pendant les deux campagnes.

Les données GPS de code et de phase ont été traitées en mode statique avec le logiciel GAMIT [9]. Dans un premier temps, les coordonnées précises des stations situées hors de la coulée (MLZE et PIL2) ont été calculées dans le référentiel géodésique ITRF96. Dans un deuxième temps, le réseau formé par les stations « fixes » et « mobiles » a été traité en fixant les positions

des deux stations hors coulée. Les calculs ont été réalisés en utilisant les orbites précises de l'IGS (International GPS Service for Geodynamics) et en tenant compte des modèles de variation du centre de phase des antennes préconisés par l'IGS. Étant donné les très courtes distances entre stations, les calculs de position ont été réalisés sur la fréquence L1 seule (moins bruitée que L2), sans estimer de paramètre troposphérique. Les ambiguïtés de phase ont été résolues dans 95 % des cas. Le résultat final est un vecteur « ligne de base » (composante nord-sud = X, composante est-ouest = Y, composante Z = altitude) par session de calcul et par couple de stations. Nous nous intéresserons essentiellement, par la suite, aux vecteurs « ligne de base » reliant la station fixe hors coulée MLZE et les stations « mobiles ». Les calculs ont été effectués pour des sessions de 24 h, puis pour des sessions de durées réduites à 12, 6, 3 et 1 h, afin de déterminer l'évolution de la précision des mesures en fonction de la durée des sessions.

4. Résultats et interprétation

4.1. Précision des mesures et durée optimale des sessions

Les variations des composantes de la ligne de base entre les deux stations fixes MLZE et PIL2 en mai 1999 permettent de déterminer la précision réelle des mesu-

res. La *figure 2* présente les variations des composantes nord-sud (*figure 2a*), est-ouest (*figure 2b*), verticale (*figure 2c*) et de la longueur (*figure 2d*) de cette ligne de base pour des sessions de 24, 12, 6 et 1 h. Les deux stations, distantes de 1,1 km, sont situées sur des sites dégagés, a priori exempts de multitrajets. La dispersion des mesures par rapport à leur moyenne pondérée représente donc directement la précision expérimentale. Celle-ci est quantifiée par l'écart moyen quadratique de la dispersion des mesures par rapport à leur moyenne pondérée, ou répétabilité [1]. La répétabilité à court terme est définie par rapport à la moyenne des mesures, pondérées par leurs écarts types, où la quantité mesurée m_i (qui représente la composante nord-sud, est-ouest ou verticale) obéit à une loi de type $m_i = m_0 + \varepsilon_i$, où ε_i est une variable aléatoire de moyenne nulle et de variance σ_i^2 . La répétabilité à long terme est définie par rapport à un modèle statistique intégrant une évolution temporelle à vitesse constante (a), de type $m_i = m_0 + a t_i + \varepsilon_i$. Dans les deux cas, les variances σ_i^2 ont été obtenues en propageant les variances a priori sur les observations dans l'inversion des données GPS.

On constate visuellement, sur les *figures 2a-2d*, que la dispersion des mesures augmente quand la durée des sessions diminue, conformément à ce que l'on attend. La *figure 2e* montre l'évolution de la précision dans les trois dimensions en fonction de la durée de la session de mesure. La répétabilité à court terme atteint 2,7 mm, 2,2 mm et 5,0 mm respectivement pour les composantes nord-sud, est-ouest et verticale de cette ligne de base pour des sessions de 1 h. Ces résultats sont comparables à ceux de Genrich et Bock [6] et de Pragnère [13]. La répétabilité à long terme atteint 2,5, 2,4 et 4,8 mm respectivement pour les mêmes composantes. La dispersion maximale atteint, pour des sessions de 24, 12, 6, et 1 h respectivement, 3, 5, 6 et 8 mm sur la composante nord-sud, 3, 6, 6 et 9 mm sur la composante est-ouest et 5, 5, 10 et 17 mm sur la composante verticale. Une analyse de variance nous a permis d'estimer la variance de l'ensemble des sessions de mesure, en faisant l'hypothèse que les dispersions calculées sur trois semaines de mesures sont de bons estimateurs de la dispersion de l'ensemble de la population de mesure. Pour des sessions de 1 h, l'intervalle de confiance à 95 % de la variance est de 6 à 8,5 mm pour les composantes nord-sud et est-ouest, de 14,5 à 19,5 mm pour la composante verticale. Pour des sessions de 24 h, l'intervalle de confiance à 95 % de la variance est de 1,5 à 3,5 mm pour la composante nord-sud, de 2 à 3,5 mm pour la composante est-ouest, de 4 à 6 mm pour la composante verticale.

