Utilisation du radar sol pour la surveillance des mouvements de terrain

François LEMAITRE
Jean-Claude POUSSIERE

ONERA de Toulouse

Jean-Paul DURANTHON
Laurent EFFENDIANTZ

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon

RÉSUMÉ

Un dispositif radar à micro-ondes pour la mesure de distances, développé pour la surveillance du versant rocheux des « Ruines de Séchilienne », situé près de Grenoble dans les Alpes françaises, est décrit. Les précisions obtenues sont de quelques dixièmes de millimètre à une distance de 1 200 m. Les données permettent de suivre les évolutions des mouvements, quelles que soient les conditions météorologiques.

DOMAINE : *Géotechnique et risques naturels.*

ABSTRACT

USE OF GROUND RADAR FOR MONITORING LANDSLIDES

*A microwave radar device for distance measurement, developed for the purpose of monitoring the rocky slope of the "*Ruines de Séchilienne*" near the city of Grenoble in the French Alps, is described herein. The level of precision obtained is to within several tenths of a millimeter at a measurement distance of 1,200 meters. The data provided enable tracking the evolution in ground movement, regardless of meteorological conditions.*

FIELD: *Geotechnical engineering and natural hazards.*

INTRODUCTION

La prévention des grands mouvements de versant constitue un enjeu majeur pour les sociétés modernes : un enjeu social parce que les structures responsables ne peuvent rester inactives devant les populations menacées, et également un enjeu technique car le suivi et la prévision des évolutions des phénomènes – clé de toute prévention – font appel à des méthodes de mesure qui doivent être les plus performantes possibles.

La surveillance d'un glissement de terrain actif nécessite l'acquisition de données en continu et en temps réel, quelles que soient les conditions météorologiques. Cette fonctionnalité indispensable ne peut être totalement assurée par les distancemètres optiques, qui sont inopérants par temps nuageux ou en présence de brouillard. La fonctionnalité « tous temps » peut toutefois être obtenue par des techniques micro-ondes, car les brouillards sont pratiquement transparents aux ondes radar.

Dans ce cadre, une technique de distancemétrie micro-ondes a été étudiée spécifiquement pour effectuer un suivi en temps réel du versant instable des « Ruines de Séchilienne », près de Grenoble en France. Les principes utilisés, les difficultés rencontrées et les méthodes employées pour y remédier sont exposés. L'appareil étant en place depuis plus de trois ans, on dispose aujourd'hui de suffisamment de recul pour présenter quelques résultats expérimentaux illustrant ce que l'on peut attendre de ce type d'instrument.

ASPECTS GÉOLOGIQUES ET VULNÉRABILITÉ

Le site des Ruines est situé dans la basse vallée de la Romanche, en rive droite de la rivière, au droit du verrou glaciaire de Montfalcon. Les terrains concernés sont constitués d'alternances de micaschistes et de psammites affectés d'une tectonique polyphasée complexe.

Le mouvement de versant, vraisemblablement initialisé par les phénomènes de décompression postglaciaires, concerne une surface totale de 70 ha. La partie la plus active, susceptible d'une rupture

à court terme, qui se déplace actuellement à une vitesse moyenne de l'ordre de 4 mm/jour, représente un volume de 3,2 millions de m^3 bordé sur ses marges d'un volume sensiblement équivalent pouvant générer des chutes régressives.

L'évaluation du phénomène a fait l'objet de reconnaissances variées, dont le percement d'une galerie de reconnaissance de 200 m de longueur pour tenter de localiser le plan de rupture arrière du volume en mouvement. Les observations menées depuis 1985 ont montré que la vitesse du glissement est fortement dépendante des conditions hydrauliques du massif.

Le principal risque en cas d'éboulement serait l'atteinte de la RN 91 et, dans l'hypothèse de chutes régressives importantes, la constitution d'un barrage naturel barrant le fond de vallée. Ce barrage fragile, derrière lequel pourrait se former rapidement un lac en contexte de crue, menacerait, en cas de rupture, directement les zones bâties situées en aval, notamment celles de la commune de Vizille.

Gestion du risque et surveillance

Comme exposé plus haut, l'intensité du mouvement de versant est fortement corrélée avec les infiltrations d'eau dans le massif, avec un caractère saisonnier réversible. Une tendance à l'accélération est toutefois de plus en plus perceptible à l'échelle du long terme. Le taux de déformation induit par le mouvement dégrade progressivement les propriétés mécaniques du massif, ce qui peut aboutir, sauf rémission, à l'individualisation d'une surface de rupture et à un éboulement brutal en grande masse.

À titre préventif, un ensemble de travaux ont été entrepris :

- creusement d'un chenal de dérivation de la Romanche, côté rive gauche de la vallée, sur 1 200 m de longueur. En amont, la tête de ce chenal est occultée par une digue fusible de manière à dévier la Romanche en cas d'obstruction du lit mineur par un éboulement ;
- réalisation d'un itinéraire de déviation de la RN 91 sur la digue formant la rive gauche du chenal de dérivation ;
- construction d'un merlon de protection entre la Romanche et le nouvel itinéraire en utilisant les matériaux disponibles. L'exiguïté des lieux n'a malheureusement pas permis l'implantation optimal de ce dispositif ;
- creusement d'une galerie de dérivation de secours de la Romanche pour éviter la formation d'un lac en cas de bouchure de la vallée : la section hydraulique, limitée à 50 m^3/s, permet de faire face aux crues annuelles.

Un plan de secours a été établi par la Préfecture du Département de l'Isère. L'efficacité de ce dispositif, en ce qui concerne ses aspects préventifs, repose en grande partie sur la fiabilité du dispositif d'alerte (notamment de son caractère tout temps), qui doit être capable de détecter suffisamment tôt les signes précurseurs (notamment de mise en vitesse) de l'éboulement pour « actionner » de manière efficace les différentes phases d'alerte et d'évacuation des populations.

Un ensemble de moyens de surveillance est d'ores et déjà mis en œuvre sur ce site. Il comprend :

- un ensemble d'extensomètres à fil : ceux-ci nécessitent la présence d'une source d'énergie sur le site ainsi qu'une télétransmission des données. La maintenance sur site de ces appareils sera vraisemblablement problématique en période de crise ;
- un dispositif de géodésie automatique : son principal inconvénient est de ne pas pouvoir fonctionner par temps de brouillard ou à travers une atmosphère nuageuse. Sur ce site, on a pu observer plusieurs périodes consécutives de 10 jours sans visibilité optique. Le risque de ne pas détecter à temps un éventuel changement de régime du mouvement est alors réel. Par ailleurs, la précision des mesures (plus ou moins 3 mm) conduit à une grande incertitude dans le calcul de la vitesse du mouvement sur 24 heures.

Compte tenu de ces inconvénients, un nouveau système, reposant sur la technique du radar, a été développé. Ses spécifications sont les suivantes :

- capacité de fonctionnement indépendante des conditions météorologiques ;
- précision suffisante pour effectuer une mesure « fine » de la vitesse du mouvement ;
- accessibilité aux données en temps réel par le réseau de surveillance, 24 heures par jour ;
- présence d'une source d'énergie non nécessaire sur le site surveillé ;
- fiabilité.

Ce système permet d'effectuer des mesures de distance depuis le versant faisant face aux « Ruines de Séchilienne » (distance comprise entre 1,1 km et 1,6 km).

