

Analyse des terrains instables à l'aide de photographies aériennes diachroniques

O. Kölbl, J.-J. Stuby

Institut de photogrammétrie, EPF-Lausanne  
Suisse

Commission VII

Résumé

L'Institut de photogrammétrie de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne a développé différents procédés pour l'analyse quantitative des terrains instables à l'aide de la photogrammétrie. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une étude interdisciplinaire pour la saisie et la détection des terrains instables. Les procédés photogrammétriques se basent d'une part sur la restitution des prises de vues aériennes diachroniques, les photographies aériennes utilisées pour la mise à jour des cartes nationales permettant de détecter et d'analyser des mouvements de terrain de 3 à 5 cm par année pour des périodes d'observation de ces vingt dernières années; d'autre part, il est possible de saisir les bilans de masses avec des plans hypsométriques détaillés. Finalement, des photographies aériennes fausses couleurs ont été utilisées avec beaucoup de succès pour la cartographie géomorphologique des terrains instables. Ces travaux ont été effectués dans diverses régions de test en Suisse.

Summary

The Institute of Photogrammetry of the Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne has developed different procedures for the quantitative analysis of unstable grounds. This study has been performed within an interdisciplinary research work for the "Detection and analysis of unstable grounds". The photogrammetric procedures are based on the one hand on the use of multitemporary photographs. With the help of the aerial photographs which are flown for map revision, it is possible to detect and measure ground movements of 3-5 cm per year for observation periods going back till about 20 years. An other possibility is the analysis of the balance of masses of unstable grounds with the help of detailed contour maps; finally, false color photographs have been used with great success for geomorphological mapping of unstable grounds. These different procedures have been used for an interdisciplinary study for different test sites in Switzerland.

Zusammenfassung

Im Rahmen einer Studie zur Erfassung und Analyse von Rutschgebieten hat das Institut für Photogrammetrie der Eidg. Technischen Hochschule in Lausanne verschiedene photogrammetrische Verfahren für die quantitative Analyse der Rutschbewegungen entwickelt. Diese Verfahren basieren einerseits auf der Auswertung multitemporärer Luftbilder. Mit dem in der Schweiz zur Verfügung stehenden Luftbildmaterial für die Kartennachführung lassen sich die Rutschbewegungen der letzten 20 Jahre erfassen

und Bewegungen von 3 bis 5 cm pro Jahr mit Sicherheit nachweisen. Eine weitere Möglichkeit ist die Erfassung des Massenhaushalts von Rutschbewegungen mit detaillierten Höhenschichtenplänen; schliesslich konnten mit grossem Erfolg Falschfarbenaufnahmen für die geomorphologische Kartierung der Rutschgebiete herangezogen werden. Diese Verfahren wurden im Rahmen einer interdisziplinären Studie für verschiedene Testgebiete der Schweiz eingesetzt.

## 1. Introduction

Les photographies aériennes représentent des documents extrêmement précieux pour l'analyse de terrains instables et pour les recherches géologiques. La restitution des photographies aériennes peut être basée sur la photo-interprétation pure ou sur l'utilisation de prises de vues diachroniques, en mesurant immédiatement le déplacement avec la précision propre aux prises de vues. Ces deux procédés ont été utilisés dans le cadre du projet présenté pour différentes régions de tests, entre autres la région de "La Frasse".

En photo-interprétation, on analyse l'apparence de la surface de la terre au moment de la prise de vue pour trouver des signes d'instabilité. Les caractéristiques principales sont les zones humides et les irrégularités du réseau hydrographique, ainsi que les particularités de la végétation et de la géomorphologie. Comme l'apparence de la végétation est extrêmement importante, il est recommandé d'utiliser des photographies aériennes en fausses couleurs pour ce type de travaux. La période suivant directement la fonte des neiges est la plus favorable pour les prises de vues. L'échelle 1:10'000 a fait ses preuves pour les travaux présentés.

