



Cerema

Centre-Est

Rapport

Observation des glissements de terrain

Nouvelles technologies d'instrumentation à distance

Novembre 2016

C14TE0086-05

Rapport établi par : Mélanie PONCET

Vu et vérifié par Gilles Gauthier
Directeur du Département Laboratoire de Lyon

Date	Version	Commentaires
07/09/2016	V0	Rédigée par M. Poncet
23/09/2016	V1	Validée par J-P. Duranthon et M-A. Chanut
02/11/2016	V2	Validée par M. Feregotto et G. Rul

Récapitulatif de l'affaire

Client : Jean-Michel TANGUY
CGDD/DRI
Tour Séquoia
92055 La Défense Cedex

Objet de l'étude : Observation des glissements de terrain - Nouvelles technologies d'instrumentation à distance

Résumé de la commande : Rapport bibliographique concernant les nouvelles technologies et les récentes évolutions dans le domaine de l'instrumentation à distance des glissements de terrain.

Référence dossier : Affaire C14TE0086-05

Offre :

Accord client :

Communicabilité : Libre (avec acceptation préalable du commanditaire dans le contrat)
 Contrôlée (communiquée uniquement avec l'autorisation du commanditaire à posteriori)
 Confidentielle (non référencée dans IsaWeb)

Chargé d'affaire : Mélanie PONCET – Département Laboratoire de Lyon
Tél. 04 72 14 33 64 / Fax +33 (0)4 72 14 30 77
Courriel : melanie.poncet@cerema.fr

Constitution de l'équipe :

Mots Clés : Risques Naturels, Glissements de terrain, Instrumentation, Innovation, Télédétection, InSAR, Photogrammétrie, Lidar

ISRN :

Liste des destinataires

Contact	Adresse	Nombre - Type
Jean-Michel TANGUY	CGDD/DRI Tour Séquoia 92055 La Défense Cedex	1 ex papier 1 ex pdf

Conclusion – Résumé

Les techniques de télédétection appliquées à l'observation des glissements de terrain sont en fort développement et permettent d'avoir des précisions de mesure très importantes. Elles offrent des avantages par rapport aux techniques *in situ* mais présentent également des limites, pour certaines indépassables. Leur fort potentiel de développement devrait cependant amener à la démocratisation de leur utilisation pour le suivi des glissements de terrain, dans des objectifs tant de recherche qu'opérationnels.

Bron, le

Le Directeur du Département Laboratoire de Lyon

Gilles Gauthier

Directeur du Département Laboratoire de Lyon

Sommaire

Introduction - Généralités.....	5
1 – L’observation des glissements de terrain.....	6
2 – Spécificités de l’instrumentation à distance.....	9
Capteurs optiques passifs.....	11
1 - Présentation.....	11
2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques passifs à des fins de suivi.....	16
Capteurs optiques actifs.....	22
1 - Présentation.....	22
2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques actifs à des fins de suivi.....	25
Capteurs micro-ondes actifs.....	31
1 - Généralités.....	31
2 - Exploitation des données fournies par capteurs actifs micro-ondes à des fins de suivi.....	39
Conclusion – Perspectives.....	46
Défis et évolutions probables à court terme.....	46
Conclusion.....	48

Introduction - Généralités

Le domaine de l'instrumentation des glissements de terrain à distance est un champ en plein essor. L'ensemble des techniques se développe de manière rapide depuis le début des années 2000. Ces progrès sont liés à la conjugaison de plusieurs facteurs : développement des capacités des capteurs, développement des plateformes (satellites, drones), développement des moyens de traitement informatique des données.

Ce rapport a pour objet :

- de recenser les principales innovations récentes en matière d'instrumentation à distance des glissements de terrain,
- d'analyser succinctement ce qu'elles apportent ou peuvent apporter,
- de souligner leurs atouts et limites dans l'état actuel de leur développement,
- d'appréhender leur développement à court ou moyen terme.

Il fait suite au rapport « Observation des glissements de terrain – Nouvelles technologies d'instrumentation in situ » de mars 2015.

Après un bref rappel de définitions et des techniques usuelles d'instrumentation, ce rapport présente :

- les techniques utilisant des capteurs optiques passifs (photographie),
- les techniques utilisant des capteurs optiques actifs (laser),
- les techniques utilisant des capteurs micro-ondes actifs (radars).

Les technologies peuvent reposer parfois sur des principes physiques complexes. Elles sont présentées ici de manière succincte, afin d'être compréhensibles par des non-spécialistes. Pour compléter ou approfondir les connaissances, des références¹ – non exhaustives – sont citées en fin de chaque partie.

1 Un nombre important de références sont issues de publications dans le cadre du Service National d'Observation OMIV (Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versant)

1 – L’observation des glissements de terrain

Un rappel des définitions principales et de la terminologie utilisée est présenté dans cette partie. Pour plus de détails, se référer au rapport « Observation des glissements de terrain – Nouvelles technologies d’instrumentation *in situ* » de mars 2015 du Cerema Centre-Est.

Un glissement de terrain correspond au **déplacement d’une masse de terrains meubles ou rocheux le long d’une surface de rupture** (plane, circulaire ou quelconque).

1 – Finalités

L’observation des glissements a deux finalités :

- Une finalité scientifique : la **compréhension du phénomène**,
- Une finalité opérationnelle : la **gestion du risque**,
 - pour agir sur l’aléa (dimensionnement de parade),
 - pour agir sur l’enjeu (surveillance).

2 – Objectifs

L’observation des glissements s’organise en trois objectifs, qui peuvent être trois étapes dans le suivi d’un site instable :

1 – Analyser le contexte général du site

La première étape est l’analyse du contexte général - état des lieux des connaissances du site et de son environnement - pour obtenir une première image du site afin de choisir les moyens d’observation (techniques et humains) adaptés.

Cet état des lieux nécessite la collecte des données (géologie, climatologie, géomorphologie, historique du site, sites similaires, etc.), sur un secteur géographique plus large que le site seul.

2 – Obtenir une image du site à l’instant t

Un deuxième objectif est l’obtention d’une image du site, de son état à l’instant t. Cette étape doit être faite avant de commencer un suivi afin de qualifier l’état initial du site et d’obtenir les valeurs de référence. Cette investigation du glissement a pour but d’obtenir un **modèle géométrique, géologique, géotechnique et hydrogéologique du site**.

Moyens d’investigation des glissements de terrain (à un instant donné)	
En surface	Visite de terrain, télédétection, topographie
En profondeur	Reconnaissances géotechniques et géophysiques, instrumentation <i>in situ</i>
Des conditions hydrauliques	Reconnaissances géotechniques, géophysiques et hydrogéologiques, visites de terrain, instrumentation

1 – L’observation des glissements de terrain (suite)

2 – Objectifs (suite)

3 – Suivre l’évolution du site

Examen périodique du site et recueil de données qualitatives et quantitatives permettant d’apprécier son évolution. Il nécessite l’instrumentation du site ou son monitoring.

Le type d’instrumentation, la périodicité des relevés et les délais de transmission et d’interprétation des données sont spécifiques à chaque site et dépendent de l’objectif poursuivi.

Moyens de suivi des glissements de terrain (évolution dans le temps)	
En surface	Instrumentation in situ et instrumentation à distance (cf. 1.3.3), levés de terrain réguliers
En profondeur	Instrumentation géotechnique et instrumentation géophysique
Des conditions hydrauliques	Instrumentation géotechnique et instrumentation géophysique, levés de terrain réguliers, relevés météorologiques

Le monitoring d’un site peut aussi avoir une finalité de gestion du risque. On parle alors de système de surveillance. L’équipement instrumental est plus conséquent et s’accompagne souvent de systèmes de communication et d’alerte.

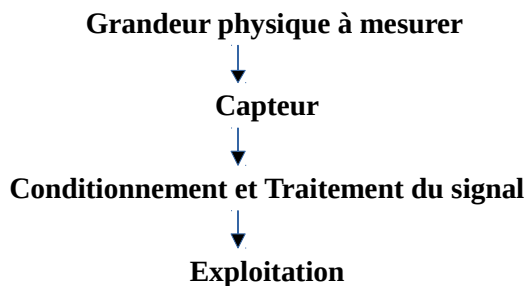
3 – L’instrumentation des glissements de terrain

L’instrumentation est la « **mise en place d’un équipement instrumental dans une structure de génie civil ou géologique en vue d’en connaître le comportement.** » (Larousse)

Pour les techniques d’instrumentation par télédétection, cependant, l’équipement instrumental n’est pas localisé dans la structure, mais à distance.

1 – Chaîne d’instrumentation

Le terme d’équipement instrumental comprend les capteurs mais également tous les dispositifs de gestion des données. On définit ainsi souvent une **chaîne d’instrumentation** constituée de :



La partie de conditionnement et de traitement du signal est particulièrement importante en télédétection, puisque la grandeur physique mesurée (onde) est de nature très différente de la grandeur physique recherchée (distance ou déplacement).

1 – L’observation des glissements de terrain (suite)

3 – L’instrumentation des glissements de terrain (suite)

2 – Familles d’instrumentation

Les techniques d’instrumentation sont couramment classées en **quatre grandes familles** :

- géodésie,
- géotechnique,
- télédétection,
- géophysique.

Pour un panorama des méthodes les plus usuelles dans ces familles, se référer au rapport 2015, pour un panorama complet aux rapports Safeland, ClimChAlp et Riskhydrogeo dont les références sont en fin de chapitre.

3 – Instrumentation *in situ*, instrumentation à distance

On différencie généralement l’instrumentation *in situ* de l’instrumentation à distance. Le présent rapport se focalise sur l’instrumentation à distance.

		Familles	Domaines
Instrumentation <i>in situ</i>	L’instrument de mesure est en contact direct avec le glissement, la mesure est généralement effectuée à l’endroit où se situe l’instrument	<ul style="list-style-type: none"> – Géotechnique – Géophysique – Géodésie (GPS) 	<ul style="list-style-type: none"> – Surface – Profondeur – Conditions hydrauliques
Instrumentation à distance	L’instrument de mesure est situé à distance du point mesuré	<ul style="list-style-type: none"> – Télédétection – Géodésie 	<ul style="list-style-type: none"> – Surface

La différenciation de ces deux catégories est pertinente du point de vue de la mise en place et de la gestion du matériel. L’installation de capteurs sur le site se heurte effectivement souvent à des considérations d’ordre pratique (sécurité et accessibilité du site, dégradations du matériel, autonomie énergétique, etc.)

2 – Spécificités de l'instrumentation à distance

1 – Définitions

Le terme anglophone correspondant est « **Remote sensing techniques** », littéralement « techniques de détection à distance » ou **télé-détection**.

Au sens large, cela inclut toute technique permettant de définir des caractéristiques de certains points du glissement à partir de mesures effectuées sans contact matériel avec ces points. Cela pourrait donc inclure certaines techniques géophysiques in situ.

Au sens restreint, que l'on retient ici, il s'agit de **mesures effectuées sans contact matériel avec le glissement dans son ensemble**.

De manière générale, les mesures effectuées sont des mesures d'une **onde électromagnétique** réfléchie (ou rétro-diffusée) par les points que l'on cherche à caractériser.

2 – Classification

Les techniques de télé-détection appliquées à l'instrumentation des glissements de terrain peuvent être classées selon différents paramètres :

1 – Méthodes actives / passives

Les méthodes passives sont celles qui mesurent les **ondes électromagnétiques naturellement émises** par le soleil et réfléchies par la surface terrestre. Il s'agit des longueurs d'onde qui ont la plus grande intensité dans le spectre solaire arrivant au niveau de la surface terrestre, c'est-à-dire du visible et du proche infra-rouge.