Ces valeurs établissent le seuil de détectabilité d'un mouvement significatif pour les quatre cas de résolution temporelle présentés : entre 3.5 mm par 24 h et 8.5 mm par heure en planimétrie, entre 6 mm par 24 h et 19,5 mm par heure en altimétrie. Le GPS est donc adapté à la mesure de déformations de basse dynamique. La dispersion des mesures observée, en particulier

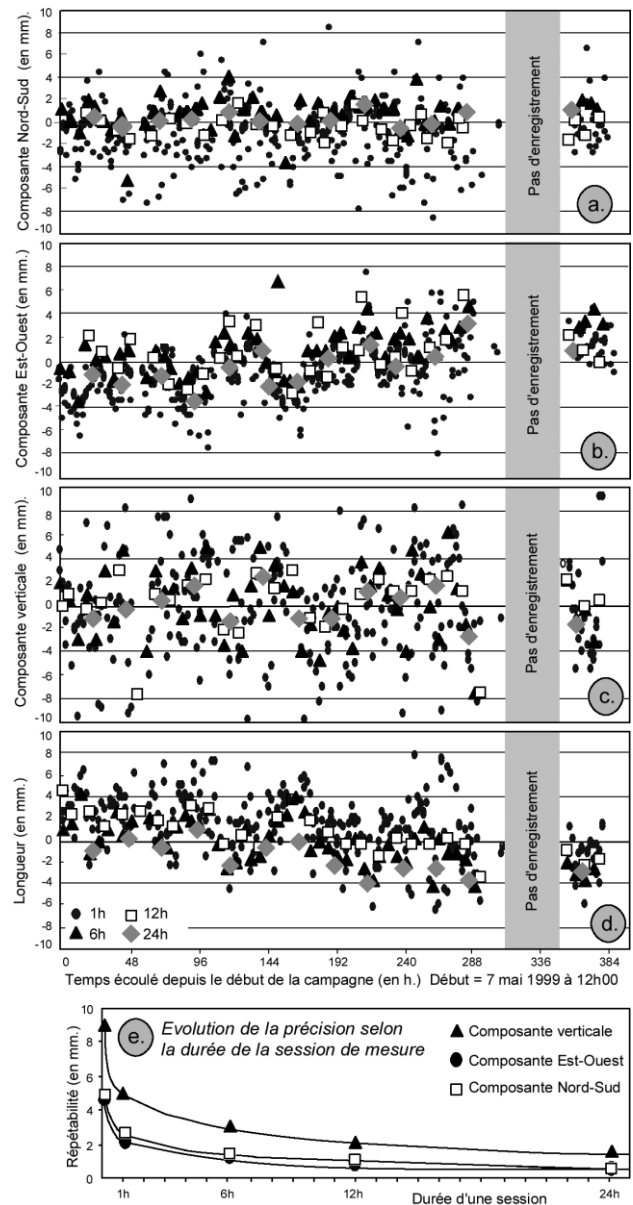


Figure 2. Variation de la ligne de base MLZE-PIL2 pour différents calculs. **a.** Composante nord-sud. **b.** Composante est-ouest. **c.** Composante verticale. **d.** Composante longueur. **e.** Répétabilités sur la détermination des composantes 3-D.

