

Rapport bibliographique

Observation des glissements de terrain

Nouvelles technologies d'instrumentation in-situ

Mars 2015

Rapport établi par : Mélanie BOURDIN

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

Date	Version	Commentaires
	V0	Rédaction par Mélanie BOURDIN
	V1	Validation technique par Jean-Paul DURANTHON, référent instrumentation RRMS
	V2	Validation par Agnès JOSEPH, responsable de l'unité Géomécanique
	V3	Validation par Geneviève RUL, responsable du groupe RRMS
	Vf	

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 in-situ

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

Référence dossier : Affaire C14TE0086-03

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 BOURDIN –Département Laboratoire de Lyon
Tél. +33 (0)4 72 14 33 00 / Fax +33 (0)4 72 14 30 77
Courriel : melanie.bourdin@cerema.fr

Constitution de l'équipe :

Mots Clés : Risques Naturels, Glissements de terrain, Instrumentation, Innovation, Inclinométrie, Fibre optique, TDR, GNSS, Géophysique

ISRN :

Liste des destinataires

Contact	Adresse	Nombre - Type
Jean-Michel TANGUY	CGDD/DRI Tour Séquoia 92055 La Défense Cedex	1ex papier 1ex pdf
Fabien RIVAL	CEREMA/DTecTV/ESI/VUER	1ex pdf

Conclusion – Résumé

Dans le domaine du suivi des glissements de terrain, le développement de nouveaux capteurs et l'amélioration de la chaîne de gestion des données a permis au cours des dernières années l'essor de nouvelles techniques ou de nouveaux instruments.

Ces nouvelles technologies présentent d'importantes avancées, réelles ou potentielles, comme leur précision, l'augmentation du nombre de mesures, la diminution des coûts.

Cependant, certaines des méthodes présentées restent du domaine de la recherche et ont été insuffisamment expérimentées jusqu'ici pour pouvoir proposer des procédures d'installation, de calcul ou d'analyse.

Bron, le

Le Directeur du Département Laboratoire de Lyon

Gilles Gauthier

Directeur du Département Laboratoire de Lyon

Sommaire

Introduction.....	5
1 – L’observation des glissements de terrain.....	6
1 – Finalités.....	6
2 – Objectifs.....	7
3 – L’instrumentation des glissements de terrain.....	10
4 – Technologies usuelles d’instrumentation.....	12
5 – Références.....	16
2 – Avancées technologiques récentes.....	17
1 – Nouveaux capteurs.....	17
2 – Progrès techniques dans la gestion des données.....	21
3 – Références.....	24
3 – Chaînes inclinométriques.....	25
1 – Chaînes inclinométriques classiques.....	25
2 – Chaînes inclinométriques à capteurs de type MEMS.....	26
3 – SAA.....	27
4 – DMS.....	29
5 – Références.....	31
4 – Réflectométrie temporelle.....	32
5 – Fibre optique.....	35
1 – Capteurs à mesure continûment répartie.....	35
2 – Capteurs à réseau de Bragg.....	37
3 – Capteurs interférométriques « longue-base ».....	39
4 – Capteurs interférométriques ponctuels.....	40
5 – Atouts et limites.....	41
6 – Références.....	42
6 – GNSS.....	43
1 – Solutions GNSS classiques.....	43
2 – Géocube.....	44
3 – Références.....	46
7 – Mesures géophysiques en continu – sismique.....	47
1 – Mesure du bruit sismique en continu.....	47
2 – Écoute microsismique / Écoute acoustique.....	48
3 – Écoute acoustique le long d’un guide-onde actif.....	49
4 – Atouts et limites communs aux méthodes sismiques.....	50
5 – Références.....	51
8 – Mesures géophysiques en continu – électrique.....	52
1 – Résistivité et polarisation provoquée.....	52
2 – Potentiel spontané.....	53
3 – Atouts et limites communs aux méthodes électriques.....	53
4 – Références.....	54
Conclusion.....	55

Introduction

L'innovation dans le domaine de l'instrumentation in situ des glissements de terrain est continue depuis la fin des années 1970. Le développement de nouveaux types de capteurs et les progrès dans la chaîne de traitement et de transmission des données ont conduit à la création de nouvelles techniques ou à l'amélioration sensible de solutions existantes.

Ce rapport a pour objet :

- de recenser les principales innovations récentes en matière d'instrumentation in situ des glissements de terrain,
- d'analyser ce qu'elles apportent ou peuvent apporter,
- de souligner leurs atouts et limites dans l'état actuel de nos connaissances, beaucoup de ces techniques étant en effet encore au stade expérimental.

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

- un aperçu des avancées récentes en termes de capteurs et de gestion des données,
- cinq types de techniques qui bénéficient de ces progrès :
 - les chaînes inclinométriques,
 - la réflectométrie temporelle,
 - les capteurs à fibre optique,
 - les GNSS¹,
 - les mesures géophysiques en continu, sismiques ou électriques.

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 références – non exhaustives – sont citées en fin de chaque partie.

1 Le terme GNSS (Global Navigation Satellite System) comprend le système GPS (Global Positioning System) qui est stricto sensu un GNSS utilisant la constellation satellitaire pionnière, américaine. Le terme GPS utilisé dans le langage courant désigne souvent des appareils pouvant exploiter plusieurs constellations.

1 – L’observation des glissements de terrain

Un glissement de terrain correspond au **déplacement d’une masse supposée quasi-indéformable de terrains meubles ou rocheux le long d’une surface de rupture** (plane, circulaire ou quelconque). Le terme glissement de terrain n’inclut pas les phénomènes de chutes de blocs, de fauchage ou de coulées boueuses.

Chaque glissement est particulier des points de vue de sa morphologie, de son volume, de sa surface, de sa profondeur, de sa vitesse et de ses enjeux (impacts réels ou potentiels).

1 – Finalités

La définition d’une méthodologie d’observation d’un glissement de terrain va être fonction d’une part du site mais également des **finalités** recherchées :

- compréhension du phénomène,
- gestion du risque.

1 – Compréhension du phénomène

Quel que soit le site et le risque qu’il représente, **la première finalité de l’observation d’un glissement de terrain est la compréhension du phénomène.**

Cette compréhension est utile à l’amélioration des connaissances scientifiques dans le domaine, mais elle est surtout primordiale pour parvenir à gérer le risque efficacement.

2 – Gestion du risque

Lorsqu’un risque existe, les finalités de l’observation du glissement différeront selon la possibilité – ou la pertinence – d’agir sur l’aléa :

L’observation des glissements pour la gestion du risque	
Agir sur l’aléa Dimensionnement de parade	L’observation du glissement permet d’obtenir les paramètres nécessaires au dimensionnement d’une solution de stabilisation ou de confortement adaptée.
Agir sur l’enjeu Gestion de la sécurité	L’observation du glissement consiste en un système de surveillance. Cette surveillance permet d’alerter les gestionnaires ou décideurs qui prennent des dispositions pour assurer la sécurité.

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

2 – Objectifs

L’observation peut être divisée en **trois objectifs** :

- l’analyse du contexte général du site par le recueil des données existantes,
- la caractérisation du site d’un point de vue statique (image du site à l’instant t),
- le suivi permettant la caractérisation de la dynamique du site.

1 – Analyser le contexte général du site

Avant la mise en observation d’un site, il est nécessaire de faire l’**état des lieux des connaissances** du site et de son environnement.

Cet état des lieux est réalisé par la **collecte des données existantes**, sur un secteur géographique plus large que le site seul. Il s’agit de données concernant la géologie, la climatologie, la géomorphologie, l’historique du site, la recherche de sites similaires, etc.

Ce recueil de données permet d’obtenir une première image du site afin de choisir les moyens d’observation adaptés.

Les moyens d’observation comprennent **les moyens techniques et les moyens humains**. L’interprétation des données nécessite en effet une expertise, tant dans la connaissance des techniques que celle du domaine étudié.

Les moyens ainsi mis en œuvre vont permettre d’obtenir des informations sur le glissement, à un instant donné et sur son évolution dans le temps, dans trois domaines :

- les caractéristiques du glissement en **surface**,
- les caractéristiques du glissement en **profondeur**,
- l’eau et les **conditions hydrogéologiques**.

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

2 – Objectifs (suite)

2 – Obtenir une image du site à l’instant t Une fois le contexte général du site établi, une investigation du glissement est nécessaire afin d’obtenir un **modèle du site**.