Les méthodes actives sont celles qui mesurent des **ondes électromagnétiques émises par un dispositif** et réfléchies par la surface terrestre (longueurs d'onde du visible, de l'infra-rouge, des micro-ondes).

3 – Autres classifications des méthodes

Les différentes méthodes, selon l'approche comparative choisie, peuvent être classées selon un ou plusieurs des critères suivants :

La longueur d'onde utilisée	Visible, Infrarouge, Radar
La plateforme	Terrestre, Aéroporté (avion, drone), Satellitaire
La grandeur physique mesurée	Distance, Coordonnées 3D, Rayonnement de la surface
Leur précision	Du mm au m
Leur résolution spatiale	Nombre de points au m ²
Leur résolution temporelle	De la seconde à l'année

3 – Paramètres mesurés

La télé-détection permet de caractériser le comportement de la **surface du glissement**, selon deux types d'informations :

- une information visuelle sur la **morphologie du glissement et son évolution dans le temps** (ouverture de fissures, apparition de bourrelets),
- une quantification de l'**amplitude**, de la **vitesse** et de la **direction** des **déplacements de surface**.

2 – Spécificités de l'instrumentation à distance (suite)

4 – Choix des méthodes d'instrumentation

Les techniques de télédétection appropriées à l'étude des mouvements de terrain sont nombreuses, mais le choix d'une ou plusieurs techniques d'instrumentation appropriée à un glissement en particulier va dépendre :

- des conditions de site (exposition, nature de la surface),
- de la taille et de la vitesse du glissement,
- de l'objectif de l'instrumentation (suivi scientifique ou opérationnel) et de la précision des mesures attendue.

Il faut cependant voir que les recommandations qui sont valables aujourd'hui peuvent changer en raison de l'évolution rapide des techniques, de la disponibilité croissante des données et de la diminution de leur temps de traitement.

5 – Références

Michoud, C., Abellán, A., Derron, M. H., & Jaboyedoff, M. (2010). *SafeLand Deliverable D4.1: review of techniques for landslide detection, fast characterization, rapid mapping and long-term monitoring*.

Settles, E., Göttle, A., & Von Poschinger, A. (2008). *Slope monitoring methods-a state of the art report*. ClimChalp, Interreg III B Alpine Space, Work package 6.

Dans la suite du rapport, les différentes méthodes sont présentées selon :

Emission de l'onde	Longueur d'onde	Méthodes
Méthodes passives	Optique	Corrélation d'images terrestres
		Corrélation d'images aériennes
		Corrélation d'images satellites
		Photogrammétrie terrestre
		Photogrammétrie aérienne
		Photogrammétrie satellite
Méthodes actives	Optique	Stations totales
		Scanner laser terrestre
		Scanner laser aéroporté
	Micro-ondes	Interférométrie radar satellitaire
		Corrélation d'images radar satellitaires
		Interférométrie radar terrestre
		Distancemètre radar terrestre

Capteurs optiques passifs

1 - Présentation

1 – Image optique en télédétection

Les images optiques (satellites, aériennes ou terrestres) sont utilisées depuis longtemps dans le domaine des mouvements de terrain. Elles permettent de décrire un glissement et son **évolution morphologique** au cours du temps, de manière qualitative. L'utilisation de la vision en trois dimensions par les méthodes stéréographiques est fréquente.

L'utilisation des images optiques de manière quantitative pour la **mesure des déplacements, déformations ou vitesses** est en revanche plus récente.

1 - Capteurs optiques

Les capteurs optiques classiques mesurent des bandes de fréquence dans le **visible**, parfois des bandes dans le **proche infrarouge**.

L'avantage principal des méthodes passives est l'absence d'un dispositif d'émission des ondes, et donc la **miniaturisation** possible des instruments. Ces capteurs sont ainsi adaptés à tout type de plateforme.

Un élément important également est l'apport des couleurs pour l'interprétation géologique ou géomorphologiques, comparativement aux méthodes laser (nuages de points) ou radar.

2 – Conditions météo

L'inconvénient principal de l'ensemble de ces capteurs est l'**absence de mesure en conditions météorologiques dégradées** (nuages, pluie, brouillard) **ou avec une luminosité trop faible** (nuit), et ce quelle que soit le type de plateforme (terrestre, aéroportée ou satellitaire). La fréquence possible d'acquisition d'images exploitables est ainsi diminuée d'autant. Cette fréquence insuffisante est d'autant plus problématique pour les techniques utilisant les images satellitaires, puisque les prises de vues peuvent plus difficilement être programmées.

Or, sous les latitudes européennes, l'occurrence de la plupart des glissements de terrain est souvent liée à la pluviométrie, en particulier aux événements se produisant en fin d'automne ou au début du printemps quand les sols sont saturés, c'est-à-dire lorsque les jours sont plus courts et les conditions météorologiques dégradées.

Cette limite intrinsèque des méthodes optiques passives n'est pas dépassable par de futurs progrès technologiques. Ces méthodes ne peuvent donc pas constituer le cœur d'un dispositif de surveillance optimal, même si elles peuvent être parfois suffisantes, selon l'objectif fixé.

3 – Images numériques et numérisation

Les images utilisées actuellement sont quasiment toutes des images numériques et leur qualité rejoint aujourd'hui la qualité des images analogiques.

Les images analogiques représentent cependant l'ensemble des **photographies historiques**, en particulier aériennes. Leur utilisation est fréquente pour une analyse des glissements sur une grande échelle de temps. Elles nécessitent d'être numérisées avec des scanners de grande qualité, afin de pouvoir être comparées aux images numériques de campagnes récentes par des méthodes de traitement informatiques.

En France, les images issues des campagnes photographiques analogiques réalisées par l'IGN avant 2005 font l'objet d'une numérisation avec une résolution de 50 cm (1 pixel correspond à 0,5 m).

1 - Présentation (suite)

1 – Image optique en télédétection (suite)

4 - Correction géométrique Les images nécessitent une correction géométrique afin de pouvoir être rapportées à un **système de coordonnées**. Pour les images satellitaires ou aériennes classiques (avion), cette correction est généralement réalisée par les fournisseurs des données.

Pour les images prises depuis le sol ou depuis basse altitude (drones), en particulier avec des appareils photo « du commerce » (non métriques), la correction est à réaliser par l'opérateur. Les auto-calibrages des appareils semblent cependant suffisants pour obtenir la précision souhaitée.

5 - Orthorectification Les images doivent être ortho rectifiées, en particulier lorsqu'elles ne sont pas prises de manière verticale par rapport au point considéré.

Cette correction peut être réalisée grâce à des solutions généralistes, avec une précision de l'ordre du mètre. Pour les finalités d'instrumentation et de suivi d'un glissement, cette précision est souvent insuffisante. Il faut alors réaliser un **modèle numérique de terrain (MNT) de haute résolution**.

Théoriquement, pour obtenir des valeurs de déplacement les plus proches de la réalité, il faudrait un MNT réalisé au moment de chaque prise de vue, mais cela est rarement possible.

6 - Vidéos L'utilisation de la vidéo comme méthode d'instrumentation est également en développement. Cependant, compte tenu des vitesses de mouvement concernées, elle s'applique plutôt aux mouvements de type éboulement et coulées boueuses et dans une finalité de compréhension du phénomène (qualitatif) plutôt que de mesure (quantitatif).

1 - Présentation (suite)

2 - Plateformes

Les images utilisées en télédétection peuvent être prises depuis des plateformes satellite, aérienne ou terrestre.

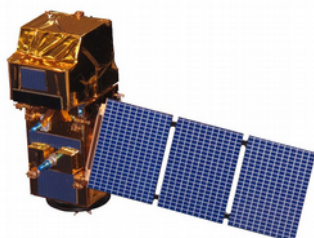
Satellitaire Les satellites d'observation de la Terre fournissant des images optiques sont très nombreux. Tous les satellites ne sont pas équivalents : ils diffèrent par leur résolution, leur période de revisite, les bandes spectrales utilisées (du visible à l'infrarouge), etc. La liste suivante présente ceux dont les données sont le plus fréquemment utilisées.

Organisme	Satellites	Depuis	Résolution
CNES (FR)	SPOT 1-4	1986	10 m
	SPOT 5	2002	2,5 m
	SPOT 6-7	2012	1,5 m
	Pléiades (1A et 1B)	2012	0,5 m
ESA (UE)	Sentinel 2	2015	10 m
DigitalGlobe (US)	Quickbird (2)	2001	0,65 m
	Geoeye (1)	2009	0,4-0,5 m
	Worldview (1, 2 et 3)	2007	0,5 m
NASA/USGS (US)	Landsat (8)	2013	15 m

La France, via le CNES, possède une grande quantité de satellites optiques d'observation. Les satellites de la constellation **Pléiades permettent d'obtenir des images de haute résolution (0,5 m)**, tandis que ceux de la constellation **SPOT permettent de remonter jusqu'en 1986**.

Actuellement, un projet Equipex² en cours, **Geosud**³, « vise à développer une infrastructure nationale de données satellitaires accessible gratuitement par la communauté scientifique et les acteurs publics ». Coordonné par l'Irstea, il permet aux acteurs publics d'avoir **accès gratuitement à certaines images** satellites et facilite leur utilisation.

Il est également à noter que les données de l'ESA issues des satellites Sentinel sont gratuites (résolution de 10 m).



Satellite Sentinel-2
Source : Wikimedia Commons

² Programme de recherche faisant partie des « Investissements d'Avenir », destiné à financer en France des équipements scientifiques de qualité, conformes aux standards internationaux.

³ <http://ids.equipex-geosud.fr/>

1 - Présentation (suite)

2 - Plateformes (suite)

Aérienne Les prises de vue aériennes par avion ont fait l'objet de campagnes systématiques en France depuis la seconde guerre mondiale. L'avantage de ces photographies réside dans :

- leur prise de vue : les images sont prises orthogonalement au sol, géoréférencées, par couples stéréographiques,
- l'existence d'archives, parfois depuis les années 40.

En revanche, l'échelle temporelle et spatiale de ces campagnes est insuffisante pour leur utilisation en surveillance. La réalisation de **campagnes spécifiques** à un glissement est possible, mais le coût financier est souvent prohibitif.



Drone OktoKopter équipé d'un appareil photographique

Source : Wikimedia Commons

Pour remédier à ce problème, l'**utilisation de drones** (ou UAV pour Unmanned Aerial Vehicle) est de plus en plus fréquente. Ceux-ci permettent de choisir l'angle ou la distance de prise de vue. Ils se heurtent cependant à des difficultés dans la **correction de la position du drone**, d'autant plus que leur trajectoire est souvent plus erratique que celle d'un avion.

La question des autorisations de vol de ces appareils est également un point non négligeable, en particulier en France où la législation est assez restrictive.

1 - Présentation (suite)

2 - Plateformes (suite)

Terrestre Les images optiques terrestres sont le plus souvent prises avec des appareils photo du commerce de bonne qualité.

Généralement, afin d'éviter trop de traitement de données, l'**appareil est fixé sur un socle**, dans une zone stable, protégée et avec une vue sur le glissement.

Ces conditions sont cependant difficiles à remplir pour tous les sites instables. Les prises de vues successives peuvent alors être effectuées d'un endroit différent, mais cela diminue de manière assez importante la précision des mesures réalisées par la suite.



Appareil photographique à demeure en face du glissement de Super Sauze (Traveletti et al., 2012)

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques passifs à des fins de suivi

Les méthodes de suivi des glissements par capteurs optiques passifs sont de deux sortes :

- la **corrélation d'images**, qui est un traitement en 2D de l'image,
- la **photogrammétrie**, qui permet de reconstruire des modèles 3D du terrain.