Figure 2. Variation of the MLZE-PIL2 baseline for different calculations. **a.** North-south component. **b.** East-west component. **c.** Vertical component. **d.** Length component. **e.** Repeatability of the 3-D components.

pour les sessions courtes (bruit haute fréquence), résulte des variations de la configuration de la constellation satellitaire et des multi-trajets [5, 6].

Les *figures 2b* et *2c* montrent de plus une diminution de la longueur de la ligne de base MLZE-PIL2, faible mais clairement détectable, de l'ordre de 5 mm en 16 jours. Le site MLZE est situé sur le toit d'un petit immeuble, le site PIL2 est situé sur un pilier de béton de 1,5 m de hauteur, implanté dans le sol marneux à moins

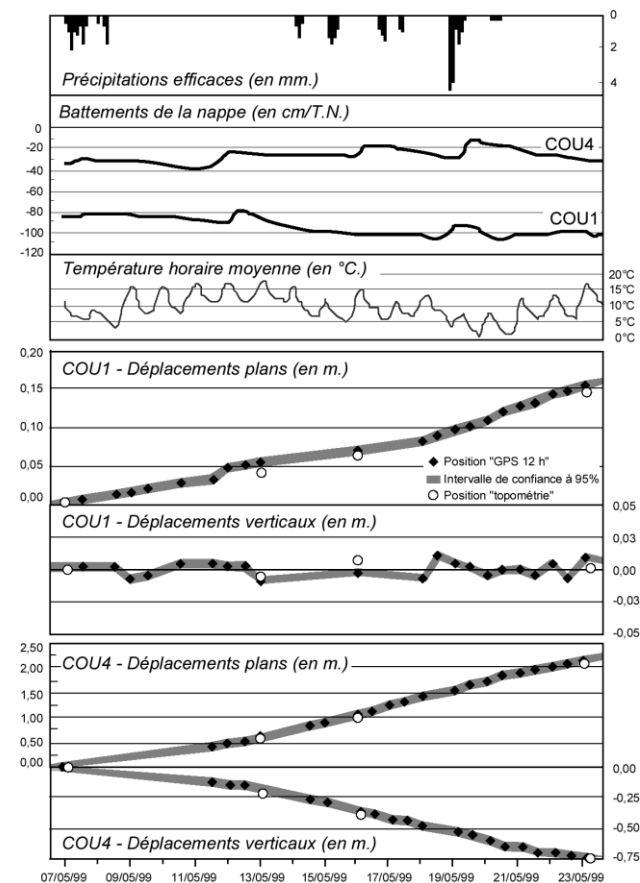


Figure 3. Relation précipitations–nappe–déplacement pour les sites COU1 et COU4 en mai 1999.

Figure 3. Rainfall–groundwatertable–displacements relationships for COU1 and COU4 in May 99.

de 2 m du rebord d’une petite falaise surplombant le pied de la coulée. La dérive observée sur la longueur de cette ligne de base est probablement due à l’instabilité du versant sur lequel est implantée la monumentation, avec un déplacement préférentiel selon la composante est–ouest (figures 2b et 2d).

4.2. Validation GPS/topométrie

La figure 3 montre l’évolution temporelle de la ligne de base entre le site de référence MLZE et les sites COU1 et COU4, respectivement situés dans les parties aval et amont de la coulée (figure 1e). Le calcul des vecteurs déplacements a été volontairement décomposé en une composante planimétrique et une composante altimétrique, afin de ne pas surestimer les déplacements 3-D cumulés (en raison de l’incertitude de mesure plus importante sur la composante verticale).