Les mesures de déplacement ont été effectuées sur des photographies aériennes de l'Office fédéral de topographie. L'échelle moyenne de ces photographies en noir/blanc varie entre 1:18'000 et 1:24'000 ; actuellement, une échelle de 1:24'000 est retenue. Cet office recouvre tout le territoire national par des vols réguliers. Ces photographies servent à la mise à jour de la carte nationale. Actuellement, le troisième cycle de révision est en cours. Pour des mesures de déplacement, on dispose ainsi de différentes séries de photographies aériennes qui permettent l'étude de phénomènes variables dans le temps. Pour la recherche présentée, cinq séries de photographies étaient disponibles; elles datent de 1957, 1969, 1974, 1980 et 1982. Ainsi, il a été possible d'étudier la variation de la vitesse du glissement et de la mettre en rapport avec les précipitations moyennes des différentes années. Dans les chapitres suivants, nous montrons la technique de restitution des prises de vues diachroniques et l'analyse de la précision obtenue.

## 2. Restitution des prises de vues diachroniques

Ce procédé est basé sur des mesures relatives effectuées sur des photographies de différentes années, sans recourir à des mesures terrestres. Comme référence, on se sert uniquement d'un nombre de points identifiés sur du terrain stable. Dans une première phase de préparation, on essaie d'identifier des séries de points de détail dans la région du glissement. Il est important que ces points puissent être reconnus sans ambiguïté sur au moins deux prises de vues successives. En moyenne, une centaine de points de comparaison ont pu être choisis entre deux séries de photographies. D'autre part, une série de points de référence ont été identifiés en dehors de la zone de glissement pour le calage. Il est très important que ces points de référence soient stables et ne présentent pas de déplacement, afin d'éviter de fausser les résultats. Pour prendre toutes les précautions possibles dans ce sens, la position et la nature des points de référence ont été contrôlées sur le terrain avec le concours d'un géologue. Par la suite, la position de tous les points a été mesurée dans un stéréorestituteur; pour augmenter la précision, les points ont été mesurés plusieurs fois. Les coordonnées spatiales des points mesurées sur un seul couple et qui se réfèrent à un système local sont ensuite transformées dans un modèle de référence unique en faisant coïncider les points de calage. Ce modèle a été lui-même transformé dans le système de coordonnées nationales à l'aide de quelques points d'ajustage tirés de la carte nationale. Ainsi, après la transformation de tous les points de détail, on peut directement déduire les déplacements du terrain à partir des différences de coordonnées. La figure 1 donne une vue d'ensemble de la région de La Frasse; le terrain en glissement est délimité par une ligne traitillée. Hors de cette zone, une vingtaine de points d'ajustage ont été choisis et servent de référence pour le calage des différentes étapes mesurées. Les résultats de ces mesures sont représentés à la figure 2.

## 3. Analyse de la précision

La précision des mesures photogrammétriques de déplacement se détermine essentiellement par des contrôles internes. On peut également recourir à des mesures terrestres pour un contrôle des mesures photogrammétriques, mais l'expérience a montré que de telles données n'ont qu'une valeur assez limitée, compte tenu du défaut de simultanéité des données à comparer. Finalement, on peut utiliser d'autres paramètres, comme par exemple les précipitations annuelles, pour tester la plausibilité des mesures photogrammétriques.

Le contrôle interne des mesures photogrammétriques s'appuie d'une part sur la répétition du pointage d'un point et d'autre part sur l'analyse de la précision d'orientation des modèles photogrammétriques. Pour réduire les erreurs d'identification et augmenter la précision des mesures, tous les points ont été observés à deux reprises. Sur chaque cliché, 100 à 150 points ont été mesurés; l'écart-type pour une mesure isolée d'un point

