

RAPPORT D'ÉTUDE 20/09/2013
N°DRS-13-126021-00968B

**Méthodes terrestres de surveillance en grand
des instabilités de versants : revue des
technologies RADAR et LIDAR du marché.**

Méthodes terrestres de surveillance en grand des instabilités de versants : revue des technologies RADAR et LIDAR du marché.

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

REMERCIEMENTS

Ce rapport a été examiné par deux experts de la Commission Scientifique de la Direction des Risques du Sol et du sous-sol de l'INERIS, missionnés pour évaluer la pertinence et la qualité de cette étude.

Cette évaluation a été menée par Messieurs Jean-Pierre Rajot (IFSTARR) et Pierre Potherat (CETE Lyon). Nous les remercions chaleureusement pour leurs remarques constructives ainsi que leur esprit critique ; ils ont ainsi contribué à la qualité de ce rapport.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	H. BOSQ* E. KLEIN	P. BIGARRE	M. GHOREYCHI
Qualité	Ingénieurs à l'Unité Auscultation et Surveillance Géotechnique et Géophysique	Directeur délégué de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

**Ingénieur à l'INERIS lors de la rédaction de la version A du présent rapport.*

RESUME

Les principales mesures de gestion des risques d'instabilité de versants, pour la protection des populations et des infrastructures, reposent souvent sur une surveillance active de l'aléa, par des visites de terrain régulières voire la mise en œuvre de méthodes instrumentales in-situ.

Le présent rapport fait une revue des méthodes innovantes de surveillance en grand de versants, compatibles avec des exigences de portabilité et de surveillance opérationnelle. L'étude est focalisée sur les techniques terrestres d'interférométrie radar et de scanner laser à longue portée, déjà largement utilisées à l'étranger par les exploitants de mines et carrières à ciel ouvert pour le suivi de la stabilité des exploitations, et des organismes publics de prévention des risques naturels.

Ce rapport montre que les conditions de mises en œuvre et performances de ces deux techniques, bien que basées sur un principe analogue (l'appareil émet des ondes qui, au contact de la cible à imager, sont réfléchies vers l'appareil), sont très différentes du fait notamment des traitements de données appliqués. Il précise ainsi les caractéristiques, avantages et limites propres à chaque technique au travers d'illustrations issues de la littérature scientifique et technique. Ce rapport fournit également des éléments de coût et comprend des recommandations quant aux conditions optimales de mise en œuvre de chacune d'elles.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme EAT-DRS06 intitulé « Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-sol ». Il s'agit d'un programme d'appui technique à la Direction Générale de la Prévention des Risques du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie.

Mots clé : versants instables – surveillance terrestre en grand – radar interférométrique terrestre – scanner laser terrestre – gestion du risque – systèmes mobiles.

TABLE DES MATIÈRES

1. OBJET ET CONTEXTE DE L'ETUDE.....	7
2. CADRE ET DONNEES D'ENTREE DE CETTE ETUDE	9
2.1 Surveillance en grand : cadre de l'étude	9
2.2 Données d'entrée et Personnes contactées.....	9
3. LES RADARS TERRESTRES.....	11
3.1 Historique de la méthode.....	11
3.2 Principe de la méthode.....	12
3.3 Exemples d'application.....	14
3.3.1 Surveillance d'un mouvement de versant par distancemétrie RADAR ULB – France.....	14
3.3.2 Mesures de déplacements sur un glissement par RADAR interférométrie – USA	15
3.3.3 Surveillance par RADAR interférométrie d'un versant instable lors d'un creusement de tunnel – Italie.....	16
3.3.4 Surveillance d'une mine à ciel ouvert par interférométrie RADAR – Canada	18
3.4 Principales performances et caractéristiques	19
3.5 Limites de la méthode et précautions d'usage	20
4. LE SCANNER LASER TERRESTRE	23
4.1 Historique de la méthode.....	23
4.2 Principe de la méthode.....	23
4.3 Exemples d'application.....	24
4.3.1 Etude structurelle d'un glissement rotationnel – Suisse.....	24
4.3.2 Surveillance d'une falaise basaltique – Espagne.....	25
4.3.3 Surveillance d'un glissement de terrain lent – Autriche.....	25
4.4 Principales performances et caractéristiques	27
4.5 Limites de la méthode et précautions d'usage	30
5. COMPARAISON TECHNIQUE DES METHODES	31
5.1 Mise en œuvre sur le terrain.....	32
5.2 Qualité et rapidité de la mesure des déplacements.....	32
5.3 Influence des effets perturbateurs	32
5.4 Capacité de surveillance et d'alerte.....	33

6. COMPARAISON ECONOMIQUE DES METHODES.....	35
7. CONCLUSIONS.....	37
8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	39
9. LISTE DES ANNEXES	41

1. OBJET ET CONTEXTE DE L'ETUDE

Les mouvements de versants recouvrent une grande variété de phénomènes gravitaires plus ou moins brutaux caractérisés par une descente de matériaux affectant aussi bien les terrains meubles (glissements de terrains, par exemple) que les massifs rocheux (éboulements et écroulements rocheux).

Ils sont à l'origine des catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus dévastatrices : ils causent chaque année plus d'un millier de morts à travers le monde [1]. En France, bien que ces phénomènes ne causent que très rarement la mort d'individus, ils occasionnent bien souvent des dégâts sur les infrastructures et peuvent entraîner d'importantes conséquences socio-économiques comme l'illustre la *Figure 1*. Il s'agit d'un éboulement ayant eu lieu en 2006 à l'entrée du village de Saint-Etienne-Sur-Tinée qui a bloqué la circulation pendant deux jours, et rendu impossible l'accès aux stations de skis et villages situés en amont.



Figure 1 – L'éboulement rocheux du 25 février 2006 sur la RD 2205 à hauteur du village de Saint-Etienne-sur-Tinée (Capture du Journal télévisé de France 2 du 26 février 2006).

Sur le territoire national, les mouvements de versants constituent le deuxième risque naturel majeur après les inondations [2] et représentent un enjeu fort pour les années à venir, notamment vis-à-vis des effets du changement climatique en milieu montagneux [3]. En particulier, les problématiques de gestion et de prévention des risques de mouvements de versants ainsi que d'aménagement du territoire deviennent une préoccupation croissante pour les collectivités et les pouvoirs publics.

Compte tenu de la complexité des mécanismes en jeu et de la difficulté à établir des modèles prédictifs, l'observation et la surveillance instrumentale sont devenues l'une des composantes clés de la prévention et de la gestion des risques de mouvements de versants. En effet sur la durée, elles permettent, par l'accumulation de données qualitatives et quantitatives, d'apprécier le comportement des versants, de confirmer des diagnostics et scénario d'évolution et de fournir ainsi aux décideurs des critères pour une meilleure gestion du risque.

Pour les mouvements de versants, on distingue ainsi principalement deux grandes catégories de méthodes de surveillance complémentaires :

- les méthodes de télémesure multi-paramètres in-situ basées sur un panel de capteurs adaptés à la mesure de grandeurs physiques pertinentes pour le site concerné et installés à même le versant ;
- les méthodes de surveillance en grand qui permettent de mesurer les mouvements et donc les vitesses, les accélérations ou la rotation d'une multitude de points et donc d'appréhender l'évolution d'un versant dans sa globalité.

Parce qu'elle fournit des grandeurs simples à interpréter, cette deuxième catégorie de méthodes connaît un essor important depuis ces vingt dernières années. En particulier, avec l'évolution rapide des technologies d'acquisition, de gestion et de traitement des données et de ce fait une résolution et des performances accrues, les solutions terrestres mobiles de radar (à ouverture réelle ou synthétique) ou scanner laser se démocratisent à l'étranger pour la surveillance géotechnique et géologique de stabilité de grands linéaires de gradins en exploitation de mines à ciel ouvert. Ces solutions présentent donc a priori un intérêt évident dans le contexte des mouvements de versants.

Elaboré dans le cadre du programme EAT-DRS06 d'appui technique à la Direction Générale de la Prévention des Risques du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, le présent rapport a pour but de faire un état des lieux technique et économique des dispositifs terrestres mobiles radar et scanner laser dits de nouvelle génération du marché, sélectionnés sur la base de conditions simples de mise en œuvre exposées ci-après.

Ce rapport établi à partir de sources variées (publications scientifiques et techniques et brochures commerciales notamment) présente de manière synthétique les principes physiques en jeu. Il illustre ensuite le potentiel des deux méthodes dans le contexte des mouvements de versants au travers d'exemples tirés de la littérature et décrit les précautions à prendre pour la mise en œuvre sur le terrain (le choix fait ici est de traiter indépendamment les technologies RADAR et LIDAR, bien qu'elles soient basées sur un principe de mesure analogue). En fin de rapport les performances, coûts et conditions de mises en œuvre de ces deux technologies sont comparés et analysés de manière à évaluer leur apport pour la caractérisation de l'aléa et pour la surveillance opérationnelle du risque.

NB : ce rapport intervient dans un contexte d'évolution rapide des technologies, ce qui devrait se traduire par l'émergence à court et moyen termes de nouvelles solutions non évoquées ici. C'est pourquoi, il pourra faire l'objet d'une mise à jour ultérieure.

2. CADRE ET DONNEES D'ENTREE DE CETTE ETUDE

2.1 SURVEILLANCE EN GRAND : CADRE DE L'ETUDE

Cette étude se concentre sur les méthodes de surveillance terrestres de type radar et scanner laser car elles permettent de mesurer des déplacements en surface avec une bonne résolution (quelques centimètres maximum), présentent une couverture et une continuité spatiale favorable au suivi de l'évolution du versant dans sa globalité et satisfont a priori les critères suivants :

- dispositif de mesure tout temps (températures extrêmes, pluie, neige), mobile, autonome en énergie et compatible avec les technologies classiques de télégestion et transfert de données vers un site distant ;
- installation très limitée, voire inutile, d'équipements à même le versant ;
- cycle de mesure court (quelques minutes) et à intervalle paramétrable garantissant une bonne réactivité ;
- traitement automatisé des données et couplage avec un gestionnaire d'alarme.

2.2 DONNEES D'ENTREE ET PERSONNES CONTACTEES

Cette étude s'appuie sur de nombreuses références scientifiques et techniques (voir paragraphe 8) ; elle fait également référence à quelques solutions spécifiques, notamment :

- les dispositifs de radars interférométriques terrestres à synthèse d'ouverture de la gamme IBIS commercialisés par la firme italienne Ingegneria Dei Sistemi ;
- le radar interférométrique terrestre à ouverture réelle proposé par la société suisse Gamma Remote Sensing ;
- les systèmes de laser scanning terrestres longue portée des fabricants Riegl (VZ-4000 et VZ-6000), Optech (ILRIS-3D) et Leica Géosystems (HDS-8800).

Les personnes suivantes ont été contactées pour le besoin de cette étude :

- Mme Gwénaëlle Le Coz, de la société ABEM France, distributeur des produits Ingegneria Dei Sistemi ;
- Mr Bernard Vieille, de la société BV Systèmes, distributeur des produits Riegl ;
- Mr Charles Werner, vice président de la société Gamma Remote Sensing ;
- Mr Eric Varrel de la société 3D Scan Map, spécialiste dans l'utilisation de dispositifs de scanner laser ;
- Mr Patrice Bretel, ingénieur au CNRS (Université de Caen), utilisateur d'une solution très récente de scanner laser mobile.

3. LES RADARS TERRESTRES

3.1 HISTORIQUE DE LA METHODE

La méthode RADAR (*Radio Detection And Ranging*) est basée sur les propriétés de propagation des ondes radio décrites par Maxwell en 1864. Dès les années 1930, elle est utilisée pour détecter et positionner des obstacles. Elle connaît ensuite un réel essor lors de la seconde guerre mondiale avec le développement de solutions terrestres et aéroportées de détection de navires et d'avions. Dans les années 1950, l'invention des radars à synthèse d'ouverture (par opposition aux radars à ouverture réelle, très volumineux) permet d'obtenir des images à très haute résolution tout en réduisant considérablement les dimensions des antennes.

L'application du RADAR aux Sciences de la Terre débute dans les années 1990, lorsque des radars à synthèse d'ouverture sont embarqués par des satellites afin d'étudier la structure et la dynamique de la croûte terrestre. En 1992, Massonnet *et al.* [4] réussissent pour la première fois à imager le champ de déplacement de la croûte terrestre lors d'un séisme (*Figure 2*) par application de la méthode d'interférométrie radar. Depuis, cette technique est largement utilisée, soit par interférométrie satellitaire, soit par des systèmes d'interférométrie terrestres notamment pour la compréhension et la gestion des risques de mouvements de terrains d'origine naturelle et anthropique.

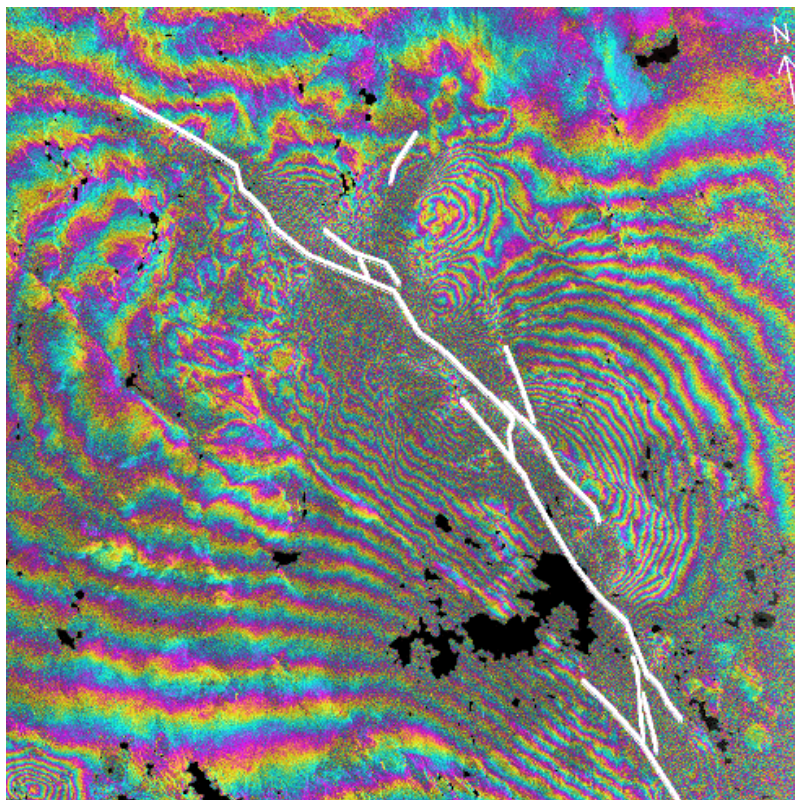


Figure 2 – Image du champ de déplacement co-sismique associée au séisme de Landers (Californie) du 28 Juin 1992, obtenue par Interférométrie Radar [4]. Les franges sont des courbes d'iso-déplacement selon la ligne de visée - chaque frange correspond à un déplacement de 28 mm (la zone mesure environ 90 x 100 km²).

3.2 PRINCIPE GENERAL DE LA METHODE

La méthode radar est basée sur l'analyse d'ondes radio projetées par un émetteur sur des cibles à imager. Les cibles interfèrent alors avec l'onde émise et réfléchissent une partie de celle-ci vers un récepteur.

En pratique, le radar intègre l'émetteur et le récepteur. Pour chaque cible éclairée, le récepteur reçoit trois informations (le temps d'arrivée, l'amplitude et la phase de l'onde réfléchi) qui permettent de localiser, d'identifier chaque cible et de calculer sa vitesse de déplacement.

On distingue alors deux types de méthodes selon le traitement mis en œuvre :

- la méthode radar classique qui exploite principalement le temps de vol aller-retour de l'onde pour le calcul de la distance radar-cible ;
- l'interférométrie radar qui exploite également l'analyse de la phase, ce qui permet d'améliorer grandement la résolution et donc de détecter des mouvements beaucoup plus fins par la construction d'image de phase contenant pour chaque point la phase retournée (Figure 3).

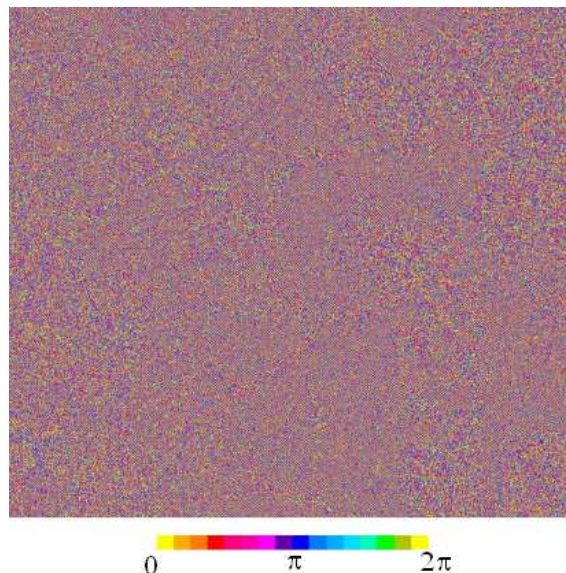


Figure 3 – Exemple d'image de phase [5]. En l'état, ce type d'image ne donne aucune information utile, cependant, la comparaison entre deux images de phases successives d'une même zone permet d'obtenir une cartographie des déplacements ayant eu lieu entre l'acquisition des deux images.

En calculant la différence entre deux images de phase de la même zone, prises selon une position similaire à des moments différents, on obtient un interférogramme radar, qui après un traitement complexe, montre les déplacements ayant eu lieu entre les deux acquisitions, dans la direction de visée du radar (Figure 4).