Technique radar utilisée

Les radars sont des dispositifs électromagnétiques utilisés pour la détection de « cibles » par rayonnement d'énergie électromagnétique et analyse de l'énergie rétro-diffusée. Tout objet (cible) interfère avec l'onde émise et réfléchit une partie de cette énergie. L'analyse comparée des signaux émis et rétrodiffusés permet d'en extraire une information reliée à la distance radar-cible, notamment le retard entre ces signaux qui est directement lié à la longueur du chemin de propagation. Les signaux émis sont généralement des trains d'impulsions sinusoïdales, et la durée d'impulsion est de quelques centaines de nanosecondes. Les radars cohérents utilisent des oscillateurs de haute stabilité et des récepteurs conçus pour extraire l'information de phase du signal réfléchi, qui varie de 360 degrés pour une variation de distance de la cible d'une longueur d'onde.

Pour des distances relativement courtes de quelques kilomètres, la propagation des ondes radar est relativement peu affectée par les conditions météorologiques, car les longueurs d'ondes utilisées sont généralement grandes devant la taille des hydrométéores : c'est là l'avantage principal du radar par rapport aux techniques optiques.

Les radars ont par nature des capacités de mesures des distances, mais les résolutions typiques sont de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Ces appareils effectuent fondamentalement des mesures de retard de propagation qui sont ensuite converties en distance. La résolution en distance dépend de la largeur de la bande émise :

$$\delta d = \frac{c}{2B}$$

avec

c : vitesse de la lumière,

B : largeur de la bande émise.

Dans le cadre d'applications à la géophysique, la scène observée évoluant très lentement, on peut la considérer comme étant fixe pendant quelques secondes. On peut alors synthétiser une bande passante très large en analysant séquentiellement l'ensemble des sous-bandes. Par cette méthode, avec 8 GHz de bande, des résolutions de 18 mm ont été obtenues.

Les marqueurs passifs sont disposés sur le site pour identifier les points surveillés. Ce sont des trièdres réflecteurs de 40 cm d'arête qui génèrent des échos puissants, bien contrastés par rapport aux signaux rétrodiffusés par la scène naturelle. Ces marqueurs se comportent pratiquement dans le domaine temporel comme des impulsions de Dirac bien isolées.

Le radar délivre également une information de phase, qui varie rapidement avec la distance du réflecteur selon la loi :

$$\phi = \frac{4\pi D}{\lambda}$$

avec

ϕ : phase,

D : distance,

λ : longueur d'onde.

Cette donnée est en général difficilement exploitable en raison du grand nombre d'ambiguïtés qui subsistent dans une cellule de résolution de quelques mètres. On pourrait résoudre cette difficulté par un suivi temporel continu, mais toute référence avec le passé serait perdue à la moindre interruption du système, et constituerait un handicap majeur dans le cas de l'application envisagée. Pour cette raison, l'approche, différente, utilise la très grande largeur de bande de l'instrument pour lever ces ambiguïtés, et s'appuie sur des techniques de traitement du signal qui ne seront pas détaillées ici. La précision finale de la mesure de phase est liée à un ensemble de considérations énergétiques, et est de l'ordre de deux degrés dans la situation décrite ici. La précision de mesure du temps de propagation correspondante est alors de 300 femtosecondes ce qui équivaudrait à une précision en distance de 0,05 mm si l'atmosphère était parfaitement stable dans le temps et homogène dans l'espace.

Les résultats de simulation présentés sur la figure 1 montrent l'erreur résiduelle en fonction du rapport signal/bruit pour chaque composante fréquentielle. À partir du seuil de – 10 dB, les trièdres commencent à être identifiés. Au-delà, les courbes montrent ce que l'on obtient avec une méthode

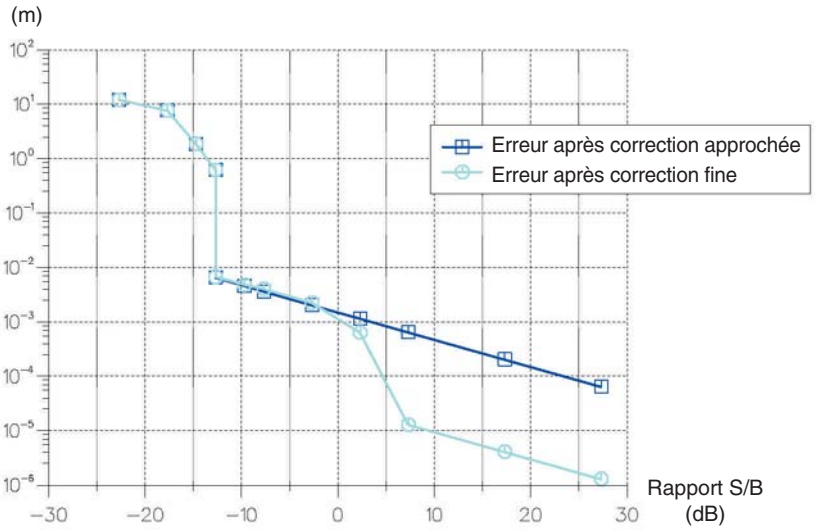

Fig. 1
Simulation des précisions obtenues en fonction du rapport signal/bruit.

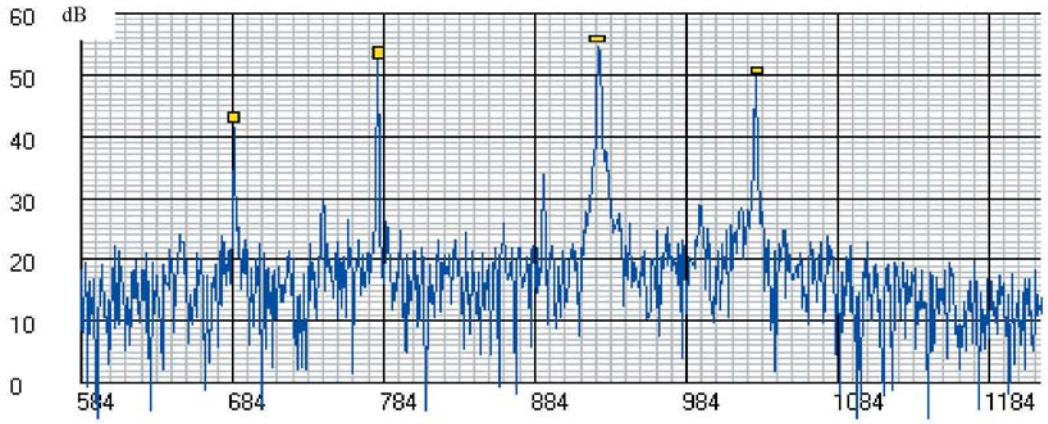

Fig. 2
Réponse impulsionnelle synthétisée (dB) d'un groupe de trièdres. L'échelle est de 18 mm par point sur l'axe des abscisses.

paramétrique classique (correction approchée), et ce qu'apporte l'utilisation de l'information de phase absolue (correction « fine »).

La figure 2 présente un exemple expérimental de réponse impulsionnelle synthétisée, qui montre que les échos des quatre trièdres sont puissants par rapport à l'environnement naturel.

Effets atmosphériques

La conversion du temps de propagation en mesure de distance fait intervenir la vitesse de la lumière et celle-ci dépend des propriétés diélectriques (indice de réfraction) de l'atmosphère le long du chemin de propagation. L'indice de réfraction de l'atmosphère varie en fonction d'un ensemble de paramètres physiques (pression, température, vapeur d'eau, etc.) qui sont eux-mêmes variables dans le temps et dans l'espace. Les sensibilités à ces paramètres sont sensiblement les mêmes que dans le domaine optique, à l'exception du paramètre humidité, pour lequel elle est environ 80 fois plus importante. De plus, contrairement à la pression ou à la température, qui suivent plus ou moins des

distributions stratifiées, la répartition de ce paramètre est très variable en fonction du lieu. En résumé, les variations relatives de l'indice de réfraction dans les couches inférieures de la troposphère sont typiquement de plus ou moins quelques dizaines de ppm, soit quelques centimètres pour une portée de un kilomètre.