Une **instrumentation** géotechnique peut être mise en place dans cette étape, permettant essentiellement de préciser le modèle géométrique, géotechnique et hydrogéologique. Le relevé n’est pas nécessairement périodique et la valorisation des données peut se faire en temps différé.

Moyens d’investigation des glissements de terrain (à un instant donné)		
En surface	Cartographie des limites du glissement et de sa morphologie	<ul style="list-style-type: none"> – Lever topographique – Analyse d’images aériennes ou satellites – Levers de terrain
En profondeur	<ul style="list-style-type: none"> – Construction d’un modèle géologique et géotechnique – Localisation et caractérisation de la (ou des) surface(s) de rupture 	<ul style="list-style-type: none"> – Campagnes de reconnaissances géotechniques : sondages, essais in situ et en laboratoire – Campagnes de reconnaissances géophysiques – Instrumentation (inclinomètres)
Des conditions hydrauliques	Définition d’un modèle hydrogéologique du glissement : niveaux de nappes, circulations, précipitations	<ul style="list-style-type: none"> – Campagnes de reconnaissances géophysiques – Campagnes de reconnaissances géotechniques : essais d’eau, piézométrie – Campagnes de reconnaissances hydrogéologiques : essais de traçage, mesures physico-chimiques – Levers de terrain (sources) – Instrumentation : Piézométrie, Météorologie

Dans une finalité de gestion du risque par **réalisation d’une solution de stabilisation ou de confortement**, la caractérisation mécanique des terrains obtenue par le biais de sondages et d’essais, ainsi qu’une bonne image du fonctionnement hydrogéologique sont essentielles.

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

2 – Objectifs (suite)

3 – Suivre l’évolution du site Le suivi du site consiste en l’**examen périodique du site et le recueil de données qualitatives et quantitatives permettant d’apprécier son évolution**. La périodicité des relevés et les délais de transmission et d’interprétation des données dépendent principalement des vitesses attendues et de l’objectif poursuivi. Certains sites peuvent ainsi être suivis de manière à avoir des données en continu, transmises et exploitées en temps réel, mais cela reste exceptionnel.

L’instrumentation occupe une place importante dans les moyens de suivi d’un site : on parle également de **monitoring**.

Moyens de suivi des glissements de terrain (évolution dans le temps)		
En surface	Caractériser, quantifier et localiser les déformations et les déplacements en surface	<ul style="list-style-type: none"> – Instrumentation : géotechnique, géodésie, télédétection – Levers de terrain réguliers
En profondeur	Caractériser, quantifier et localiser les déformations et les déplacements en profondeur	<ul style="list-style-type: none"> – Instrumentation : géotechnique, géophysique
Des conditions hydrauliques	<ul style="list-style-type: none"> – Caractériser et relier les variations des conditions météorologiques aux variations des conditions hydrauliques – Caractériser et relier les variations des conditions hydrogéologiques aux déformations et aux déplacements 	<ul style="list-style-type: none"> – Instrumentation : géotechnique, géophysique – Levers de terrain réguliers – Relevés météorologiques

Dans une finalité de gestion du risque par installation d’un **système de surveillance**, les moyens de suivi mis en œuvre sont généralement plus lourds que ceux mis en œuvre pour la seule étude phénoménologique. La fréquence des relevés et la rapidité d’exploitation des données sont également augmentés.

Des seuils ou critères d’alerte sont définis par avance et permettent de prévenir les gestionnaires concernés de l’imminence d’un événement.

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

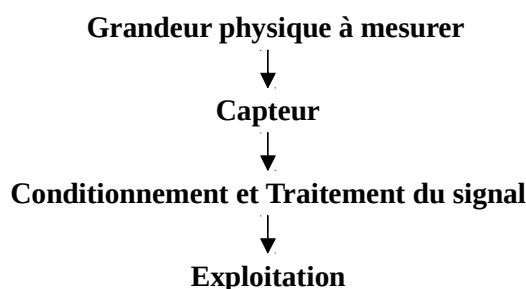
3 – L'instrumentation des glissements de terrain

L'instrumentation intervient principalement pour le suivi des glissements, elle y est même souvent essentielle.

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)

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 grandeur physique mesurée par le capteur n'est pas toujours celle recherchée : une interprétation des mesures est souvent nécessaire. Par exemple, une sonde inclinométrique mesure des angles par rapport à la verticale : l'exploitation du relevé permet de calculer les déplacements.

2 – Familles d'instrumentation

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

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

Cette classification est pertinente vis-à-vis des connaissances nécessaires à leur mise en œuvre et à la maîtrise du fonctionnement des capteurs et des appareils de mesure.

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

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

3 – Instrumentation in situ, instrumentation à distance On différencie généralement l'instrumentation in situ de l'instrumentation à distance. Les trois domaines d'auscultation (surface, profondeur et conditions hydrauliques) peuvent être étudiés par l'instrumentation in situ. L'instrumentation à distance permet uniquement d'avoir des mesures de surface. Le présent rapport se focalise sur l'instrumentation in situ.

		Familles	Domaines
Instrumentation in situ	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 	<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 (accessibilité du site, dégradations du matériel, autonomie énergétique, etc.)

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

4 – Technologies usuelles d'instrumentation

Différentes techniques d'instrumentation peuvent être mises en place, les plus courantes sont rappelées ici, classées par familles. Un panorama plus complet et détaillé peut être trouvé dans les rapports Safeland et ClimChAlp, dont les références sont en fin de chapitre.

1 – Géotechnique Les méthodes géotechniques permettent de caractériser :

- les déplacements (en surface et en profondeur),
- les conditions hydrogéologiques.

Les informations obtenues sont **très précises, mais toujours ponctuelles**.

Méthodes d'instrumentation géotechnique courantes	
Extensométrie	<p>Les extensomètres sont des dispositifs permettant de mesurer une variation de distance entre deux points. Ils peuvent être de natures très diverses.</p> <p>Souvent installés en surface, ils peuvent également mesurer des distances en forage.</p>
Inclinométrie	<p>Les inclinomètres sont constitués d'un tube scellé dans le terrain, verticalement, horizontalement ou incliné. Une sonde comportant des capteurs (accéléromètres) est introduite dans le tube.</p> <p>La sonde mesure la déformation du tube, qui permet de caractériser l'amplitude et la direction des déplacements en fonction de la profondeur.</p> <p>Il existe également des chaînes inclinométriques qui restent en place dans le tube et permettent un relevé en continu.</p>
Piézométrie	<p>Les piézomètres permettent de mesurer le niveau d'eau dans le terrain.</p> <p>Ils peuvent être de type ouvert dans des terrains perméables ou constitué d'une sonde de mesure de pression interstitielle dans les terrains faiblement perméables.</p>

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

4 – Technologies usuelles d'instrumentation (suite)

- 2 – Géodésie** Le suivi géodésique des glissements permet de **quantifier les mouvements superficiels**. Il s'agit de mesures ponctuelles. Les différences entre deux relevés sont interprétées en termes de déplacement et de vitesse.

Méthodes d'instrumentation géodésique courantes	
Géodésie infrarouge	<p>Cette technique utilise un tachéomètre (ou station totale), généralement à visée infrarouge, qui mesure les angles et les distances d'objets ou de cibles situés en surface du glissement.</p> <p>Cette technique nécessite d'avoir une bonne visibilité et de pouvoir placer l'appareil de mesure de manière stable sur un versant opposé au glissement. La mesure peut être automatisée.</p>
GNSS (Global Navigation Satellite System)	<p>La solution GNSS permet de suivre les déplacements de points à la surface du glissement. La position des points est calculée en coordonnées absolues ou relatives à partir d'un canevas de référence local.</p> <p>Ces positions peuvent être obtenues en temps quasi-réel (quelques minutes) ou en temps réel (quelques secondes).</p> <p>Si les solutions GNSS ne sont pas adaptées aux zones au couvert forestier dense ou dans des vallées encaissées, elles s'affranchissent en revanche des autres problèmes de visibilité (climat, obstacles).</p>

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

4 – Technologies usuelles d’instrumentation (suite)

3 – Télédétection La télédétection est une instrumentation à distance, fréquemment utilisée pour le suivi des glissements de terrain. Elle permet d’obtenir un **champ de déplacements** sur l’ensemble d’un versant, parfois en **trois dimensions**.

Les récents développements dans les outils, leur précision et la diminution de leur coût rendent ces techniques de plus en plus intéressantes.