Ainsi, si en un point, pour une période donnée, le déplacement dans la direction de visée est égal à une longueur d'onde, la différence de phase mesurée est de 2π . Et si, en un autre point le déplacement dans cette même direction est de N longueurs d'ondes (N étant un entier), la différence de phase mesurée est aussi de 2π .

Alors, un interférogramme présente des franges qui correspondent chacune à un déplacement d'une longueur d'onde supplémentaire (Figure 4). Il est donc nécessaire de « dérouler » ces franges pour obtenir une image plus facilement lisible des déplacements (Figure 5). Cette figure montre le passage d'un interférogramme brut (à gauche) dont on déroule les franges à partir des zones de déplacement nul (trait noir) afin d'obtenir une carte des déplacements dans la direction de visée du radar satellitaire (à droite).

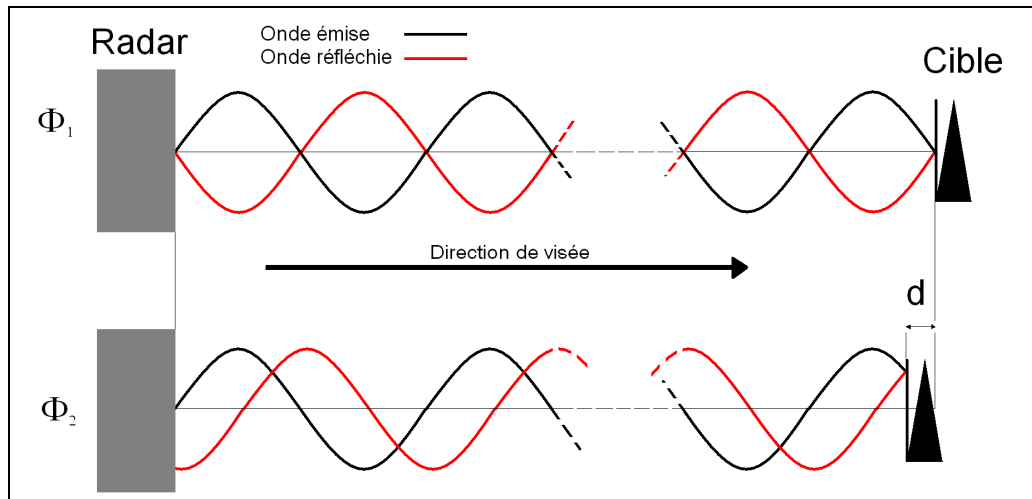


Figure 4 – Changement de la Phase suite à un déplacement d de la cible dans la direction de visée du radar.

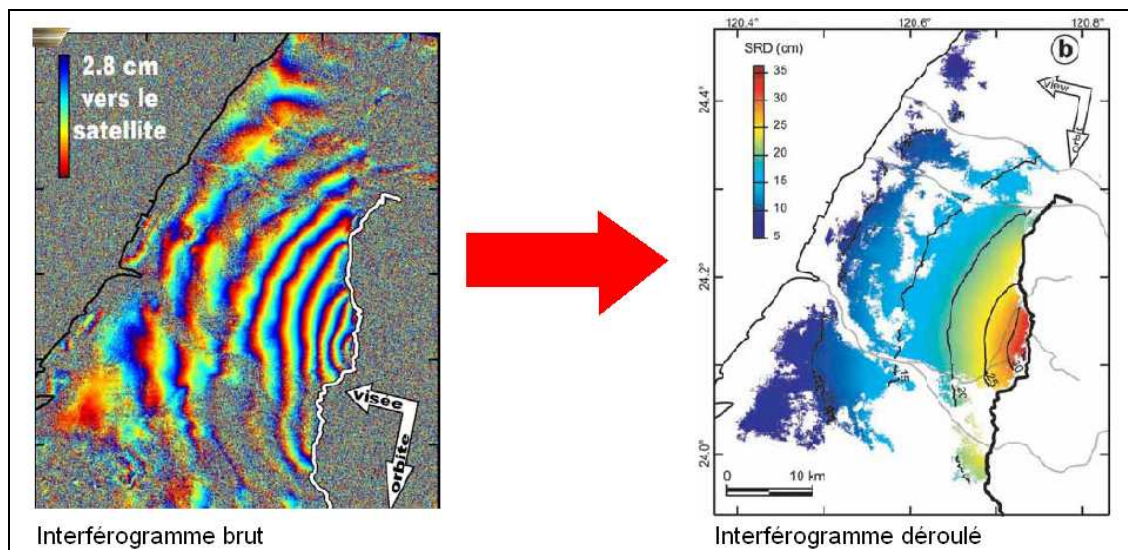


Figure 5 – Obtention d'une carte des déplacements dans la direction de visée par déroulement des franges interférométriques [6].

NB : pour des informations plus précises sur le traitement de données, le lecteur est invité à consulter les nombreux articles et thèses scientifiques et techniques sur le sujet.

3.3 EXEMPLES D'APPLICATION

3.3.1 SURVEILLANCE D'UN MOUVEMENT DE VERSANT PAR DISTANCÉMÉTRIE RADAR ULB – FRANCE

Le versant des Ruines de Séchilienne (Isère) est l'un des rares sites surveillés de manière continue par un distancemètre radar. Ce radar Ultra Large Bande a été conçu par l'ONERA en partenariat avec le CETE Lyon dans les années 1990 ; il fait partie intégrante du dispositif de surveillance du site depuis 2001.

Il repose sur une technologie spécifique basée sur l'analyse du temps de trajet aller-retour des ondes et exploite en partie aussi la phase retournée [7,8]. L'appareil est installé sur le versant opposé, à environ 2 kilomètres de distance de la zone en mouvement. Le radar balaye en une dizaine de minutes une quarantaine de réflecteurs en aluminium installés sur le versant. Ils génèrent des échos relativement puissants par comparaison à leur environnement naturel et permettent ainsi d'assurer la cohérence et la pérennité des mesures (*Figure 6*). La résolution absolue est ainsi évaluée à 0,2 mm [8].

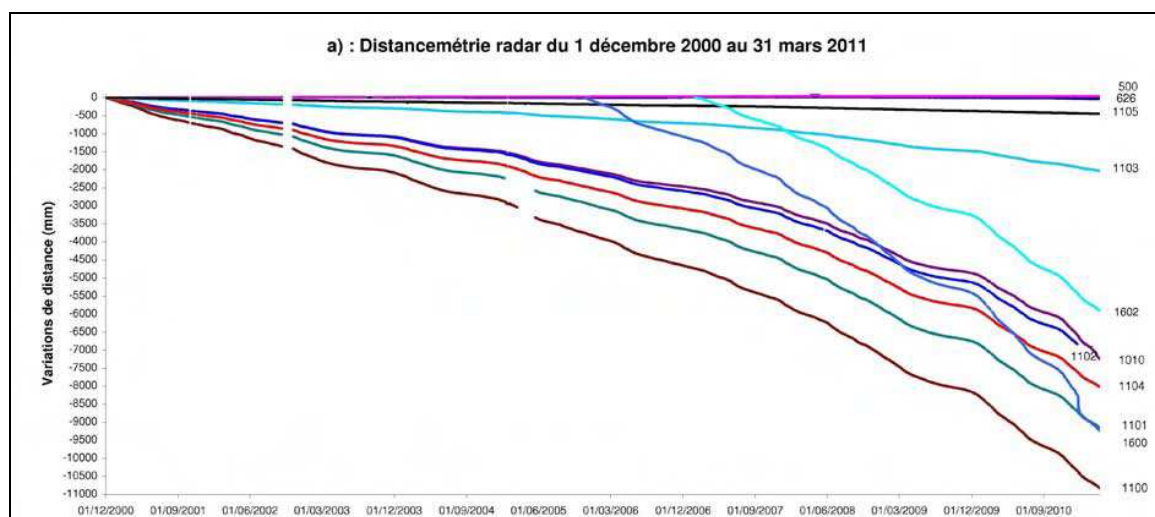


Figure 6 – Mesures par distancétrie radar de septembre 2000 à mars 2011 [7].

La comparaison des données radar avec celles obtenues par d'autres méthodes en place sur le site (GPS, télémétrie laser) confirme la cohérence des mesures.

Par ailleurs, une application de mesure par le même radar sur sol nu (sans végétation) lancée fin 2009 fournit des mesures pour la zone frontale non équipée de cibles car inaccessible. Ce test mené sur neuf zones (représentées par des cercles sur la *Figure 7* permet d'établir un profil cohérent des déplacements avec l'altitude avec une précision estimée à 1 mm/jour.

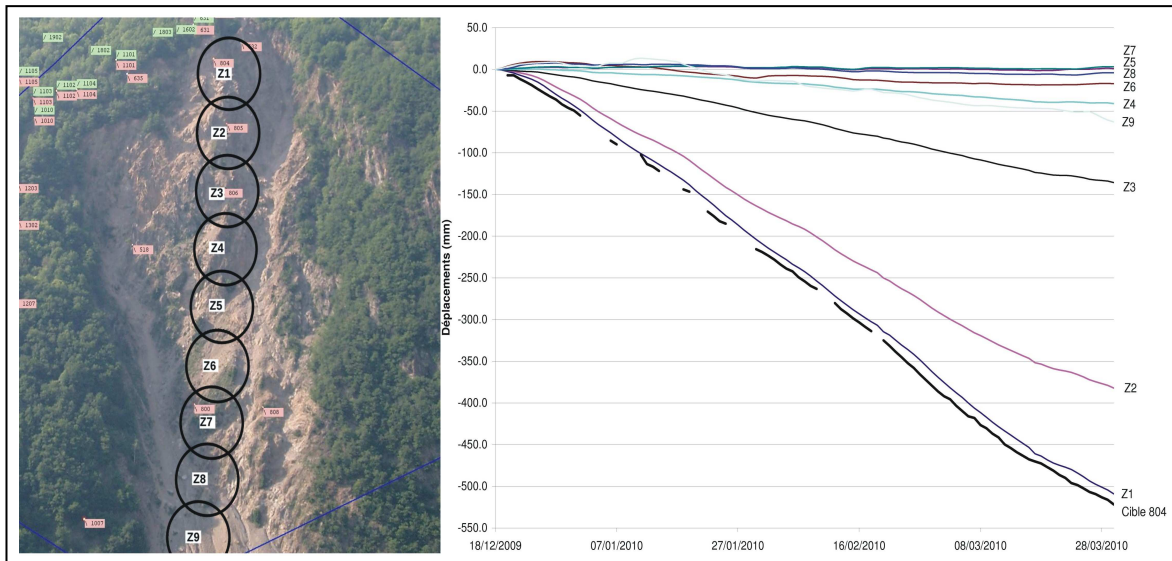


Figure 7 – A gauche, emplacements des zones de mesures sur sol nu, à droite courbes de déplacements associées entre décembre 2009 et mai 2010 [7].

3.3.2 MESURES DE DEPLACEMENTS SUR UN GLISSEMENT PAR RADAR INTERFEROMETRIQUE – USA

Le glissement du Slumgullion (Colorado, USA) est un phénomène lent (quelques mètres par an) caractérisé par un mouvement de translation, dont la zone active présente une surface de $4 \times 0,4 \text{ km}^2$ [9]. Ce site fait l'objet d'une surveillance continue depuis plusieurs dizaines d'années avec notamment un dispositif de mesures de déplacements de surface par GPS et extensomètres.

Entre le 26 juin et le 1^{er} juillet 2012 (soit 120 h), le glissement a fait l'objet d'une campagne de mesure interférométrique pour compléter les mesures de déplacement in-situ. Le radar a été positionné au sommet du versant (point jaune) pour faire coïncider la direction de visée (parallèle avec le grand axe du glissement) avec la direction des déplacements connue grâce à la surveillance continue et ainsi limiter les zones d'ombres.

La Figure 8 présente les déplacements dans la direction de visée du radar. Elle montre que la précision de l'appareil permet de différencier clairement les zones les plus rapides des zones (fluage accéléré ou 'accelerating creep') plus lentes (fluage stationnaire ou 'steady state creep') du glissement. Plus généralement, ces données permettent aux auteurs de l'étude d'améliorer la compréhension de la cinématique du glissement.

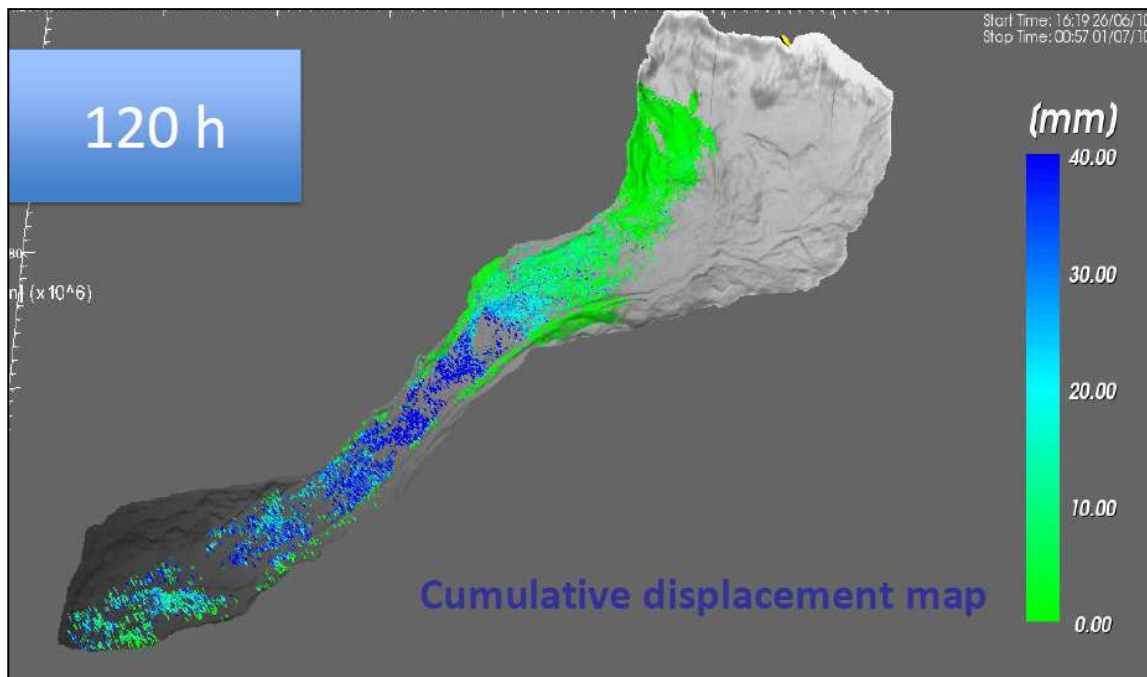


Figure 8 – Déplacements mesurés par interférométrie radar terrestre sur le glissement du Slumgullion durant une période de 120 h [9].

3.3.3 SURVEILLANCE PAR RADAR INTERFEROMETRIQUE D'UN VERSANT INSTABLE LORS D'UN CREUSEMENT DE TUNNEL – ITALIE

Ce cas d'application concerne la surveillance continue d'un versant d'environ un million de mètres cubes au sein d'un massif métamorphique complexe, à l'aplomb d'un important tronçon routier.

Ce versant produisant fréquemment des glissements superficiels, il s'agissait d'assurer une surveillance lors de la mise en sécurité du secteur pour procéder à la réouverture de l'axe routier et de l'accès au tunnel [10].

Le versant étant particulièrement instable, la cadence d'acquisition des données était très élevée, à savoir une toutes les six minutes. La base de données interférométrique comprend ainsi plus de 160 000 cartes de déplacements (entre novembre 2007 et septembre 2009). Elle montre que la surveillance par radar interférométrique a permis d'anticiper l'occurrence de neuf glissements superficiels sur la période par application de la méthode de Fukuzono¹ [11], et de ce fait, d'assurer la sécurité du chantier et d'optimiser les travaux, comme l'illustre la Figure 9.

¹ La méthode de Fukuzono s'appuie sur le fait que l'inverse de la vitesse de déplacement d'un glissement de terrain et le temps d'occurrence de la rupture brutale sont bien souvent liés.