Ces fluctuations constituent un problème majeur car elles grèvent la précision finale de l'instrument. Pour cette raison, un ensemble de travaux ont été menés sur ce point [1-7] ; ceux-ci ont mis en évidence que les perturbations peuvent être séparées en trois « domaines » spatio-temporels :

- D1 : les fluctuations liées à de la turbulence qui se développe avec des constantes de temps inférieures à quelques secondes : elles correspondent à des échelles spatiales de quelques dizaines de mètres, ont un comportement de nature aléatoire et les données expérimentales se conforment bien aux modèles statistiques construits à partir de la théorie de la turbulence ;
- D2 : les variations dues à des phénomènes atmosphériques globaux (éclairement solaire, cycle diurne, etc.). Elles ont des constantes de temps supérieures à quelques dizaines de minutes, et correspondent à des phénomènes intrinsèquement déterministes, mais imprévisibles en pratique ;
- D3 : un domaine intermédiaire dans lequel les phénomènes décrits ci-dessus s'imbriquent. On peut citer par exemple le cas de la convection thermique le long de la pente ou bien la génération de vapeur d'eau par la végétation sous l'action de l'éclairement solaire.

La réduction de ces effets indésirables s'appuie sur deux principes simples :

- intégration temporelle des données : le phénomène étudié étant très lent, le calcul de moyennes dans le temps permet de réduire les fluctuations présentant un caractère aléatoire. Ce procédé induit néanmoins un retard de la mesure sur l'événement, aussi a-t-il été limité à des temps d'intégration de quelques heures. Cette méthode est très efficace pour réduire les perturbations de type D1 mentionnées ci-dessus ;
- utilisation de marqueurs de référence : des mesures simultanées sur des points voisins topographiquement fixes qui donnent, au même moment, une estimation de l'indice de réfraction intégré le long du chemin de propagation. Cette méthode est d'autant plus efficace que les axes de propagation sont globalement voisins [7]. Malheureusement, on ne peut pas choisir les points de référence aussi proches que souhaité des points à surveiller.

Dans le cas présent, trois marqueurs topographiquement fixes ont été disposés à l'extérieur de la zone en mouvement. Ces données permettent les évaluations en temps réel de l'indice de réfraction et de son gradient local, qui sont utilisées ensuite pour compenser les données des points en mouvement. Cette méthode est plutôt efficace pour la réduction des perturbations à grande échelle spatiale de type D2.

Ces méthodes n'apportent cependant pas de solution efficace pour réduire les perturbations de type D3, c'est-à-dire des variations d'indice correspondant à des échelles spatio-temporelles de quelques centaines de mètres pendant quelques heures.

La figure 3 montre la position des trièdres implantés sur le site, depuis l'emplacement du radar. Les cercles signalent les points fixes de référence utilisés pour la compensation des effets atmosphériques.

Ces perturbations ont été caractérisées dans le domaine temporel par leur densité spectrale de puissance (DSP) sur plusieurs périodes. Les résultats présentés sur la figure 4 montrent la rapide décroissance de la puissance en fonction de la fréquence, qui suit approximativement la loi en puissance – 8/3 que prévoit la théorie [1-7]. On remarque également que ces spectres sont similaires, quels que soient la date et le lieu. L'intensité moyenne de la turbulence, globalement caractérisée par la constante de structure Cn, dépend globalement du relief local, de la force du vent, et décroît rapidement avec l'altitude.

Les perturbations atmosphériques ont également été caractérisées dans le domaine spatial au moyen d'une analyse en composantes principales (ACP) d'enregistrements de trois semaines portant sur quatorze trièdres. On identifie par cette méthode, à partir des valeurs propres d'une estimation de la matrice de covariance, le nombre de variables aléatoires indépendantes présentes dans les données. Les résultats de la figure 5 montrent que deux valeurs propres se détachent nettement. Le vecteur propre associé à la première a ses composantes quasi identiques ; cette valeur correspond donc à des variations homogènes de l'indice de réfraction. Les composantes du second vecteur propre sont pratiquement proportionnelles à l'altitude du point considéré ; la valeur propre associée correspond donc à des variations du gradient vertical d'indice de réfraction qui varie lui-même en fonction des échanges thermiques entre le sol et le ciel.

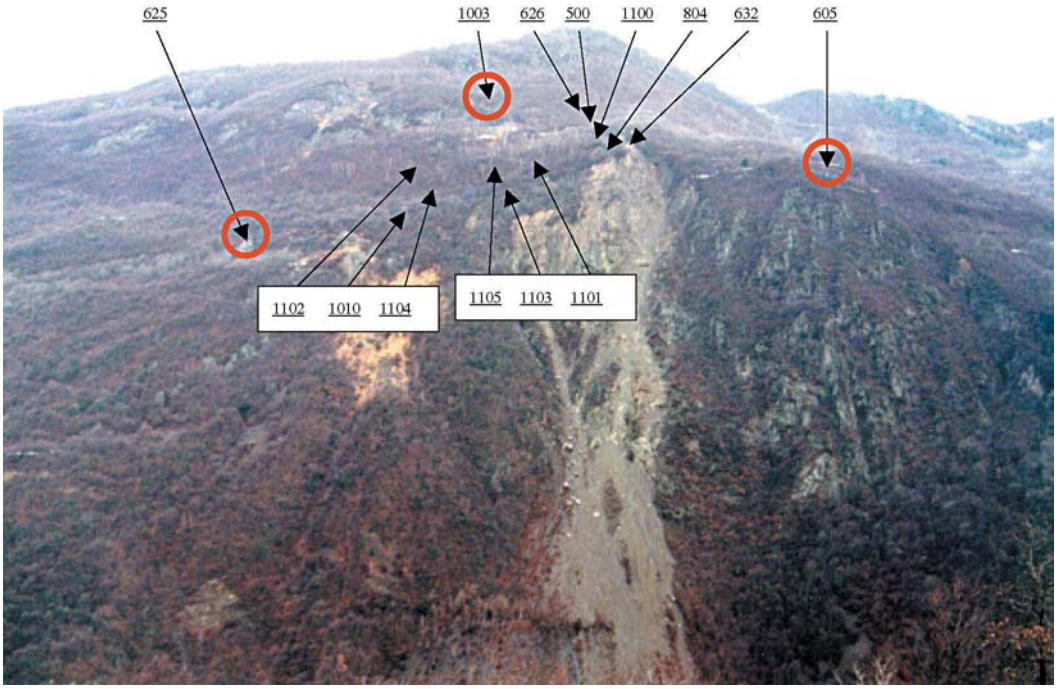

Fig. 3

Ensemble des trièdres sur le site vu du local de Montfalcon abritant le radar. Les trièdres cerclés en rouge signalent les points fixes de référence utilisés pour la compensation atmosphérique.