Méthodes d’instrumentation par télédétection	
Corrélation d’images	<p>La comparaison de deux images prises à un intervalle de temps donné permet d’évaluer les déplacements en surface.</p> <p>Cette information peut être 2D, ou 3D si un modèle numérique de terrain (MNT) est disponible (obtenu par photogrammétrie ou d’autres méthodes).</p> <p>Les images peuvent être issues de sources différentes : satellite, aérienne ou terrestre.</p>
Interférométrie Radar (InSAR)	<p>Ces techniques utilisent deux images radar issues de satellites (Differential-InSAR) ou de radar terrestre (Ground Based InSAR).</p> <p>L’analyse par interférométrie des deux images permet d’obtenir un champ de déplacements.</p>
Scanner laser	<p>Les scanners laser, qu’ils soient terrestres (TLS) ou aéroportés (ALS), permettent d’obtenir une image en 3D d’objets ou de versants entiers (MNT).</p> <p>La comparaison de deux MNT réalisés à deux dates différentes permet de suivre l’évolution d’un glissement.</p> <p>Les MNT obtenus par ALS, aussi appelé LIDAR (Light Detection And Ranging), sont très précis.</p>

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

4 – Technologies usuelles d’instrumentation (suite)

4 – Géophysique Si la géophysique est couramment utilisée pour l’investigation des glissements et l’obtention d’un modèle du site, son utilisation en suivi temporel est récente.

Les méthodes géophysiques sont des méthodes parfois lourdes à mettre en œuvre et produisent une importante quantité de données qu’il est nécessaire de traiter. Ce sont les progrès dans ces domaines qui permettent d’utiliser aujourd’hui ces techniques : elles sont présentées de manière plus détaillée dans les parties 7 et 8 du rapport.

Méthodes d’instrumentation géophysiques	
Sismique	<p>Les méthodes sismiques (analyse du bruit de fond en continu, écoute acoustique ou écoute microsismique) permettent d’obtenir des informations sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> – la variation des caractéristiques mécaniques des terrains, – les événements se produisant au sein du glissement, – l’activité du glissement.
Électrique	<p>Les méthodes électriques (résistivité, polarisation spontanée) permettent d’obtenir des informations sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> – les variations des caractéristiques hydrogéologiques des terrains – les circulations d’eau.

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

5 – Références

SafeLand deliverable 4.1. (2010). Review of techniques for landslide detection, fast characterization, rapid mapping and long-term monitoring.

ClimChAlp Work Package 6. (2008). Slope monitoring methods, a state of the art report.

2 – Avancées technologiques récentes

Les **avancées technologiques** récentes dans le domaine de l'instrumentation des glissements de terrain présentées dans ce rapport concernent différents niveaux de la chaîne d'instrumentation :

- **les capteurs,**
- **les équipements de gestion des données.**

1 – Nouveaux capteurs

L'instrumentation des glissements de terrain bénéficie des progrès technologiques liés aux nouveaux capteurs.

Ces capteurs sont généralement, à l'origine, développés pour des applications industrielles (télécommunications, industrie automobile, etc.) :

- capteurs MEMS (Microelectromechanical systems),
- marqueurs RFID (Radio Frequency Identification),
- fibre optique.

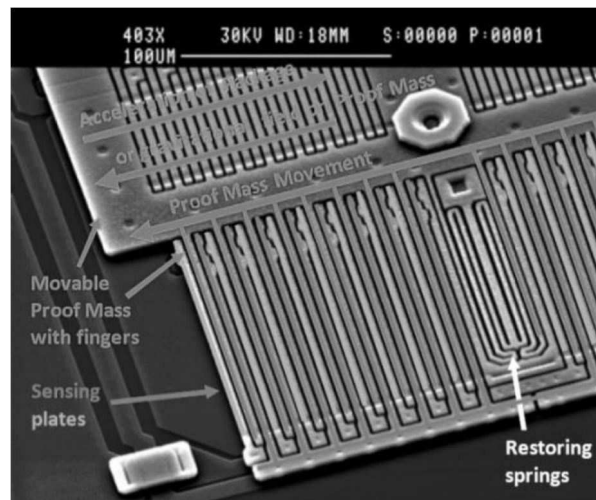
Ces nouveaux capteurs (MEMS, fibre optique) remplacent au fur et à mesure les capteurs usuels dans les instruments de mesure existants. Ils permettent également l'apparition de nouveaux instruments de mesure ou de nouvelles techniques d'instrumentation (RFID, fibre optique).

2 – Avancées technologiques récentes (suite)

1 – Nouveaux capteurs (suite)

1 – MEMS Le terme MEMS signifie Microelectromechanical systems, et peut se traduire par **Microsystèmes électromécaniques**.

Principe Les capteurs MEMS sont des capteurs très **miniaturisés**. Tous types de capteurs sont concernés : accéléromètres, clinomètres, magnétomètres, thermomètres, etc.



Accéléromètre MEMS (microscope électronique)

Applications La technologie MEMS se développe depuis plusieurs années et de nouveaux capteurs plus performants apparaissent régulièrement sur le marché (médecine, automobile, smartphones, etc.)

En instrumentation géotechnique, **les capteurs MEMS équipent maintenant les nouveaux modèles d'appareils** (inclinomètres par exemple).

Les caractéristiques des capteurs permettent également de créer une **instrumentation multi-paramètre** :

- par l'insertion de plusieurs micro-capteurs dans un même instrument,
- par le développement de capteurs multi-paramètres.

Avantages Ces capteurs MEMS apportent plusieurs avantages par rapport aux capteurs utilisés jusqu'ici :

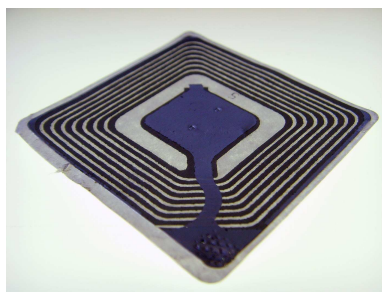
- leur taille réduite (de 10 μm à 1 mm),
- leur faible coût (fabrication en série),
- leur faible consommation énergétique,
- l'homogénéité entre les capteurs,
- leur facilité d'utilisation.

2 – Avancées technologiques récentes (suite)

1 – Nouveaux capteurs (suite)

2 – RFID La technique RFID (Radio Frequency Identification) est souvent utilisée pour les étiquettes électroniques des marchandises, le marquage d'animaux ou le paiement sans contact.

Principe La technique RFID (Radio Frequency Identification) est le plus souvent constituée de **marqueurs passifs** – composés d'une puce et d'une antenne – et d'un **lecteur actif**. Lorsque les deux éléments sont suffisamment proches, le lecteur active le marqueur et récupère ses informations. Il existe également des **marqueurs actifs** qui, munis d'une batterie, émettent un signal. Ce signal peut être lu à une distance plus importante.



Marqueur RFID passif

Applications Dans l'industrie minière, les marqueurs RFID passifs et plus récemment actifs sont utilisés pour tracer les matériaux extraits, y compris en sous-sol. En effet, **certaines fréquences radio** (basses fréquences) **peuvent traverser les couches géologiques**.

Les potentialités des **marqueurs actifs** pour l'instrumentation géotechnique en général et des glissements de terrain en particulier sont plutôt grandes. L'implantation d'un réseau de marqueurs, en surface ou en profondeur, pourrait par exemple fournir un **champ de déplacements** (en relatif).

À ce jour, aucune expérimentation n'a fait l'objet de publication. On peut cependant citer comme projets en cours ou à venir :

- le suivi de la stabilité des talus de mine à ciel ouvert par l'insertion de marqueurs en profondeur (projet du fournisseur de marqueurs Elexon Mining);
- le suivi de laves torrentielles par l'implantation de marqueurs sur des objets en surface (projet VOR, D. Jongmans, Université Grenoble I).

Avantages Les principaux avantages du RFID comparé aux autres techniques (géodésie, télédétection) sont :

- faible coût du matériel (antenne 2000 €, marqueur actif 100 €),
- fonctionnement sans contrainte de visibilité ou de conditions météorologiques.

2 – Avancées technologiques récentes (suite)

1 – Nouveaux capteurs (suite)

3 – Fibre optique Les applications industrielles habituelles de la fibre optique utilisent ses propriétés de conduction de la lumière pour la transmission de données à haut débit.