On note tout d’abord que le mouvement général de la coulée est clairement détecté par les mesures GPS. Les déplacements cumulés obtenus en 17 j de mesures continues atteignent 0,15 m (planimétrie) et –0,01 m (altimétrie) au site COU1, 2,04 m (planimétrie) et

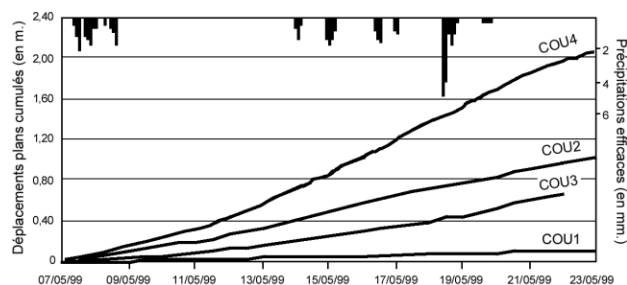


Figure 4. Déplacements plans cumulés des sites COU1, COU2, COU3 et COU4 en mai 1999.

Figure 4. Cumulative horizontal displacements of site COU1, COU2, COU3 and COU4 in May 1999.

–0,75 m (altimétrie) au site COU4. Ces déplacements correspondent à une vitesse moyenne de 12 cm·j⁻¹ au site COU4 et 0,9 cm·j⁻¹ au site COU1. Les cercles blancs sur la figure 3 montrent les résultats des mesures de topométrie sur des cibles situées à proximité immédiate des sites COU1 et COU4. Les déplacements déterminés par GPS sont en bon accord avec ceux mesurés ponctuellement par topométrie. L’écart moyen est de 0,8 cm, pour une précision intrinsèque des mesures topométriques (sans compensation) de ±1,3 cm en planimétrie et de ±2,7 cm en altimétrie [3].

4.3. Variations spatiales et temporelles des déplacements

La comparaison des déplacements mesurés par GPS sur les sites COU1 à COU4, qui s’amortissent vers le pied de la coulée (figure 4), permet de spatialiser sa cinématique. Ce comportement est vraisemblablement contrôlé par la paléotopographie, qui délimite des compartiments en déplacement différentiel et au comportement hydrodynamique différents [2], et par la position de la nappe par rapport à la surface topographique (position moyenne : 0,29 m/T.N. pendant la période de mesure au site COU4 et –0,84 m/T.N. au site COU1, figure 3).

La comparaison entre les résultats obtenus en mai 1999 (période de fonte de la neige) et octobre 1999 (période sèche) pour la ligne de base MLZE-COU4 (figures 3 et 5) indiquent des vitesses moyennes respectives de 12 et 0,2 cm·j⁻¹. Cette variation saisonnière est probablement à attribuer aux battements de la nappe (et aux pressions interstitielles générées), en position haute en mai quand elle est régulièrement alimentée par la fonte progressive de la neige (position moyenne pendant la période de mesure –0,29 m/T.N.), en position d’étiage en octobre (position moyenne –2,10 m/T.N.).

L’analyse de détail de la série temporelle MLZE-COU4 en octobre 1999 montre, en outre, une variation périodique d’une amplitude d’environ 1 cm pendant les trois premiers jours de mesure pour les sessions de 1, 3 et 6 h (figure 5). Le quatrième jour de mesure est marqué par un saut dans les séries temporelles, particulièrement visible sur la composante verticale, suivi d’une