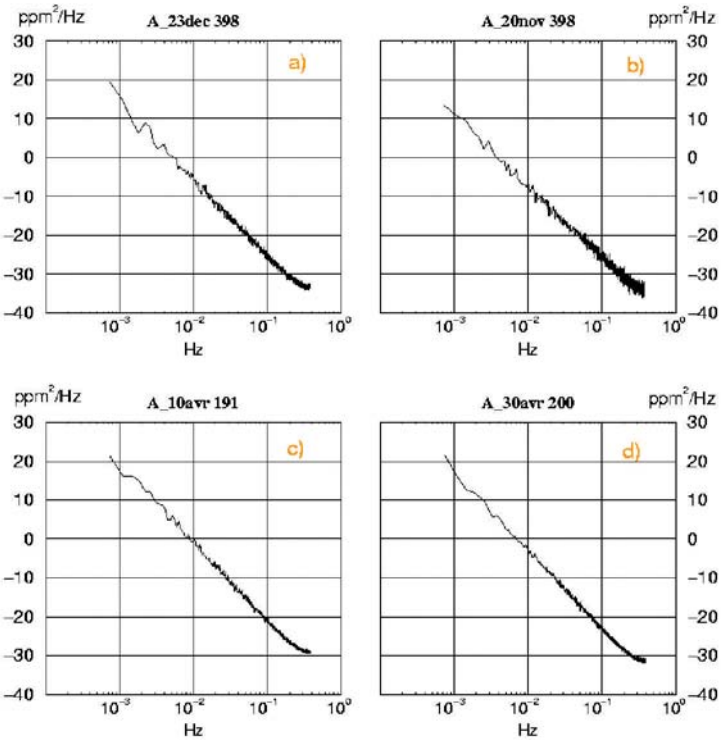

Fig. 4

Caractérisation temporelle des perturbations atmosphériques (DSP).

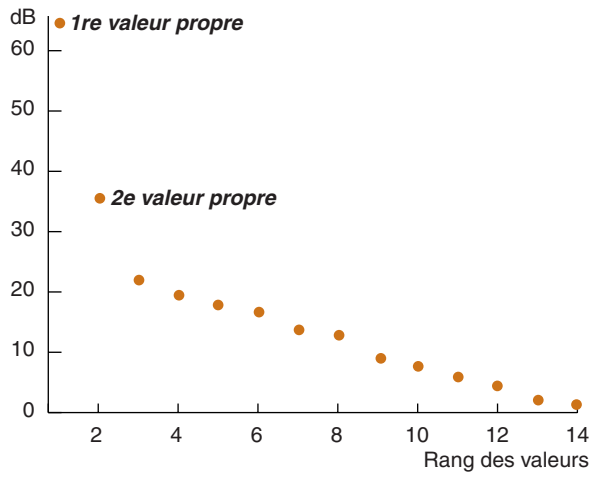

Fig. 5
Caractérisation spatiale des perturbations atmosphériques (ACP).

Instrument

L'instrument développé est installé dans un local situé sur le versant faisant face à l'éboulement (Fig. 6). Le dispositif rayonnant doit permettre l'illumination de l'ensemble des « zones d'intérêt », avec une densité de puissance suffisante. L'antenne utilisée présente un faisceau étroit qui ne permet pas de couvrir l'ensemble du site. Pour élargir la zone d'investigation tout en évitant le recours à des mécanismes complexes de balayage ou des pointages successifs qui grèveraient la fiabilité du système, les zones d'intérêt sur le site sont illuminées simultanément par l'intermédiaire d'un système de déflexion qui sépare le faisceau principal en six sous-faisceaux orientables individuellement (Fig. 7).

L'ensemble des circuits électroniques d'émission et de réception sont situés dans un boîtier monté directement derrière l'antenne. La plupart des trièdres radar sont associés à des cibles optiques, afin de pouvoir comparer leurs données respectives. La figure 8 montre un ensemble trièdre radar et réflecteur optique mis en place en falaise. C'est l'un des points du site qui évolue le plus rapidement.

Fig. 6
Local de Montfalcon hébergeant le distancemètre optique (au rez-de-chaussée) et le radar (à l'étage).

Fig. 7
Le radar et le système déflecteur à facettes.

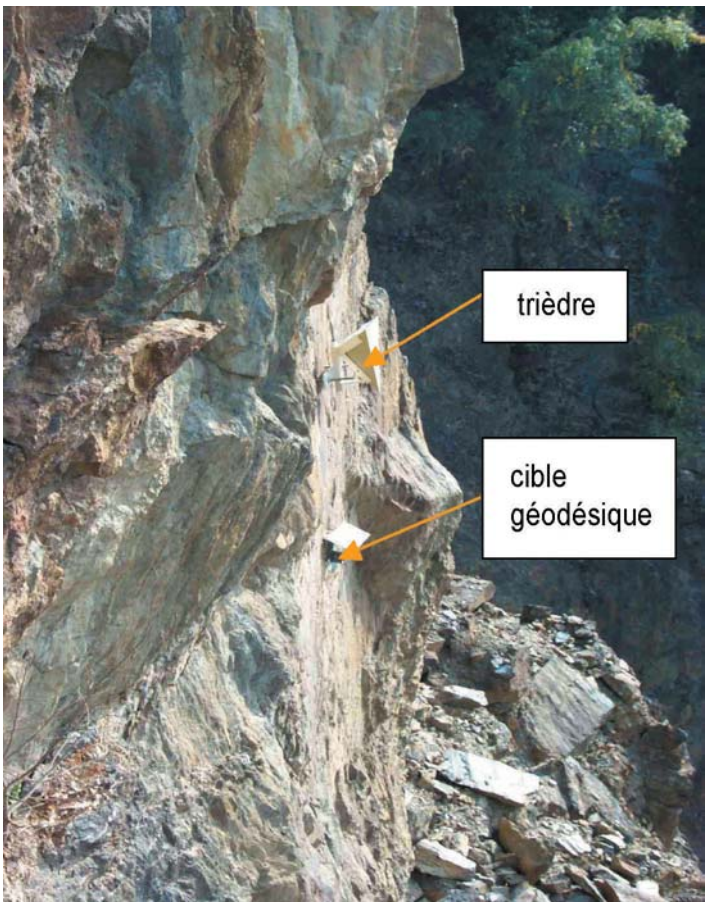

Fig. 8
Le trièdre 804 monté en falaise avec la cible géodésique en dessous.

Le radar est géré par un calculateur (PC) qui effectue tous les traitements et construit les fichiers de mesures (de distance et de vitesse) à la cadence de 1 point par heure. Ces données sont accessibles en temps réel à partir du centre de contrôle du Centre d'études techniques de l'Équipement (CETE) de Lyon qui collecte les informations issues de l'ensemble des instruments du site.

Exemples de résultats

Précision intrinsèque de l'instrument

Une manière de qualifier l'instrument sans faire intervenir les perturbations atmosphériques est d'effectuer la différence de deux mesures consécutives, à quelques secondes d'intervalle. Un résultat de ce type est présenté sur la figure 9, qui montre que le résidu est inférieur à plus ou moins 0,1 millimètre.

Amélioration apportée par la compensation atmosphérique

Pour illustrer l'importance de la compensation de ces effets, la figure 10 présente des données brutes délivrées par l'instrument. On y voit des variations de plus ou moins 1 cm, et on peut identifier le cycle diurne/nocturne. L'utilisation d'un seul point de référence améliore beaucoup les résultats, comme le montre la figure 11, mais il subsiste alors l'influence du gradient vertical d'indice : le résidu est d'autant plus faible que le point considéré et le point de référence sont à la même altitude. Les trièdres considérés s'étendent sur une dénivelée totale de l'ordre de 500 mètres.