Principe Lorsque les propriétés physiques de la fibre (pression, température, déformation, etc.) changent, la diffusion d'un signal lumineux en son sein va être modifiée. L'analyse du signal permet ainsi de mesurer différents paramètres.

Applications La fibre optique est utilisée de deux manières en instrumentation :

- en tant que **capteurs ponctuels** (accéléromètres, piézomètres, sondes de température, etc.),
- en tant qu'**extensomètres ou capteurs de déformation distribués**.

Le développement de ces capteurs vise principalement à l'**instrumentation d'ouvrages ou de structures**. Les capteurs spécifiquement destinés à des applications géotechniques sont plus récents.

Compte-tenu des avancées que l'utilisation de la fibre optique peut amener, le domaine est actuellement l'objet de nombreuses recherches.

Avantages Les principaux avantages de la fibre optique résident dans :

- **son insensibilité aux ondes électromagnétiques**, et donc aux effets des orages ;
- la précision élevée des mesures ;
- la possibilité d'une mesure continûment répartie.

2 – Avancées technologiques récentes (suite)

2 – Progrès techniques dans la gestion des données

Dans le cadre général de ce qui est désormais qualifié de « big data » (ou mégadonnées), le développement des nouvelles technologies d'instrumentation des glissements de terrain tient également de l'amélioration des techniques utiles à **la récupération, la transmission, le traitement et l'analyse des données** :

- les capacités de calcul,
- les transmissions sans fil,
- les développements des logiciels.

Les progrès dans ces domaines permettent entre autre d'envisager l'instrumentation en continu de sites à faible enjeu, c'est-à-dire pas uniquement dans une finalité de gestion du risque.

1 – Capacités des serveurs, capacités de calcul

Le développement des capacités des serveurs de données permet de pouvoir utiliser pour le suivi des glissements des **techniques générant un grand volume de données** telles que :

- les méthodes géophysiques (électrique ou microsismique),
- la fibre optique.

D'autre part, l'**amélioration des capacités de calcul** permet de :

- traiter les données sans besoin de recourir à des calculateurs au coût prohibitif,
- améliorer le traitement des données par l'utilisation d'algorithmes plus précis ou complexes.

2 – Avancées technologiques récentes (suite)

2 – Progrès techniques dans la gestion des données (suite)

2 – Transmission des données à distance Compte-tenu de l'éloignement des sites, la transmission des données à distance entre le site et le centre d'exploitation s'est mise en place assez rapidement. Les avancées dans ce domaine concernent principalement les débits, la fiabilité et les coûts en nette diminution.

Protocoles de communication Les **protocoles de communication sans fil** utilisés le plus couramment sont :

- WIFI,
- RFID,
- Zigbee.

Réseaux de capteurs sans fil La transmission sans fil des données a également des applications sur le terrain, par la mise en place de **réseaux de capteurs sans fil** (Wireless sensor network ou WSN). Le développement de tels réseaux est permis par les progrès en termes de capteurs et des technologies de transmission sans fil. Par exemple, les **micro-capteurs, de type MEMS**, sont alimentés par batterie et contiennent :

- une unité de mesure numérique,
- une unité de traitement et de stockage des données,
- une unité de communication sans fil.

La création d'un tel réseau nécessite une réflexion approfondie sur sa structuration (nombre et espacements des nœuds), en particulier quand la zone à couvrir est vaste.

Les problèmes les plus récurrents de ce type de systèmes sont :

- la durée de vie des batteries des capteurs,
- la difficulté d'intégration de plusieurs types de données,
- la difficulté, voire l'impossibilité, à isoler les sources d'erreur ou de perte d'information dans le système.

2 – Avancées technologiques récentes (suite)

2 – Progrès techniques dans la gestion des données (suite)

3 – Analyse des données Les progrès techniques en termes de capteurs et de capacités des serveurs ont tendance à générer un plus grand nombre de données, qui plus est de nature différente (GNSS, températures, inclinométrie, etc.)

Le plus fréquemment, chaque instrument ou technique possède son propre logiciel d'analyse des données, celui-ci n'étant d'ailleurs pas toujours conçu de manière optimale pour l'utilisateur. **La multiplication des données augmente ainsi d'autant le temps d'analyse.**

Gestion intégrée de différentes sources de données

Les solutions permettant dans une même interface le traitement de plusieurs sources de données sont peu fréquentes et généralement adaptée à un glissement – et une instrumentation – en particulier.

Certains fournisseurs d'instrumentation géotechnique proposent des logiciels qui permettent d'intégrer différentes données (issues des capteurs qu'ils distribuent). Ces logiciels sont plutôt pensés pour le suivi de projets : il y a peu de références pour le suivi de glissements de terrains.

On peut également signaler le projet **SLEWS** (Sensor-based Landslide Early Warning System) qui cherche à développer un système flexible (adapté à différents types glissements de terrain) de surveillance : de la conception du réseau de capteurs à la visualisation des données et l'émission d'alertes.

Importance du facteur humain

L'analyse des données est le dernier maillon de la chaîne, et le regard de l'expert est primordial. Ce **regard critique** est d'autant plus important que le reste de la chaîne devient automatisée.

Les logiciels qu'il est nécessaire de créer doivent ainsi à la fois permettre de limiter le temps d'analyse d'une grande quantité d'informations, tout en laissant la possibilité à l'utilisateur d'avoir une vision complète de la donnée.

2 – Avancées technologiques récentes (suite)

3 – Références

Capteurs Sellers, J. B., & Taylor, R. (2008). MEMS Basics. *Geotechnical Instrumentation News*, n°54.

Inaudi, D., & Glisic, B. (2007). Overview of fiber optic sensing technologies for geotechnical instrumentation and monitoring. *Geotechnical Instrumentation News*, n°52.

<http://www.elexonmining.com/>

Gestion des données Web-based data management softwares. (2011). *Geotechnical Instrumentation News*, n°65-66.

Fernandez-Steeger, T. M., Arnhardt, C., Walter, K., Haß, S., Niemeyer, F., Nakaten, B., ... & Ritter, H. (2009). SLEWS–A prototype system for flexible real time monitoring of landslides using an open spatial data infrastructure and wireless sensor networks. *Geotechnologien science report*, 13, 3-15.

3 – Chaînes inclinométriques

1 – Chaînes inclinométriques classiques

L'inclinométrie est une technique qui donne de très bons résultats pour le suivi des glissements de terrain. Elle permet en effet de **mesurer précisément les déplacements horizontaux en profondeur (amplitude et direction)**, d'identifier les surfaces de rupture et participe à la compréhension du mécanisme du glissement.

1 – Principe Les inclinomètres en place ou **chaînes inclinométriques** consistent en une série d'éléments rigides pouvant contenir chacun un accéléromètre uniaxial, biaxial ou triaxial. Les capteurs peuvent être répartis de manière équidistante le long de la chaîne, ou concentrés aux profondeurs où la déformation est attendue.

2 – Atouts Installés en permanence dans un forage, ils permettent une **mesure des déplacements en continu** dans le temps et peuvent être couplés avec un système de transmission des données à distance. Ils représentent une avancée pour l'instrumentation et la surveillance de sites difficilement accessibles.

3 – Limites Les chaînes inclinométriques font cependant face à plusieurs inconvénients :

- la mesure est **ponctuelle** et l'installation de plusieurs inclinomètres se heurte à des problèmes de faisabilité technique et surtout financière,
- comme pour un inclinomètre manuel, la durée de mesure peut être très courte dans le cas d'un glissement rapide : au bout d'un certain **taux de déformation**, la chaîne inclinométrique est détruite,
- la **résistance** du système est **limitée** pour des sites en conditions extrêmes.

Plusieurs modèles récents de chaînes inclinométriques cherchent à améliorer leurs performances vis-à-vis de ces limites :

- les chaînes inclinométriques à capteurs MEMS,
- les SAA,
- la colonne DMS.

3 – Chaînes inclinométriques (suite)

2 – Chaînes inclinométriques à capteurs de type MEMS

Le développement des capteurs de type MEMS (cf. chapitre 2) a permis en particulier l'apparition d'accéléromètres de plus en plus précis.

1 – Principe Usuellement de type balance de force ou à corde vibrante, les capteurs équipant les sondes inclinométriques peuvent être remplacés par des capteurs (accéléromètres) de type MEMS. Ils sont systématiquement couplés avec une sonde de température pour correction.