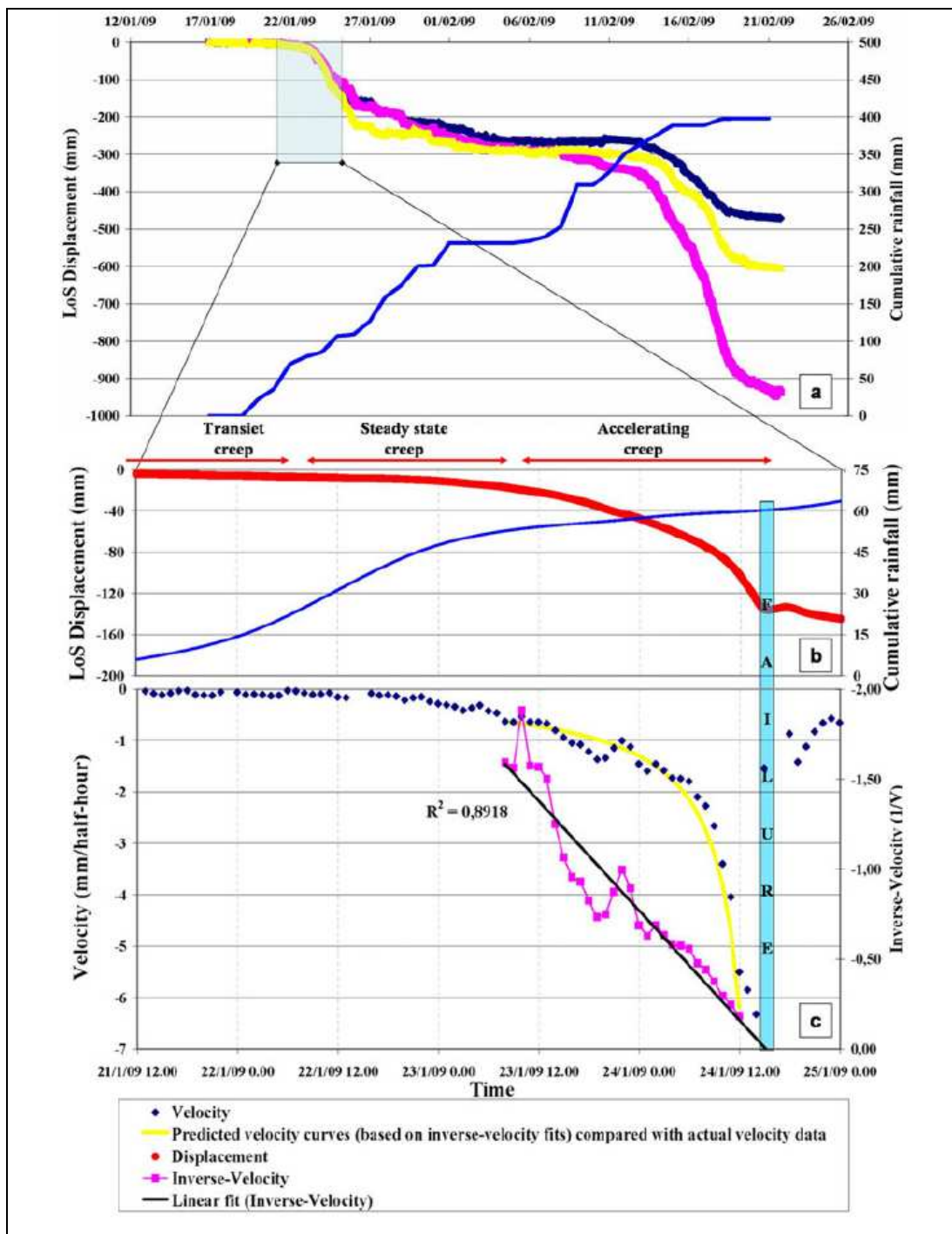


Figure 9 – Surveillance d'un versant en Italie, a) Précipitations cumulées et déplacement en quelques points de mesure ; b) Précipitations et déplacement en un point dans la zone d'éboulement ; c) vitesse de déplacement et lenteur pour ce point de mesure [10].

Cette base de données permet également d'analyser finement les facteurs de déclenchement des glissements. Par exemple, les auteurs observent que trois des neuf glissements font suite à des précipitations intenses.

3.3.4 SURVEILLANCE D'UNE MINE A CIEL OUVERT PAR INTERFEROMETRIE RADAR – CANADA

La mine à ciel ouvert de cuivre de Highland Valley située en Colombie Britannique (Canada) est constituée de plusieurs grandes fosses traversées par des zones de failles pouvant induire des chutes de blocs brutales. En particulier le mur ouest de la fosse est traversé par la faille Lornex qui est connue de l'exploitant pour générer fréquemment des éboulements massifs. La surveillance de ce mur est effectuée en permanence à l'aide d'une station totale qui mesure à intervalles réguliers la position d'un ensemble de 75 réflecteurs disposés sur les gradins.

Comme ce dispositif ne fournit pas des mesures suffisamment denses dans l'espace pour prévenir l'ensemble des phénomènes dynamiques, une expérimentation de surveillance par interférométrie radar « stéréo » a été menée en 2011 [12]. Cette technique particulière repose sur la combinaison des données acquises simultanément par deux radars interférométriques positionnés de manière à couvrir au mieux l'ensemble de la scène. Elle permet, par un processus complexe de traitement couplé des jeux de données de mesurer le champ de déplacement tridimensionnel, ce qui est difficilement réalisable avec un seul radar.

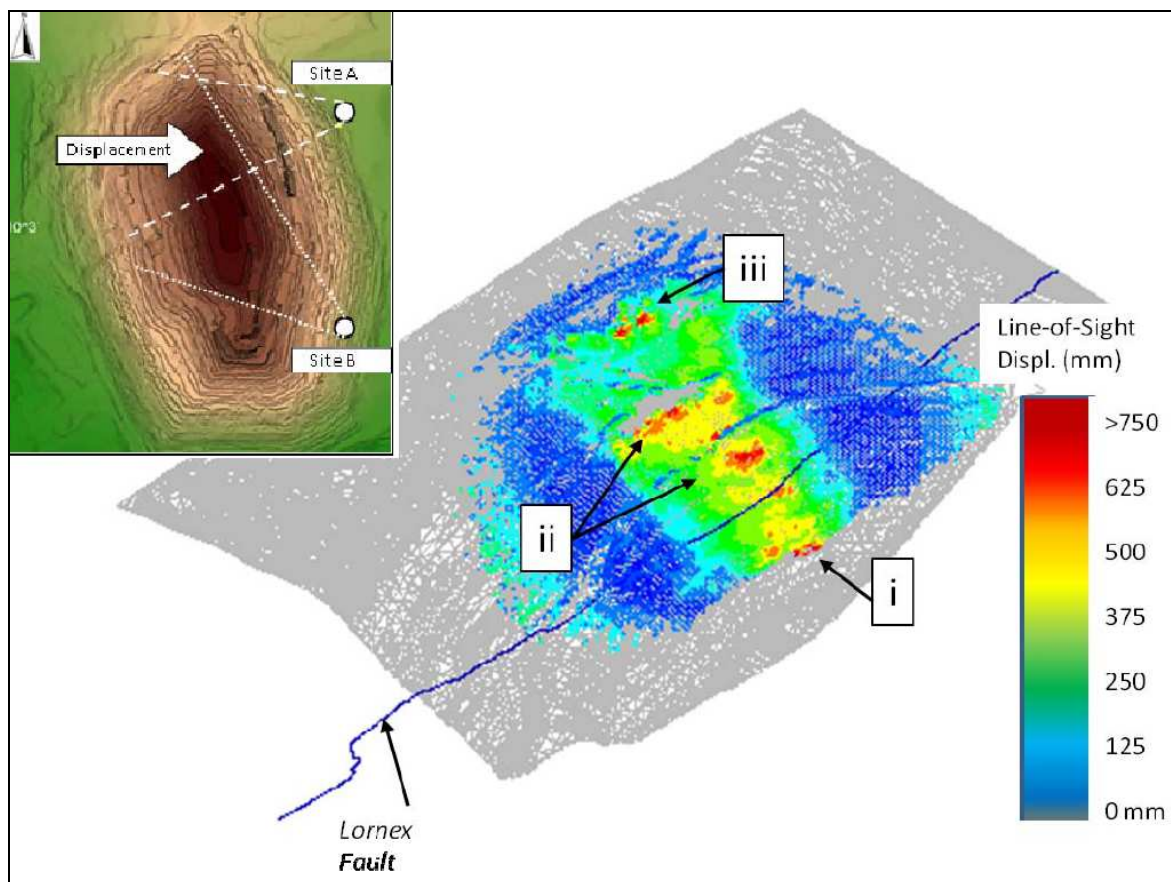


Figure 10 – Déplacements mesurés par interférométrie radar stéréoscopique durant plusieurs jours sur le mur ouest de la fosse Lornex (Mine de Highland Valley Copper – Canada). Trait bleu : faille Lornex. Les couleurs correspondent à la norme du vecteur de déplacement en chaque point [12]. L'encadré en haut à gauche montre le placement des radars et leur zone de vision respective (en pointillés).

L'expérimentation a duré quelques jours et a fourni des résultats intéressants illustrés en *Figure 10* : elle met en évidence différents secteurs en déplacement. On remarque par exemple que la zone ayant subi les plus forts déplacements se trouve immédiatement au dessus de la faille (ii), et que les secteurs situés en dessous ou au sommet du mur (i et iii respectivement) semblent être bien plus stables, ce qui est cohérent avec les observations réalisées avec la station totale.

Il faut noter que dans ce cas précis, la qualité des mesures est particulièrement bonne du fait de la présence des 75 réflecteurs (utilisés par la station totale) qui renvoient des échos puissants. La technique d'interférométrie radar stéréoscopique fournit ainsi le champ de déplacement tridimensionnel avec une excellente précision.

3.4 PRINCIPALES PERFORMANCES ET CARACTERISTIQUES

Les solutions de radar mobiles sont encore peu nombreuses sur le marché (cf. Annexes). Leurs performances en conditions de terrain sont donc peu documentées dans la littérature, de plus, les quelques références disponibles [9, 10, 13-17] associent souvent le fabricant.

La solution mobile du distancemètre radar ULB évoqué dans l'un des exemples d'application précédents est en cours de développement. Les performances données ci-après sont donc celles de la solution existante [7,8], non mobile.

	Radar Interférométrique	Distancemètre radar ULB
Précision absolue	0,1 mm	0,2 mm à 1200 m de distance
Portée	30 m à 10 km	200 m à 15 km
Temps d'acquisition	Entre 5 et 15 mn selon la surface surveillée (ex. 5 mn pour une zone de 5 km ² à 2 km de distance)	10 mn pour 40 cibles réparties sur une zone de 70 ha
Fréquence	~ 17 GHz	18 - 26 GHz
Longueur d'ondes	~ 17 mm	~ 12 à 17 mm
Poids de l'équipement	Entre 100 et 250 kg	inconnu

Tableau 1 – Principales performances et caractéristiques des solutions de radar mobile.

Les performances moyennes mentionnées dans le *Tableau 1* relèvent pour la plupart de données acquises dans des conditions plus favorables que les conditions de terrain habituelles. En pratique, elles sont obtenues par temps clair, à l'aide de cibles métalliques parfaitement orientées par rapport à l'angle de visée du radar. Elles tiennent également compte de compensations liées aux conditions atmosphériques.

Ces performances sont globalement comparables quelle que soit la solution.

La résolution en distance, c'est-à-dire la capacité à distinguer deux points de mesure proches, ainsi que la portée sont directement liées à la bande de fréquence utilisée. Donc, plus la bande de fréquence est large, plus le radar est capable de distinguer différents objets placés le long d'un même rai.

S'agissant de la portée, on observe que plus la zone surveillée est distante du radar, plus la taille des pixels augmente (*Figure 11*). Ainsi, la mesure de déplacement sur une zone située à un kilomètre de distance du radar est la valeur du déplacement moyennée sur une zone d'environ deux mètres carrés. Il s'agit là d'un ordre de grandeur puisque la taille de la cellule dépend bien sûr aussi des performances de l'équipement et des paramètres d'acquisition.

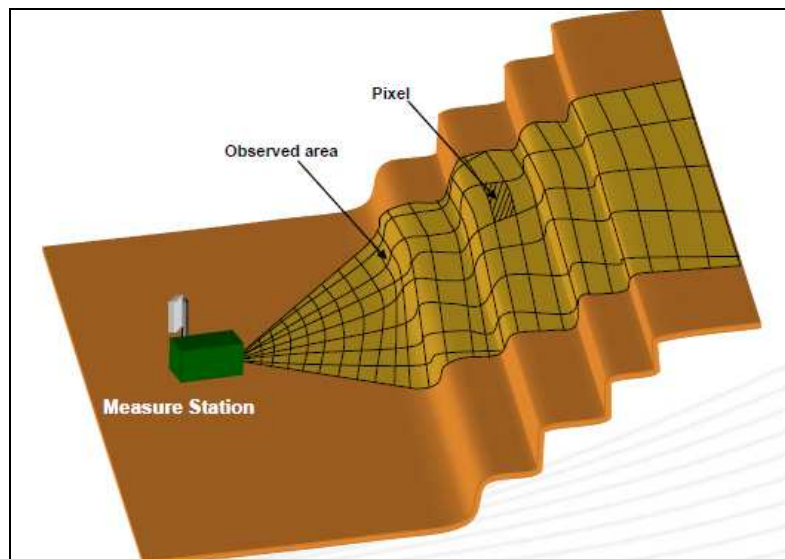


Figure 11 – Illustration de la dégradation de la qualité de l'échantillonnage spatial avec la distance de mesure pour le radar interférométrique [9]

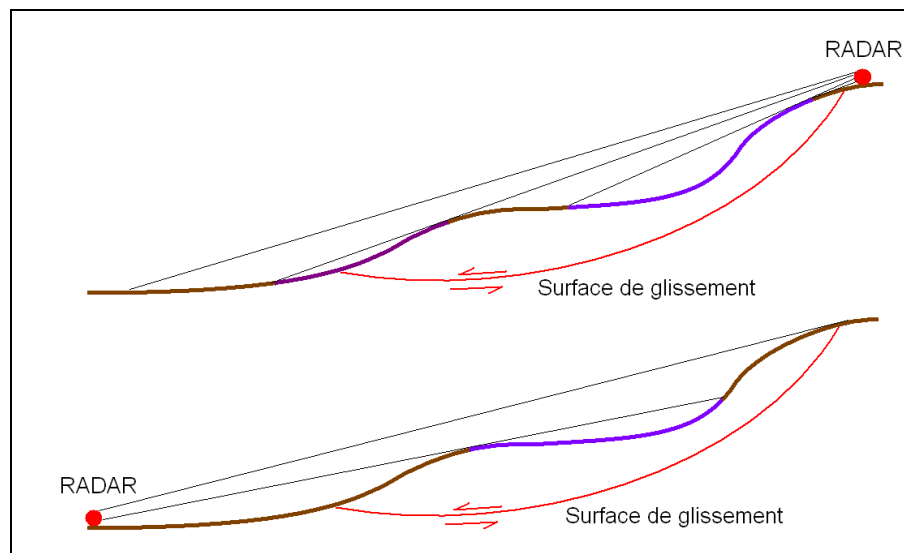
Enfin, en raison de la longueur d'onde utilisée (~ 17 mm), la propagation des ondes radar est peu affectée par les conditions météorologiques, il s'agit ainsi d'une technique tout temps.

3.5 LIMITES DE LA METHODE ET PRECAUTIONS D'USAGE

La méthode radar présente quelques limites intrinsèques qui peuvent pour certaines être contournées. Principalement, elles imposent une préparation minutieuse des campagnes de mesure.

En effet :

- les conditions atmosphériques (l'humidité notamment) influent sur la vitesse de propagation des ondes dans l'air et donc sur la précision des mesures. Il existe trois stratégies couramment utilisées pour compenser cet effet lors du traitement des données :
 - o installation d'une station météorologique sur le site pour la prise en compte des paramètres ad-hoc ;
 - o installation de quelques récepteurs de référence supposés fixes sur le site : toutes les variations sur ces récepteurs seront considérées comme des variations à appliquer aux mesures dans la zone en mouvement ;
 - o utilisation de méthodes de « permanent scattering » qui consistent à effectuer les corrections atmosphériques d'après l'analyse des variations de distance des points qui conservent la meilleure cohérence au cours du temps.
- la mesure des distances ou déplacements est unidimensionnelle dans la direction de visée du radar, ce qui peut rendre l'information incomplète. Selon les applications recherchées, cette limite peut-être contournée par différentes techniques (utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain précis lors du traitement de données, ajout de couples de réflecteurs sur le terrain, utilisation simultanée de plusieurs radars comme au paragraphe 3.4.4 etc.) pour produire des cartes de déplacements 2D et 3D.
- la méthode radar impose un emplacement judicieux de l'équipement sur le site. Cet emplacement doit permettre de limiter au mieux les zones masquées, en plaçant le dispositif en haut ou en bas de la pente, afin de viser dans la direction supposée du déplacement général et de manière à restreindre au maximum les effets de masques (zones non éclairées par le radar, *Figure 12*).



*Figure 12 – Placement du radar interférométrique terrestre et effets de masques.
Les zones masquées sont dessinées en violet.*

- les radars mobiles du marché sont généralement assez lourds (*Tableau 1*). Le placement déjà fortement contraint par les caractéristiques de la méthode peut également être grandement compliqué par le poids et l'encombrement du dispositif. La logistique nécessaire pour leur mise en place peut devenir rapidement très fastidieuse, voire onéreuse.
- dans le cas de mesures discontinues, lorsque l'équipement est déployé périodiquement ou temporairement sur un site, il peut être extrêmement difficile de recouper les mesures dans le temps : le principe de mesure (paragraphe 3.2) implique en effet l'introduction d'une ambiguïté sur la phase entre deux campagnes de mesures distinctes. Ainsi, si l'on surveille le versant A pendant un certain temps, puis le versant B, et que l'on veut revenir sur A, il sera très compliqué voir impossible de trouver le déplacement qui a eu lieu sur A entre temps d'après la différence de phase (*Figure 13*). Cela suppose aussi de retrouver un positionnement quasi-identique (avec une précision submillimétrique) de l'appareil entre les deux campagnes. Lorsque le dispositif est en surveillance continue sur un site, l'ambiguïté de phase est supprimée par le court laps de temps (environ dix minutes) séparant les images de phases successives, durant lequel le déplacement ne peut-être trop grand.