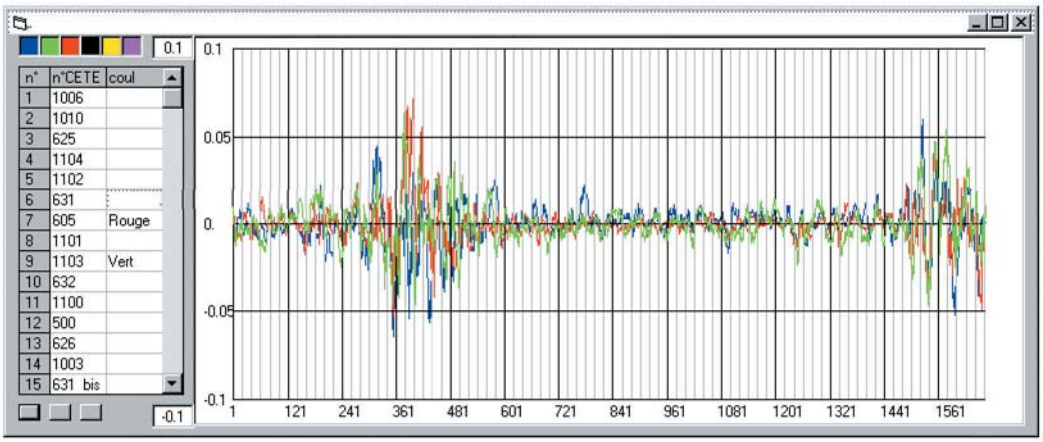

Fig. 9
Caractérisation de la précision intrinsèque de l'instrument (en mm).
L'échantillonnage est de 1 point/30 s sur l'axe des abscisses.

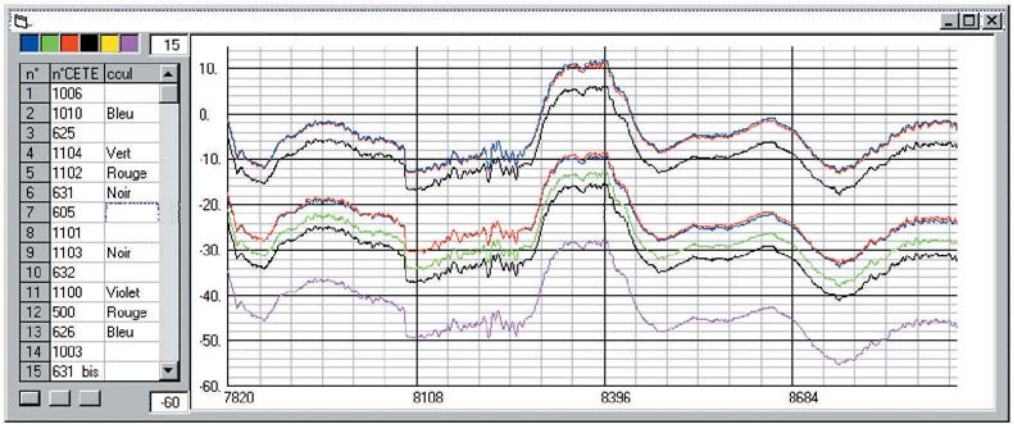

Fig. 10
Résultats sans compensation des effets atmosphériques (en mm).
L'échantillonnage est de 1 point/30 s sur l'axe des abscisses

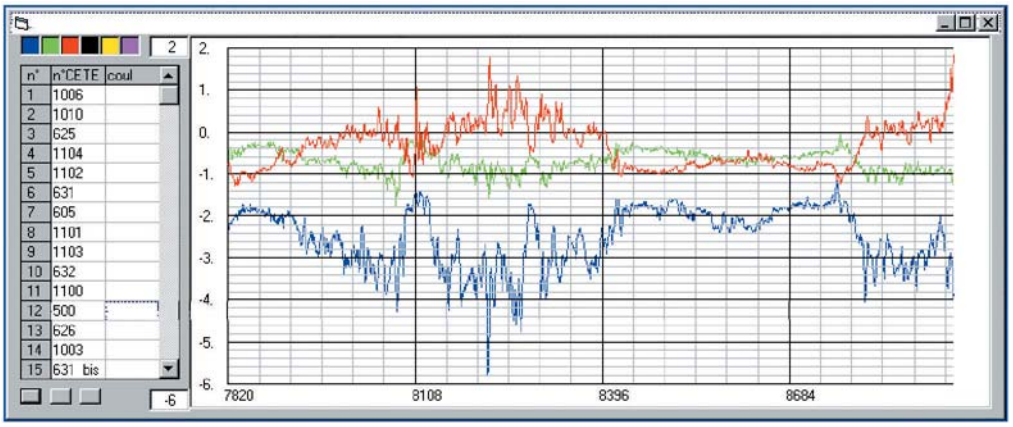

Fig. 11

Résultats avec compensation sur 1 point de référence unique (en mm).
L'échantillonnage est de 1 point/5 min sur l'axe des abscisses (cf. Fig. 10 pour le repérage des trièdres par leur couleur).

Observation de points fixes, extraction d'une vitesse en millimètres par jour

Sur le site sont disposés des trièdres qui ne participent pas (encore) au mouvement de glissement. Leur suivi permet d'apprécier la précision globale de l'instrument. La figure 12 montre ce que l'on obtient en utilisant la méthode de compensation sur trois points et une moyenne sur 8 heures : il apparaît alors un résidu (+/– 0,2 mm) qui suit approximativement une période de 24 heures. Ce résidu est lié aux perturbations de type D3, difficiles à compenser, mentionnées plus haut. Si son amplitude n'est pas très importante, il s'avère par contre très gênant pour le calcul de la vitesse de glissement. Pour obtenir des résultats acceptables, on doit alors calculer cette vitesse sur des périodes multiples de 24 heures. La figure 13 montre la vitesse de glissement calculée ainsi sur une période de 48 heures.

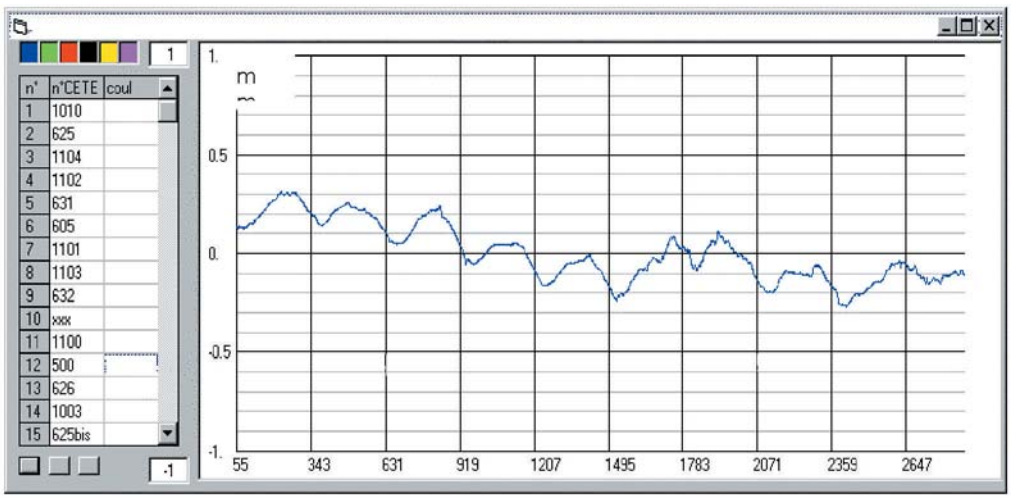

Fig. 12

Résultats sur point fixe (en mm).
L'échantillonnage est de 1 point/5 min sur l'axe des abscisses.