2 – Application L'application de ce type de capteurs en inclinométrie est aujourd'hui courante : les nouveaux modèles de sondes ou de chaînes proposées par les fabricants sont très souvent équipés de capteurs MEMS. Certains auteurs (Uchimura et al., 2011) développent des instruments de plus en plus petits, ne nécessitant pas de forage préalable à leur installation afin de diminuer drastiquement les coûts d'instrumentation.

3 – Atouts L'utilisation de ce type de capteurs amène plusieurs avancées :

- l'**homogénéité des capteurs** entre eux permet de pouvoir comparer les mesures de manière certaine,
- le **faible coût** de production des capteurs permet de diminuer fortement les coûts totaux.

Ces atouts permettent de :

- **suivre un plus grand nombre de glissements** de terrains dans des zones reculées, y compris dans des régions en développement (Uchimura et al., 2011).
- **installer un plus grand nombre d'inclinomètres sur un seul glissement** afin d'avoir une vision en 3D des surfaces de rupture et des déplacements en profondeur.
- relier les chaînes inclinométriques à un réseau de capteurs et à un système de transmission automatique des données

3 – Chaînes inclinométriques (suite)

3 – SAA

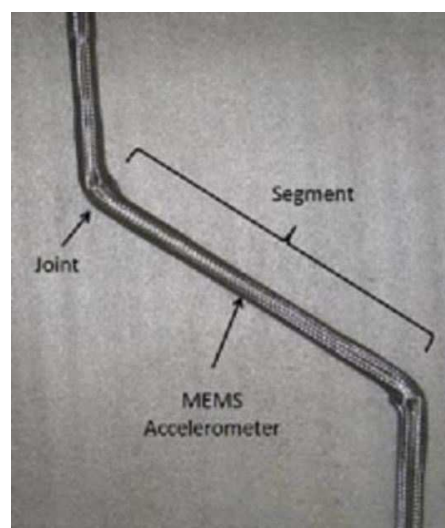
SAA est l'acronyme de **ShapeAccelArray**, une chaîne inclinométrique fabriquée et commercialisée par la société Measurand (Canada).

1 – Principe Le système ShapeAccelArray est constitué de **segments rigides de 30,5 cm ou 50 cm** de longueur, reliés entre eux par des joints flexibles empêchant la torsion. La longueur totale peut atteindre 100 m.

Chaque segment contient un accéléromètre triaxial de type MEMS couplé avec une sonde de température pour correction. Cette chaîne est entourée d'un **tube flexible** scellé par un coulis dans un forage, sans besoin de tube inclinométrique.



SAA sur son support



Segment de SAA

De par sa souplesse, ce système a une importante tolérance au cisaillement. Pour une installation verticale, les résultats sont représentés sous forme d'une polyligne 3D représentant la forme de la SAA.

L'incertitude sur la mesure est d'environ +/- 1,5 mm sur 30 m.

Le coût de l'instrument est légèrement supérieur au coût d'une chaîne inclinométrique MEMS classique (environ 1000 € du mètre linéaire).

3 – Chaînes inclinométriques (suite)

3 – SAA (suite)

2 – Applications Ce système a été mis en œuvre pour la surveillance de glissements de terrain rapides avec des résultats prometteurs (Dasenbrock, 2014). Les applications de cet instrument dans le domaine géotechnique comprennent aussi le suivi d'ouvrages (installation verticale ou horizontale), la mesure de convergence dans les tunnels ou des mesures de vibrations en continu.

Il peut également être couplé avec un système d'alerte déclenché par le dépassement d'un seuil (de déplacement ou de vibration).

3 – Atouts L'avantage principal réside dans le **fort taux de déformation** accepté par le système. Il est ainsi possible de :

- suivre un glissement avec le même inclinomètre sur un temps plus long,
- suivre par inclinométrie un glissement dont les déplacements attendus sont importants.

De plus, si le rayon de courbure du tube reste supérieur à 3,5 m, **l'inclinomètre peut être récupéré et réutilisé** dans un autre forage, diminuant ainsi les coûts d'investissement.

4 – Limites La souplesse du système nécessite en revanche une **installation à faire avec beaucoup de précautions** pour éviter toute déformation, en particulier quand la longueur excède 10 m ou que le pied de l'inclinomètre est situé sous le niveau de la nappe.

Les spécifications à suivre pour un fonctionnement optimal du système sont détaillées dans le mode d'emploi disponible sur le site du constructeur.

3 – Chaînes inclinométriques (suite)

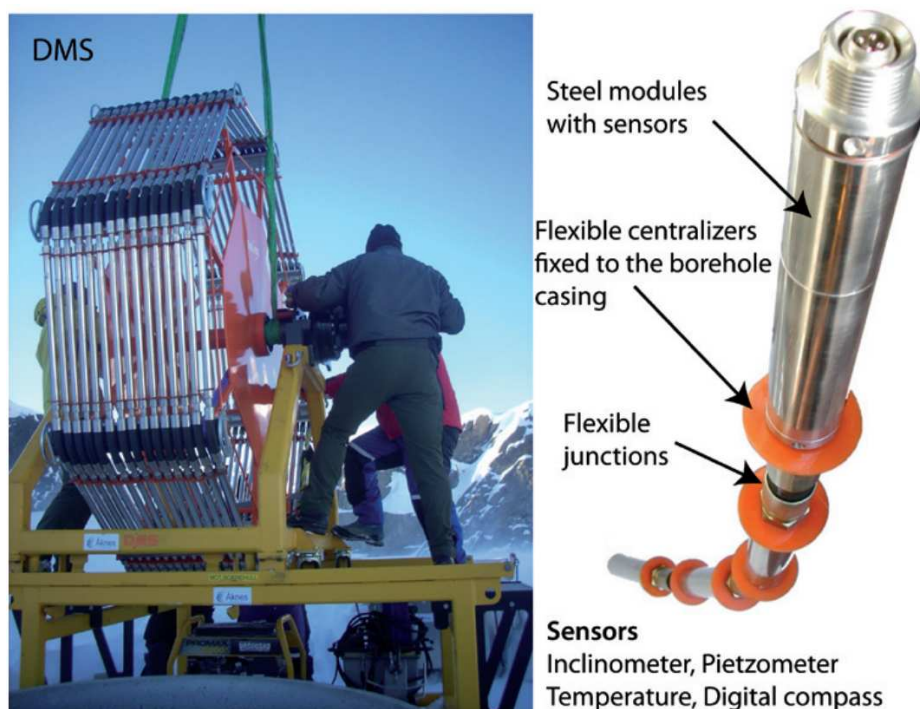
4 – DMS

DMS est l'acronyme de Differential Monitoring of Stability, une **chaîne de mesure multiparamétrique** conçue et commercialisée par CSG (Centro Servizi di Geingegneria, Italie).

1 – Principe La colonne DMS est composée de **segments d'acier d'1 m de longueur reliés entre eux par des joints flexibles**. La longueur totale de la colonne peut atteindre 250 m.

Chaque segment comprend un ou plusieurs capteurs ainsi que les éléments nécessaires à la récupération et la transmission des données. Ces capteurs sont de type :

- clinomètre biaxial,
- accéléromètre (mono/bi/triaxial),
- thermomètre,
- piézomètre,
- boussole numérique.



Installation et conception de la colonne DMS de 120 m de long mise en place sur le glissement de Mannen, Norvège (Blikra et al., 2013)

3 – Chaînes inclinométriques (suite)

4 – DMS (suite)

2 – Applications À l'heure actuelle, une quinzaine de colonnes DMS ont été installées sur plusieurs glissements de terrain, principalement dans les régions alpines (Italie, Autriche) et en Norvège. Les mesures obtenues sont de bonne qualité et la colonne est souvent couplée avec un système d'alerte (Blikra et al., 2013).

3 – Atouts Les atouts principaux de cette colonne sont :

- la mesure multiparamétrique en continu, transmise à distance en temps réel.
- sa durée de vie et la résistance : la colonne DMS est conçue pour **résister à des conditions extrêmes** (température, pression, traction, déformation) afin de pouvoir être mise en place dans tout type d'environnement (y compris marin).
- son adaptabilité : des configurations pré-établies par le fabricant existent, selon l'objectif ou le type de pente suivie. Il est cependant possible de faire réaliser une **configuration particulière, adaptée au site suivi**. Il est également possible, lorsque la colonne n'est pas installée à demeure, de récupérer les éléments et de les réagencer pour instrumenter un nouveau forage.