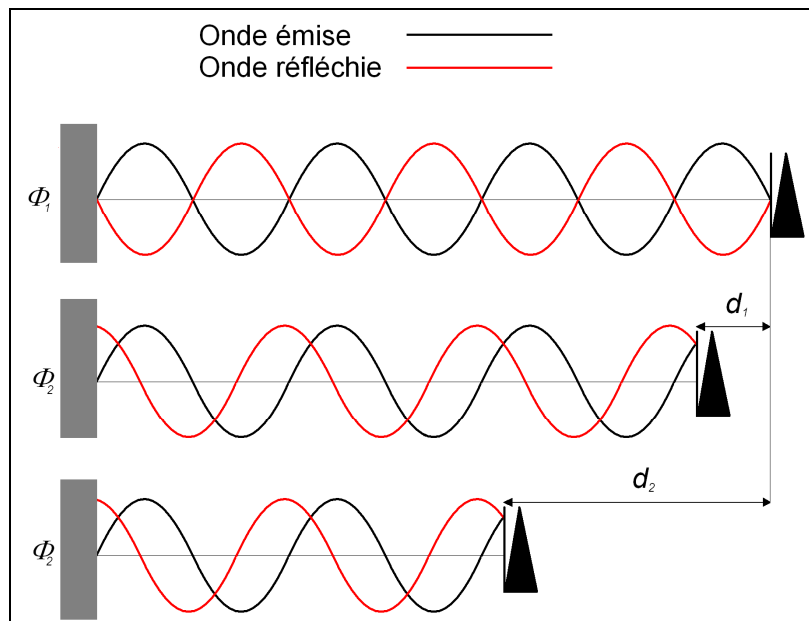


Figure 13 – Illustration de l'ambiguïté de phase. Deux déplacements d_1 et d_2 différents peuvent retourner la même valeur de phase.

- la présence de végétation peut également perturber la mesure de phase et entraîner une perte de cohérence entre deux mesures si l'état de la surface change entre les deux mesures. La profondeur de pénétration du couvert végétal étant relativement faible pour les longueurs d'ondes utilisées (< 1 cm), la méthode radar y est très sensible.

4. LE SCANNER LASER TERRESTRE

4.1 HISTORIQUE DE LA METHODE

Le scanner laser terrestre ou LIDAR (*Light Detection And Ranging*) repose sur l'utilisation d'ondes lumineuses (ondes électromagnétiques visibles) générées par LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) et non sur les ondes radio utilisées par les radars conventionnels.

C'est une technologie plus récente que le radar, qui remonte aux années 1960. Elle a été développée au départ pour mesurer précisément des distances. La première application notable est réalisée en 1962 par Smullin et Fiocco qui déterminent pour la première fois la distance Terre-Lune avec une précision centimétrique.

Avec l'intégration de la mesure des angles de visée et les évolutions technologiques des quinze dernières années (introduction de carte mémoire à grande capacité, avancées des outils informatiques de traitement de données etc.), il est dorénavant possible de mesurer la position d'un très grand nombre de points d'une structure pour en constituer un modèle numérique tridimensionnel.

Le scanner laser trouve depuis des applications dans de nombreuses disciplines (métrologie industrielle, construction etc.), notamment grâce au couplage avec la photogrammétrie qui permet de restituer des modèles 3D très réalistes.

4.2 PRINCIPE GENERAL DE LA METHODE

Le principe est le même que pour le radar, seul le type d'onde change : un laser émet une onde lumineuse vers la cible et mesure le temps d'aller-retour de l'onde. Ce temps de vol est ensuite converti en distance, connaissant la vitesse de la lumière dans l'air. Certains scanners exploitent par ailleurs aussi l'information sur la phase, comme pour les solutions radar.

En utilisant les angles horizontaux et verticaux selon lesquels le faisceau laser a été projeté, le scanner calcule la position du point éclairé dans son référentiel. En répétant l'opération un très grand nombre de fois, le scanner construit un modèle tridimensionnel de la scène visée. Il est alors possible, si besoin est, de déplacer l'appareil afin de modéliser les parties masquées, puis d'assembler les images pour obtenir un modèle complet.

Le scanner ne mesure donc pas directement un déplacement mais l'état d'un objet à un moment donné. En comparant différents modèles tridimensionnels acquis successivement dans le même référentiel, il est possible d'obtenir les déplacements ayant eu lieu entre deux prises de vue et de calculer les volumes déplacés.

Certains dispositifs sont également capables d'identifier des paramètres physiques des surfaces imagées (couleur, rugosité, réflectivité etc.) par l'analyse des signaux réfléchis, permettant ainsi de compléter les scans acquis.

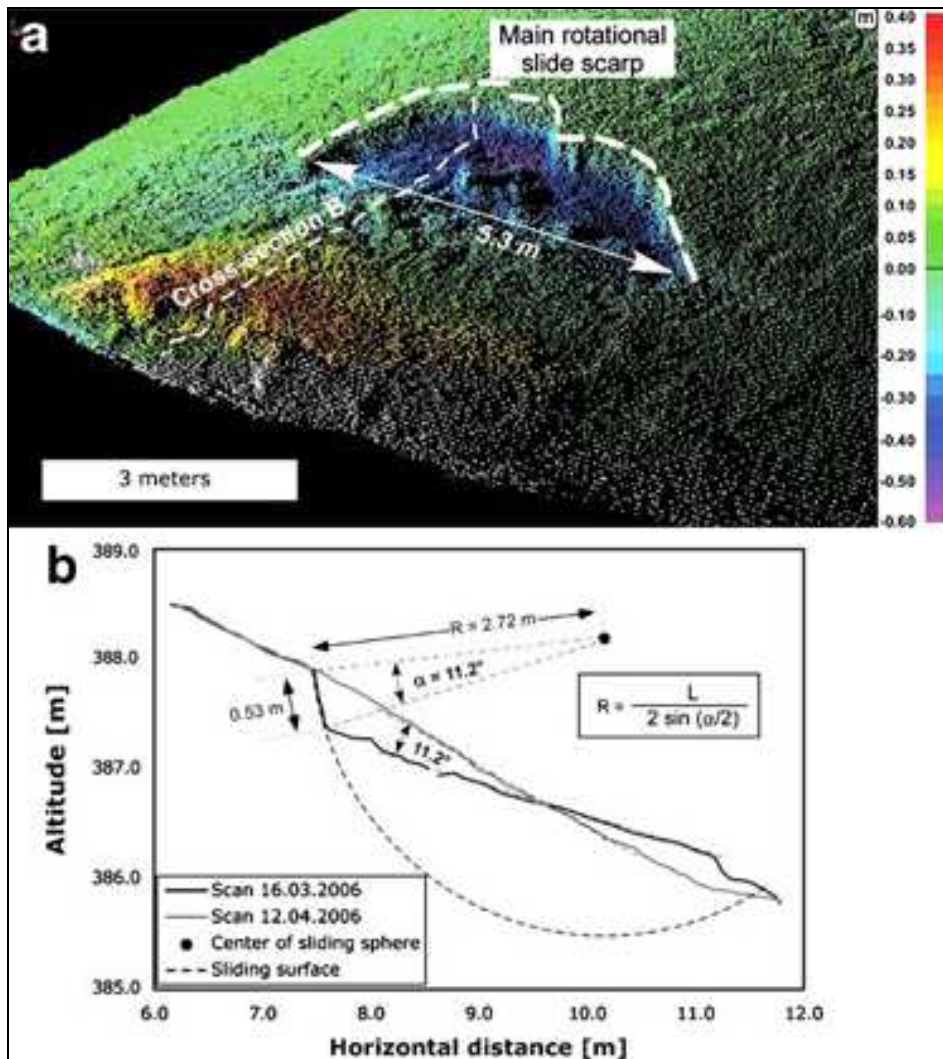
4.3 EXEMPLES D'APPLICATION

4.3.1 ETUDE STRUCTURELLE D'UN GLISSEMENT ROTATIONNEL – SUISSE

On trouve le long de la rivière de la Sorge (Suisse, canton de Lausanne) de nombreux glissements de très petite taille qui menacent fréquemment la stabilité des berges. Jaboyedoff *et al.* [18] ont utilisé en 2006 des mesures obtenues par scanner laser pour surveiller et effectuer des études structurelles de ces objets.

La Figure 14 montre une carte des déplacements verticaux obtenue en comparant deux MNT haute définition obtenus respectivement les 16 mars et 12 avril 2006. On voit que la partie haute de la structure est descendue de quelques dizaines de centimètres tandis que la partie inférieure est remontée d'autant. Outre la caractérisation complète du champ de déplacement affectant ce glissement, cette carte a également permis de proposer un modèle interprétatif.

Notons toutefois que cette expérimentation a été effectuée à courte distance (quelques dizaines de mètres) sur une surface relativement petite pour ce type de phénomènes.



4.3.2 SURVEILLANCE D'UNE FALAISE BASALTIQUE – ESPAGNE

Les falaises constituées d'orgues basaltiques peuvent présenter de nombreux risques pour les personnes et les biens car des séries d'orgues peuvent se détacher massivement et brutalement de la paroi sous l'effet de l'érosion.

La *Figure 15* montre le résultat de la surveillance d'une falaise basaltique en Catalogne, sur laquelle est bâti le village de Castellfollit De La Roca, entre mars et avril 2007 [19]. On y voit très clairement le détachement d'un bloc de 50 m³ (on estime que pour cette falaise ce type d'évènement - volume compris entre 50 et 250 m³ - se produit en moyenne une fois tous les 10 ans).

Par ailleurs, une analyse fine des MNT successifs obtenus sur la période par scanner laser a permis de mettre en évidence des déformations lentes (quelques centimètres par mois) autour de la zone de rupture, et ainsi d'anticiper spatialement la surface de rupture probable.

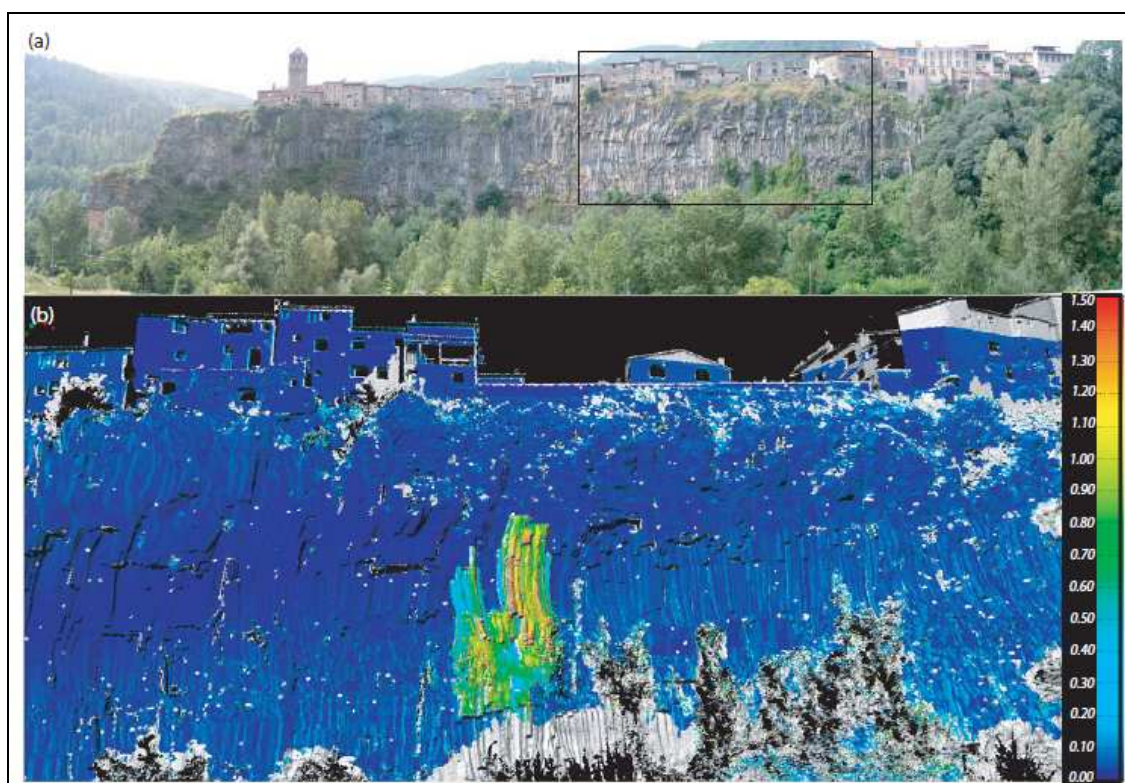


Figure 15 – a) Le village de Castellfollit De La Roca et sa falaise (Espagne) en vue photographique et b) image du champ de déplacement entre mars et avril 2007 correspondant à l'effondrement d'un bloc de 50 m³ [19].

4.3.3 SURVEILLANCE D'UN GLISSEMENT DE TERRAIN LENT – AUTRICHE

La *Figure 16* montre le scan d'un glissement de terrain lent, la *Figure 17* montre plusieurs cartes de déplacements correspondantes à ce site, obtenues par comparaison de plusieurs scans.

Ce versant instable, connu sous le nom de glissement de Galiern, est situé dans la partie cristalline des Alpes Autrichiennes. Il affecte des roches métamorphiques (Gneiss principalement), sur une surface d'environ 100 x 100 m². Il a été initié en 2005 par une crue exceptionnelle de la rivière en aval qui a fortement déstabilisé la base de la pente. Il s'agit d'un glissement peu profond et quasiment statique.



Figure 16 – Scan d'un glissement de terrain lent en Autriche [20]. Au premier plan, un cours d'eau longeant des installations industrielles ainsi qu'une route. Un glissement de terrain (zone déboisée) surplombe ces infrastructures.

La Figure 17 montre les différences d'altitudes du versant constatées entre plusieurs périodes de temps obtenues par comparaison de plusieurs scans, entre mars 2006 et septembre 2007. On observe au cours du temps une accentuation des changements d'altitudes sur le versant (vert = pas de différence, bleu = ajout de matériaux, rouge = disparition de matériaux), traduisant l'évolution du glissement de terrain, avec des zones d'arrachement de matériaux en surface et des zones d'accumulation. On voit que le dispositif a permis de mettre en évidence l'évolution du glissement au cours du temps, et de différencier très nettement les multiples zones plus ou moins actives. D'autre part, cette étude a permis de montrer que, sur cette période de temps relativement longue, le versant a été affecté principalement par des glissements superficiels de faible ampleur et pas ou peu de déplacement commun à l'ensemble de la structure.

Toutes ces figures mettent en évidence la très haute densité de points acquis par le système de scanner laser terrestre, et par conséquent le grand nombre de points pour lesquels on calcule un déplacement. Elle montre également que le scanner laser permet de cartographier un mouvement complexe et lent (quelques centimètres par an).

Par ailleurs, il a été montré [21-23] que les systèmes de scanner laser terrestre sont également capables sous certaines conditions d'anticiper dans le temps et l'espace, une éventuelle rupture brutale des versants surveillés. C'est le cas notamment pour des opérations de surveillance de mine à ciel ouvert.

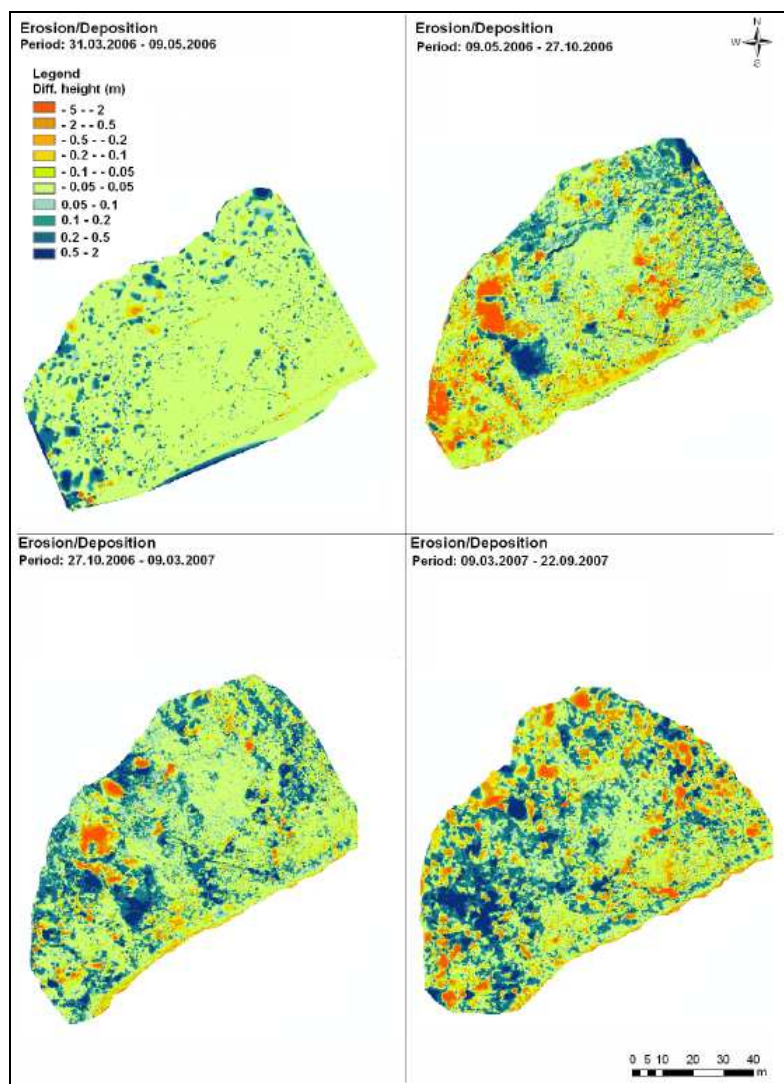


Figure 17 – Cartes de déplacements obtenus par manipulation de scans successifs d'un glissement lent en Autriche [20]. En vert, les zones stables (pas ou très peu de variation d'altitude entre deux scans), en rouge les zones d'érosion, en bleu les zones d'accumulation.

4.4 PRINCIPALES PERFORMANCES ET CARACTERISTIQUES

Comme la technique de laser scanner trouve des applications dans de nombreux domaines (voir paragraphe 4.1), elle s'est très fortement développée. Il existe sur le marché de nombreuses solutions terrestres de scanner laser potentiellement adaptées à la problématique de mouvements de versants.

Le *Tableau 2* donne des ordres de grandeurs des principales performances et caractéristiques des solutions, issues de données et de la littérature technique et scientifique [18 - 20, 22 - 24].