Fiabilité

En règle générale, la fiabilité des systèmes électroniques est liée à un ensemble de facteurs dont les principaux sont les puissances mises en jeu, le contrôle thermique, les vibrations et la présence de mécanismes. La génération de puissance hyperfréquence émise, de l'ordre du milliwatt en moyenne,

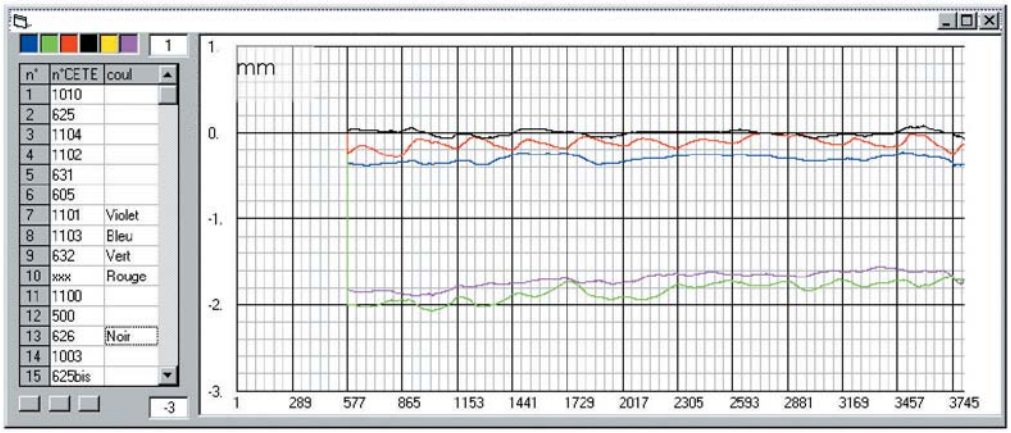

Fig. 13
Extraction de la vitesse de glissement en mm/jour sur 48 heures.
L'échantillonnage est de 1 point/5 min sur l'axe des abscisses.

ainsi que l'ensemble des circuits d'émission/réception s'appuie sur une technologie « état solide ». L'appareil non soumis à des vibrations, est abrité dans un local (*cf.* Fig. 6 et 7), dont la température est relativement contrôlée et, par ailleurs le dispositif exposé plus haut permet de s'affranchir de tout mécanisme pour assurer la couverture de la zone surveillée. Toutes les conditions sont donc *a priori* réunies pour obtenir une grande fiabilité de fonctionnement de la partie électronique du système. Après un an d'observation en situation opérationnelle, les seuls aléas qui ont pu être observés et identifiés sont dus à des causes extérieures, par exemple des masquages intempestifs de réflecteurs par des animaux ou des promeneurs, le dépôt de givre sur ceux-ci, ou bien la destruction accidentelle de l'un d'entre eux par une chute de bloc. Pour remédier en partie à ces événements peu fréquents, un filtrage non linéaire des données a été mis en place, qui affranchit les données des perturbations brèves et brutales générées notamment par les masquages par les animaux. En termes de maintenance, la seule opération nécessaire est une actualisation semestrielle des paramètres permettant l'identification des marqueurs, en raison du glissement naturel de ceux-ci.

Observations du mouvement naturel

Quelques résultats typiques d'observations opérationnelles sont présentés. La figure 14 présente un suivi sur une période de un mois. On constate que le mouvement n'est pas linéaire. Le petit accident à droite correspond au masquage d'un trièdre de référence par un promeneur ; dans ce cas, des données erronées sont malencontreusement utilisées pour la compensation des autres points. La figure 15 montre un enregistrement sur lequel on peut remarquer une nette rupture de pente, liée à de fortes précipitations. Le petit « accident » qu'on peut remarquer est un phénomène de givrage de quelques trièdres. Le dépôt de glace sur les faces crée une longueur de propagation supplémentaire (l'indice de réfraction de la glace est voisin de 1,8). En apparence, le trièdre en question « recule », puis « retombe » quelques heures plus tard (Fig. 16).

Amélioration du fonctionnement du radar

Lors d'un événement non prévisible qui s'est produit, un rocher a dévalé la pente dans une zone au premier abord stable et a détruit le trièdre de référence 1003 situé en haut du versant. En l'absence de ce point de compensation, les mesures sont pratiquement inexploitables : le système est donc vulnérable à toute disparition de ces trièdres de référence.

Quelques améliorations avaient d'ores et déjà été apportées au logiciel pour réduire les effets de masquages brefs et intempestifs (principalement dus aux passages d'animaux devant les réflecteurs), au moyen d'un filtrage non linéaire sur les données. Cette disposition s'avère malheureusement insuffisante pour remédier au problème évoqué ci-dessus.

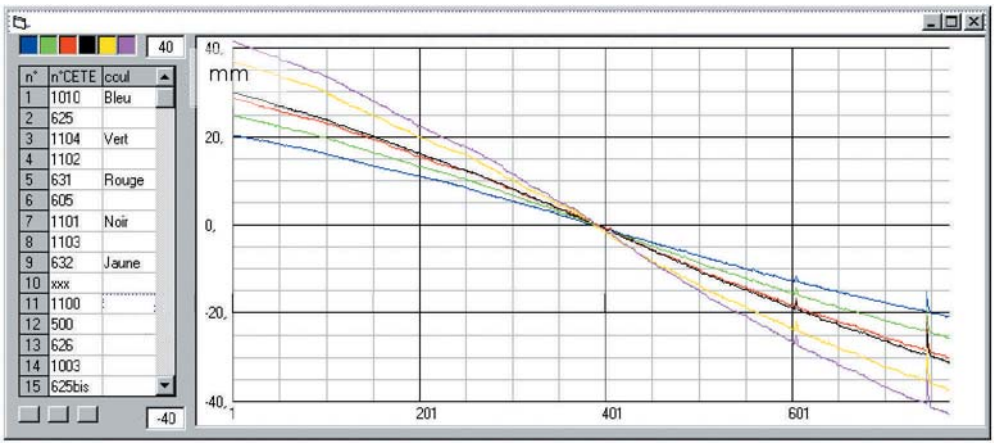

Fig. 14

Exemple typique de suivi sur un mois (mouvement relatif).
L'échantillonnage est de 1 point/heure sur l'axe des abscisses.

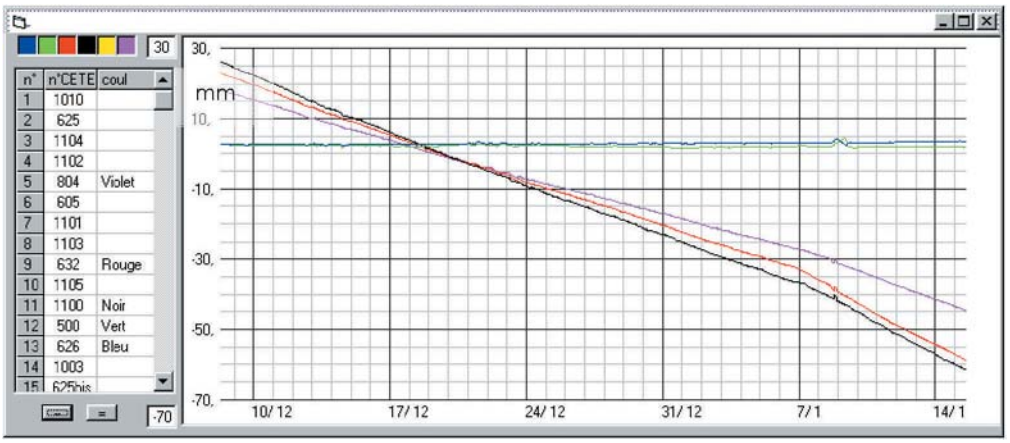

Fig. 15

Observation d'un changement de pente suite à des précipitations.
L'échantillonnage est de 1 point/heure sur l'axe des abscisses

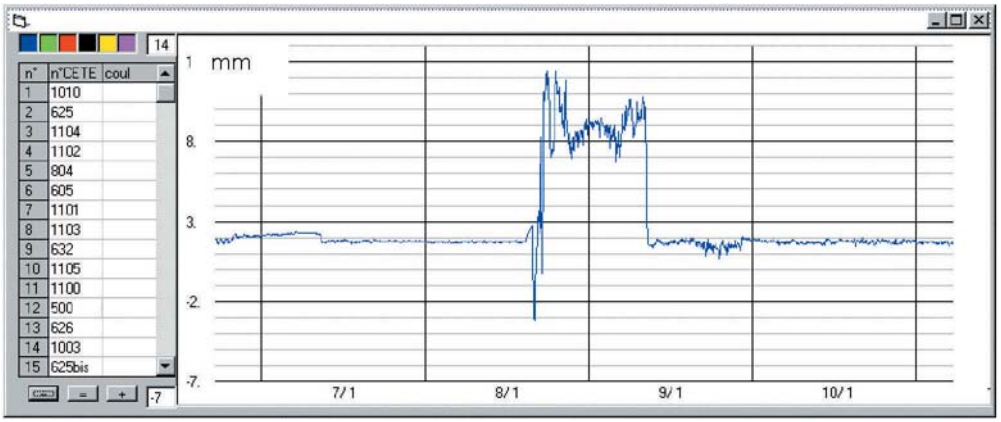

Fig. 16

Un « accident » typique : dépôt de givre sur les trièdres.
L'échantillonnage est de 1 point/heure sur l'axe des abscisses.