1 – Corrélation d'images

La corrélation d'images numériques ou Digital Image Correlation (DIC) est une méthode optique qui permet de mesurer les déplacements entre deux images dans le plan de l'image.

1 - Principe général

La corrélation d'images numériques est une méthode couramment utilisée dans la science des matériaux pour mesurer les déformations d'échantillons en laboratoire. Elle permet d'obtenir les **déplacements en deux dimensions**.

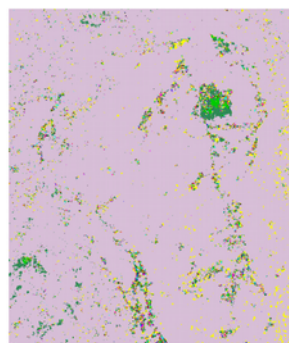
Pour la télédétection, les algorithmes utilisés permettent d'obtenir un champ de déplacement continu sur l'ensemble de la surface considérée en 2D. Une projection sur la surface topographique peut permettre de retrouver les déplacements en 3 dimensions.

Les images source peuvent être issues de toutes les plateformes : satellitaire, aéroporté ou terrestre. Pour une utilisation en surveillance des glissements à partir d'images satellitaires, une **résolution minimale de 2,5 m** est nécessaire.

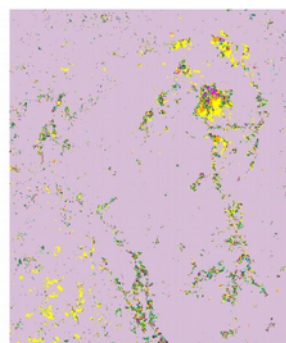
Il existe différents algorithmes de corrélation d'images, plus ou moins précis. Cependant, l'influence de la qualité (résolution et précision) des données de base est bien plus importante que l'algorithme choisi. Ces algorithmes de corrélation permettent d'avoir une **précision de mesure d'environ 1/5^e de pixel** (« corrélation sous-pixel »).

La présence de végétation ou la modification de l'apparence du glissement peut créer des problèmes de **décorrélation entre images**. Ces techniques restent cependant moins sensibles que les méthodes par interférométrie radar (InSAR) et permettent de réaliser des mesures de déplacements plus importants.

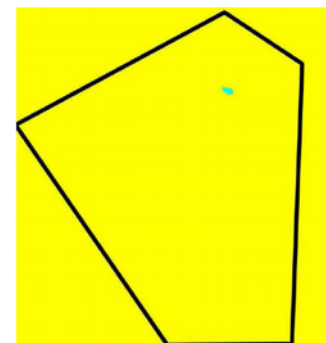
Pour l'obtention des déplacements en 3 dimensions, la **qualité du MNT** utilisé et sa contemporanéité de la prise d'images sont également de grande importance pour la précision des mesures fournies. Ces MNT peuvent être issus de techniques de photogrammétrie ou de relevés Lidar.



Mouvements horizontaux



Mouvements verticaux



Déplacements totaux > 50 cm

Corrélation d'images terrestres sur le site du versant instable de Séchilienne (38) ayant permis de détecter la zone de départ d'un éboulement (16-20 juillet 2011)

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques passifs à des fins de suivi (suite)

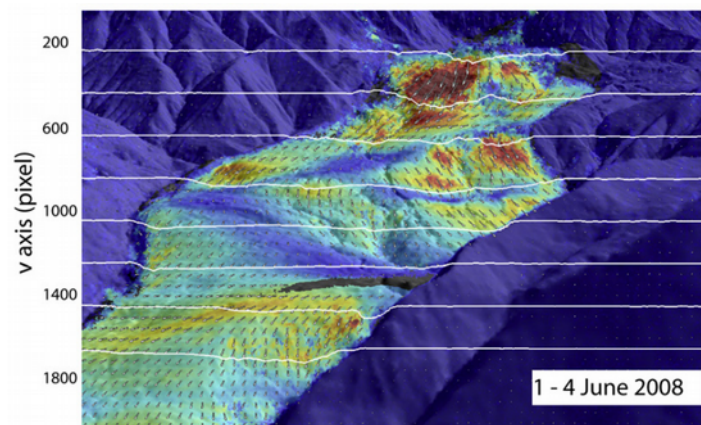
1 – Corrélation d'images (suite)

2 – Corrélation d'images terrestres

La corrélation d'images terrestres est effectuée à partir de photographies numériques prises par un appareil du commerce placé à demeure, fixé et protégé. La similarité de l'angle de vue est en effet très importante pour éviter des phénomènes de décorrélation (Travelletti et al., 2012).

Les avantages principaux de cette méthode sont son coût faible et la forte résolution temporelle possible (jusqu'à 24 images par secondes).

Ses inconvénients principaux, en plus de ceux inhérents aux images du visible, sont l'absence d'algorithmes de traitement simples et la difficulté à trouver un point de vue sur le glissement suffisamment proche et dégagé. La suppression des images prises en conditions dégradées et donc non exploitables doit le plus souvent être faite ou contrôlée manuellement.



Champ de déplacement du glissement de Super Sauze (04) obtenu par corrélation d'images terrestres (Travelletti et al., 2012)

3 - Corrélation d'images aériennes

La corrélation d'images aériennes peut être effectuée à partir des images aériennes historiques, permettant de retrouver l'historique du glissement. Cependant, compte tenu des différences entre les différents jeux de données, l'automatisation est très complexe car elle nécessite d'effectuer *a minima* un contrôle visuel, voire un pré-traitement manuel des images en sélectionnant les points de contrôle.

Compte tenu des coûts, il est impossible d'effectuer une surveillance de glissement par des campagnes successives de photographies aériennes.

Une alternative consiste à utiliser les drones (Lucieer et al., 2014). Il est alors nécessaire de constituer des orthomosaiques à partir des différentes prises de vues. Si les prises de vue ne sont pas faites depuis le même point, un traitement 3D (photogrammétrie) est nécessaire, avant de pouvoir extraire une image 2D orthogonale. Il y a donc de forts risques de perte d'information lors de ces traitements successifs.

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques passifs à des fins de suivi (suite)

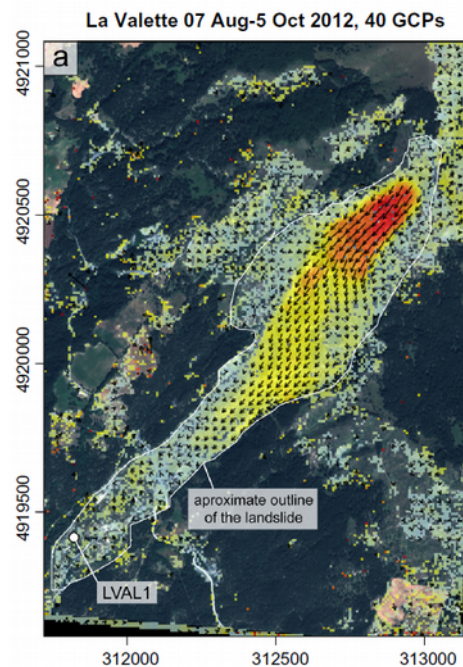
1 – Corrélation d'images (suite)

4 - Corrélation d'images satellitaires

La corrélation d'images satellitaires est utilisée pour la cartographie de l'aléa, étant donné les échelles des images, mais assez peu en instrumentation et surveillance des glissements.

Les raisons sont principalement liées aux données (accès, taille des fichiers, absence d'algorithmes). De plus, la résolution et le temps de revisite des satellites ne permet pas forcément d'avoir les données adaptées à la mesure des déplacements sur tout type de glissement.

L'utilisation des images Pléiades de grande résolution permettrait d'avoir une précision de l'ordre de 0,13 m sur les déplacements (Stumpf et al., 2014).



Champ de déplacement du glissement de La Valette (04) obtenu par corrélation d'images Pléiades (Stumpf et al., 2014)

5 - Références

Travelletti, J., Delacourt, C., Allemand, P., Malet, J. P., Schmittbuhl, J., Toussaint, R., & Bastard, M. (2012). *Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslide monitoring: Application, potential and limitations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 70, 39-55.

Lucieer, A., De Jong, S.M., & Turner, D. (2014). *Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography*. Progress in Physical Geography, 38(1), 97-116,

Stumpf, A., Malet, J. P., Allemand, P., & Ulrich, P. (2014). *Surface reconstruction and landslide displacement measurements with Pléiades satellite images*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 95, 1-12.

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques passifs à des fins de suivi (suite)

2 - Photogrammétrie La photogrammétrie consiste en la génération d'un nuage de points 3D de la surface étudiée, à deux moments donnés, et leur comparaison entre eux.

1 – Principe Les MNT sont obtenus par l'utilisation d'au minimum deux images du même site, avec des angles de prise de vue différents mais convergeant vers l'objet étudié, prises lors de la même campagne photographique. L'origine de ces images peut être satellite, aérienne ou terrestre.

Les MNT construits par photogrammétrie peuvent servir pour la correction altimétrique des méthodes de corrélation d'images, mais également directement par leur comparaison l'un à l'autre.

La construction des modèles 3D se fait par :

- **stéréoscopie** : utilisation de deux images de la même scène, prises au même moment, où le capteur est légèrement décalé (images satellitaires et aériennes),
- structure basée sur le mouvement ou **SFM** (Structure From Motion) : utilisation d'une séquence d'images prise par un capteur en mouvement (images prises par des drones, images terrestres).

La précision du nuage de points est liée au nombre de photographies exploitées et à leur résolution.

Plusieurs logiciels sont disponibles pour le traitement photogrammétrique. Le logiciel open source **MicMac de l'IGN**, fréquemment utilisé, permet d'avoir une bonne précision, mais l'automatisation du traitement n'est pas aisée. Une **interface graphique** du logiciel a été récemment développée par le Cerema Normandie-Centre.

Afin de pouvoir comparer les images entre elles pour une vision 3D, des **points de contrôle au sol** (PCS ou GCP pour Ground Control Points) sont nécessaires. Il s'agit de traces, la plupart du temps en forme de croix, disposées sur le sol. Il est complexe d'obtenir un MNT bien géoréférencé à partir de techniques photogrammétriques si ces cibles ne sont pas en place.

La comparaison de deux MNT réalisés à partir de photographies prises à des dates différentes permet d'obtenir des informations sur le mouvement : approche des **déplacements** et calcul des **volumes déplacés**. La technique de comparaison des nuages de points est identique à celle utilisée avec des données Lidar.

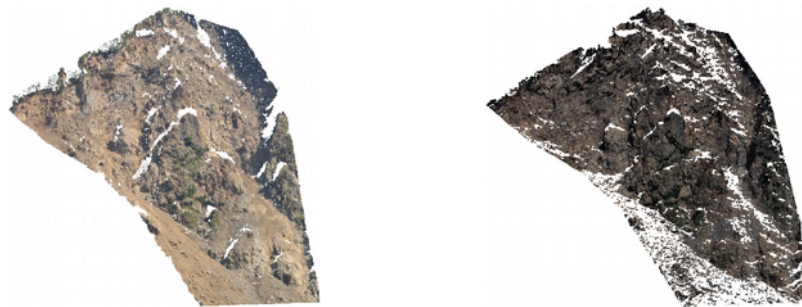
2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques passifs à des fins de suivi (suite)

2 - Photogrammétrie (suite)

2 – Photogrammétrie à partir d'images terrestres

Les techniques de construction de modèles 3D à partir d'images terrestres nécessitent de trouver les bons points de vue afin d'obtenir un nuage de points assez dense.