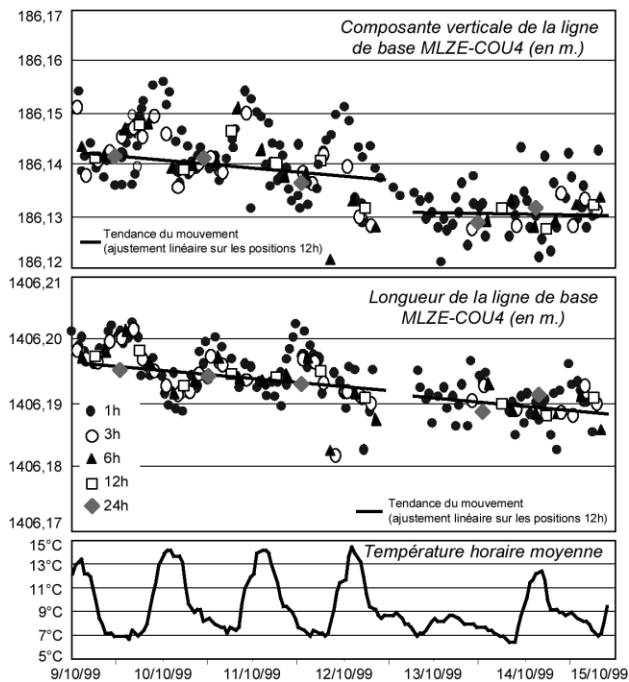


Figure 5. Variation des composantes verticale et longueur de la ligne de base MLZE-COU4 en octobre 1999 et évolution de la température horaire moyenne.

Figure 5. MLZE-COU4 baseline in October 1999. Variation of the vertical and length components and evolution of the mean hourly temperature.

stabilisation des mouvements les cinquième et sixième jours. L'analyse des résidus standardisés d'une régression linéaire a également clairement montré ce changement de régime entre les premiers et derniers jours de mesure. La variation des températures horaires moyennes à la station climatique de Super-Sauze (située à 1,4 km de la coulée) montre une corrélation claire avec les déplacements, avec un déphasage d'environ 2 h.

Le fait que l'ensemble des sessions de 1, 3 et 6 h montrent ce même comportement (lissé par les sessions de 12 et 24 h), le caractère périodique de ces variations, leurs ordres de grandeur supérieurs à la précision des mesures GPS (1,9 mm en planimétrie et 3,5 mm en dénivelé pour des sessions de 6 h, *figure 2e*) et leur corrélation avec les variations de température plaident en faveur d'un phénomène géophysique (dilatation hydrothermique ?) et non d'un biais dans les mesures GPS. Néanmoins, ce phénomène n'avait pas été observé lors de la campagne de mai 1999, pour des amplitudes thermiques pourtant identiques (6 °C). L'étude de détail des relations pluie–nappe–déplacements est en cours et ne fait pas l'objet d'un développement dans cet article (Malet, thèse en cours).

Remerciements. Ce programme a été financé par le CNRS dans le cadre du contrat PNRN 97/99-34MT de l'Insu. Contribution Insu N° 237. Les GPS utilisés proviennent du Parc Insu. Contribution Géosciences Azur N° 320. Nous remercions J.-J. Schott pour ses remarques avisées lors de la relecture de l'article.

5. Conclusion

L'utilisation du GPS sur le glissement-coulée de Super-Sauze constitue une première pour la mesure des déplacements d'un mouvement de terrain en continu sur une longue période. Les résultats obtenus permettent de quantifier la cinématique 3-D de la coulée, sur un nombre de points limité par le nombre de récepteurs GPS disponibles et par la logistique de leur maintenance (les GPS utilisés ne sont pas optimisés pour ce genre d'application). Les résultats obtenus sont en accord avec les mesures géodésiques classiques. L'étude montre qu'il est possible, même sur des sessions courtes (1 h), d'obtenir une précision de quelques millimètres sur des bases courtes (< 1 km), meilleures que celles obtenues par tachéométrie. Les mesures GPS réalisées en mai et octobre 1999 permettent, en outre, de mettre en évidence les variations spatiales (compartmentation) et temporelles (saisonniers et journalières) de la cinématique de la coulée.