Comme pour les solutions de radar interférométrique, les performances affichées par les constructeurs sont obtenues dans des conditions plus favorables à celles obtenues en conditions de terrain usuelles. Elles tiennent également compte de compensations liées aux conditions atmosphériques.

	Scanner Laser terrestre
Précision absolue	~ 1 cm à 100 m de distance
Portée	De 100 m à 6 km
Temps d'acquisition	Variable selon la surface surveillée (~15 mn pour une application standard)
Fréquence	> 300 GHz
Longueur d'ondes	0,78 μ m à 1 mm
Poids de l'équipement	Entre 20 et 45 kg

Tableau 2 – Principales performances et caractéristiques des solutions de radar mobile.

La précision moyenne est comparable quelle que soit la solution.

La portée en revanche est très variable selon les modèles : elle varie de quelques centaines de mètres à plus de 6 km. Elle est dépendante aussi de la fréquence de mesure, de la réflectivité du versant surveillé et des conditions atmosphériques.

La *Figure 18* illustre cette variabilité pour le scanner Riegl VZ-6000. Cette figure montre que pour une fréquence d'acquisition donnée (définie par l'utilisateur), la portée sera maximale sur les surfaces les plus réfléchissantes (exemple : 6 km sur des matériaux réfléchissants à 90% pour une fréquence d'acquisition de 50 000 points par seconde – courbe bleue sur le graphique de gauche – contre 3,7 km sur une surface réfléchissante à 20% avec la même fréquence d'échantillonnage).

On y voit d'autre part l'effet des conditions climatiques sur la portée. Par exemple, pour une surface réfléchissante à 90% et une fréquence d'échantillonnage de 50 kHz, la portée maximale est de 6 km pour une atmosphère claire permettant une visibilité de 23 km (courbe bleue sur le graphique de gauche). Cependant, dans les mêmes conditions mais en présence de brouillard (visibilité de 5 km, courbe orange sur le même graphique), la portée est réduite à 2,8 km.

Enfin, cette figure montre également l'effet sur la portée de la fréquence d'échantillonnage. Dans des conditions identiques, la portée obtenue avec un échantillonnage à 300 kHz est environ deux fois moindre que celle obtenue avec un échantillonnage à 50 kHz.

Pour améliorer la performance à longue distance notamment, il est possible pour certains appareils d'émettre plusieurs pulses successifs (*Figure 18*). Cela peut néanmoins introduire une ambiguïté lors du traitement des données : il est alors nécessaire d'identifier précisément quel retour correspond à quel pulse émis.

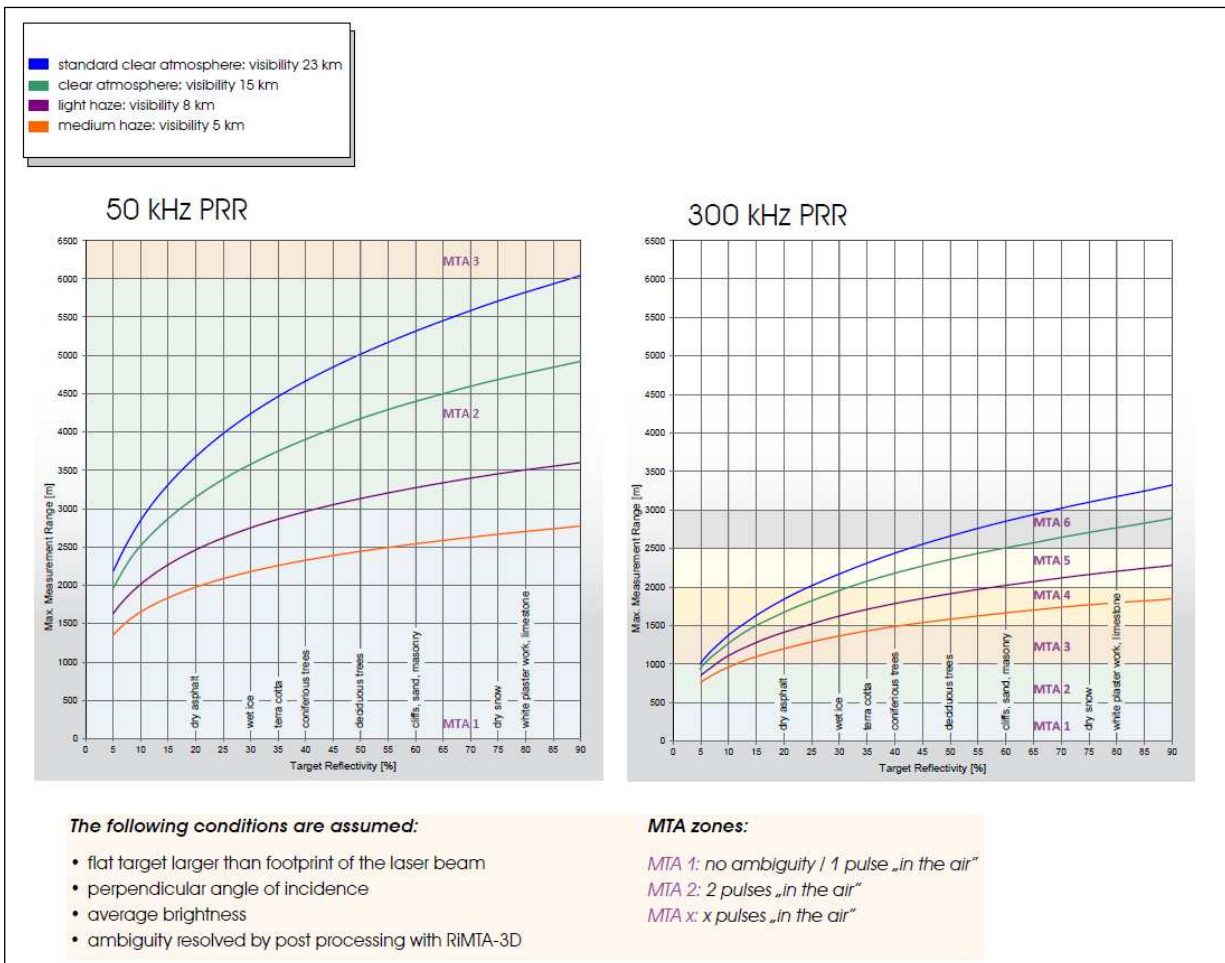


Figure 18 – Portée du laser Riegl VZ-6000 en fonction de la réflectivité de la cible, des conditions atmosphériques et de la fréquence d'acquisition [24]. Le terme MTA pour Multiple-Time-Around caractérise le nombre de pulse émis.

S'agissant de la surface surveillée, la plupart des scanners ont un champ de vision de 360° en horizontal et jusqu'à 80° en vertical. Cela permet une mesure sur des versants de plusieurs kilomètres carrés avec un système longue portée.

Enfin, des routines intégrées à l'acquisition et/ou au traitement des données permettent d'obtenir une densité maximale de 1 point tous les 2 cm à 1000 m de distance .

4.5 LIMITES DE LA METHODE ET PRECAUTIONS D'USAGE

Les champs d'applications de la mesure par scanner laser étant très vastes, les constructeurs proposent de nombreuses solutions logicielles censées répondre à chaque utilisation. Il faut donc être vigilant quant au choix des solutions logicielles et s'assurer qu'elles correspondent bien à l'application souhaitée. Le traitement des données peut en effet rapidement devenir fastidieux si la plateforme logicielle n'est pas adaptée.

Les limites inhérentes à la méthode de scanner laser sont par ailleurs les suivantes :

- le traitement de données peut s'avérer rapidement très complexe du fait du grand nombre de points à manipuler, notamment pour l'intégration et la gestion en base de données. Il nécessite souvent des moyens de calcul importants.
- le processus de traitement de données se décompose en plusieurs phases qui peuvent être automatisées avec plus ou moins de succès selon la qualité des mesures et la complexité de l'objet investigué. On recense notamment le maillage (pour passer du nuage de points discontinus à une surface maillée), la consolidation (si plusieurs prises de vues ont été utilisées pour s'affranchir des zones masquées) etc.
- à cause du phénomène de dispersion du faisceau laser dans l'air, le diamètre du rayon augmente avec la distance de propagation. Au moment de l'impact avec la surface, l'impulsion laser sera caractérisée par une surface d'impact et non un point unique (pour les solutions Optech le diamètre du faisceau à 100 m de distance est compris entre 19 et 27 mm, cf. Annexe E). La dispersion du faisceau est également dépendante des conditions atmosphériques.
- l'effet des conditions atmosphériques sur l'intensité de l'onde doit aussi être pris en considération dès lors que la portée dépasse 100 m [24], et ce bien que la plupart des lasers scanner opèrent dorénavant à des longueurs d'ondes très petites, avec des lumières monochromes moins sensibles à ces conditions.
- la présence de végétation affecte également considérablement les performances des systèmes de laser scanning. Comme au contact d'obstacles une partie de l'onde laser est réfléchiée, on peut mesurer en retour de multiples signaux qu'il convient de discriminer pour ne garder que le retour utile représentatif du sol nu. Certains constructeurs proposent des logiciels permettant de filtrer ces signaux perturbateurs par analyse de la forme d'onde. Néanmoins, il s'agit de traitements informatiques lents qui ne sont pas applicables en quasi temps réel et qui présentent une efficacité limitée.
- il faut veiller à utiliser un laser dont la classe est compatible avec l'application visée. Par exemple, la classe 1 est inopérante sur surface mouillée, la classe 3b implique des précautions particulières pour la sécurité des personnes.

5. COMPARAISON TECHNIQUE DES METHODES

Le tableau suivant récapitule les principales performances, caractéristiques et modalités d'utilisation des solutions terrestres de radar mobile et scanner laser.

	Radar Interférométrique	Scanner laser terrestre
Précision absolue	Submillimétrique	Centimétrique
Portée	Jusqu'à 5 km Insensible aux conditions atmosphériques	Jusqu'à 6 km Sensible aux conditions atmosphériques
Possibilité de couvrir toute la scène	Non s'il y a des effets de masques	Oui avec plusieurs prises de vue s'il y a des masques
Obtention des déplacements	1D : directe 2D / 3D : pseudo-directe si l'on dispose d'un Modèle Numérique de terrain haute-définition	3D après traitement
Effet de la position de l'équipement	Important : direction de visée optimale dans la direction des déplacements	Faible
Effets atmosphériques	Faibles Compensation complexe	Forts Compensation complexe
Effets de la végétation	Forts Compensation impossible	Forts Compensation complexe et limitée
Mesure des déplacements après démobilisation / remobilisation de l'appareil	Extrêmement difficile du fait des problèmes liés à l'ambiguïté de phase	Possible après traitement de données

Tableau 3 – Comparaison des performances et conditions d'utilisation des solutions mobiles terrestres de radar et scanner laser.

5.1 MISE EN ŒUVRE SUR LE TERRAIN

Comme évoqué précédemment, les deux méthodes présentent des caractéristiques complètement différentes du point de vue de la mobilité et de la mise en œuvre sur le terrain. Les scanners laser terrestres sont bien plus avantageux.

D'abord, leur faible poids (une vingtaine de kilogrammes) et leurs dimensions réduites sont un atout considérable comparativement aux systèmes d'interférométrie terrestre, mesurant plusieurs mètres et pouvant peser plusieurs centaines de kilogrammes. L'amenée sur site et l'installation des scanners laser sont de ce fait facilitées.

Ensuite, leur placement est beaucoup moins contraignant que celui des systèmes d'interférométrie radar grâce à la mesure tridimensionnelle qui ne contraint pas à faire coïncider direction de visée et direction de déplacement.

D'un point de vue de la configuration et du paramétrage, les deux types de dispositifs semblent assez équivalents. Les procédures sont entièrement automatisées, les opérations de mise en route sont assez rapides.

5.2 QUALITE ET RAPIDITE DE LA MESURE DES DEPLACEMENTS

La précision de la mesure est supérieure avec le radar interférométrique à condition de pouvoir placer le dispositif dans la position adéquate. Ce système présente aussi l'avantage de mesurer directement des déplacements.

L'obtention des déplacements par scanner laser nécessite un traitement de données souvent complexe (par comparaison de deux états) et donc des compétences pointues.

De plus, les logiciels fournis par défaut avec les scanners laser ne sont pas adaptés au calcul rapide de déplacements : il est nécessaire d'acquérir un logiciel supplémentaire, sous réserve qu'il existe auprès du constructeur. Par ailleurs, comme la mesure par scanners laser génère de gros volumes de données, le transfert pour traitement à distance est peu envisageable (une infrastructure de traitement de données sur le site est indispensable).

5.3 INFLUENCE DES EFFETS PERTURBATEURS

Les solutions radar sont quasi inopérantes hors sol nu étant donné la longueur d'ondes utilisée. Le seul moyen de s'affranchir de cette limite est de placer des réflecteurs parfaitement dégagés sur le site. La dimension de surveillance globale du site en est forcément affectée.

Les scanners laser, qui opèrent à des longueurs d'ondes beaucoup plus petites, ont une bonne pénétration en profondeur en présence d'un couvert végétal. Cela se traduit cependant par une multiplicité des signaux de retour, que l'on peut différencier à la condition que les masques végétaux en question soient séparés de quelques dizaines de centimètres du substratum à imager. Généralement, les logiciels de traitement de données intègrent les fonctionnalités permettant de compenser cet effet, et ce avec des résultats corrects.

Les principaux effets perturbateurs affectant la précision des mesures sont les conditions atmosphériques. Pour les solutions radar, elles influent principalement sur la vitesse de propagation des ondes dans l'air. Les solutions logicielles proposées par les constructeurs pour compenser ces effets reposent souvent sur des techniques de « permanent scattering » [27, 28] (cf. paragraphe 3.5). Cette méthode est a priori très efficace mais elle nécessite d'importantes ressources de calcul et une vigilance quant à l'effet des compensations appliquées sur les données.

Pour les solutions laser, l'effet des conditions atmosphériques est plus complexe, puisqu'elles affectent à la fois la vitesse de propagation des ondes, l'intensité et le diamètre du faisceau. De même, la dispersion des ondes est également dépendante des conditions atmosphériques.

5.4 CAPACITE DE SURVEILLANCE ET D'ALERTE

La capacité des dispositifs à fonctionner ou non en période de crise et à délivrer des alertes est un point crucial. Les exemples documentés précédemment démontrent que l'une et l'autre des techniques peuvent être déployés à des fins de surveillance opérationnelle si les conditions d'usage et précautions sont respectées.

Cependant, en termes de déploiement opérationnel et de rapidité d'accès à des mesures de déplacements successibles fiables, la solution radar est la plus efficace.

En effet, compte tenu de la complexité de traitement et de gestion de données de scanners laser, leur utilisation en situation d'alerte peut se révéler problématique. Les constructeurs et revendeurs de ce type de solutions semblent avoir pris conscience de ces limites et il est probable que d'ici peu, des solutions logicielles adaptées à l'utilisation en mode surveillance apparaîtront sur le marché.

6. COMPARAISON ECONOMIQUE DES METHODES

Les coûts financiers donnés dans le *Tableau 4* résultent de devis élaborés par les constructeurs présentant des solutions mobiles compatibles avec une application de surveillance opérationnelle (voir Annexes).

Les devis fournis étant très détaillés car proposant de nombreux accessoires et options, les coûts donnés ci-après tiennent compte uniquement des équipements indispensables à chaque solution. Ils correspondent à l'investissement minimal nécessaire à l'obtention d'un dispositif fonctionnel du point de vue matériel et logiciel.

Ce coût inclut en particulier :

- la fourniture de l'appareil et accessoires indispensables (mallette de transport, batterie etc.) ;
- si nécessaire, la fourniture d'un logiciel adapté à la surveillance de déplacements ;
- une session de formation tournée vers l'acquisition et le traitement de données.

Ce coût est entendu hors frais de maintenance annuelle.

La période de garantie par défaut dépasse rarement 12 mois.

Type de dispositif	Radar interférométrique à synthèse d'ouverture	Radar interférométrique à ouverture réelle	Scanner laser longue portée
Prix Hors Taxes en k€	~ 160 k€	~ 250 k€	~ 200 k€
Dispositif type	IBIS-FL et interface logicielle adaptée	Gamma Remote Sensing GPRI et interface logicielle adaptée	Riegl VZ-6000 et interface logicielle adaptée.

Tableau 4 – Eléments de comparaison économique de quelques solutions mobiles terrestres de radar et scanner laser.

On peut noter par ailleurs que les solutions IBIS et Riegl sont commercialisées depuis quelques années (avec des évolutions régulières des matériels et logiciels) ; les utilisateurs sont nombreux. La solution GAMMA SENSOR est très récente, elle est commercialisée depuis peu.

7. CONCLUSIONS

Les solutions mobiles de surveillance en grand de type radar et scanner laser (LIDAR) présentent des performances et des atouts considérables à la fois pour l'aide à la caractérisation de l'aléa et pour la surveillance de mouvements de versants et des mines à ciel ouvert sur la base du suivi des déplacements de surface. Des cartographies successives de déplacements peuvent en effet alerter sur de possibles déclenchements de phénomènes dynamiques de terrain, ceci sur des surfaces étendues.