Principe

Trois trièdres de référence ont été implantés sur le site, au voisinage des premiers, le trièdre 1003 ayant été réinstallé (Fig. 17). Après intégration de ces points supplémentaires dans le cycle des mesures, des modifications du logiciel qui gère les compensations atmosphériques ont été effectuées afin d'assurer la continuité des mesures en présence d'événements tels que ceux décrits plus haut.

Le principe repose sur l'hypothèse que le masquage ou la destruction simultanée de deux trièdres de référence par la chute d'un bloc rocheux est peu probable.

Les six points de compensation sont maintenant groupés par paires et sont surveillés en continu afin de détecter toute anomalie, notamment dans les cas suivants :

- perte notable de niveau de la puissance rétrodiffusée,
- évolution soudaine et importante de la mesure brute de distance.

On effectue ensuite en temps réel la gestion en fonction des anomalies constatées :

❶ aucune anomalie : on exploite les trois moyennes des mesures effectuées sur chaque paire ;
❷ une anomalie sur un des trièdres d'une paire : on n'utilise que les mesures effectuées sur son voisin valide ;
❸ autre cas : on passe en mode dégradé, c'est-à-dire que l'on n'utilise que les informations issues des trièdres de référence valides pour effectuer une compensation au premier ordre des variations de l'indice de réfraction de l'atmosphère. Dans cette situation, les données délivrées par l'instrument sont moins précises que dans le mode de fonctionnement normal.

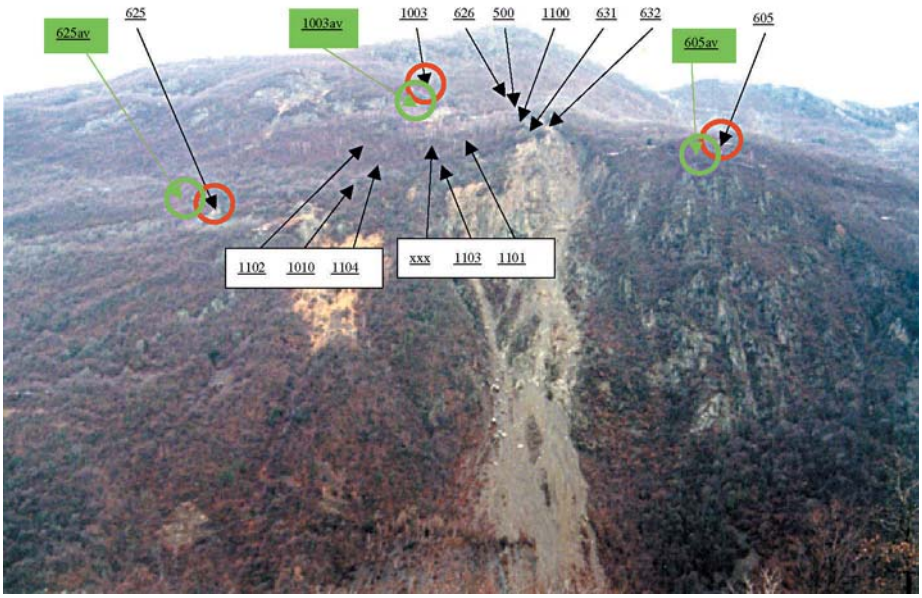

Fig. 17
Vue sur le glissement de terrain à partir du local de Montfalcon abritant le radar. Les anciens trièdres de référence (1003,625,605) sont cerclés en rouge. Ils ont été doublés avec de nouveaux trièdres (1003av, 625av, 605av) cerclés en vert.

Résultats

Les tests ont consisté à effectuer une succession de masquages sur les trièdres 605 et 605av (qui sont les plus facilement accessibles), de manière alternative ou simultanée, et à observer l'incidence sur les données traitées d'autres points de mesure voisins tels que les trièdres 632 et 804. La cadence d'acquisition est de deux points par minute. En fonctionnement normal, les données sont moyennées avec des constantes de temps d'une heure afin d'éliminer les fluctuations rapides dues à la turbulence atmosphérique. Pour des raisons pratiques, les tests, qui ont duré environ une heure et demie, ont été réalisés sans effectuer ce moyennage.

La figure 18 présente les mesures brutes (sans compensation des effets atmosphériques). Les masquages sur les trièdres 605 et 605 av induisent des écarts importants sur les mesures.

La figure 19 montre les mesures traitées, selon l'ancienne procédure, pour compenser les variations de l'indice de réfraction de l'atmosphère. Les écarts importants observés sur les points de compensation altèrent les mesures sur les points de mesure 632 et 804.

Enfin, la figure 20 montre les données traitées selon la nouvelle méthode. On constate que les anomalies artificiellement introduites sur les points de compensation ont été détectées et que le traitement exposé ci-dessus a bien joué son rôle : les données sont compensées et insensibles à la disparition des points de référence.

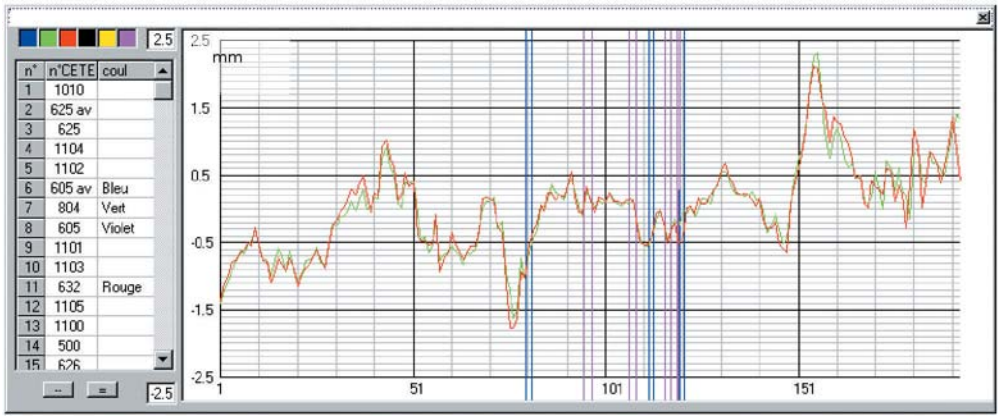

Fig. 18

Mesures brutes : le masquage des points 605 et 605av conduit à des écarts importants sur la mesure de leur position, les points 804 et 632 ne sont pas affectés. L'échantillonnage est de 1 point/30 s sur l'axe des abscisses.