L'utilisation du GPS pour le suivi des mouvements de terrain offre l'avantage de délivrer un positionnement tridimensionnel de précision infra-centimétrique pour des sessions de mesure d'une heure. Cette technique ne nécessite pas une vision directe entre les sites localisés sur le mouvement de terrain et le (ou les) site(s) de référence. Les mesures peuvent être effectuées par tout type de temps et en conditions nocturnes. Sous réserve d'un moyen de communication permettant de rapatrier les données vers un centre de traitement, la même précision que celle obtenue ici en temps différé peut être obtenue en temps quasi-réel. L'utilisation du GPS pour ce type d'application est cependant limitée par des obstacles tels que le relief, la végétation, qui peuvent constituer des masques limitant la visibilité du ciel et créer des multitrajets. Dans ce cas, la précision des mesures se dégrade plus vite quand la durée des sessions diminue [5]. Le coût du matériel et sa maintenance sont aussi des obstacles au suivi en continu des mouvements de terrain par GPS. Cependant, pour de courtes lignes de base (de l'ordre du kilomètre), des GPS monofréquences, moins coûteux, sont suffisants pour garantir une précision infra-centimétrique. Cette étude montre que, en dépit des difficultés discutées ci-dessus, le GPS a la capacité de suivre en continu la dynamique d'entités géophysiques aux déplacements faibles et lents ($\sim 5 \text{ mm}\cdot\text{j}^{-1}$) et pourrait donc constituer, dans un système d'alerte, un complément aux techniques de topométrie conventionnelles.

Références

- [1] Dixon T., The Global Positioning System, *Rev. Geophys.* 29 (1991) 249–276.
- [2] Flageollet J.-C., Malet J.-P., Maquaire O., The 3-D structure of the Super-Sauze earthflow: a first stage towards modelling its behaviour, *Phys. Chem. Earth (sous presse)*.
- [3] Flageollet J.-C., Maquaire O., Weber D., et al., New technologies for landslide hazard assessment in Europe, NEWTECH, DG XII, Final Report (1998) 431.
- [4] Follacci J.-P., Seize ans de surveillance du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes), *Bull. Lab. Ponts et Chaussées* 220 (1999) 35–51.
- [5] Galisson L., Utilisation du GPS de précision pour la mesure de faibles déformations du sol, Mémoire DEA « Systèmes spatiaux et environnement », université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1998, 109 p.
- [6] Genrich J.-F., Bock Y., Rapid resolution of crustal motion at short ranges with Global Positioning System, *J. Geophys. Res.* 96 (1992) 3261–3269.
- [7] Gili J.A., Corominas J., Rius J., Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring, *Eng. Geol.* 55 (2000) 167–192.
- [8] Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., *GPS—Theory and practice*, 4th Ed., Springer, Wien, New-York, 1997, 389 p.
- [9] King R.W., Bock Y., Documentation for the Gamit GPS analysis software, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego (1999).
- [10] Larson K.M., Agnew D.C., Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurement, 1. Precision and accuracy, *J. Geophys. Res.* 96 (1991) 16547–16565.
- [11] Malet J.-P., Maquaire O., Klotz S., The Super-Sauze flowslide (Alpes-de-Haute-Provence, France); triggering mechanisms and behaviour, in : VIIIth Int. Symp., Landslides, Cardiff, à paraître, 6 p.
- [12] Mao A., Harrison C.G.A., Dixon T.H., Noise in GPS coordinate time series, *J. Geophys. Res.* 104 (1999) 2797–2816.
- [13] Pragnère A., Optimisation des paramètres dans le traitement des données GPS d'une courte ligne de base (1,37 km), mémoire de maîtrise, Unsa (1996) 15.
- [14] Schmutz M., Guérin R., Maquaire O., Descloîtres M., Schott J.-J., Albouy Y., Apport de l'association des méthodes TDEM et électrique pour la connaissance de la structure du glissement-coulée de Super-Sauze, *C. R. Acad. Sci., Paris, série IIa* 328 (1999) 797–800.
- [15] Weber D., Herrmann A., Reconstitution de l'évolution géomorphologique de versants instables par photogrammétrie numérique. L'exemple du glissement de terrain de Super-Sauze, *Bull. Soc. géol. France* (2000) (sous presse).
- [16] Zhang J., Bock Y., Johnson H., Fang P., Williams S., Genrich J., Wdowinski J., Behr J., Southern California Permanent GPS geodetic array: error analysis of daily position estimates and site velocities, *J. Geophys. Res.* 102 (1997) 18035–18055.