Bien que basées sur un principe analogue, la mise en œuvre de ces techniques nécessite des précautions spécifiques à chacune d'elles, comme le montre cette étude. On retiendra en particulier que :

- le radar interférométrique permet d'obtenir une cartographie très précise et rapide des déplacements dans la direction de visée du radar. C'est un équipement tout temps, qui est très robuste sur sol nu. Il souffre cependant d'un poids important qui peut rendre difficile son déploiement sur le terrain. De part sa précision et la rapidité de traitement et d'interprétation des données, la solution radar est particulièrement bien adaptée à la surveillance opérationnelle avec des mesures répétées à intervalles courts. A l'inverse, les contraintes d'installation ainsi que les problèmes liés à l'ambiguïté de phase pour le calcul des déplacements entre deux campagnes de mesure éloignées dans le temps font que cet outil est peu approprié à l'auscultation périodique de multiples versants ou à la caractérisation de l'aléa ;
- le scanner laser terrestre (LIDAR) présente des performances très intéressantes en termes de portabilité et de mise en œuvre sur le terrain. Certes, il ne mesure pas directement un déplacement, mais en comparant des modèles tridimensionnels de terrain acquis successivement dans le même référentiel, il est possible d'obtenir les déplacements ayant eu lieu entre les prises de vue. La qualité des mesures est particulièrement sensible aux conditions atmosphériques ; elle dépend également des traitements appliqués aux données brutes. Le scanner laser présente l'avantage de pouvoir mesurer des ouvertures de fissures centimétriques dans la roche, ce qui assure une très bonne évaluation spatiale des zones à risque. C'est donc un outil très efficace pour la caractérisation de l'aléa et l'observation précise des mouvements de versants, y compris sur couvert végétal. La complexité des procédures de traitement et de gestion des données exige des compétences pointues et des ressources importantes qui limitent en revanche fortement l'utilisation à des fins de surveillance.

D'un point de vue économique, les solutions terrestres de radar et scanner laser se situent dans une gamme de prix similaire, à savoir de l'ordre de quelques centaines de milliers d'euros à l'heure actuelle.

Enfin, compte tenu de leur potentiel (qui va bien au-delà du domaine des risques naturels) et de l'amélioration rapide des technologies, de nouveaux acteurs et de nouvelles solutions sont sur le point d'émerger sur ce marché de niche.

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Highland, L.M., Bobrowsky P., 2008, The landslide handbook – A guide to understanding landslides: *Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325*, 129 p.
- [2] Duffaut P., 2004, Glissements de terrain, *Encyclopædia Universalis*.
- [3] Bo M.W., Fabius M., Fabius K., 2008, Impact of global warming on stability of natural slopes, *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management. Presse de l'Université Laval, Québec*, 594 p.
- [4] Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T., 1993, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar Interferometry, *Nature* 364, 138-142.
- [5] Pathier E., Lasserre C., 2007, Mesure de la déformation du sol par interférométrie radar satellitaire. Exemples d'applications à la tectonique active. *Présentation ISTERRE*.
- [6] Pathier, E., Fruneau B., Deffontaines B., Angelier J., Chang C.-P., Yu, S.-B., Lee C.-T., 2003, Coseismic displacements of the footwall of the Chelungpu fault caused by the 1999, Taiwan, Chi-Chi earthquake from INSAR and GPS data, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 212, 73–88.
- [7] Pothérat P., Lemaitre F., Duranthon J.P., Benoit A., 2010, La mesure à très longue distance. Un besoin. Un outil : le radar ULB, *Rock Slope Stability symposium, 24-25th November 2010, Paris, France..*
- [8] Duranthon J.P., Effendiantz L., Lemaitre F., 2005, An original methodology for instable landslides monitoring: the microwave radar for distance measurement. The case study of the national highway 91at the bottom of the rocky slope of Séchilienne, Géoline 2005, Lyon, France.
- [9] Schulz W., Coe H., Shurtleff J. A., Panosky B. L., Farina J.P., Ricci P.P., Barsacchi G., Kinematics of the Slumgullion landslide revealed by ground based inSAR surveys, 2012, *Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Banff, Canada, 3-8 June*.
- [10] Bozzano F., Cipriani I., Mazzanti P., Prestininzi A., 2011, Displacement patterns of a landslide affected by human activities: insights from ground based InSAR monitoring, *Natural Hazards*, DOI 10.1007/s11069-011-9840-6.
- [11] Fukuzono T., 1985, A method to predict the time of slope failure caused by rainfall using the inverse number of velocity of surface displacement. *J Japanese Landslide Soc.* 22: 8–13.
- [12] Severin J., Eberhardt E., Leoni L., Fortin S., 2011, Use of Ground-Based Synthetic Aperture Radar to Investigate Complex 3-D Pit Slope Kinematics, *Proceedings, Slope Stability 2011: International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Vancouver, Canada (September 18-21, 2011)*.
- [13] Casagli N., Catani F., Del Ventisette C., Luzi G., 2010, Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry, *Landslides* 7: 291–301.

- [14] Suwa H., Mizuno T., Ishii T., 2010, Prediction of a landslide and analysis of slide motion with reference to the 2004 Ohto slide in Nara, Japan, *Geomorphology* 124: 157-163.
- [15] Lingua A., Piatti D., Rinaudo F., 2008, Remote-monitoring of a landslide using an integration of GB-inSAR and LidAR techniques, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- [16] Roedelsperger S., Becker M., Gerstenecker C., Laeuffer G., 2009, Near real-time monitoring of displacements with the ground-baser SAR IBIS-L, 'Fringe 2009 Workshop', Frascati, Italy.
- [17] Werner C., Strozzi T., Wiesmann A., Wegmüller U., 2011, EUSAR 2012 Nürnberg, Germany Interferometry, Repeat-Path SAR, SAR Tomography II Session B7.
- [18] Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellan A., Derron M.H., Loya A., Metzger R., Pedrazzini A., 2010, Use of LIDAR in landslide investigations: a review, *Natural Hazards* 61, pp. 5-28.
- [19] Abellan A., Jaboyedoff M., Oppikofer T., Villaplana J.M., 2009, Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner : experiment and application to a rockfall event, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9, pp. 365-372.
- [20] Prokop A., Panholzer H., 2009, Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides, *Natural Hazards and Earth systems sciences* 9, pp 1921-1928.
- [21] Little M.J., 2009, Slope monitoring strategy at PPRUST open pit operation, *The South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- [22] Abellán A., Calvet J., Vilaplana J.M., Blanchard J., 2010, Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring, *Geomorphology* Vol. 119, pp 162-171.
- [23] Abellán A., Vilaplana J.M., Martínez J., 2006, Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rock-fall study at Val-De-Nuria, (Eastern Pyrennes, Spain), *Engineering Geology* Vol. 88 pp. 136–148.
- [24] Datasheet Riegl VZ 6000, 2012, Brochure commerciale.
- [25] Datasheet Optech ILRIS-3D, Brochure commerciale.
- [26] Boulaassal H., 2010, Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres, *Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg*.
- [27] Noferini L., Pieraccini M., Mecatti D., Luzi G., Atzeni C., Tamburini A., Broccolato M., 2005, Permanent scatterers analysis for atmospheric correction in ground-based SAR interferometry, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol 43, n°7, pp 1459 -1470.
- [28] Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B., 2004, A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical Research Letters* Vol. 31.

9. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe A	Présentation de l'entreprise et de la solution Ingegneria Dei Sistemi	4 A4
Annexe B	Présentation de l'entreprise Gamma Remote Sensing	2 A4
Annexe C	Présentation de l'entreprise et de la solution Riegl	8 A4
Annexe D	Présentation de l'entreprise et de la solution Leica Géosystems	6 A4
Annexe E	Présentation de l'entreprise et de la solution Optech	4 A4
Annexe F	Tableau comparatif des profils des entreprises	2 A4

ANNEXE A

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE INGEGNERIA DEI SISTEMI

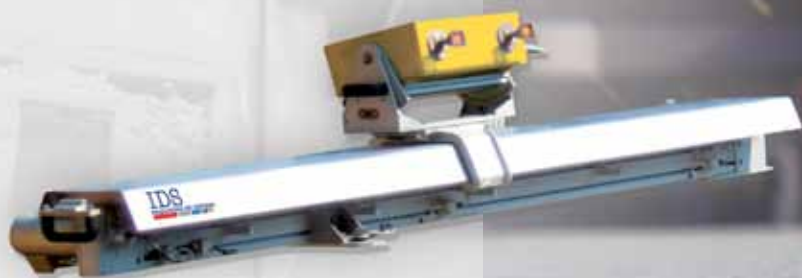
La firme IDS (Ingegneria Dei Sistemi) dont le siège social est basée à Pise et qui compte plusieurs antennes dans le monde, propose différents systèmes de radar interférométriques terrestre à synthèse d'ouverture. Cette entreprise, fondée en 1980 emploie aujourd'hui environ 500 salariés et commercialise différents types d'équipements de Géophysique, de navigation aéronautique et spatiale basés sur les technologies radar.

Les dispositifs d'interférométrie terrestre commercialisés par cette société sont utilisés par de nombreux exploitants de mines ou carrières à ciels ouverts (Minera Escondida, Minera Yanacocha, Highland Valley copper...), des entreprises de travaux publics pour la surveillance de déplacements dans les ouvrages d'arts, ainsi que des organismes universitaires ou de sécurité publique pour l'étude et la protection contre les mouvements de versants.

IBIS-FL : Preventing Natural and Man Made Disasters Utilizing Microwave Interferometry

IBIS-FL

**An innovative sensor for remote monitoring
of terrain, snowfields and structural movements**



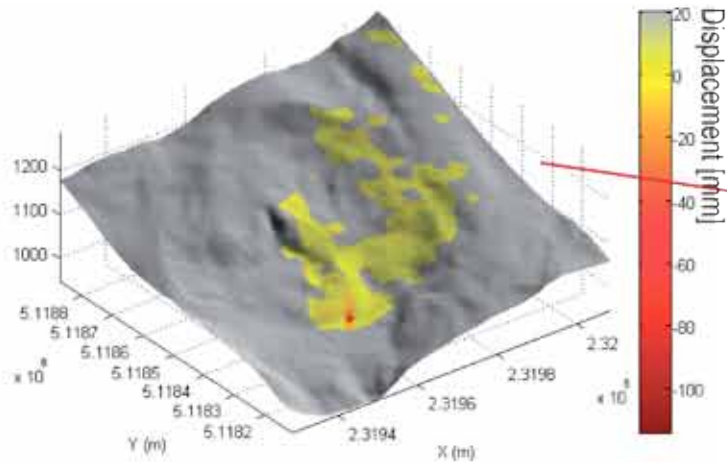
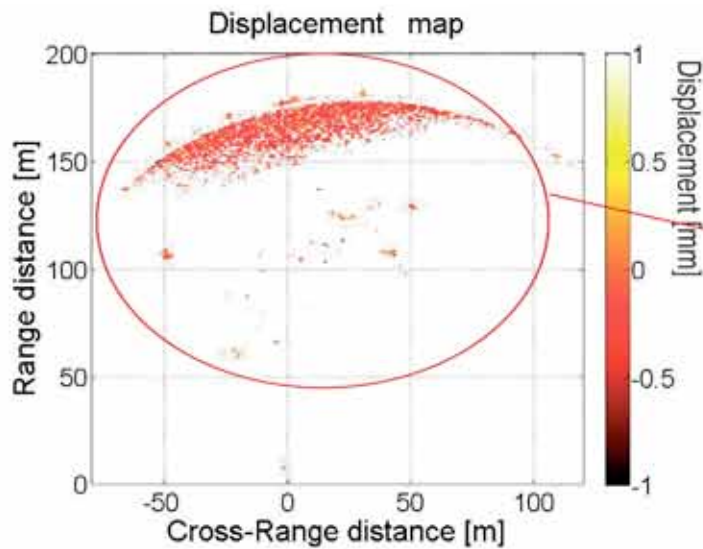
Monitoring applications:

Terrain and environmental

- Landslides and slopes
- Terrain subsidence
- Glaciers and avalanches
- Volcanoes

Structural movement

- Dams
- Buildings
- Cultural heritage



Advantages Over Traditional Techniques:

- Remote sensing up to 4 km.
- Displacement accuracy up to 1/10 mm.
- Real-time two-dimensional mapping of simultaneous displacements over large areas (several km²)
- Sampling movements every 2 minutes
- Autonomous operation
- Day-Night, all weather operation

IDS
INGEGNERIA DEI SISTEMI

IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A.
Pisa Headquarters
Via Enrica Calabresi 24, 56121 Pisa, Italy
Phone +39 050 31241 - Fax +39 050 3124201
www.idsgeoradar.com

For further information contact
sales.georadar@ids-spa.it

ANNEXE B

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE GAMMA REMOTE SENSING

La firme Suisse Gamma Remote Sensing basée à Berne, fondée en 1995, a un profil de Très Petite Entreprise et propose principalement des solutions logicielles pour le traitement d'images interférométriques satellitaires ou terrestre et elle commercialise depuis peu de temps un dispositif de radar interférométrique à ouverture réelle. Cet appareil a été vendu à une dizaine de structures, majoritairement des universités nord-américaines ainsi qu'à une filiale de Fugro qui l'utilise pour la surveillance de travaux miniers. Les clients universitaires en font une utilisation dans un but d'étude et de surveillance des glaciers, des mouvements de versants et des volcans actifs. La *Figure A1* montre le dispositif de radar interférométrique proposé par l'entreprise Gamma Remote Sensing installé sur site.



Figure A1 : Le radar interférométrique à ouverture réelle de la société Gamma Remote Sensing déployé sur site.

ANNEXE C

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE RIEGL

Cette firme a été fondée en 1978 en Autriche et s'est rapidement développée en proposant différents types d'appareil de mesure optiques (principalement des distancemètre laser, puis des scanners). L'entreprise est aujourd'hui présente un peu partout dans le monde et emploie plusieurs centaines d'employés. Les systèmes de laser scanning terrestres à longue portée commercialisés par RIEGL sont aujourd'hui utilisés par de nombreuses entreprises de géomètres-topographes, de travaux publics, d'exploitants miniers, d'instituts géographiques et d'universités pour l'étude des glaciers ou de tout les types de mouvements de terrains.

RIEGL VZ-6000[®]

- more than 6,000 m measurement range
- exceptionally well suited for measuring snowy and icy terrain
- wide field of view, 60° x 360°
- high speed data acquisition up to 222,000 meas. / second
- high accuracy, high precision ranging based on echo digitization and online waveform processing
- multiple target capability - unlimited number of targets
- optional waveform data output
- built-in calibrated digital camera
- on-board inclination sensors
- Integrated L1 GPS receiver with antenna
- Integrated compass
- built-in SSD data storage media
- compact and rugged design

This new 3D VZ-Line Laser Scanner offers superior and unrivaled long range measurement performance of more than 6,000 m, reflectorlessly.

RIEGL's unique V-Line technology is based on echo digitization and online waveform processing. The VZ-6000 operates even in poor visibility and demanding multi target situations caused by dust, haze, rain, snow.

Due to its laser wavelength the instrument is exceptionally well-suited for measuring snowy and icy terrain.

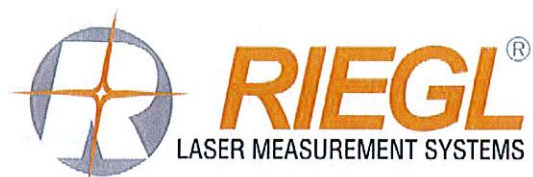
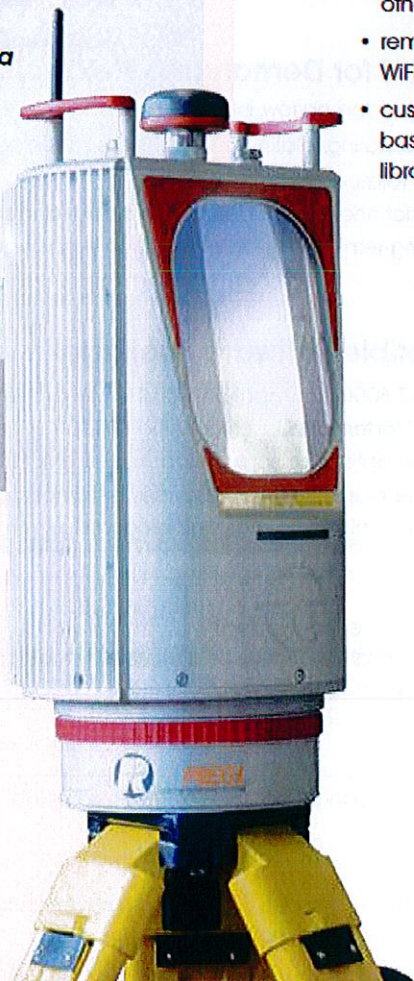
Modes of Operation:

- stand-alone operation with integrated graphical user interface via 7" touchscreen
- remote control via VNC Viewer with any standard tablet PC or other mobile device via WIFI
- remote operation with RiSCAN PRO on a notebook via LAN or WIFI connection
- customized operation by third party tools / applications based on RIEGL's well documented interfaces and scanner libraries, e.g. RIVLib

Typical applications include

- Topography & Mining
- Glacier Mapping
- Snow Field Monitoring
- Long Range Monitoring
- Civil Engineering
- Archaeology

visit our website
www.riegl.com



Ultra Long Range Performance

The High-Speed, High-Resolution 3D Laser Scanner *RIEGL* VZ-6000 offers an ultra long range of more than 6,000 m and a wide field of view of 60° vertical and 360° horizontal.

High accuracy and reliability of range measurement is based on *RIEGL*'s unique V-Line technology of echo digitization and online waveform processing. Extreme long range measurements can be achieved even with poor visibility and demanding multi target situations caused by dust, haze, rain, snow, etc.

Built-in Camera

A built-in calibrated 5-Megapixel camera capturing images deflected by the laser mirror allows coverage of the whole field of view with an appropriate number of high resolution images automatically stitched together to create a high resolution panorama image. This panorama image, in combination with precise 3D measurements produced by the VZ-6000, enables the creation of photorealistic virtual models for geological and geotechnical investigations, avalanche research, geomorphology, and geological features.