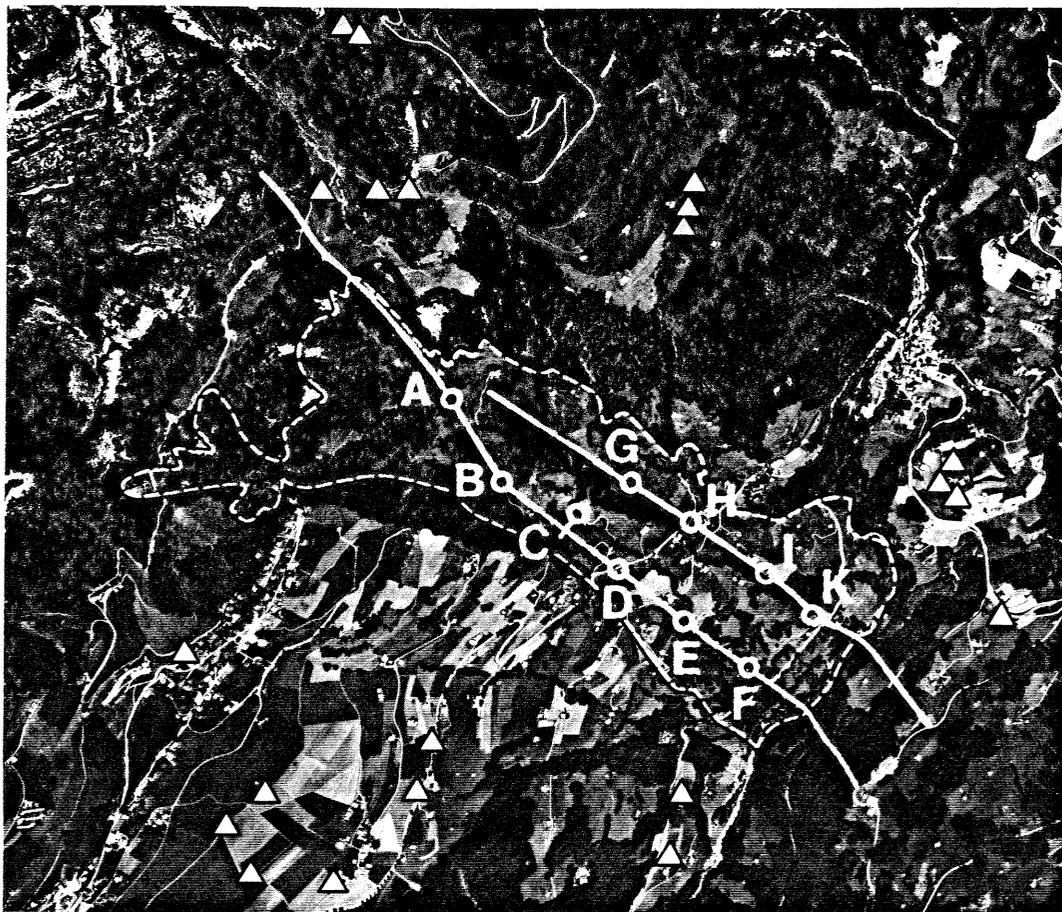


Fig. 1

Extrait d'une prise de vue aérienne de la région de "La Frasse". La zone de glissement principale est délimitée par la ligne traitillée. Les triangles indiquent les points de référence considérés comme stables. Ces points ont servi de points de calage pour la transformation des mesures des différentes années. La ligne polygonale avec les points A - F indique la position du profil de la figure 4 (photographie reproduite avec l'accord de l'Office fédéral de topographie).

se situe entre 3 et 5  $\mu\text{m}$ , l'écart-type de la moyenne est par conséquent de 2 à 4  $\mu\text{m}$ . Cette valeur correspond à un écart-type de 5 à 6 cm sur le terrain pour des photographies à l'échelle de 1:25'000 (prises de vues de 1969, 74, 80 et 82) et de 15 cm pour des clichés au 1:40'000 (prises de vues de 1957). Le tableau 1 récapitule la précision obtenue dans les diverses restitutions photogrammétriques effectuées.

En plus de la précision de pointage, les erreurs systématiques du matériel de prise de vues ainsi que les erreurs des appareils de restitution limitent la précision des mesures photogrammétriques. Ces erreurs peuvent être réduites par des algorithmes de transformation appropriés.

Des transformations de similitude et des transformations affines ont été utilisées pour déterminer les déplacements entre



Fig. 2

Déplacement annuel moyen du terrain pour les périodes 1957-69 (flèche de gauche), 1969-74 (flèche suivante), 1974-80 (3e flèche) et 1980-82 (flèche de droite). La présentation se limite à une sélection des points (photographie reproduite avec l'accord de l'Office fédéral de topographie).