Des résultats récents montrent qu'il est possible d'obtenir des **précisions proches des nuages de points obtenus par scanner laser terrestre**, et pour un coût bien moindre.

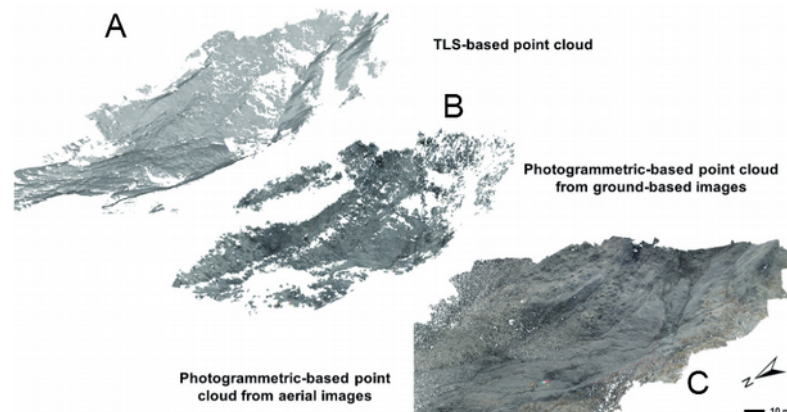


Nuages de points obtenus par photogrammétrie terrestre sur leversant instable de Séchillienne (38) en Juillet 2014 et Juin 2015 (Cerema Centre-Est)

3 – Photogrammétrie à partir d'images aériennes

Les campagnes d'images aériennes par avion sont, pour la plupart, réalisées de manière à pouvoir effectuer un traitement stéréoscopique. Les progrès informatiques récents permettent d'effectuer ces reconstructions 3D facilement, avec une précision de l'ordre du décimètre. Comme pour les autres applications, l'espacement temporel des campagnes ou le coût prohibitif de campagnes spécifiques, ne permet pas d'utiliser cette source pour la surveillance de sites. En plus des corrections identiques aux images terrestres, les images aériennes nécessitent une correction atmosphérique.

L'utilisation des **drones** est de plus en plus plébiscitée, car elle permet de composer des MNT d'une précision pouvant atteindre 10-15 cm (Turner et al., 2012). D'autre part, des logiciels open source facile d'utilisation se développent et devraient permettre dans les prochaines années l'automatisation du traitement.



Nuages de point obtenus par Lidar terrestre(A), Photogrammétrie terrestre (B) et Photogrammétrie aérienne par drone (C) sur le glissement de Super Sauze (Rothmund, 2013)

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques passifs à des fins de suivi (suite)

2 - Photogrammétrie (suite)

4 – Photogrammétrie à partir d'images satellites

Comme pour les techniques de corrélation d'images, l'utilisation d'images satellites en photogrammétrie pour la surveillance des glissements est peu développée, puisqu'elle est limitée aux satellites possédant une résolution suffisamment élevée comme les satellites Pléiades.

Leur application est plutôt dans le domaine de la cartographie de l'aléa, par la détection à grande échelle de zones potentiellement en mouvement.

5 - Références

Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2012). *An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds*. *Remote Sensing*, 4(5), 1392-1410.

Stumpf, A., Malet, J. P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, M., & Skupinski, G. (2015). *Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion*. *Geomorphology*, 231, 130-145.

Turner, D., Lucieer, A., & de Jong, S. M. (2015). *Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV)*. *Remote Sensing*, 7(2), 1736-1757.

Niethammer, U., Rothmund, S., Schwaderer, U., Zeman, J., & Joswig, M. (2011). *Open source image-processing tools for low-cost UAV-based landslide investigations*. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38(1), C22.

Niethammer, U., James, M. R., Rothmund, S., Travelletti, J., & Joswig, M. (2012). *UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results*. *Engineering Geology*, 128, 2-11.

Rothmund, S., Niethammer, U., Walter, M., & Joswig, M. (2013, April). *Comparison of DSMs acquired by terrestrial laser scanning, UAV-based aerial images and ground-based optical images at the Super-Sauze landslide*. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 15, p. 11358).

3 - Conclusion

Les capteurs optiques passifs, quelles que soient leurs plateformes, fournissent des informations visuelles de type photographique. Ces données sont riches en informations, d'autant plus qu'elles sont lisibles directement par l'œil de l'observateur.

Des techniques de traitement de l'image 2D ou 3D permettent d'approcher les déplacements à la surface des glissements. Malgré certains manques, en particulier dans l'automatisation du traitement, ces méthodes sont prometteuses, car les appareils sont de moins en moins chers, et faciles à mettre en œuvre. Elles donnent des précisions satisfaisantes, y compris en 3 dimensions.

Ces méthodes peuvent être utilisées par exemple pour identifier des zones de comportements différents au sein d'un même glissement et ainsi mieux dimensionner l'instrumentation à mettre en œuvre par la suite.

L'inconvénient principal réside dans l'absence de mesure ou d'observations lors de conditions météorologiques dégradées.

Capteurs optiques actifs

1 - Présentation

On appelle capteurs optiques actifs des **appareils de mesure émettant et recevant des ondes du visible ou du proche infrarouge**.

Deux types d'appareils utilisent ces capteurs :

- les **stations totales**,
- les **scanner laser**.

1 – Stations totales

Les **stations totales automatiques** sont généralement désignées par les sigles RTS (Robotic Total Stations), ATS (Automated Total Station) ou AMTS (Automated Motorized Total Station).

1 - Fonctionnement

Il s'agit de tachéomètres automatiques, c'est-à-dire d'appareils de mesure constitués, au minimum, d'un **théodolite** et d'un **distancemètre** qui fonctionnent de manière continue et automatisée.

Le fonctionnement de ces appareils nécessite le plus souvent des cibles installées sur le terrain (**prismes**).

Le théodolite et le distancemètre sont électroniques et utilisent des longueurs d'onde du visible ou de l'infrarouge. Ils mesurent **trois paramètres** pour chaque point de visée (prisme) :

- un angle vertical,
- un angle horizontal,
- une distance.



Station totale de surveillance dans une mine (Indonésie)

Source : Wikimedia Commons

1 - Présentation (suite)

1 – Stations totales (suite)

2 – Matériels récents Les versions les plus récentes de stations totales, les **IATS** (Image Assisted Total Stations) contiennent en plus un **appareil photo** et parfois une fonction **scan laser**.

L'utilisation de l'image permet de réaliser des mesures sur des cibles autres que les prismes (Reflectorless Robotic Total Station). La portée est cependant moindre qu'avec l'utilisation de cibles et les réflecteurs naturels doivent être suffisamment puissants, ponctuels et permanents.

Le scan laser de ces appareils est bien moins développé que ceux des TLS. Sa vitesse d'acquisition en particulier, est beaucoup plus lente.

Les logiciels fournis avec les appareils permettent d'exploiter l'ensemble des données, mais pas encore de manière optimale.

En surveillance, ces appareils sont utilisés pour le suivi d'affaissements en zone urbaine lors de travaux. Des développements sont attendus et la recherche est en cours sur le sujet, y compris pour des applications en milieu non anthropisé (Wagner, 2016 ; Wagner et al., 2016).



IATS existantes : a) Topcon IS-3 ; b) Trimble S9 ; c) Pentax Visio ; d) Leica Nova
de Wagner et al. (2016)

1 - Présentation (suite)

2 – Scanner laser

Les scanner laser (ou **LiDAR**) permettent de construire des modèles numériques de terrain de l'ensemble de la surface et sont différenciés en scanner laser terrestre (TLS) et scanner laser aéroporté (ALS).

Le terme **lidar** (Light Detection And Ranging) est composé par similarité avec le terme radar (Radio Detection And Ranging). Contrairement au radar, les longueurs d'ondes utilisées sont de l'ordre du visible, du proche infra-rouge ou de l'ultraviolet, comprises entre 500 et 1550 nm.

Le scanner laser émet une onde lumineuse qui éclaire le sol en un point. Il mesure le temps mis par l'onde pour être rétro-diffusée. **Le temps est converti en une distance** entre le scanner et un point de la zone auscultée.

Ces appareils sont capables de mesurer très rapidement une grande surface et fournissent en sortie un nuage de points 3D, convertible en un modèle numérique de terrain précis. La précision de celui-ci est cependant dépendante de la distance de l'appareil, des conditions atmosphériques, de la présence ou non de végétation, etc.



Lidar Yellowscan porté par un drone OnyxStar

Source : Wikimedia Commons



Lidar terrestre de marque Leica

Source : Wikimedia Commons

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques actifs à des fins de suivi

1 – Stations totales

Les stations totales automatiques mesurent précisément la position de prismes installés sur le site instable. Ce sont des appareils fréquemment mis en place pour la surveillance de glissements.

1 - Principe La comparaison des positions des prismes à différents moments donne le **déplacement relatif** des objets naturels desquels ils sont solidaires. Pour obtenir la déformation superficielle absolue, il y a donc besoin d'installer des prismes sur une **zone stable**.

La mesure est **continue** (24/7) et elle peut être réalisée à une **fréquence élevée** si nécessaire. La fréquence est limitée par le nombre de prismes et l'alimentation électrique disponible.

La distance station-prisme maximale est de **1-2 km** généralement. Certaines données constructeur indiquent jusqu'à 5 km. Ces valeurs sont valables pour une mesure par temps clair et permettent d'avoir une exactitude de mesure de l'ordre du **centimètre**.

2 - Applications

Les stations totales sont **rarement utilisées seules** pour la surveillance de glissements de terrain. Une surveillance des déformations basée uniquement sur cet outil peut toutefois être mise en place dans des cadres géotechniques, de façon temporaire, lorsque les enjeux sont forts, que des mesures très précises sont nécessaires, et que le site est adapté. Ce peut être le cas lorsqu'un phénomène naturel affecte des infrastructures sensibles. Ce type de surveillance a par exemple été mise en place après le séisme de l'Aquila pour le suivi des déformations post-rupture affectant un réseau d'eau potable (Manconi et al., 2012).

Les stations totales ne permettent pas (encore) d'avoir une information sur les déplacements de l'ensemble de la surface d'un glissement, mais seulement des prismes. Pour cette raison, elles sont souvent **couplées avec d'autres techniques d'instrumentation à distance**.

Elles peuvent être couplées avec du LiDAR (Corsini et al., 2013) ou du radar terrestre (Castagnetti et al., 2013). Cependant, il est impossible d'identifier le « centre » du prisme, celui mesuré par la station totale, avec les méthodes laser et radar. En effet, l'ensemble du prisme forme un nuage de points de grande réflectivité. Par conséquent le recoupement des méthodes est impossible et la mesure par station totale permet principalement la validation des zones stables pour le **calage des modèles**.

3 - Atouts

L'atout principal des stations totales est leur exactitude. Il est possible d'atteindre une **mesure de la déformation en trois dimensions au millimètre près**. Théoriquement, l'exactitude peut atteindre $\pm 0,5$ mm en positionnement (± 1 mm dans le cas général) et $\pm 0,3$ mm en position relative des réflecteurs. L'exactitude de mesure dépend en particulier de la distance entre l'appareil et le prisme.

Les stations totales nécessitent peu d'entretien et ont un coût raisonnable (5-10 k€).

Comme leur nom l'indique elles sont par nature automatiques et donc conçues pour la surveillance, y compris en **temps réel**, et intégrable à un système d'alerte. Dans ce cas elles doivent cependant être couplées à des méthodes fonctionnant également par temps dégradé.