4 – Limites L'inconvénient principal est le **coût de l'instrument, ainsi que de son installation**. En effet, compte-tenu du poids, l'installation doit être obligatoirement réalisée par hélicoptère pour une colonne d'une longueur supérieure à 15 m. Le coût d'investissement est d'autant plus important si la colonne reste à demeure dans le cas d'un système d'alerte par exemple.

Il reste adapté pour la **surveillance de glissements de terrain en environnement difficile et peu accessibles**, où la simple réalisation d'un forage représente déjà un investissement important qu'il convient de rentabiliser.

3 – Chaînes inclinométriques (suite)

5 – Références

Chaînes MEMS Uchimura, T., Wang, L., Qiao, J.P., and Towhata, I. 2011. Miniature ground inclinometer for slope monitoring. *Proc. of the 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hongkong.*

SAA Dasenbrock, D. 2014. Performance observations of MEMS ShapeAccelArray (SAA) deformation sensors. *Geotechnical Instrumentation News, n°78*

<http://www.measurandgeotechnical.com>

DMS Blikra, L.H., Kristensen, L., Lovisolo, M. 2013. Subsurface monitoring of large rockslides in Norway : a key requirement for early warning. *Italian Journal of Engineering Geology an Environment.*

<http://www.csgrl.eu>

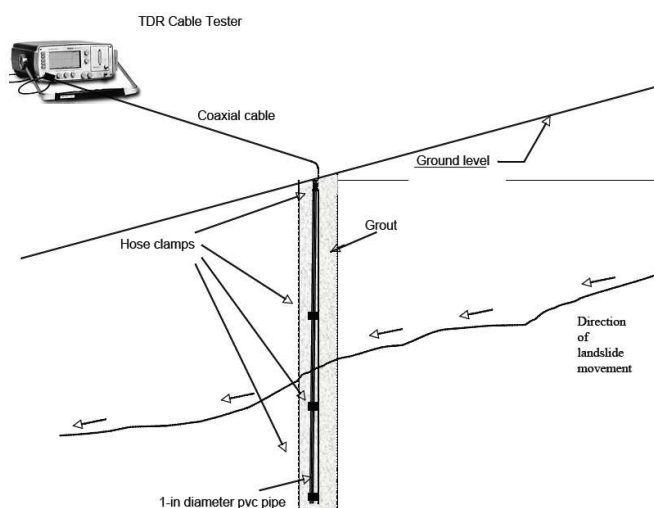
4 – Réflectométrie temporelle

1 – Principe La technologie de réflectométrie temporelle (Time Domain Reflectometry ou TDR) est un système de radar par câble.

Le système est constitué :

- d'un **câble coaxial** entouré d'une gaine isolante scellé par un coulis dans un forage,
- d'un appareil de mesure (**réflectomètre**).

Le réflectomètre envoie un courant dans le câble. À l'endroit où le câble est déformé, le courant est réfléchi puis mesuré par le réflectomètre. Le temps de parcours est traduit en une profondeur. L'amplitude du signal mesuré est fonction de l'amplitude de la déformation du câble.



Instrumentation par TDR (Cortez et al., 2009)

Les performances de mesure du système sont les suivantes :

Paramètre	Qualité de la mesure
Profondeur de la déformation	Très bonne précision pour une surface de cisaillement de faible épaisseur
Amplitude du déplacement	La corrélation entre l'amplitude du signal et l'amplitude du déplacement peut être établie uniquement avec un calibrage du système en laboratoire.
Direction du déplacement	Non mesurée

L'absence de mesure fiable de l'amplitude des déplacements fait l'objet de recherches actuelles (université de Munich), visant à définir des **procédures standardisées d'installation** du système (Singer et al., 2010), chacune adaptée à un contexte précis (nature du matériau, vitesse de glissement, etc.)

4 – Réflectométrie temporelle (suite)

2 – Applications La réflectométrie temporelle a été utilisée pour l'étude de plusieurs glissements de terrain, mais systématiquement couplée avec d'autres méthodes de mesure des déplacements comme l'inclinométrie (Singer et al., 2009).

Son usage semble également répandu aux États-Unis pour la surveillance des pentes le long des infrastructures routières. Le ministère de l'agriculture (USDA) a édité en 2009 un guide pour les utilisateurs (Cortez et al., 2009).

3 – Atouts L'intérêt de cette technique réside principalement dans :

- la **simplicité et rapidité de la mesure**,
- le **faible coût** (du matériel et du forage dont le diamètre est inférieur à celui nécessaire pour l'installation d'un inclinomètre),
- la possibilité de mesure en continu et de transmission à distance.

La technique TDR est bien adaptée pour la **localisation précise en profondeur d'une ou plusieurs surfaces de cisaillement de faible épaisseur**.

Il est possible d'envisager cette technologie pour :

- imager en 3D une surface de cisaillement par l'installation de plusieurs câbles TDR,
- instrumenter des sites à faible enjeu, simplement pour vérifier la présence ou l'absence de mouvement.

Il peut également être envisagé d'installer ce système dans un tube inclinométrique devenu inexploitable afin de continuer la mesure de manière qualitative sur un même forage. Le taux de déformation accepté par le système peut être en effet plus élevé et la perte du câble a peu d'impact financier.

4 – Réflectométrie temporelle (suite)

4 – Limites À l'heure actuelle, cette technique **ne permet pas d'avoir une mesure fiable de l'amplitude des déplacements.**

D'autre part, lors du choix de l'instrumentation et de l'installation, **certaines précautions doivent être prises** concernant :

Formulation du coulis	La rigidité du coulis doit être adaptée aux caractéristiques du sol. Si celle-ci est trop faible ou trop forte, la déformation du terrain ne sera pas transmise au système de mesure.
Longueur du câble de transmission	Dans le cas d'un suivi en continu, le signal est atténué de manière exponentielle dans le câble de transmission jusqu'à la station de mesure. Le câble ne doit pas dépasser 150 m.
Seuil de déplacement	Selon le câble utilisé, le seuil de déplacement nécessaire pour avoir une réflexion du signal varie de 14 à 30 mm.
Vitesse de déplacement	Le diamètre du câble doit être fonction de la vitesse de glissement. Il doit être petit, donc plus sensible, pour un glissement lent et plus large pour un glissement rapide pour éviter une rupture précoce.
Épaisseur de la surface de cisaillement	Si l'épaisseur de la zone de cisaillement est de l'ordre de plusieurs décimètres (ou plus), le mouvement ne sera pas détecté par le système de mesure, car le rayon de courbure du câble ne sera pas suffisant pour induire une réflexion du courant.

5 – Références Singer, J., Schuhbäck, S., Wasmeier, P., Thuro, K., Heunecke, O., Wunderlich, T., ... & Festl, J. (2009). Monitoring the Aggenalm landslide using economic de-formation measurement techniques. *Austrian J Earth Sci*, 102(2), 20-34.

Singer, J., Thuro, K., & Festl, J. (2010). Development and testing of a time domain reflectometry (TDR) monitoring system for subsurface deformations. *Rock mechanics in civil and environmental engineering*. Taylor and Francis Group, London, 613-616.

Cortez, E. R., Hanek, G. L., Truebe, M. A., & Kestler, M. A. (2009). Simplified User's Guide to Time-Domain-Reflectometry Monitoring of Slope Stability (No. 0877 1804—SDTD)

5 – Fibre optique

De manière simplifiée, **l'intensité ou la fréquence d'un signal lumineux diffusé dans une fibre optique est modifiée selon les paramètres du milieu qu'elle traverse**, en particulier **la température et la déformation**.

En instrumentation géotechnique, plusieurs types de capteurs existent :

- les capteurs à mesure continûment répartie,
- les capteurs à réseau de Bragg,
- les capteurs interférométriques longue-base,
- les capteurs interférométriques ponctuels.

1 – Capteurs à mesure continûment répartie

Les capteurs à mesure continûment répartie (également nommés capteurs continus, capteurs répartis ou capteurs distribués) permettent la mesure de milliers de points en même temps sur une même fibre.

Le principe de la mesure consiste à envoyer un signal lumineux depuis une extrémité de la fibre et à analyser le **signal rétro-diffusé** (onde incidente qui est retournée dans la direction d'où elle a été émise). Le spectre de rétro-diffusion est composé par des effets linéaires (rétro-diffusion de Rayleigh) et non linéaires (rétro-diffusion de Raman et Brillouin).

La mesure (de température, de déformation) est localisée sur la fibre en fonction du temps de parcours du signal par la méthode OTDR (Optical Time Domain Reflectometry).