Caractéristiques de prises de vues			Nombre de points mesurés	Ecart-type de pointage pour la moyenne de 2 mesures [ $\mu\text{m}$ ]	Erreurs résiduelles après orientation			
Année	Echelle du cliché	Hauteur de vol [m]			Nombre de points	Transf. de similitude [ $\mu\text{m}$ ]	Transf. affine [ $\mu\text{m}$ ]	Transf. affine, erreur/année [cm/année]
1957	1:40'000	4500	160	$\pm 4$	28	$\pm 12$	$\pm 10$	$\pm 3 \frac{1}{2}$
1969	1:27'000	4200	220	$\pm 2$	24	$\pm 9$	$\pm 8$	$\pm 4$
1974	1:23'000	3800	160	$\pm 2$	29	$\pm 9$	$\pm 6$	$\pm 2 \frac{1}{2}$
1980	1:24'000	4000	155	$\pm 2 \frac{1}{2}$				

Tableau 1

Récapitulation des valeurs de précision de la restitution photogrammétrique. L'écart-type de pointage et les erreurs résiduelles après l'orientation permettent d'estimer la précision du procédé. Pour réduire l'influence des erreurs systématiques des mesures photogrammétriques, on a utilisé pour l'orientation des transformations de similitude et des transformations affines.

deux vues successives. Les paramètres de transformation ont été calculés à l'aide d'une compensation et, pour chaque transformation, on a utilisé en moyenne une vingtaine de points de référence. Il résulte des erreurs résiduelles un écart-type de  $\pm 10 \mu\text{m}$  pour une transformation de similitude et de  $\pm 8 \mu\text{m}$  pour une transformation affine. L'erreur de pointage étant petite, comparativement aux erreurs résiduelles lors de l'orientation des modèles, il faut en conclure que la précision des mesures de déplacement est essentiellement limitée par les erreurs systématiques indiquées ci-dessus. Si l'on prend en considération l'échelle des clichés, on constate que le déplacement peut être mesuré à l'aide de photographies au 1:24'000 avec une précision d'env. 20 cm, et avec des photographies au 1:40'000 avec une précision d'env. 40 cm. Ainsi, en se référant aux déplacements annuels et en tenant compte du temps écoulé entre les prises de vues successives, on obtient une précision de 3-5 cm par année. D'autre part, il est aussi nécessaire que les points pour lesquels les déplacements sont déterminés permettent un repérage assez sûr, comme par ex. des angles de bâtiments, des rochers, des pylônes, etc. Si l'on doit se contenter d'arbres et d'arbustes, la précision se dégrade forcément.

Il est évident que toutes ces mesures de précision doivent être considérées comme écart-type avec un intervalle de confiance de 65 %. Pour l'analyse des points isolés, il est recommandé d'augmenter l'intervalle de confiance respectif.

Une comparaison entre les mesures photogrammétriques de déplacement et les mesures géodésiques pose des problèmes difficiles à résoudre parce qu'en général la comparaison ne porte pas sur les mêmes points et le laps de temps ne concorde que rarement. Dans la région de La Frasse, le long de la route Aigle-Le Sépey, on disposait de quelques repères déterminés avec précision en 1966 et dont la position a été recalculée en 1981. Il a été possible d'autre part d'exploiter des relevés cadastraux des années 1951, 1932 et 1861. Dans le tableau 2, on a essayé de confronter ces mesures géodésiques et photogrammétriques. Bien que beaucoup de points aient pu être déterminés par les deux procédés, il n'en est resté qu'un petit nombre pour cette comparaison. Ainsi, par ex., le point F montre un déplacement annuel de 68 cm durant la période 1966-81, alors que la valeur correspondante déterminée par photogrammétrie pour la période 1957-80 est de 105 cm. Ces différences, relativement grandes, deviennent plausibles si l'on considère que les mouvements de glissement sont soumis à des variations temporaires assez importantes. Ce sont essentiellement les précipitations, extrêmement variables, qui provoquent ces différences de mouvements. La figure 3 montre les précipitations annuelles mesurées à Leyzin, puis ces dernières années au Sépey, ainsi qu'une moyenne mobile établie sur trois et cinq ans. On s'aperçoit alors que pour la période 1964-70, des précipitations sensiblement supérieures à celles de 1970-75 ont été enregistrées. Cela explique que les déplacements déterminés par photogrammétrie durant la période 1957-69 présentent des valeurs beaucoup plus élevées

Points	Déplacements annuels moyens (en cm/année) déterminés par								
	mesures photogrammétriques					mesures géodésiques			
	1980 1982	1974 1980	1969 1974	1957 1969	1957 1980	1966 1981	1951 1981	1932 1981	1851 1981
A	23	9	9	21	15			9	
F	304	73	10	160	105	68			
K	53	25	8	32	25	21			
H	25	6	8	17	12		16		9
Ecart-type	± 7	± 2,5	± 4	± 4	± 2	> ± 0,5			

Tableau 2

Comparaison des déplacements déterminés par photogrammétrie et des valeurs de mesures terrestres. Les points A et F correspondent à ceux marqués sur le profil de la figure 4. Les différences entre les deux moyens de mesure sont essentiellement dues aux différentes périodes prises en considération.