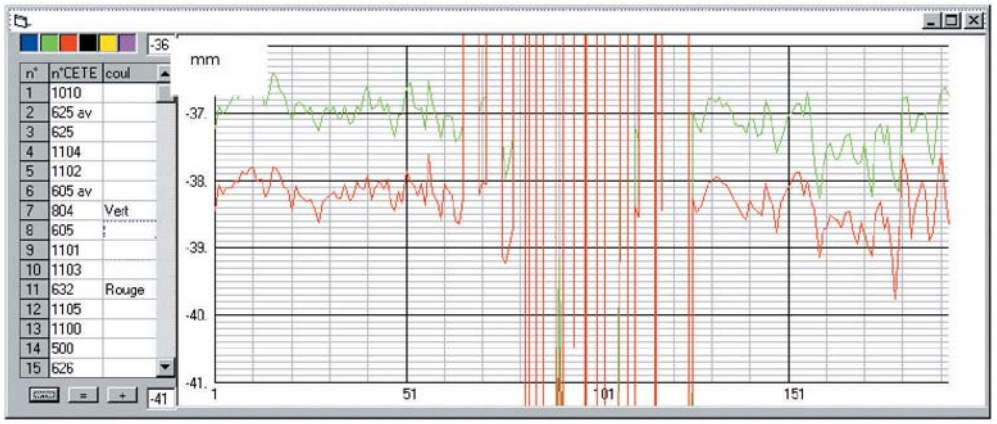

Fig. 19

Mesures compensées selon l'ancienne méthode. L'utilisation du point 605, en partie absent, pour corriger les mesures sur les points 804 et 632 introduit des grands écarts sur les relevés. L'échantillonnage est de 1 point/30 s sur l'axe des abscisses.

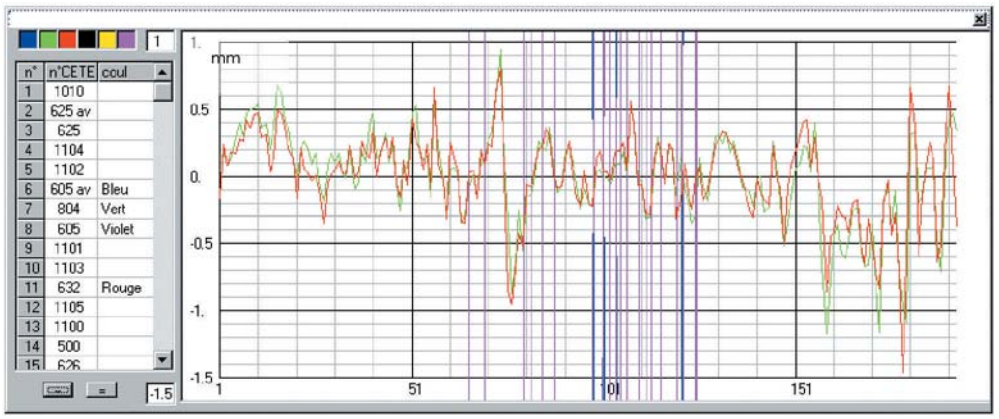

Fig. 20

Mesures compensées avec gestion des anomalies. La continuité des mesures est assurée. L'échantillonnage est de 1 point/30 s sur l'axe des abscisses.

Conclusions

La technique de distancemétrie micro-onde présentée est une approche efficace lorsqu'une capacité tout temps est requise. Elle peut délivrer des mesures de distance précises sur des marqueurs passifs en exploitant l'information de phase absolue. Les instabilités dans le temps et dans l'espace de l'indice de réfraction atmosphérique constituent la principale limitation de cette technique, mais cet inconvénient peut être fortement réduit en moyennant les données dans le temps et en utilisant plusieurs points fixes de compensation. La précision finale dépend des conditions rencontrées sur le terrain pour mettre en œuvre ces techniques.

Sur le site présenté, considéré comme notoirement instable du point de vue des conditions aérologiques, des précisions de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres à des distances de 1 200 m à 1 600 m ont été atteintes. Les données obtenues permettent d'effectuer un suivi global de l'évolution du mouvement, en temps réel, quelles que soient les conditions météorologiques.

Un recul expérimental de trois années montre que quelques aménagements (mineurs) sont encore à effectuer pour remédier à des (peu fréquentes) difficultés de terrain, notamment liées à quelques périodes de givre. Globalement, on peut considérer que le dispositif étudié et mis en place a démontré son caractère opérationnel pour la surveillance de sites instables déclarés.

La suite des travaux sur ce site consistera à tester sur sol nu des méthodes de mesure de l'activité du site sans disposer de trièdres réflecteurs en place. Ce cas correspond au besoin de suivi du site après un éboulement en masse.

L'application typique pour ce type de dispositif est la détection d'entrée en activité de risques rocheux majeurs potentiels, en raison de sa capacité tout temps, des contraintes d'accessibilité couramment associées à ce type de phénomène et de l'absence de source d'énergie sur le site surveillé. Par ailleurs, cette technique pourrait s'accommoder d'un fonctionnement de type « nomade » par tests ponctuels (périodes de 15 jours/an par exemple) sur la base d'un dispositif mobile positionné sur des socles de référence.

Remerciements : *Ces travaux ont été soutenus depuis 1995 par le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Direction des Risques majeurs) ainsi que par le ministère de l'Intérieur (Direction de la Sécurité civile).*

Références bibliographiques

[1] LEMAÎTRE F., *Systèmes micro-onde de surveillance de masses rocheuses instables,* Rapport technique ONERA n° 1/1787, **1995,** Contrat MI-MATE.

[2] LEMAÎTRE F., LAFFOURCADE R., *Systèmes micro-onde de surveillance de masses rocheuses instables,* Rapport technique ONERA nº 1/1823, **1996,** Contrat MI-MATE.

[3] LEMAÎTRE F., POUSSIERE J.-C., *Procédé et dispositif pour la surveillance d'un site instable,* Brevet d'invention FR 96 06976 n° 2749671, avril **1996.**

[4] LAFFOURCADE R., LEMAÎTRE F., SOUM G., Comparison geometrical optics/Rytov's method for the modelling of atmospheric turbulence effects on a millimetre microwave link, *Journées propagation électromagnétique du décamètre à l'angström*, Société des électroniciens et des électriciens (SEE), Rennes, octobre **1997**.

[5] LEMAÎTRE F., MALASSINGNE C., *Développement d'un radar adapté à la surveillance des versants instables,* Rapport technique ONERA n° 1/1916, **1998**, Contrat MI-MATE.

[6] LAFFOURCADE R., LEMAÎTRE F., SOUM G., Atmospheric inhomogneities effects on accurate microwave distance measurements, *International Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Société des électroniciens et des électriciens (SEE), Washington, may **1998.**

[7] LAFFOURCADE R., *Effets des inhomogénéités de l'atmosphère sur un système de distancemétrie micro-onde,* Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse, octobre **1998.**

[8] MALASSINGNE C., LEMAÎTRE F., PASCAL O., P. BRIOLE, Unstable area ground based radar monitoring, *5th International Conference on Radar Systems* , Brest, mai **1999.**

[9] MALASSINGNE C., LEMAÎTRE F., PASCAL O., Techniques de distancemétrie radar, *2nd Microwaves and Electromagnetism days of Toulouse*, Institute of electrical and electronic engineers (IEEE), **1999.**

[10] MALASSINGNE C., *Extraction de paramètres géophysiques par radar,* Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse, novembre **2000.**

[11] DURANTHON J.-P., *Les différents modes d'auscultation d'un massif rocheux*, Comité Technique 23/sujet 2.23.07.8 du LCPC, décembre **1998.**

[12] LEMAÎTRE F., DURANTHON J.-P., *Mise en œuvre d'un système radar de surveillance*, Comité Technique 23/sujet 2.23.07.7 du LCPC, juillet **2000.**

[13] EFFENDIANTZ L., DURANTHON J.-P., *Risque majeur d'éboulement des « Ruines de Séchilienne »*, Points des mesures de suivi et de surveillance du site, Dossier H/35098 – 31 mars **2002.**