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques actifs à des fins de suivi (suite)

1 – Stations totales (suite)

4 - Limites Les limitations des stations totales sont liées à :

- **La géométrie et la topographie du site** : l'appareil doit pouvoir être positionné pour avoir une vue directe de l'ensemble du site, à une distance si possible inférieure à 1 km (maximum 2 km).
- **Les conditions atmosphériques** : la mesure peut être impossible ou perdre grandement en exactitude en cas de trop fortes perturbations (nuages, pollution, pluie, neige, etc).
- **La connaissance du glissement** : afin d'atteindre une bonne précision, l'instrument de mesure et certains des prismes doivent être installés sur des zones stables, identifiées au préalable.
- **L'accessibilité à l'instrument de mesure** : le site d'installation de la station totale doit être accessible et protégé de tout type de dégradations.
- **L'accessibilité au glissement** : des prismes doivent pouvoir être installés au sein du glissement.
- **Le couplage cible/terrain** : cela pose peu de problème pour les mouvements de type rocheux, ou si des éléments rigides (bâtiments) sont présents sur le glissement, dans le cas contraire un système adapté de fixation des prismes au terrain doit être dimensionné.
- **Résolution spatiale** : le nombre de point de mesure est limité au nombre de prismes qui peuvent être mis en place, c'est une instrumentation ponctuelle.

6 - Références Castagnetti, C., Bertacchini, E., Corsini, A., & Capra, A. (2013). *Multi-sensors integrated system for landslide monitoring: critical issues in system setup and data management*. European journal of remote sensing, 46, 104-124.

Corsini, A., Castagnetti, C., Bertacchini, E., Rivola, R., Ronchetti, F., & Capra, A. (2013). *Integrating airborne and multi-temporal long-range terrestrial laser scanning with total station measurements for mapping and monitoring a compound slow moving rock slide*. Earth surface processes and landforms, 38(11), 1330-1338.

Manconi, A., Giordan, D., Allasia, P., Baldo, M., & Lollino, G. (2012). *Surface displacements following the Mw 6.3 L'Aquila earthquake: One year of continuous monitoring via Robotized Total Station*. Italian Journal of Geosciences, 131(3), 403-409.

Wagner, A. (2016). *A new approach for geo-monitoring using modern total stations and RGB+ D images*. Measurement, 82, 64-74.

Wagner, A., Wiedemann, W., Wasmeier, P., & Wunderlich, T. (2016). *Monitoring Concepts using Image Assisted Total Stations*

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques actifs à des fins de suivi (suite)

2 – Scanner laser terrestre

Le scanner laser terrestre ou **TLS** (Terrestrial Laser Scanner) est également dénommé **Lidar terrestre**.

1 - Principe Le scanner éclaire l'ensemble du glissement en très peu de temps et peut ainsi mesurer des **millions de points**. L'ensemble de ces points est ensuite converti en un **modèle numérique de terrain 3D** (MNT). Pour un même site ou versant, il peut être utile de déplacer le scanner pour imager l'ensemble des surfaces sans avoir de zone d'ombre liée au relief. Les images sont alors assemblées pour obtenir le MNT final.

Le principe de l'instrumentation des glissements sur cette base est de **comparer deux MNT pris à différentes dates**. Leur comparaison permet d'obtenir les déplacements entre les deux jeux de données et de calculer les volumes déplacés. La technique d'analyse des MNT est similaire aux techniques de photogrammétrie.

Il existe plusieurs types d'algorithmes pour comparer les MNT entre eux. Le choix se fait selon les caractéristiques du glissement, ce que l'on souhaite mesurer (volumes ou vecteurs déplacement) et les capacités de calcul.

2 - Application Les scanners laser terrestres sont **couramment utilisés** depuis le début des années 2000 pour le suivi des glissements de terrain. Ils permettent de retrouver les volumes déplacés ou éboulés, ou d'obtenir un champ de déplacement avec une bonne précision.

Le scanner laser doit être placé à des distances maximales d'environ :

- 1500 m pour des cibles de grande réflectivité,
- 800 m pour les versants rocheux,
- 350 m pour les versants légèrement végétalisés.

Pour les versants avec une végétation arborée, la densité et la variation de la couverture végétale empêchent l'utilisation simple du scan laser terrestre. Il est alors nécessaire de procéder à des corrections complémentaires par :

- création d'un filtre de végétation (mesure complémentaire en image infrarouge de la couverture végétale),
- utilisation d'instruments mesurant l'onde complète (full waveform) et analyse de celle-ci.

3 - Atouts Les atouts principaux du Lidar terrestre sont :

- l'information en **3 dimensions**,
- sa **rapidité** : mesure plusieurs dizaines de milliers de points par seconde ; un site peut être scanné en 15 min,
- sa **résolution spatiale** : données sur l'ensemble du glissement/versant, même abrupt, avec une résolution atteignant 1 point tous les 2 cm,
- son **exactitude** : données précises au **centimètre** près,
- sa **souplesse** : portabilité du dispositif (poids et dimensions réduites), constance de la géométrie de prise de vue non contraignante, plusieurs exploitations possibles de la donnée.

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques actifs à des fins de suivi (suite)

2 – Scanner laser terrestre (suite)

- 4 - Limites** Les principales limites de la méthode sont :
- le besoin de **visibilité directe** optique : limitations liées aux conditions atmosphériques, à la végétation, etc.
 - la **distance de mesure limitée** : moins d'un kilomètre,
 - l'**absence** d'outils, de méthodologies ou de fichiers de données **génériques** : le format de fichier ou le traitement de la donnée sont spécifiques à chaque matériel, à chaque site et sont peu transposables,
 - la nécessité d'identifier des **points stables** pour géoréférencer les différents nuages de points,
 - la **fréquence d'acquisition** : compte tenu du coût, les appareils à demeure sont rares. Il s'agit généralement de campagnes de mesure, qui sont donc espacées de plusieurs mois,
 - **données volumineuses et complexes** : besoin de compétences dans le traitement, impossibilité de transfert à distance, automatisation du traitement difficile, temps de traitement minimal de quelques heures.

5 - Développements récents L'utilisation d'approches de **corrélation d'image**, comme celles utilisées avec les images optiques passives, plutôt qu'un traitement de données 3D est en développement (Travelletti et al., 2014). Ces approches permettent de diminuer fortement les temps de calcul et pourraient permettre de réaliser un traitement automatique des données laser pour une instrumentation en temps réel. Elles ne sont cependant applicables qu'aux pentes ayant une signature optique suffisante, peu végétalisées. Pour le moment leur développement ne permet pas de comparer aisément des jeux de données pris depuis un point de vue différent.

- 6 - Références** Travelletti, J., Malet, J. P., & Delacourt, C. (2014). *Image-based correlation of Laser Scanning point cloud time series for landslide monitoring*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 32, 1-18.
- Barbarella, M., & Fiani, M. (2012). *Landslide monitoring using terrestrial laser scanner: georeferencing and canopy filtering issues in a case study*. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, 39, B5.
- Guarnieri, A., Pirotti, F., & Vettore, A. (2012). *Comparison of discrete return and waveform terrestrial laser scanning for dense vegetation filtering*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39(B7), 511-516.
- Barbarella, M., & Fiani, M. (2013). *Monitoring of large landslides by Terrestrial Laser Scanning techniques: field data collection and processing*. European Journal of Remote Sensing, 46, 126-151.

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques actifs à des fins de suivi (suite)

3 – Scanner laser aéroporté

Le scanner laser aéroporté ou ALS (Aerial Laser Scanner) ou Lidar aéroporté est à l'origine porté par des avions ou des hélicoptères, et aujourd'hui de plus en plus souvent par des drones.

1 - Principe Le principe de la méthode est identique à celui du TLS : la réalisation de MNT de haute résolution comparés entre eux pour le calcul des déplacements. La précision des MNT obtenus est cependant plus faible : elle est de l'ordre de **15 cm**.

Le traitement de la donnée brute est plus important qu'avec la version terrestre, compte tenu des corrections nécessaires liées au plan de vol de l'avion ou du drone.

En revanche, contrairement à la version terrestre, le Lidar aéroporté peut permettre de s'affranchir de la végétation (Razak et al., 2011) sans passer par les méthodes de filtrage manuelles, en utilisant les différents retours de l'onde.

L'utilisation de drones se développe comme pour l'imagerie optique, car ceux-ci permettent de s'approcher plus des glissements tout en n'engageant pas la sécurité d'un équipage humain dans le cas de conditions de vols complexes (zones montagneuses par exemple).

2 - Application Compte tenu de la précision, cette méthode s'applique moins bien que son équivalent terrestre aux glissements très lents. En effet, pour détecter un mouvement entre deux campagnes, les déplacements devront avoir été supérieurs à l'imprécision de la méthode (15 cm).

Les relevés Lidar aéroportés sont le plus souvent utilisés pour compléter d'autres méthodes de télédétection, par exemple pour construire les MNT nécessaires à l'orthorectification des images optiques.

3 - Atouts Les atouts principaux de la méthode sont :

- l'information en **3 dimensions**,
- sa **rapidité** : mesure de plusieurs dizaines de milliers de points par seconde sur l'ensemble du site,
- la visibilité de l'**ensemble du glissement**,
- la transparence partielle de la **végétation**,

4 - Limites Les principales limites de la méthode sont :

- le besoin de **visibilité directe** optique : limitations liées aux conditions atmosphériques
- l'**absence** d'outils, de méthodologies ou de fichiers de données **génériques**,
- la nécessité d'identifier des **points stables** présents sur l'ensemble des MNT à comparer,
- la **fréquence d'acquisition** : compte tenu du coût très important, les campagnes sont espacées de plusieurs mois voire années,
- **données volumineuses et complexes** : besoin de compétences dans le traitement, impossibilité de transfert à distance, impossibilité d'automatisation du traitement, temps de traitement minimal de quelques heures
- la **précision** de 15 cm,

2 – Exploitation des données fournies par capteurs optiques actifs à des fins de suivi (suite)

3 – Scanner laser aéroporté (suite)

- 5 - Références** Corsini, A., Borgatti, L., Cervi, F., Dahne, A., Ronchetti, F., & Sterzai, P. (2009). *Estimating mass-wasting processes in active earth slides–earth flows with time-series of High-Resolution DEMs from photogrammetry and airborne LiDAR*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 433-439.
- Thoma, D. P., Gupta, S. C., Bauer, M. E., & Kirchoff, C. E. (2005). *Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment*. *Remote sensing of Environment*, 95(4), 493-501.
- Riquelme, A. J., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2014). *A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds*. *Computers & Geosciences*, 68, 38-52.
- Razak, K. A., Straatsma, M. W., Van Westen, C. J., Malet, J. P., & De Jong, S. M. (2011). *Airborne laser scanning of forested landslides characterization: terrain model quality and visualization*. *Geomorphology*, 126(1), 186-200.

4 - Conclusion

Les tachéomètres ou stations totales classiques donnent une mesure très précise des déplacements, mais ponctuelle car limitée à la mesure de prismes installés sur le site instable.

Les scanners laser permettent d'obtenir des nuages de points denses rapidement mais le traitement de la donnée est lourd.

L'apparition d'appareils (IATS) combinant un tachéomètre, une caméra et une fonction scan laser est prometteuse. Pour le moment, ces appareils n'ont pas une précision suffisante, mais leur développement est rapide car leurs applications sont multiples. Au-delà de la possibilité de mesures très complètes, ils présentent également l'intérêt de réaliser le traitement et la fusion des données dans les logiciels intégrés aux appareils.

Ces méthodes, y compris les nouveaux appareils, restent cependant soumises aux conditions atmosphériques et météorologiques : aucun suivi n'est possible en conditions dégradées (pluie, nuages, neige).