Waveform Data Output (optional)

The digitized echo signals, acquired by the *RIEGL* VZ-6000 - also known as waveform data - are the basis for waveform analysis. This data is provided via the optionally available waveform data output and accessible with the associated *RIEGL* software library *RiWAVElib* for investigations and research on multi target situations based on the digital waveform data samples of the target echoes.

Designed for Demanding Fieldwork

3D profiling of the narrow infrared laser beam is realized with a light-weight vertically oscillating/rotating mirror which is mounted on a stable 360 degree horizontally rotateable mechanism.

This compact and rugged design with a dust- and splash-proof housing is the basis for long-term and reliable operation even under adverse environmental conditions.

Compatible Software Packages

The *RIEGL* VZ-6000 is compatible with the well-proven *RIEGL* software package *RISCANPRO* for terrestrial laser scanning, *RIEGL*'s interface library *RiVLib*, as well as the workflow-optimizing software packages *RIMONITOR* and *RIMINING*.

The software plugin *RiMTA-3D* provides automatic assignment of the correct MTA zones in multiple time around processing.

Stand-alone Registration

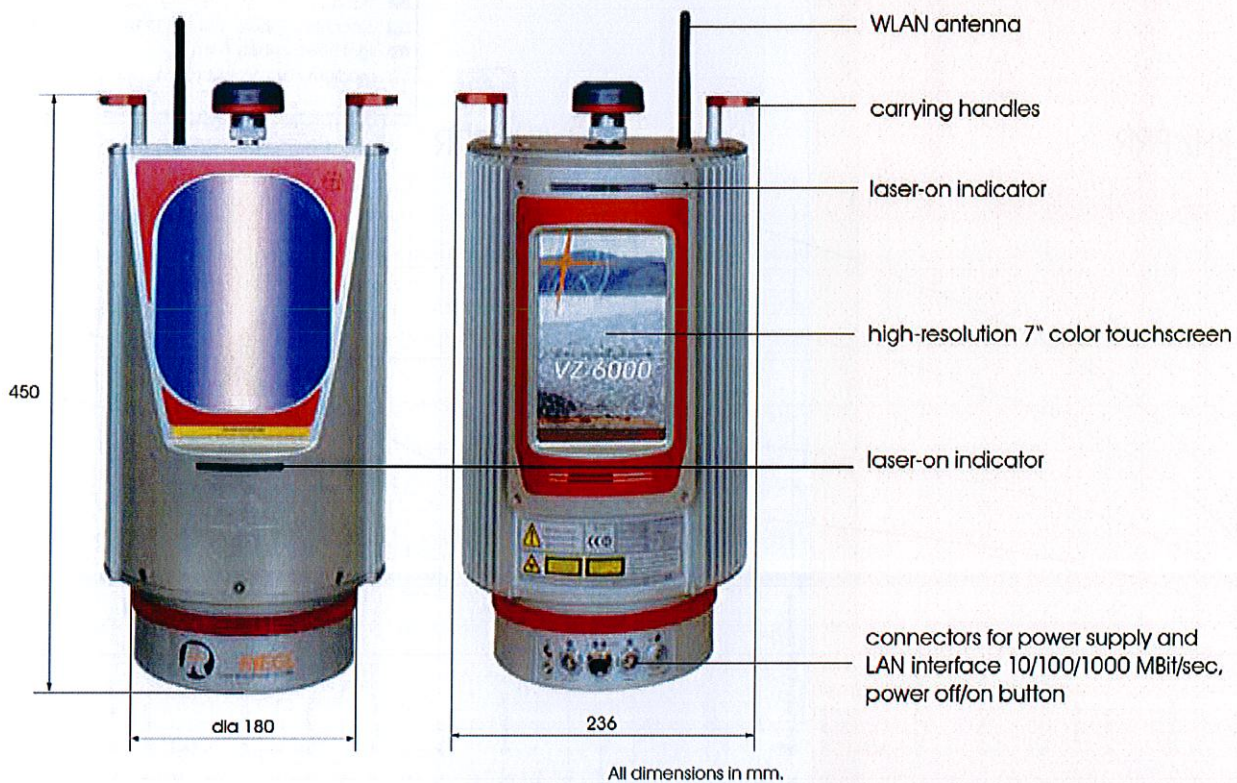
- integrated GPS receiver (L1) or external high-end GNSS receiver connected
- integrated compass, accuracy typ. 1° (one sigma value, available for vertical scanner setup position)
- on-board inclination sensors (tilt range $\pm 10^\circ$, accuracy typ. $\pm 0.008^\circ$)

Registration via Control Points

- fast fine scanning of reflectors for precise determination of scanner position using control points

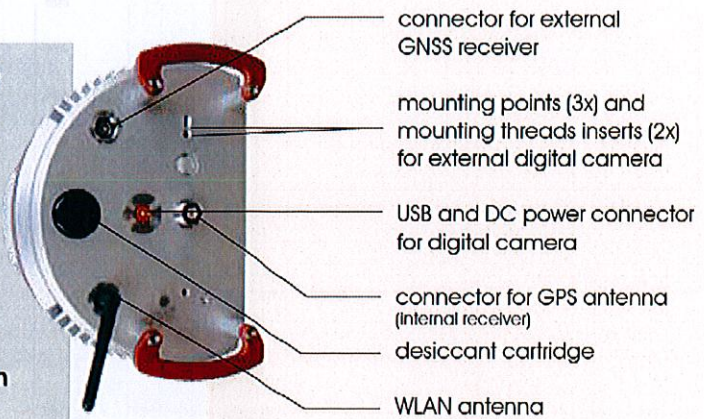
Totalstation-like-Registration

- setup above well known point (integrated laser plummet)
- precise fine scanning of well known remote target (reflector)
- on-board inclination sensors
- Backsighting



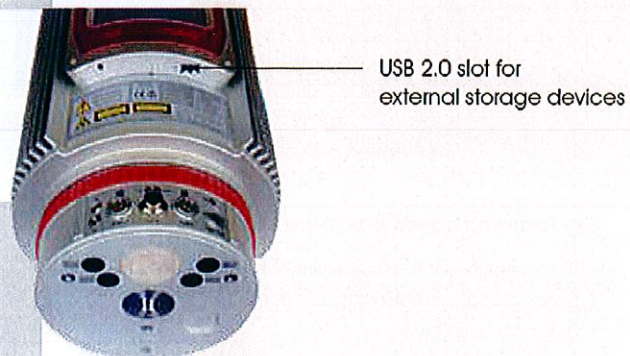
Communication and Interfaces

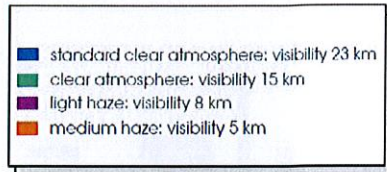
- LAN port 10/100/1000 MBit/sec within base
- integrated WLAN interface with high-gain antenna
- USB 2.0 for connecting an external digital camera
- connector for GPS antenna
- two external power supply ports
- connector for external GPS synchronization pulse (1PPS)
- connector for external GNSS receiver



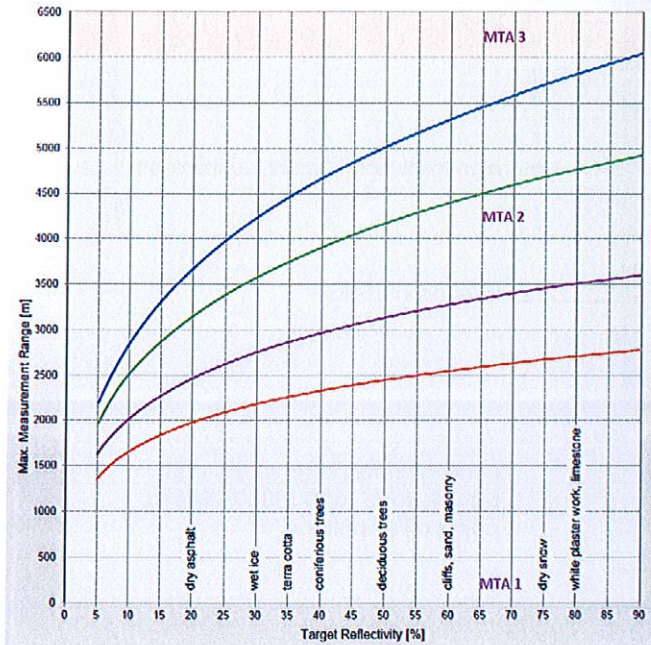
Scan Data Storage

- internal 80 GByte SSD (Solid State Disc) (2 GByte reserved for the operating system)
- external storage devices (USB flash drives or external hard drives) via USB 2.0 interface

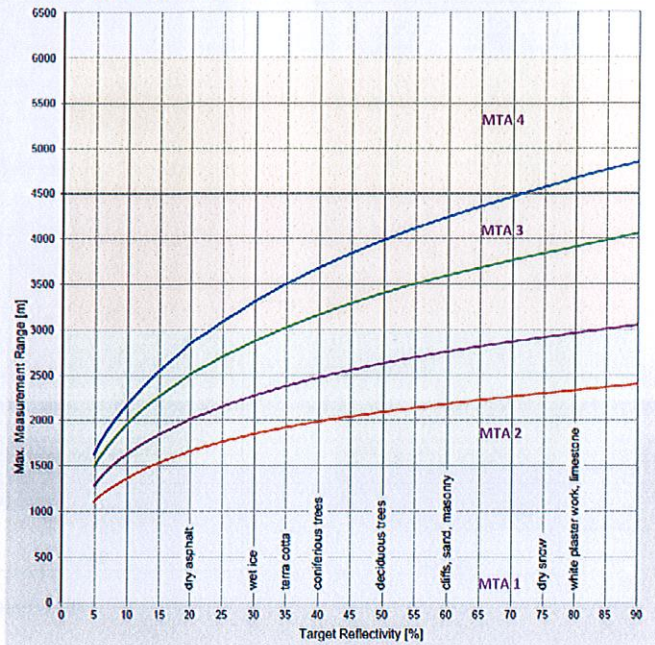




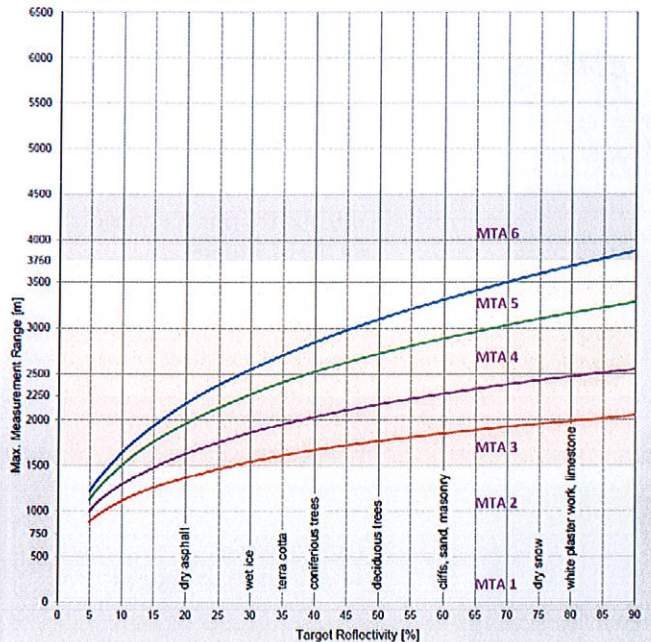
50 kHz PRR



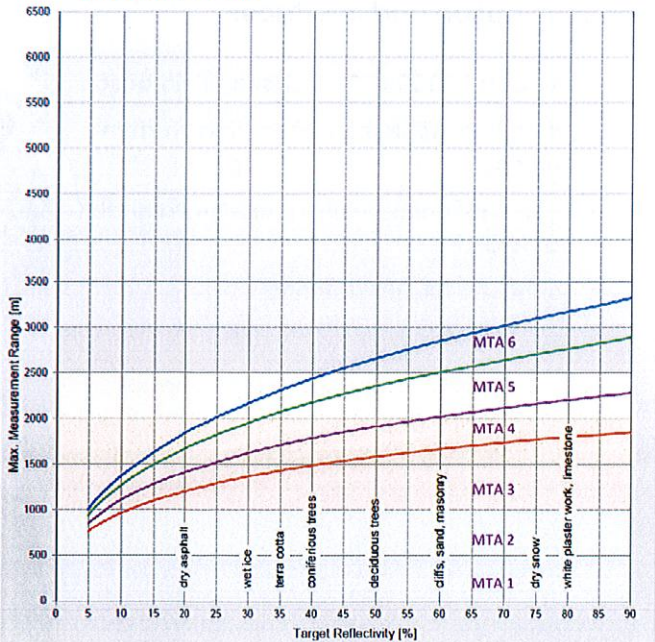
100 kHz PRR



200 kHz PRR



300 kHz PRR



The following conditions are assumed:

- flat target larger than footprint of the laser beam
- perpendicular angle of incidence
- average brightness
- ambiguity resolved by post processing with RIMTA-3D

MTA zones:

MTA 1: no ambiguity / 1 pulse „in the air“

MTA 2: 2 pulses „in the air“

MTA x: x pulses „in the air“

User-Friendly and Efficient Operation and Acquisition Workflow

Operation is easy with the integrated graphical user interface via 7" touchscreen, or by remote control of the scanner via VNC Viewer with any tablet PC or mobile device via WiFi connection.

Highly efficient scan data acquisition and global registration is supported by on-board inclination sensors, integrated L1 GPS receiver, an interface for a high-end external GNSS receiver on top of the scanner, a digital compass and built-in SSD data storage media. With a visual project overview of acquired scan data, it is possible to ensure complete data coverage or check the progress of a project.



Power Supply

Add-on Rechargeable Battery

- optional add-on rechargeable battery pack (high power, high capacity NiMH cells)
- compact thin cylinder design, short-circuit-proof and protected connection pins
- rechargeable during standard scan operation via external power supply
- integrated micro-controller based charging electronics
- easily attachable to base of the laser scanner by central locking screw

Power Supply

- intelligent power supply management, up to three independent external power sources can be connected simultaneously for uninterrupted operation
- reliable under- and over voltage protection
- wide external voltage supply range 11-32 V DC
- power consumption typ. 75 W (max. 90 W)
- LED indicators for power status

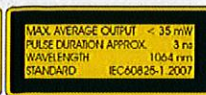


Technical Data RIEGL VZ®-6000

Laser Product Classification

Class 3B Laser Product according to IEC60825-1:2007

The following clause applies for instruments delivered into the United States:
Complies with 21 CFR 1040.10 and 1040.11 except for deviations pursuant to
Laser Notice No. 50, dated June 24, 2007.



Range Measurement Performance ¹⁾

Measuring Principle

time of flight measurement, echo signal digitization,
online full waveform analysis, full waveform export capability (optional)
single pulse ranging

Mode of operation

Pulse repetition rate PRR (peak) ²⁾	50 kHz	100 kHz	200 kHz	300 kHz
Effective Measurement Rate ²⁾	37 000 meas./sec	74 000 meas./sec	147 000 meas./sec	222 000 meas./sec
Max. Measurement Range ³⁾				
natural targets $\rho \geq 90\%$	6 000 m ⁴⁾	4 800 m ⁴⁾	3 800 m ⁴⁾	3 300 m ⁴⁾
natural targets $\rho \geq 20\%$	3 600 m	2 800 m ⁴⁾	2 100 m ⁴⁾	1 800 m ⁴⁾
Max. Number of Targets per Pulse	practically unlimited ⁵⁾			

Accuracy ⁶⁾

15 mm

Precision ⁷⁾

10 mm

Minimum Range

5 m

Laser Wavelength

near infrared

Laser Beam Divergence

0.12 mrad

Laser Beam Footprint (Gaussian Beam Definition)

15 mm @ exit, 60 mm @ 500 m, 120 mm @ 1000 m, 240 mm @ 2000 m

1) With online waveform processing.

2) Rounded values, selectable by measurement program.

3) Typical values for average conditions. Maximum range is specified for flat targets with size in excess of the laser beam diameter, perpendicular angle of incidence and for atmospheric visibility of 23 km. In bright sunlight, the maximum range is shorter than under overcast sky.

4) Ambiguity to be resolved by post-processing.

5) Details on request.

6) Accuracy is the degree of conformity of a measured quantity to its actual (true) value.

7) Precision, also called reproducibility or repeatability, is the degree to which further measurements show the same result.

8) One sigma @ 150 m range under RIEGL test conditions.

9) 0.12 mrad correspond to 12 mm increase of beam width per 100 m of range.

Scanner Performance

Scanning Mechanism

Vertical (Line) Scan

lightweight mirror

rotating / oscillating / step-by-step

total 60° (+30° / -30°)

100°/sec to 14,400°/sec (≥ 20 rotations/sec), full FOV

0.002° $\leq \Delta \theta \leq 0.280^\circ$ ¹¹⁾

between consecutive laser shots

better 0.0005° (1.8 arcsec)

integrated, for vertical scanner setup position, details see page 2

integrated, L1, with antenna

integrated, for vertical scanner setup position, details see page 2

integrated

integrated, for real-time synchronized time stamping of scan data

scanner rotation synchronization

providing digitized echo signal information for specific target echoes

Horizontal (Frame) Scan

rotating head

max. 360°

0°/sec to 60°/sec ¹⁰⁾

0.002° $\leq \Delta \phi \leq 3^\circ$ ¹¹⁾

between consecutive scan lines

better 0.0005° (1.8 arcsec)

integrated, details see page 2

Angle Measurement Resolution

Inclination Sensors

GNSS Receiver

Compass

Laser Plummet

Internal Sync Timer

Scan Sync (optional)

Waveform Data Output (optional)

10) Frame scan can be disabled, providing 2D scanner operation.

11) Selectable.