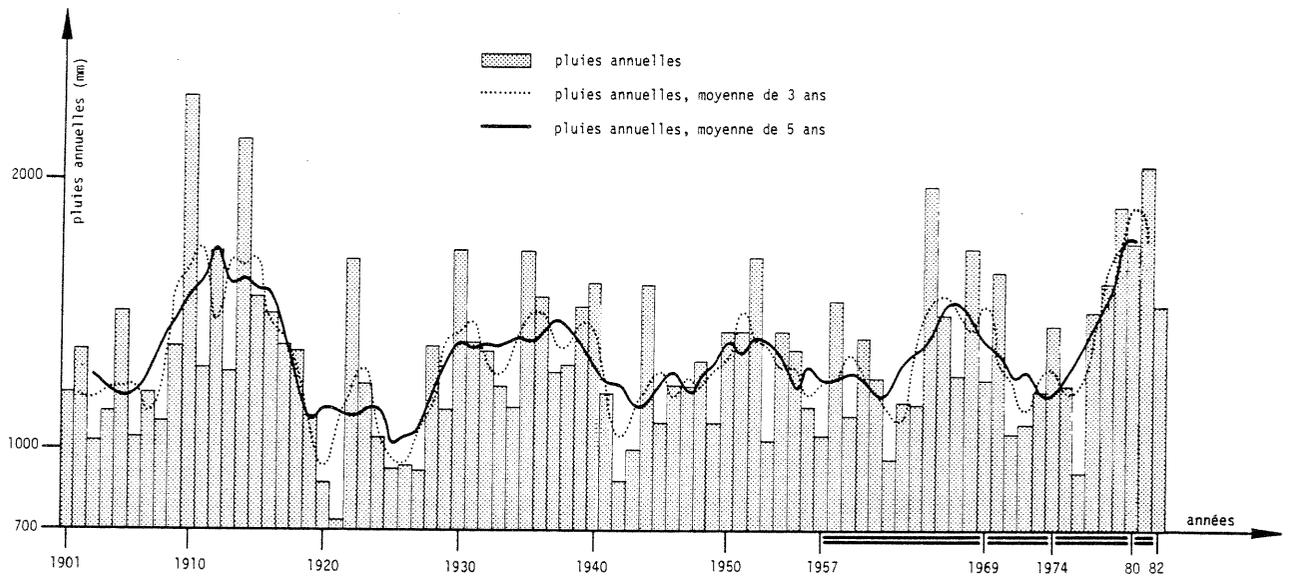


Fig. 3

Précipitations annuelles et moyennes mobiles des précipitations annuelles sur 3 ans (ligne pointillée) et 5 ans (ligne continue). Ces valeurs ont été tirées d'enregistrements à Leysin et au Sépey. Dans le bord inférieur, tout à droite du dessin, on montre les périodes couvertes par les mesures de déplacement photogramétriques.