Capteurs micro-ondes actifs

Il s'agit de **matériels utilisant des antennes radar** (Radio Detection And Ranging) émettant dans des longueurs d'onde comprises entre 1 mm et 1 m (domaine des micro-ondes ou ondes radio).

Les radars permettent d'obtenir deux types de données :

- ponctuelles, par mesure au distancemètre,
- d'ensemble, par imagerie radar.

1 - Généralités

1 – Principe de la mesure radar

Les radars utilisés en télédétection sont généralement constitués d'une **antenne unique pour l'émission et la réception de l'onde rétrodiffusée**.

1 – Ondes émises et reçues

L'onde émise et l'onde reçue (rétrodiffusée) sont caractérisées par :

Onde émise	Onde reçue
Longueur d'onde	Temps de parcours
Amplitude	Amplitude
Phase	Déphasage (par rapport à l'onde émise)

2 – Facteurs influençant la rétrodiffusion

La manière dont l'onde est rétrodiffusée va dépendre de :

Facteurs influençant la rétrodiffusion
Distance de la cible, Pression, Température, Pression d'eau, Couches atmosphériques, Rugosité et propriétés diélectriques de la cible (humidité, salinité).

Les ondes radar sont cependant moins sensibles aux conditions atmosphériques que celles des longueurs d'onde du spectre visible. **En conditions dégradées** (pluie, brouillard) **des données peuvent être acquises**, même si elles sont parfois de moins bonne qualité.

1 - Généralités (suite)

2 – Bandes de fréquence

En télédétection, les **fréquences** radar utilisées sont généralement comprises entre **1 et 30 GHz**. Elles sont classées en bandes de fréquence.

Bandes	Longueur d'onde	Fréquence
L	15-30 cm	1-2 GHz
S	7,5-15 cm	2-4 GHz
C	3,75-7,5 cm	4-8 GHz
X	2,5-3,75 cm	8-12 GHz
Ku	1,67-2,5 cm	12-18 GHz

1 – Influence de la bande de fréquence utilisée

Les ondes radar réagissent à des **objets de dimensions proches ou supérieures à leur longueur d'onde**.

Par conséquent, quand la longueur d'onde augmente :

- l'exactitude de la mesure diminue (car la résolution spatiale et la fidélité de mesure diminuent),
- la stabilité de mesure entre deux passages du radar augmente (car la sensibilité aux variations des conditions atmosphériques diminue),
- le pouvoir de pénétration augmente (car la sensibilité à la végétation diminue).

2 – Bandes utilisées par les radars

Les radars sont le plus souvent **focalisés**, c'est-à-dire qu'ils n'utilisent qu'**une seule bande de fréquence**, voire une seule fréquence.

Les radars satellitaires émettent souvent en bande C. Certains radars satellitaires plus récents émettent en bande L et X. Les radars terrestres émettent le plus souvent en bande Ku.

Il existe également des radars **large bande** ou ultra-large bande qui émettent sur un ensemble de fréquences très large. L'échantillonnage de l'ensemble des fréquences permet de s'affranchir des effets météo ou de végétation afin de pouvoir effectuer une **mesure par tout temps**.

Seuls les radars focalisés permettent de produire une image radar, les radars large bande sont plutôt utilisés pour la mesure de distance.

1 - Généralités (suite)

3 – Image radar

Lorsqu'une antenne émet une onde cohérente polarisée qui éclaire une surface et mesure l'onde rétrodiffusée (amplitude et phase), le résultat de cette mesure peut être représenté par une image de cette surface.

1 – Résultat brut Le résultat brut de la mesure des ondes rétrodiffusées est une **image 2D de valeurs complexes**. À chaque pixel correspond un nombre complexe composé de l'amplitude du signal (réel) et de sa phase (imaginaire).

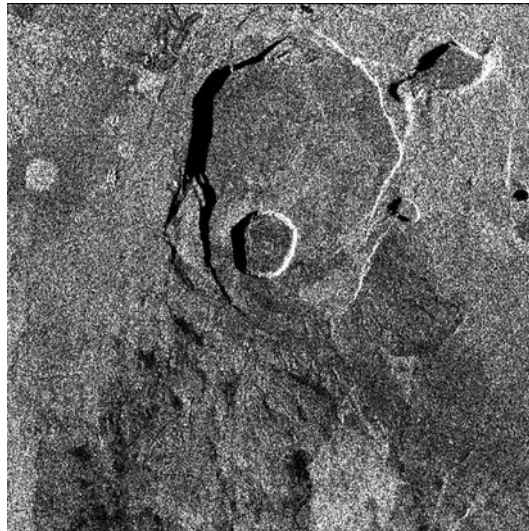


Image de l'amplitude du signal radar prise par satellite au-dessus du Kilauea (USA). A chaque pixel est également associée une valeur de phase.

Source : Wikimedia Commons

2 – Amplitude du signal L'amplitude de l'onde rétrodiffusée dépend de :

- la source,
- l'environnement traversé,
- la capacité de la cible à réfléchir le signal.

Dans des applications d'imagerie terrestre, l'amplitude radar est classiquement utilisée pour imager le type de couverture du sol (végétation, rocher nu).

Pour les applications de suivi de déplacement, l'information d'amplitude est utilisée par des techniques, récentes, de corrélation d'images.

3 – Phase du signal La phase du signal rétrodiffusé, ou plus exactement son déphasage par rapport à l'onde émise, va dépendre de :

- la géométrie,
- le sol (humidité, végétation, etc)
- la composition de l'atmosphère traversée (nuages, pollution, etc)

L'analyse de la phase va permettre, par les techniques d'interférométrie, d'atteindre une précision de mesure de l'ordre du millimètre.

1 - Généralités (suite)

4 – Améliorations du signal radar

Le signal radar nécessite d'avoir plusieurs traitements avant de pouvoir être utilisé en télédétection. Ces traitements permettent :

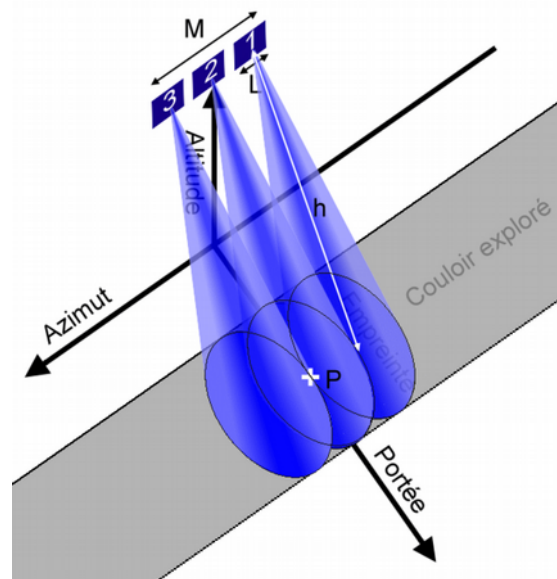
- d'améliorer la résolution (SAR),
- de corriger des erreurs sur la mesure de la phase (ambiguïté de phase),
- de surmonter en partie les limites inhérentes au mode de prise de vue.

1 – SAR La résolution brute des images radar est d'autant plus faible que l'antenne réceptrice est petite et positionnée à grande distance de la cible.

La résolution est donc très faible pour les images radar issues des satellites. Pour améliorer la résolution du signal, on utilise la technique du **SAR (Synthetic Aperture Radar)** ou RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture).

Cette technique consiste à considérer un seul point et à sommer l'ensemble des ondes radar qui s'y sont réfléchies, pour toutes les positions de l'antenne permettant d'éclairer ce point.

Cela revient à considérer une antenne équivalente dont la longueur est la distance que parcourt l'antenne tout en éclairant le point considéré. Pour un radar satellitaire, la longueur de l'antenne équivalente sera 100 à 1000 fois plus grande que la longueur réelle de l'antenne.



Principe de fonctionnement du RSO : le point P est éclairé par une antenne équivalente de longueur M. La direction définie par le point éclairé au sol et le satellite (distance h) est appelée LOS (line of sight)

Source : Wikimedia Commons

1 - Généralités (suite)

4 – Améliorations du signal radar (suite)

2 – Corrections liées à la phase La mesure, en particulier par interférométrie, est liée à la mesure du déphasage existant entre l'onde émise et l'onde reçue. Cela explique :

- la **précision des mesures** : les longueurs d'onde étant de l'ordre du centimètre, la mesure est de l'ordre du millimètre
- la limitation des mesures : il est impossible de faire la différence entre un point qui se serait déplacé d'une distance d et un point qui se serait déplacé de $d+2\pi$ (**ambiguïté de phase**)

D'autres sources d'erreur viennent s'ajouter à l'ambiguïté de phase sur les mesures :

- l'effet lié au relief : l'éclairage du relief par un faisceau radar, s'il n'est pas vertical (c'est le cas pour les satellites), amène des **phénomènes de distorsion** qui doivent être corrigés par l'utilisation de MNT de haute résolution
- l'effet lié à la position et au mouvement de la plateforme : les positions des satellites sont connues avec précision alors que la correction pour les radars aéroportés est très complexe
- le bruit : il est généralement filtré par l'addition de plusieurs images

3 – Direction du faisceau radar Une limitation des mesures par radar satellite est liée à la direction du faisceau radar. Cette direction est appelée LOS (line of sight).

La **direction du faisceau est la direction de mesure**. Sur les satellites, les radars n'émettent usuellement pas de manière verticale. De plus, la plupart des satellites ont des orbites globalement polaire (azimuth nord-sud). La LOS est ainsi de direction E-O ou O-E.

De manière à pouvoir avoir une vision dans les trois dimensions, il est nécessaire d'avoir les images de la même scène issues des **orbites ascendantes** (vers le nord) **et descendantes** (vers le sud).

En revanche, il est quasiment **impossible de mesurer des déplacements dans la direction nord-sud** par les méthodes radars.

1 - Généralités (suite)

5 – Plateformes

Comme pour les techniques optiques, les radars peuvent être portés par différentes plateformes. Les méthodes les plus développées utilisent les satellites. Les radars terrestres sont en développement.

1 – Les satellites radar Les satellites possédant des radars embarqués dont les données peuvent être utilisées pour la surveillance des glissements existent depuis le **début des années 90**. Avec les années, la résolution des radars embarqués et le nombre de satellites permettent d'atteindre des mesures de plus en plus précises.

De plus, la disponibilité de données régulières depuis plus de 20 ans permet d'avoir un **historique en continu des sites**.

Les satellites suivants, mis en orbite récemment, ont une visée d'imagerie radar des territoires à des fins de géomorphologie ou de géodésie : ils émettent en bandes X, C et L.

Satellite	Années	Bande de fréquence	Période de re-visite
TerraSAR-X	2009 →	X	11 jours
Cosmo Sky-Med	2009 →		2, 4, 8 ou 16 jours
RADARSAT-2	2007 →	C	24 jours
RADARSAT-1	1995 – 2013		24 jours
ENVISAT	2002 – 2012		35 jours
ERS-1, ERS-2	1991 – 2000 1995 – 2011		35 jours
Sentinel-1	2014 →		6 ou 12 jours
RADARSAT constellation	2018 (?)		3 ou 12 jours
ALOS	2006 – 2011	L	46 jours
ALOS – 2	2014 →		14 jours

Pour le suivi d'un glissement, le choix du satellite va se faire en fonction de :

- **la disponibilité de données en orbite ascendante et descendante** : cela permet de pouvoir retrouver les mouvements verticaux,
- **la vitesse du mouvement** : il faut que le mouvement entre deux prises de vue (temps de revisite) soit inférieur au quart de la longueur d'onde pour éviter toute ambiguïté dans la lecture de la phase.