Selon la partie du spectre rétro-diffusé qui est analysée, on distingue quatre méthodes (Lanticq, 2009).

1 – OTDR L'OTDR ou Optical Time Domain Reflectometry est la technique couramment utilisée pour vérifier l'état d'une fibre optique.

La mesure effectuée détecte les modifications de l'intensité du signal : celle-ci est en effet modulée par les défauts de la fibre. Cette technique permet ainsi de **localiser des déformations sur la fibre** sans réellement en mesurer l'amplitude.

2 – OFDR L'OFDR ou Optical Frequency Domain Reflectometry mesure également la variation d'intensité dans le signal réfléchi, avec une source de lumière dont la fréquence varie. Cette méthode a une très bonne résolution pour la **mesure de la déformation et de la température**, mais la distance d'investigation est limitée (< 500 m pour une résolution de 1 cm et < 35 m pour une résolution de 22 μm).

5 – Fibre optique (suite)

1 – Capteurs à mesure continûment répartie (suite)

3 – ROTDR Les capteurs ROTDR (Raman Optical Time Domain Reflectometry) utilisent la rétrodiffusion de Raman : le spectre de fréquence du signal mesuré est modifié par rapport au signal émis en raison de l'interaction entre la lumière et les molécules de la fibre.

Ces capteurs sont uniquement **sensibles à la température** (précision de 0,1°C). Il est possible de mesurer actuellement sur des longueurs de 20 km avec une résolution spatiale comprise entre 0,5 m et 1 m.

4 – BOTDR Les capteurs BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry) utilisent la rétrodiffusion de Brillouin : le spectre de fréquence du signal mesuré est modifié par rapport au signal émis en raison de l'interaction entre la lumière et des ondes acoustiques.

Ces capteurs sont **sensibles à la température** (précision de 0,1°C) **et à la déformation** (précision de 5-20 µε). Il est possible de mesurer actuellement sur des longueurs de 30 km avec une résolution spatiale comprise entre 0,5 m et 1 m.

5 – Applications Les fibres optiques sont ainsi couramment utilisées pour la **surveillance des ouvrages** tels que les barrages, digues, ouvrages d'art et infrastructures. Une fibre incluse dans la structure des ouvrages permet de détecter des déformations ou des réactions chimiques.

Les applications **géotechniques** principales des fibres optiques distribuées sont (Puzrin et al., 2010) :

- la surveillance des déformations dans certaines structures géotechniques (ancrages, pieux, etc.),
- la cartographie des limites de glissements de terrain.

Dans le cas de la définition de l'**extension d'un glissement de terrain**, les fibres sont installées soit dans une infrastructure linéaire (chaussée d'une route), soit directement dans le terrain. Dans ce dernier cas, la fibre est rendue solidaire du terrain par le biais de mini-ancrages (Iten, 2011).

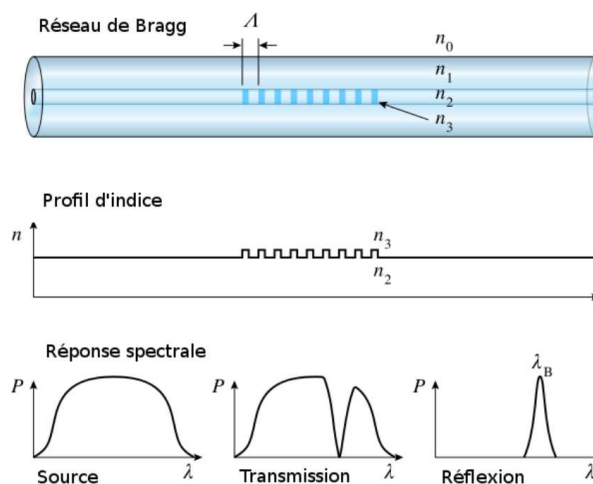
L'installation de fibre optique distribuée a été également réalisée sur un glissement de terrain par Zhang et al. (2014), permettant de définir précisément ses limites et d'obtenir un déplacement approximatif.

5 – Fibre optique (suite)

2 – Capteurs à réseau de Bragg

Les capteurs à réseau de Bragg sont des capteurs **ponctuels**. Plusieurs réseaux de Bragg peuvent être mis en série sur une même fibre, créant ainsi un capteur **quasi-distribué**.

1 – Principe La présence d'un réseau de Bragg dans une fibre filtre les longueurs d'onde d'un signal lumineux. Une déformation de la fibre va modifier la géométrie du réseau de Bragg et les longueurs d'ondes filtrées en seront également modifiées. **La mesure du décalage dans les longueurs d'ondes réfléchies permet ainsi de retrouver la déformation.** Il convient cependant d'avoir un système complémentaire pour la mesure de la température, à laquelle est également sensible ce type de capteurs.



Réseau de Bragg fibré et sa réponse spectrale (Lanticq, 2009)

Contrairement aux techniques distribuées, la mesure effectuée par cette méthode est ponctuelle, au niveau de chaque réseau de Bragg présent dans la fibre. On peut comparer ce système à une succession de capteurs (les réseaux de Bragg) sur un support linéaire (la fibre) qui transmet les données. Étant donné la grande résolution spatiale qu'il est possible d'avoir (jusqu'à 10 cm), cette méthode est ainsi qualifiée de **quasi-distribuée**.

Cependant, si théoriquement il est possible d'installer 100 réseaux de Bragg sur une même fibre (Lanticq, 2009), **le nombre de réseaux dépasse rarement une quinzaine** (Iten, 2011). Au-delà de ce nombre, les signaux issus des différents réseaux de Bragg sont difficiles à discerner entre eux. Ainsi, quelle que soit la longueur de la fibre, le nombre de points de mesure est limité.

5 – Fibre optique (suite)

2 – Capteurs à réseau de Bragg (suite)

2 – Applications Cette technique remplace couramment les jauges de déformation et les applications en géotechnique sont nombreuses. Une application particulière est l'insertion de ce type de capteurs dans des **géosynthétiques** et permet de suivre les déformations des massifs en sol renforcé (Loke et al., 2006).

Dans le cadre de suivi de **glissements de terrain**, ces capteurs ont été expérimentés par exemple par Moore et al. (2010). Malgré de nombreuses perturbations du signal, la précision des capteurs installés, verticalement ou horizontalement (extensomètre), a permis d'illustrer jusqu'au comportement journalier du glissement, lié à l'alternance gel/dégel.

5 – Fibre optique (suite)

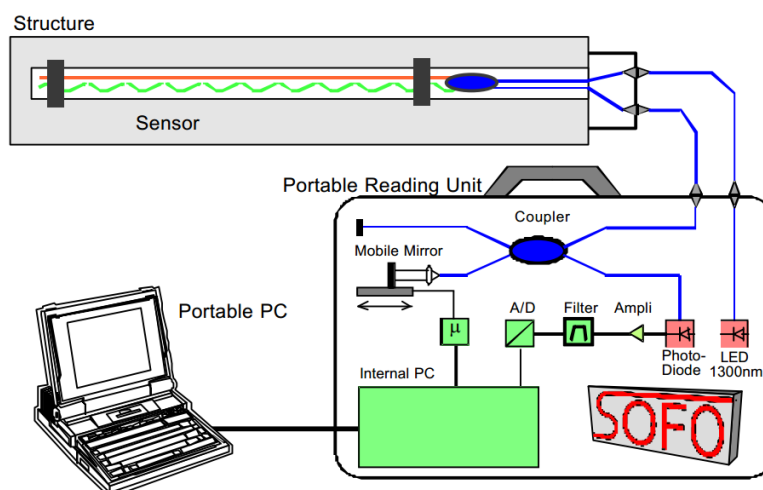
3 – Capteurs interférométriques « longue-base »

Les capteurs les plus couramment utilisés pour la surveillance d'ouvrages sont les capteurs interférométriques **SOFO** (Surveillance des Ouvrages par Fibre Optique). Développés par l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne et commercialisés par SMARTEC, ces capteurs utilisent l'interférométrie à faible cohérence entre deux fibres.

1 – Principe Une des fibres, pré-tendue, est solidaire de la structure tandis que l'autre est installée dans un tube. L'analyse par interférométrie des signaux dans chacune des fibres permet de retrouver la déformation de la fibre pré-tendue et donc de la structure instrumentée.

La mesure effectuée est donc une **mesure de l'extension ou du raccourcissement de la fibre** solidaire de la structure.