Communication

Interfaces

LAN port 10/100/1000 Mbit/sec in the base

integrated WLAN interface with high-gain antennas

connector for GPS antenna

2 connectors for external power supply

connector for external GNSS-timing signals

connector for external high-end GNSS receiver

internal 80 GByte SSD, external storage devices

(USB flash drives or external hard drives) via USB 2.0 interface

Scan Data Storage

General Technical Data

Power Supply Input Voltage

Current Consumption

Main Dimensions / Weight

Humidity

Protection Class

Temperature Range

11 - 32 V DC

typ. 75 W (max. 90 W)

236 x 226.5 x 450 mm (length x width x height), approx. 14.5 kg

max. 80 % non condensing @ +31°C

IP64, dust- and splash-proof

0°C up to +40°C (operation) / -10°C up to +50°C (storage)

Integrated Digital Camera

Display

field of view 7.2°x5.5° (v x h)

resolution 2560 x 1920 pixels (5 Mpixel), automatic exposure control

7" WVGA (800 x 480) color

capacitive touchscreen, full operation control for stand alone usage



RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 3580 Horn, Austria
Tel.: +43 2982 4211, Fax: +43 2982 4210, E-mail: office@riegl.co.at

RIEGL USA Inc., Orlando, Florida 32819, USA
Tel.: +1-407-248-9927, Fax: +1-407-248-2636, E-mail: info@rieglusa.com

RIEGL Japan Ltd., Tokyo 1640013, Japan
Tel.: +81-3-3382-7340, Fax: +81-3-3382-5843, E-mail: info@riegl-japan.co.jp

www.riegl.com

ANNEXE D

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE LEICA GEOSYSTEMS

Cette firme a été fondée en 1818, à Heerburg (Suisse) et a largement contribué à de nombreuses avancées technologiques dans le domaine de la mesure optique. Elle fabrique aujourd'hui un grand nombre de systèmes pour la topographie, la cartographie et le positionnement (Systèmes GNSS/GPS, Tachéomètres, stations totales, Scanners Lasers...). Elle compte environ 2500 employés directs de par le monde et possède une vingtaine de filiales. Ses principaux clients pour les dispositifs de laser scanning terrestres à longues portées sont majoritairement les exploitants de mine à ciel ouvert.

HDS8800

Complete Laser Scanning System
for Mine Surveying



- when it has to be **right**

Leica
Geosystems

HDS8800 Mine Scanning System

Laser scanner, Software and Support for Mine Surveying
... from the Global Leader in Laser Scanning Solutions

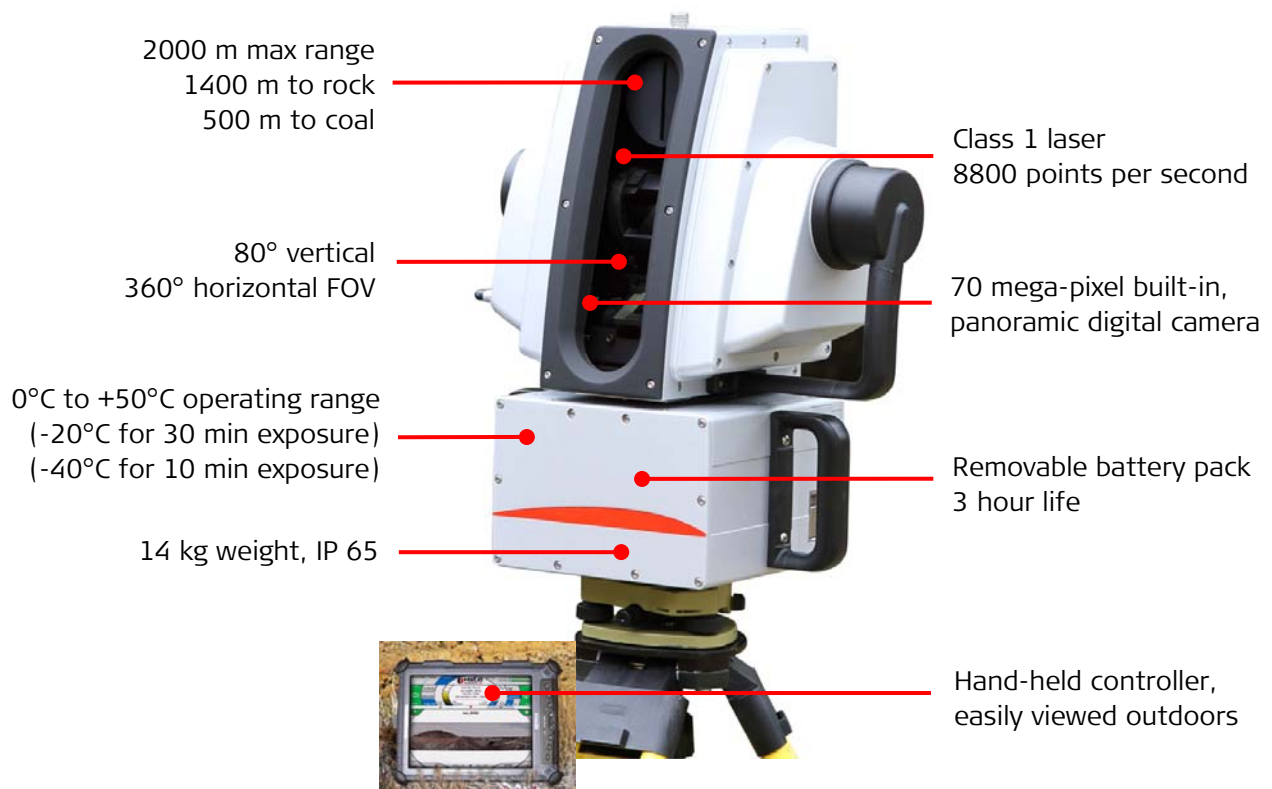
The HDS8800 mine scanning system offers all the benefits of laser scanning in a convenient, easy-to-learn and highly productive package. It's High-Definition Surveying™ (HDS™) for the mining industry.

- Faster
- Safer
- More accurate volumes and contours
- Less intrusive

A complete, integrated system

- ✓ Easy-to-use, highly productive laser scanner
- ✓ Easy-to-use, rugged field data collector
- ✓ Easy-to-learn office software specifically designed for mine surveyors
- ✓ Leica-quality training, support and warranty

Full photographic detail makes it easier and more efficient to analyze the mine scene. A high-resolution, panoramic camera image is taken while scanning and automatically rendered over the laser scan data. There is no separate camera, calibration or alignment.



Portable, surveyor-friendly instrument

- Fast, long range scanner
- Motorized backsight telescope
- Automatic, digital tilt compensation
- Embedded, high-resolution, panoramic, colour camera
- Removable, long-life battery

Use traditional survey workflows

- Standard instrument setup
- Stationing
- GPS data integration

Intuitive, Mining-Specific Software

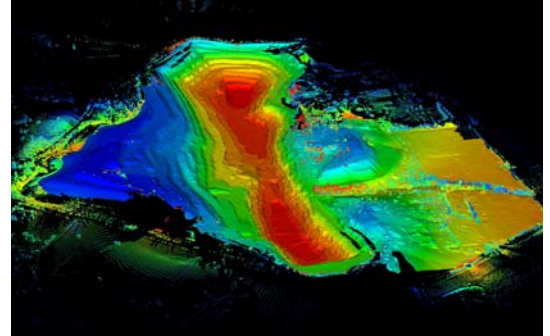
Key software features

Included with the system, the scanning and processing software features a complete set of tools for mining.

- Powerful 3D graphics interface
- Colour and intensity data display
- Windows™ style data browser
- Registration
- Modelling (2D, 3D)
- Exporting
- Volumes, surface calculations
- Contours
- Sections
- Face maps
- 3D scene models
- Building footprints and elevations

Use the stand-alone office software for

- Stockpile and excavation reconciliations
- Bucket, truck and shovel volumes
- Open pit and quarry surveys
- Tailings dam measurements
- Bulk material profiles within silos
- Geologic mapping



Unique Low Temperature Scanning Capability



The scanner is capable of operating at temperatures as low as -40 deg-C for short periods

- No special equipment or additional accessories required
- Maximum exposure times are as follows:
 - o -20 deg-C allows 30 mins scanning time
 - o -40 deg-C allows 10 mins scanning time
- Typical scan time is 10 mins
- This low temperature capability allows the scanner to function in even the most extreme locations

HDS8800 Vehicle System

Robust vehicle mounting system allows rapid deployment of the scanner to greatly increase productivity

- Data and power cables directly feed from vehicle to scanner
- Quick mounting and unmounting system without the need to reconnect cables
- Increased height improves line-of-sight over undulating ground
- Safer site survey practices
- Increased productivity for reduced field crews



World Class Leica Geosystems Training & Support

Leica Geosystems is one of the world's largest manufacturers and developers of surveying and measurement instruments and software. For 3D laser scanning, Leica Geosystems is by far the industry leader, with more scanners and software users than all other manufacturers combined.

One key reason for the popularity of Leica Geosystems products is our renowned global service, support, and training. Training, for example, includes both on-site and classroom training by industry experts. In addition, Leica Geosystems strong user community (thousands of laser scanning customers) provides an additional resource network for customers.

Key HDS8800 Performance Specifications

General			
Instrument type	Compact, pulsed, high-speed laser scanner with mining grade accuracy, range and field-of-view	Data transfer	Ethernet cable to rugged PC
User interface	External rugged tablet PC customised for use with system	Data storage	Rugged PC
Scanner drive	Servo motor	Compensator	Built-in tilt compensator 20" resolution
Data storage	External rugged PC	Level indicator	External bubble 30" divisions, 20' bubble
Camera	Integrated 70 mega pixel digital camera	Mounting	Tribrach
Laser Scanning System		Electrical	
Type	1545 nm Near-IR Pulse	Battery Type	Integrated NiMh rechargeable and removable
Laser class	1 (IEC 60825-1:2007)	Duration	3 hours
Range*	2.5 m -2000 m 1400 m to 80 % albedo (rock) 500 m to 10 % albedo (coal)	Environmental	
Scan rate	8,800 points per second	Operating temp.	0 °C to +50 °C -20 °C to +50 °C for 30 min exposure -40 °C to +50 °C for 10 min exposure
Divergence	+ 0.25 mrad	Protection class	IP 65 (IEC 60529)
Accuracy		Physical	
Range**	10 mm to 200 m 20 mm to 1000 m	Dimensions	455 x 246 x 378 mm
Angle	+/- 0.01 °	Weight	14 kg (without battery)
Repeatability**	8 mm	Field Computer (included) Software for Scanning and Post-Processing (included)	
Field-of-view		Scan Control, Registration, Modelling (2D, 3D), Exporting, Volumes, Surfaces, Contours, Sections, Face Maps, 3D Scene Models, Building Footprints and Elevations	
Horizontal	360 °	Ordering Information	
Vertical	80 °	Contact Leica Geosystems or authorized representatives	
Aiming/Sighting	Built-in, motorised telescope (14 x) Additional co-aligned 650 nm (red) laser pointer	* Values are average performance on sample surfaces, performance will vary depending on individual target surface characteristics ** Under laboratory conditions	

All specifications are subject to change without notice. Laser class 3R in accordance with IEC 60825-1 resp. EN 60825-1. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation. Other trademarks and trade names are those of their respective owners.

Illustrations, descriptions and technical specifications are not binding and may change. Copyright © Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, 2010

■ Authorized **Leica Geosystems** Distributor

Leica Geosystems AG
Heerbrugg, Switzerland
www.leica-geosystems.com

Leica Geosystems AG
Heerbrugg, Switzerland
www.leica-geosystems.com

- when it has to be **right**

Leica
Geosystems

ANNEXE E

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE OPTECH

Cette firme a été fondée en 1974 au Canada et est spécialisée dans la fabrication de systèmes de mesures basés sur la technologie laser (Lidar terrestre ou aéroporté, bathymétrie...). Les scanners laser terrestres longue portée proposés par cette firme sont aujourd'hui employés par de nombreux exploitants miniers, entreprises de travaux publics et organismes de recherche et/ou surveillance des risques géologiques.

Summary Specification Sheet

Key Features

- 10 kHz repetition rate
- High precision mode
- Rapid survey method
- Extended range mode

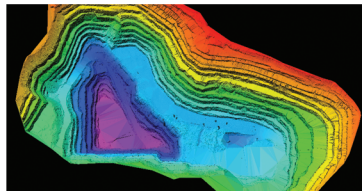
Benefits

- Fast data collection
- Improved accuracy
- Reduced processing time
- Long range scanning



Optech's ILRIS Terrestrial Laser Scanner is a fully portable, laser-based ranging and imaging system for the commercial survey, engineering, mining and industrial markets. A compact and highly integrated instrument with digital image capture and sophisticated software tools, ILRIS is an industry-leading solution that addresses the needs of commercial users.

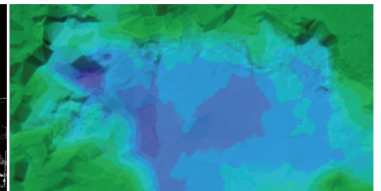
ILRIS



➤ Mining



➤ Civil Engineering



➤ Geological Survey



ILRIS Terrestrial Laser Scanner

Instrument Type: Dual-Mirror Pulsed Time of Flight

Parameter	ILRIS-3D	ILRIS-3D-ER	ILRIS-HD	ILRIS-HD-ER	ILRIS-LR
Range 80% reflectivity	1200 m	1700 m	1250 m	1800 m	3000 m
Range 10% reflectivity	400 m	650 m	400 m	650 m	1330 m
Minimum range	3 m				
Laser repetition rate (peak and effective PRF) ¹	2500 to 3500 Hz		10,000 Hz		10,000 Hz
Efficiency (effective PRF/peak PRF)	100%				
Raw range accuracy ^{2,3}	7 mm @ 100 m				
Raw range accuracy (averaged) ^{3,4}	n/a		4 mm @ 100 m		4 mm @ 100 m
Raw angular accuracy	8 mm @ 100 m (80 μrad)				
Scanner Performance					
Field of view	40° x 40° (-20° through 90°, -90° through 20° with 3 _D option)				
Minimum step size ⁵	0.001146° (20 μrad)		0.000745° (13 μrad)		0.001146° (20 μrad)
Maximum density (point-to-point spacing)	2 cm @ 1000 m		1.3 cm @ 1000 m		2 cm @ 1000 m
Rotational speed	0.001 to 20°/sec				
Rotational step size (minimum)	0.001146° (20 μrad)				
Beam diameter (1/e ²)	22 mm @ 100 m		19 mm @ 100 m		27 mm @ 100 m
Beam divergence	0.009740° (170 μrad)		0.008594° (150 μrad)		0.014324° (250 μrad)
Laser wavelength	1535 nm		1535 nm		1064 nm
Laser class ^{6,7}	1 or 1M		1 or 1M		3
Integrated camera	3.1 MP				
Physical and Environmental					
Size (L x W x H)	320 x 320 x 220 mm		320 x 320 x 240 mm		320 x 320 x 240 mm
Weight	13 kg		14 kg		14 kg
Operating temperature	0 to +40°C				
Storage temperature	-20°C to +50°C				
Relative humidity	0 – 95% non-condensing				
Power consumption	75 W				
Battery operation (standard battery pack, hot-swappable)	5 hours operation				
Data storage	Removable USB drive				
Optional Configuration					
3 _D	Automated pan/tilt base (7 kg)				
MC	Motion compensation option: Enables GPS timestamping (from INS system)				
Standard Accessories					
Scanner control software for Windows and Window CE-based computers		Data extraction software to generate user-selectable file formats			
Automated alignment software		2.0-GB USB memory drive			
User manuals		Universal AC voltage power supply			
Interconnect power/battery cables		Rugged carrying case			
Optional Accessories					
Manual pan/tilt base		GPS/external camera mounting kit			
PDA, UMPC, Notebook PCs		Batteries and chargers			
Backpack		Cold-weather jacket			

¹ PRF is pulse repetition frequency.

² All ranges quoted are with ER Mode enabled.

³ All accuracies are 1 sigma, as performed under Optech test conditions. Details available on request.

⁴ Average of 4 shots minimum.

⁵ Independent fully-selectable vertical and horizontal step size selection.

⁶ Laser class in accordance with IEC 60825-1 and US FDA 21 CFR 1040.

⁷ ILRIS-LR laser Class 3 when viewing between 0-114 m. Class 1M when viewing at ranges greater than 114 m.

Data output to a variety of user-selectable formats and XYZ coordinates, including return intensity and digital photograph.

User interface: PDA, UMPC, tablet or notebook via wired/wireless connection (802.11b/g).

Digital imaging: Internal 3.1-Megapixel camera with calibration file for creating true color RGB point clouds.

Display: On-board 6.5" VGA color LCD panel for image, system status, and data display.

Optech Incorporated

300 Interchange Way, Vaughan ON, Canada L4K 5Z8

Tel: +1 905 660 0808 Fax: +1 905 660 0829 www.optech.com

© Optech Incorporated. E&OE. Information subject to change without notice. Printed in Canada. 110901



ANNEXE F

TABLEAU COMPARATIF DES PROFILS DES ENTREPRISES

SOCIETE :	IDS	GRS	RIEGL	LEICA	OPTECH
FONDEE EN :	1980	1995	1978	1818	1974
NOMBRE D'EMPLOYES :	500	Moins de 20	Plusieurs centaines	2500	Inconnu
IMPLANTATION :	Mondiale	Locale	Mondiale	Mondiale	Mondiale
TYPE DE CLIENTELE :	Mines, Travaux Publics, Universités, Risques Géologiques	Mines, Universités, Risques Géologiques	Mines, Travaux Publics, Universités, Risques Géologiques	Mines	Mines, Travaux Publics, Universités, Risques Géologiques