Satellite	Déplacement max mesurable par InSAR
Terra-SAR (X)	0,75 cm en 11 jours (25 cm/an)
ERS (C)	1,4 cm en 35 jours (15 cm/an)
ALOS (L)	6 cm en 46 jours (45 cm/an)

1 - Généralités (suite)

5 – Plateformes (suite)

2 – Radars aéroportés Les radars aéroportés commencent à arriver sur le marché. Cependant, ils n'ont pas pour le moment une précision aussi grande que les satellites, à cause de l'incertitude sur la position précise de leur trajectoire. Le défi pour ces méthodes est de réaliser un système de positionnement ultra-précis. Ces méthodes ont un fort potentiel mais un coût très élevé.

3 – Radars terrestres Deux types de radars terrestres existent :

- les radars à synthèse d'ouverture pour le traitement par analyse interférométrique,
- les radars distancemètres.

1 - Généralités (suite)

6 – Analyse des images par interférométrie (InSAR)

L'interférométrie radar, ou InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), désigne des méthodes qui utilisent plusieurs images SAR complexes en exploitant l'information de phase du signal.

1 – Acquisitions des images

Un des paramètres d'acquisition suivant doit être différent entre les images exploitées par interférométrie :

- l'instant d'acquisition,
- la position et l'orientation du radar,
- la fréquence ou la polarité de l'onde,
- le mode d'acquisition.

Pour l'application du suivi de déplacement, le seul paramètre d'acquisition qui doit changer est la **date d'acquisition**. La géométrie d'acquisition doit être la plus proche possible entre les deux images, afin de limiter les sources d'erreur.

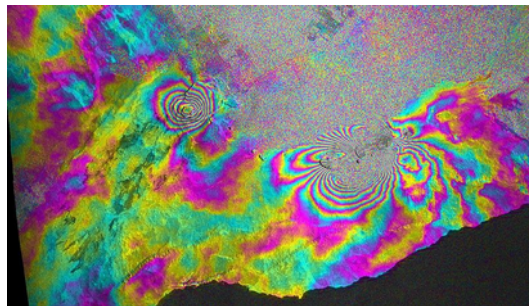
En modifiant la géométrie de la prise de vue (position du satellite), il est possible de construire un MNT de façon similaire à la stéréoscopie optique.

2 – Analyse par interférométrie

L'analyse par interférométrie des deux images prises à des dates différentes calcule le diagramme d'interférence.

On appelle interférométrie différentielle ou D-InSAR (Differential Interferometric SAR) la technique de mesure des déformations à partir de ces interférogrammes.

Elle nécessite la réalisation de l'ensemble des corrections (de position du satellite, topographiques, azimuthale, etc.)



Interferogramme produit avec la constellation of COSMO-SkyMed montrant la déformation du Kilauea (USA) après une éruption

Source : Wikimedia Commons

2 - Exploitation des données fournies par capteurs actifs micro-ondes à des fins de suivi

1 – Interférométrie radar satellitaire

Les techniques de surveillance des glissements de terrain par interférométrie radar utilisent le plus souvent des données issues des satellites. On parle généralement de méthodes InSAR différentielles avancées (A-DinSAR).

1 - Principe Les méthodes de mesure de déplacement par interférométrie radar satellitaire utilisent l'analyse d'interférogrammes réalisés à partir de plusieurs images SAR. Il est généralement nécessaire d'utiliser au moins **une quinzaine d'images** pour filtrer l'ensemble des effets comme le bruit.

Pour qu'une mise en cohérence de ces images soit possible, il est nécessaire d'y identifier des **réflecteurs**.

L'analyse temporelle de la série d'images SAR par interférométrie va permettre d'obtenir une vitesse de déplacement des réflecteurs. En effet **seuls les déplacements des points (réflecteurs) que l'on peut formellement identifier d'une image sur l'autre peuvent être calculés**.

Les méthodes A-DinSAR (satellites) sont souvent séparées en deux catégories dans les publications, selon les algorithmes⁴ utilisés :

- les méthodes dites PSI (**Persistent Scatterers Interferometry**),
- les méthodes dites SB (**Small Baseline**).

La différence entre ces algorithmes est globalement basée sur le type de réflecteurs utilisés :

- dominants (PSI),
- distribués (SB).

Réflecteurs	Dominants	Distribués
Définition	Réflecteurs de petite dimension renvoyant une amplitude de signal importante et stable au cours du temps. Facilement identifiables à une échelle de résolution importante, inférieure au pixel	Réflecteurs correspondant plutôt à des petites zones de réflectance homogène et stable au cours du temps.
Exemples	Objets (bâtiments, ouvrages), sol au relief aigu (rochers nus), réflecteurs artificiels (cibles)	Sol nu sans relief (coulées boueuses, désert), végétation rase et constante (prairie naturelle, etc.)
Contre exemples	Surfaces, végétation	Végétation variant au cours du temps (forêt, terres cultivées)

Aujourd'hui, cependant, les **algorithmes récents d'interférométrie radar intègrent ou proposent les deux approches**, apportant une vision plus complète des déplacements de la surface du glissement (on peut citer SqueeSAR et SPN).

Il est nécessaire d'avoir a minima 30 réflecteurs au km² (la densité peut aller jusque 10 000 – 100 000 réflecteurs au km² en travaillant en bande X).

4 On peut citer parmi les algorithmes : PS-InSAR, (Permanent Scatterer InSAR), SqueeSAR, IPTA (Interferometric Point Target Analysis), PSP (Persistent Scatterer Pairs), SPN (Stable Point Network), StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers), SBAS (Small Baseline Subset), CPT (Coherent Pixel Technique)

2 - Exploitation des données fournies par capteurs actifs micro-ondes à des fins de suivi (suite)

1 – Interférométrie radar satellitaire (suite)

2 – Application Les méthodes DinSAR satellites sont aujourd'hui bien développées et appliquées à l'étude de la subsidence et à la surveillance des zones sismiques et volcaniques.

Des études menées sur des glissements de terrain montrent que l'on peut mesurer des taux de déformation annuels moyens avec une exactitude de 0,1 à 1 mm/an dans l'axe radar-cible. Les différents algorithmes de traitement des images radar ont chacun leurs avantages et inconvénients, qui ne sont pas détaillés ici. Tous permettent cependant d'obtenir une précision de l'ordre du millimètre.

Des **approches combinées** utilisant des images radar issues de différents satellites utilisant des bandes de fréquence différentes ont également été menées (Herrera et al., 2012). Sur le cas étudié, elles ont permis de détecter et de suivre 27 % des glissements existants sur un territoire à risques en milieu montagneux. La bande X a permis de détecter le plus possible de réflecteurs dominants, la bande L de détecter le plus de glissements. Le seuil de déplacement pour la détection d'un glissement par cette méthode est de 14 mm/an.

Avant d'envisager le suivi d'un glissement ou d'une région par ces méthodes, il convient d'en vérifier la pertinence. On peut trouver des recommandations dans certaines publications (Notti et al., 2010).

3 – Avantages Les avantages principaux de cette méthode résident dans :

- la **précision (infra)-millimétrique des mesures**, de plus en plus fine avec l'apparition de satellites radar en bande X,
- le **nombre de points** mesurés (réflecteurs), d'autant plus grand que le satellite émet en longueur d'onde courte (bande X),
- la mesure sur de **grandes échelles** géographiques, permettant un suivi sur un territoire entier et une identification des zones à risques,
- la mesure rétroactive des déplacements grâce à l'**historique** disponible.

4 – Limites Les limites principales de cette méthode résident dans :

- la difficulté de surveillance des glissements **boisés, cultivés ou enneigés** sans pose de réflecteurs artificiels (décorrélation),
- la difficulté de surveillance de glissements présentant des **pentés très irrégulières** (effets de distorsion importants),
- la difficulté de surveillance des glissements dont les **mouvements sont orientés nord-sud**,
- la **mesure limitée à 1/4 de la longueur d'onde du radar** entre deux acquisitions (ambiguïté de phase),
- le besoin d'un **MNT** pour le traitement des effets liés à la topographie,
- la complexité du traitement des données : il n'existe pas de logiciel utilisateur,
- le coût élevé pour la surveillance d'un seul glissement.

2 - Exploitation des données fournies par capteurs actifs micro-ondes à des fins de suivi (suite)

1 – Interférométrie radar satellitaire (suite)

- 5 - Références** Wasowski, J., & Bovenga, F. (2014). *Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives*. Engineering Geology, 174, 103-138.
- Mikhailov, V. O., Kiseleva, E. A., Smol'yaninova, E. I., Dmitriev, P. N., Golubev, V. I., Isaev, Y. S., ... & Khairtdinov, S. A. (2014). *Some problems of landslide monitoring using satellite radar imagery with different wavelengths: Case study of two landslides in the region of Greater Sochi*. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 50(4), 576-587.
- Herrera, G., Davalillo, J. C., Mulas, J., Cooksley, G., Monserrat, O., & Pancioli, V. (2009). *Mapping and monitoring geomorphological processes in mountainous areas using PSI data: Central Pyrenees case study*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 9, 1587-1598.
- Notti, D., Davalillo, J. C., Herrera, G., & Mora, O. (2010). *Assessment of the performance of X-band satellite radar data for landslide mapping and monitoring: Upper Tena Valley case study*. Nat Hazards Earth Syst Sci, 10, 1865-1875.
- Herrera, G., Gutiérrez, F., García-Davalillo, J. C., Guerrero, J., Notti, D., Galve, J. P., ... & Cooksley, G. (2013). *Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees)*. Remote Sensing of Environment, 128, 31-43.
- Costantini, M., Falco, S., Malvarosa, F., Minati, F., Trillo, F., & Vecchioli, F. (2014). *Persistent scatterer pair interferometry: approach and application to COSMO-SkyMed SAR data*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(7), 2869-2879.

2 - Exploitation des données fournies par capteurs actifs micro-ondes à des fins de suivi (suite)

2 – Corrélation d'images radar satellitaires

La corrélation d'images radar utilise la valeur de l'**amplitude de l'onde rétrodiffusée** et non pas la phase comme les méthodes interférométriques. Ses principes sont similaires aux techniques de corrélations d'image optiques passive (cf partie 2).

1 - Principe L'analyse des données d'amplitude plutôt que de phase permet de s'affranchir de certaines limites des techniques InSAR (ambiguïté de phase, corrections, etc.)

Malgré des traitements de données similaires, il existe une différence fondamentale entre les images satellites radar et les images satellites optiques : les images optiques ont une résolution équivalente dans toutes les directions horizontales (x,y) alors que les images radar ont une **résolution bien plus faible dans la direction de l'azimut que dans la direction de la portée**. Les techniques de corrélation d'image radar, comme l'interférométrie, ne permettent donc pas de réaliser des mesures dans la direction nord-sud.

La corrélation d'images radar se développe depuis les années 2000. Cependant, elle est d'application récente concernant le suivi des glissements de terrain. C'est en effet l'apparition des satellites SAR en bande X, conjuguée à des algorithmes atteignant une précision de 1/10^e à 1/20^e de pixel, qui permettent d'avoir une résolution suffisante de mesure.

La combinaison de données issues des orbites descendantes et ascendantes du satellite permet également d'obtenir un champ de déplacement 3D.

2 - Référence Raucoules, D., De Michele, M., Malet, J. P., & Ulrich, P. (2013). *Time-variable 3D ground displacements from high-resolution synthetic aperture radar (SAR). Application to La Valette landslide (South French Alps)*. *Remote Sensing of Environment*, 139, 198-204.

2 - Exploitation des données fournies par capteurs actifs micro-ondes à des fins de suivi (suite)

3 – Interférométrie radar terrestre

L'interférométrie radar terrestre est basée sur les mêmes principes que l'interférométrie radar satellitaire.