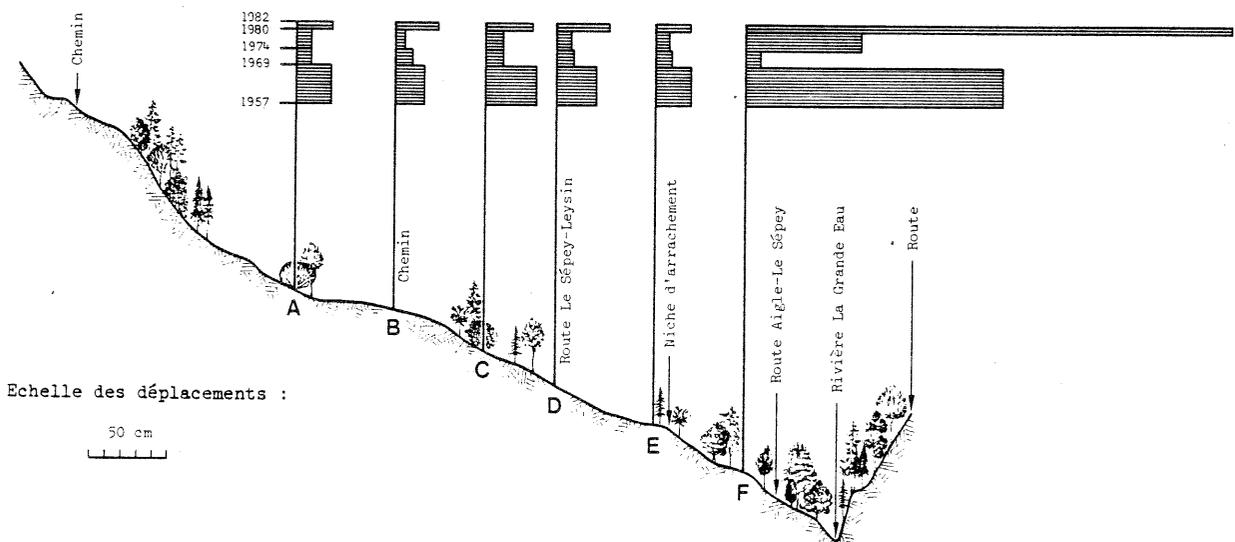


Fig. 4

Comparaison des mouvements de terrain pour les périodes 1957-69, 1969-74, 1974-80 et 1980-82 le long d'un profil du glissement de La Frasse. Pour une meilleure représentation, une moyenne annuelle a été calculée pour les trois périodes d'observation. On remarque les grandes variations des mouvements de terrain; ces variations sont essentiellement dues aux différentes quantités de précipitations (cf. fig. 3). Par conséquent, le calcul d'une moyenne annuelle des déplacements ne représente qu'une simplification grossière; en réalité, il faut s'attendre à des variations temporaires encore beaucoup plus importantes.

que durant 1969-74. Cependant, ces mouvements ont subi ces derniers temps une nouvelle accélération (cf. fig. 4) et au cours du mois de janvier 1982 des déplacements très inquiétants ont été constatés. Les périodes de fortes précipitations observées entre 1965-70 et 1978 à ce jour ne sont pas des cas isolés; des précipitations même plus abondantes avaient été enregistrées surtout entre 1910-20 et aussi entre 1930-40. Les recherches en vue d'établir une corrélation entre la pluviométrie et les mouvements enregistrés devraient se poursuivre.

#### 4. Conclusion

Les mesures photogrammétriques sur des photographies diachroniques ont montré que ce procédé se prête très bien à la détermination de mouvements de terrains instables. Avec les photographies aériennes de l'Office fédéral de topographie, il est possible de détecter encore des mouvements de 3 à 5 cm par année. Comme ce procédé se base sur des photographies disponibles pour toute la Suisse, il peut être appliqué de façon routinière. Cependant, il ne faut pas oublier que le glissement de La Frasse montre quelques particularités qui ont favorisé ces travaux. Ce glissement est localement bien limité et entouré de régions relativement stables. Ainsi, le choix des points de calage pour la connexion des différentes étapes d'observation n'a pas posé de problème. Dans d'autres régions, il n'a pas été possible de trouver, dans le périmètre d'un seul modèle (environ 5 x 3 km), des points de calage suffisamment fiables. D'autre part, nous avons constaté que certaines prises de vues d'ancienne date montrent des déformations de film considérables. Dans ces cas, il convient de recourir à une compensation de blocs. La zone prise en considération peut ainsi être étendue; de plus, il est possible d'introduire des paramètres auxiliaires, afin de corriger les déformations de film.

Il est évident que des déplacements pris isolément, tels qu'ils sont obtenus par des mesures photogrammétriques, ne donnent qu'une information partielle puisqu'il manque une délimitation des zones de comportement uniforme. Cette information complémentaire, pour une étude plus complète du glissement, pourrait être tirée d'une photo-interprétation combinée avec une reconnaissance sur le terrain, comme mentionné dans l'introduction.

La photogrammétrie offre ainsi une approche assez complète aux tâches de saisie et d'analyse de terrains instables. Ces méthodes peuvent être appliquées par exemple lorsque des ouvrages ou des constructions sont envisagés dans une zone qui pourrait être instable, sans qu'il soit nécessaire de planifier un temps d'observation de plusieurs années ou de dépendre d'anciennes mesures géodésiques.