1 - Principe L'interférométrie radar terrestre est souvent nommée GB-InSAR pour Ground-Based InSAR). Il existe également des dispositifs utilisant des radars à « ouverture réelle » (opposés aux SAR, radars à « synthèse d'ouverture »). Le terme **TIR (Terrestrial Interferometric Radar)** les regroupe tous.

Les interféromètres radar terrestres sont des appareils de mesure développés depuis les années 2000. Ils peuvent être déplacés, mais peu facilement : leur mise en place est sensible et leur poids peut atteindre **plusieurs centaines de kilos**.

Les fréquences utilisées sont plus élevées que celles des satellites (**bande Ku**), ce qui permet plus de précision, mais rend les ondes sensibles aux particules présentes dans l'air et empêche de pénétrer la végétation.

2 - Application Les radars interférométriques terrestres sont souvent utilisés pour des **surveillances de court terme**. Ils sont utilisés pour la surveillance de glissement, de mines à ciel ouvert, de travaux géotechniques.

Les images peuvent être prises à très peu de temps d'intervalle (plusieurs par heure). Cette fréquence permet de s'affranchir des problèmes de cohérence que l'on peut avoir avec les images satellites, car les réflecteurs restent identifiables d'une image sur l'autre.

La forte résolution temporelle combinée à la grande précision permettent théoriquement d'obtenir le champ de déplacement de glissements rapides (jusqu'à 1 m/ jour) avec une précision millimétrique. Ces données sont très utiles pour une compréhension fine des phénomènes.

De plus, le traitement des données par l'appareil donne directement des valeurs de déplacement et des vitesses. Cela permet une utilisation en surveillance opérationnelle lors de travaux (définition de seuils d'alerte).

3 - Atouts Les avantages principaux de l'interférométrie radar terrestre sont :

- la précision de la mesure (0,3 mm),
- la distance de mesure (2-5 km),
- la forte résolution temporelle (jusque 5 min),
- appareil orientable dans la direction des déplacements.

4 - Limites Les limites principales en sont :

- le coût,
- la portabilité,
- l'application uniquement aux versants sans végétation trop dense,
- l'impossibilité de comparer plusieurs campagnes de mesures (car il est impossible de remettre le radar exactement dans la même position).

2 - Exploitation des données fournies par capteurs actifs micro-ondes à des fins de suivi (suite)

3 – Interférométrie radar terrestre (suite)

- 5 - Références** Lowry, B., Gomez, F., Zhou, W., Mooney, M. A., Held, B., & Grasmick, J. (2013). *High resolution displacement monitoring of a slow velocity landslide using ground based radar interferometry*. *Engineering Geology*, 166, 160-169.
- Caduff, R., Schlunegger, F., Kos, A., & Wiesmann, A. (2015). *A review of terrestrial radar interferometry for measuring surface change in the geosciences*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2), 208-228.

2 - Exploitation des données fournies par capteurs actifs micro-ondes à des fins de suivi (suite)

4 – Distancemètre radar terrestre

Les distancemètres radar terrestre sont des instruments qui émettent une onde radar (bande Ku) et mesure très précisément la distance à une cible.

1 - Principe Les distancemètres radar peuvent utiliser dans le traitement de la donnée les information d'amplitude ou de phase, parfois par analyse interférométrique. On les différencie cependant des radars interférométriques terrestres car ils ne sont pas destinés à mesurer des réflecteurs naturels à la surface du sol, mais des **réflecteurs artificiels (cibles) installés sur le glissement**. Il est généralement préférable, lorsque cela est possible, d'installer certaines de ces cibles dans des zones stables afin de servir de référence.

2 - Application Peu de glissements sont ou ont été instrumentés par ce type d'appareils. On peut citer le versant instable de Séchilienne (38), pour lequel un distancemètre radar ultra-large bande (ULB) est en place depuis 1999.

3 - Atouts Les atouts principaux des distancemètre radars sont :

- la précision de la mesure au dixième de millimètre,
- la mesure de tout temps (en particulier pour le radar ULB),
- la longue portée de la mesure (plus de 10 km).

4 - Limites Les limites principales des distancemètres radar sont :

- le besoin d'installation de cibles dans la zone instable,
- le besoin de connaissance d'une zone stable,
- la portabilité de l'instrument (une version portative du radar utilisé sur le glissement de Séchilienne est en cours d'industrialisation).

5 - Références Monserrat O, Moya J, Luzi G, Crosetto M, Gili J, Corominas J. (2013). *Non-interferometric GB-SAR measurement: application to the Vallcebre landslide (eastern Pyrenees, Spain)*. Natural Hazards and Earth System Sciences 13 : 1873 – 1887.

Potherat P., Lemaitre F., Duranthon J.-P., Benoit A. (2010). *La mesure à très longue distance. Un besoin. Un outil : le radar ULB*. actes du Rock Slope Stability symposium, Paris, 24-25 novembre 2010.

Conclusion – Perspectives

Défis et évolutions probables à court terme

Développements des instruments ou des plateformes

Des progrès dans la précision des relevés, la rapidité et l'automatisation du traitement devraient intervenir dans les prochaines années, par le développement des matériels en eux même.

On peut citer par exemple :

- l'amélioration constante des **stations totales**, intégrant aujourd'hui les prémices d'instruments permettant la mesure **géodésique**, la mesure par **analyse d'images** et la mesure par **scanner laser** ;
- le développement à venir des **lidar**, outils intégrés par exemple aux véhicules autonomes, qui permettra d'avoir accès à des instruments **plus performants et moins chers** ;
- le développement des **drones** qui, en intégrant des instruments de **positionnement de plus en plus précis**, permettra de diminuer l'erreur actuelle sur les relevés photogrammétriques et de scan laser pris depuis cette plateforme ;
- la recherche de **solutions low-cost** : en plus des diminutions des coûts liés à la loi de l'offre et de la demande sur les matériels, la recherche actuelle sur les moyens de surveillance des phénomènes naturels a tendance à valoriser et développer les méthodes à bas coût, applicables plus largement.

Gestion du big data

L'ensemble de ces méthodes, optiques ou radar, produit énormément de données. La qualité de la donnée est également très bonne et en amélioration constante. Cependant, cela n'est pas sans poser plusieurs problèmes :

- l'**accès aux données et leur stockage**, même lorsqu'elles sont gratuites, n'est pas forcément simple ;
- le **transfert des données** est parfois également problématique : les relevés lidar par exemple ne peuvent pas être transmis à distance ;
- l'absence d'homogénéité des **formats de fichiers** pour une même méthode ;
- les **capacités informatiques nécessaires au traitement** de ces données ne sont pas forcément à disposition de tous les acteurs qui en auraient besoin ;
- les **algorithmes de traitement** efficaces ne sont pas forcément tous développés complètement ;
- lorsqu'ils existent, leur intégration à des **logiciels faciles d'utilisation et ergonomiques** est rarement réalisée ;
- des **connaissances** poussées dans le traitement des données sont donc encore nécessaires pour l'utilisation des ces techniques de suivi.

Cet état de fait est d'autant plus prégnant pour les données issues de satellites, qui sont de loin les plus volumineuses. C'est en ce sens que des **projets comme Geosud en France ou Geohazards TEP⁵** (Geohazards Thematic Exploitation Platform) de l'ESA (Agence spatiale européenne) ont été créés. Ils mettent en relation, dans des domaines d'application précis, les fournisseurs de données et les acteurs scientifiques, institutionnels, commerciaux ou bénéficiaires. Ils visent à terme la **production de solutions adaptées aux problématiques** considérées (gestion des risques, de l'environnement et des territoires).

5 <https://geohazards-tep.eo.esa.int/>

Défis et évolutions probables à court terme (suite)

Combinaison de méthodes et fusion des données

Les méthodes présentées comportent certaines **limites intrinsèques** – qui ne sont pas dépassables par l'amélioration des instruments ou celle des algorithmes de traitement. Pour pallier ces manques, la plupart des publications consultées utilisent toujours **plusieurs méthodes de suivi** :

- pour **contrôler la validité de la nouvelle méthode analysée**, souvent par la mesure de points de contrôle au sol par GNSS ou stations totales,
- pour **compléter et faire face aux limites de la méthode analysée**.

Ainsi, les **MNT** issus de campagnes Lidar ou de photogrammétrie sont utilisés pour la correction des méthodes 2D (corrélation d'image, interférométrie radar). On peut ainsi atteindre de très grandes précisions de mesure en utilisant un MNT de très haute résolution construit par Lidar terrestre couplé avec des méthodes InSAR précises au millimètre. On peut également avoir une bonne précision de mesure en utilisant ces MNT avec les méthodes de corrélation d'images, dont le coût est relativement faible.

Il n'existe cependant **pas de méthodologie « standard » et encore moins de logiciel permettant de croiser simplement ces jeux de données**. Leur manipulation nécessite des moyens informatiques et des connaissances poussées dans plusieurs champs de traitement du signal.

Les techniques présentées ici sont également limitées par le type d'information qu'elles apportent : le champ de déplacement à la surface du glissement et la morphologie de celle-ci. Aucune information n'est donnée sur les **déplacements en profondeur ou les conditions hydrogéologiques**. Ces informations sont tout aussi importantes que les déplacements de surface, que l'on ait pour objectif de comprendre les phénomènes ou de surveiller un site.

Les interfaces intégrant l'ensemble des données issues des différentes méthodes d'observation sont encore loin d'être fréquentes, même si elles commencent à se développer, en particulier pour les systèmes d'alerte.

Conclusion

Les techniques de télédétection appliquées à l'observation des glissements de terrain sont **nombreuses et en fort développement** et permettent d'avoir des précisions de mesure très importantes. Elles sont d'autant plus intéressantes que, contrairement aux techniques *in situ*, elles donnent une information spatiale sur l'ensemble de la surface considérée, et non sur seulement quelques points. Elles permettent également d'avoir des informations à grande échelle et sur des sites par ailleurs difficiles d'accès.

Les données acquises par télédétection permettent, après des phases de post-traitement, d'analyse et d'exploitation :

- de **mesurer** des champs de déplacement, des vitesses ou des volumes déplacés,
- **d'observer** l'apparence du glissement et l'apparition de signes (fissures, bourrelets) pouvant être les avertisseurs d'un évènement.

Elles contribuent ainsi au suivi des sites mais ne sont généralement pas suffisantes, car :

- elles ne permettent pas d'avoir d'informations ni en profondeur ni sur les mécanismes,
- elles ont des limitations indépassables (conditions météo, végétation, décorrélation, etc.)
- elles ne peuvent remplacer la connaissance du terrain, même avec un MNT de haute résolution

Elles vont être amenées à se développer encore dans les années à venir et leur utilisation devrait être facilitée par l'apparition d'algorithmes et de logiciels – y compris open source – permettant leur traitement rapide et automatisé. Ces progrès combinés à des coûts en baisse devraient permettre dans un avenir proche de suivre un grand nombre de sites grâce à ces méthodes.

Rédigé le,	Validé le,
Mélanie PONCET	Geneviève RUL, responsable du groupe Risques Rocheux et Mouvements de Sols



Cerema

Connaissance et prévention des risques – Développement des infrastructures - Énergie et climat – Gestion du patrimoine d’infrastructures
Impacts sur la santé – Mobilités et transports – Territoires durables et ressources naturelles – Ville et bâtiments durables

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Département Laboratoire de Lyon - 25, avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 BRON CEDEX - +33 (0)4 72 14 33 00

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

Établissement public - Siret Numéro SIRET - TVA Intracommunautaire : FR 94 130018310 - www.cerema.fr