La précision de mesure de la déformation est de $1 \mu\epsilon$ et la résolution spatiale de 10 cm.



Composition de l'instrumentation SOFO (Inaudi & Casanova, 1999)

2 – Applications Ces capteurs sont fréquemment utilisés pour le suivi de structures (par exemple le viaduc de Millau), moins en géotechnique.

L'instrumentation d'un glissement de terrain par plusieurs capteurs SOFO de 5 m de long a été effectuée par Wöllner et al. (2011). Les déformations mesurées semblent cohérentes avec les mesures géodésiques.

5 – Fibre optique (suite)

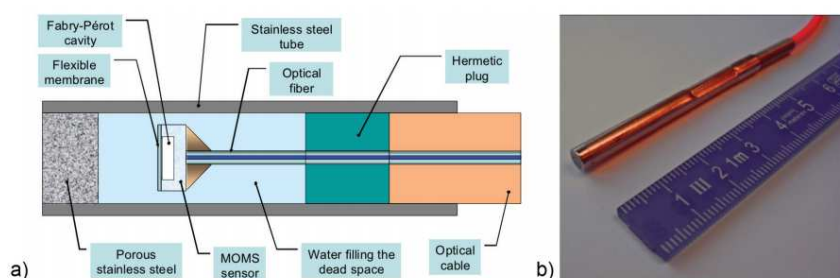
4 – Capteurs interférométriques ponctuels

Les capteurs interférométriques ponctuels à fibre optique sont la plupart du temps constitués par des systèmes d'interféromètres de **Fabry-Pérot**.

1 – Principe Ces capteurs sont constitués d'une **cavité** limitée par deux surfaces partiellement réfléchissantes, dont une est reliée à la fibre optique. Les réflexions successives d'un signal lumineux à l'intérieur de la cavité vont créer une figure d'interférence.

Lorsque le volume de la cavité varie, la figure d'interférence est modifiée.

Selon le capteur, le volume de la cavité peut dépendre de la pression, de la température, du déplacement, etc.



Un exemple de capteur à fibre optique : piézomètre MOMS
a) Vue schématique du piézomètre, b) Photo du piézomètre dans un tube d'acier.
Rodrigues et al. (2010)

2 – Applications Les capteurs à interféromètre de Fabry-Pérot trouvent de nombreuses applications en géotechnique :

- piézomètres,
- jauges de contrainte,
- capteurs de température,
- capteurs de pressions,
- capteurs de déplacement.

Ces capteurs sont proposés par certains fournisseurs d'instrumentation et présentent un **intérêt certain pour l'instrumentation de glissements où les conditions atmosphériques sont propices aux orages** ou aux interférences électromagnétiques.

5 – Fibre optique (suite)

5 – Atouts et limites Compte tenu des potentialités des capteurs à fibre optique, le domaine fait l'objet de nombreuses recherches. Celles-ci devraient permettre une utilisation croissante de ces capteurs.

Actuellement, les capteurs **de déformation** existants ont en commun un certain nombre d'atouts et de limites :

1 – Atouts Les potentialités de l'utilisation de la fibre optique pour l'instrumentation des glissements de terrain sont grandes :

- la mesure peut être réalisée **de manière distribuée ou quasi-distribuée** sur une grande longueur,
- les mesures réalisées ont une très **grande précision** et sont donc adaptées à des glissements lents,
- la fibre optique en elle-même est très **légère**, de faible diamètre,
- son **coût est faible** au vu de la quantité de données produites,
- des capteurs de déformation (à correction thermique intégrée) sont aujourd'hui proposés par différents distributeurs d'instrumentation,
- la fibre optique est **insensible aux ondes électromagnétiques** (orages) ou à la corrosion chimique,
- elle fonctionne par tout temps et sous toute couverture végétale,
- il n'y a que **très peu de perte de signal** dans la transmission des données par fibre (à l'exception des problèmes de connectique).

2 – Limites La fibre optique présente cependant encore des inconvénients certains :

- le **coût du système d'acquisition et de traitement des données**,
- la **consommation énergétique** du système pour une mesure en continu,
- la nécessité pour l'utilisateur d'avoir une **bonne connaissance de la théorie du fonctionnement de ces capteurs** afin d'analyser les données,
- la **quantité de données** produites et le temps nécessaire à l'analyse.

Enfin, la plupart des capteurs sont adaptés au suivi des ouvrages et leur utilisation dans le cadre de glissements de terrain se heurte à certaines limites :

- les fibres optiques sont généralement **fragiles** et supportent peu de déformation ; seules certaines, renforcées mécaniquement, peuvent être utilisées,
- **l'ancrage et la solidarisation** de la fibre au sol peuvent être délicats,
- contrairement à l'inclinométrie, la **direction des déplacements** n'est généralement pas mesurée.

5 – Fibre optique (suite)

6 – Références

Généralités sur les capteurs fibre optique Iten, M. (2011). Novel applications of distributed fiber-optic sensing in geotechnical engineering. *Thèse. École polytechnique fédérale de Zurich.*

Lanticq, V. (2009). Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil. *Thèse. Télécom ParisTech.*

Capteurs à mesure continûment répartie Zhang, D., Shi, B., Sun, Y., Tong, H., Wang, G. (2014). Bank slope monitoring with integrated fiber optical sensing technology in Three Gorges Reservoir area. *Engineering for society and territory, vol. 2.*

Puzrin, A., Iten, M., Hauswirth, D. (2010). Advanced geotechnical applications of distributed fiber-optic sensing. *Geotechnical Instrumentation News, n°6*

Capteurs à réseau de Bragg Loke, K.H., Kongkitkul, W., Tatsuoka, F. (2006). Fibre optic technology in geosynthetic instrumentation for monitoring of soil structures. *Proceedings of 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama, Japan*

Moore, J. R., Gischig, V., Button, E., & Loew, S. (2010). Rockslide deformation monitoring with fiber optic strain sensors. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 191-201.*

Capteurs interférométriques « longue-base » Inaudi, D., Casanova, N. (1999). SOFO : Structural monitoring with fiber optic sensors. *C FIB, "Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures", Vienna, Austria*

Wöllner, J., Woschitz, H., Brunner, F.K. (2011). Testing a large fiber optic strain-rosette, embedded in a landslide area. *8th Int. Symp. Field Measurements in GeoMechanics, Berlin, Germany.*

Capteurs interférométriques ponctuels Rodrigues, C., Inaudi, D., Juneau, F., & Pinet, É. (2010). Miniature Fiber-Optic MOMS piezometer. *Geotechnical Instrumentation News, n°63.*

6 – GNSS

1 – Solutions GNSS classiques

La mesure par GNSS (Global Navigation Satellite System) ou GPS (Global Positioning System) consiste en la **localisation en coordonnées absolues** d'un récepteur qui reçoit les signaux d'au moins quatre satellites.

1 – Principe Le temps de trajet d'un signal satellitaire jusqu'au récepteur permet de calculer une distance. La combinaison d'au moins quatre mesures de distance satellite-récepteur permet de retrouver la position absolue de ce dernier. La mesure de la position en absolu comporte des erreurs liées à l'altération des signaux des satellites dans la ionosphère. Elle peut être corrigée en utilisant la position connue d'une antenne fixe à proximité.

Dans le cas de la mesure de position de plusieurs points sur un même site, l'erreur en chaque point peut être considérée comme identique, car les signaux des satellites reçus en chaque point sont les mêmes. La précision peut alors être fortement améliorée : on parle de **GPS différentiel**.

Les progrès actuels dans la technique GNSS sont liés à :

- la multiplication du **nombre de satellites** (constellations GPS, GALILEO, GLONASS, BEIDOU),
- la disponibilité d'**antennes de plus en plus précises et de moins en moins chères**,
- des instruments de plus en plus **légers et faciles d'utilisation**.

2 – Applications Les techniques GNSS sont couramment utilisées pour le suivi des glissements, de manière ponctuelle ou continue, pour mesurer les déplacements de la surface. L'instrumentation utilisant des matériels de faible coût se développe de plus en plus (Heunecke et al., 2011, Cina et al., 2013).

3 – Atouts Les méthodes GNSS actuelles peuvent atteindre une précision millimétrique, y compris en altimétrie. Compte tenu de cette précision, cette technique est devenue adaptée pour le suivi de glissements lents.

4 – Limites Les inconvénients principaux résident dans :

- l'altération du signal sous couvert forestier,
- la consommation énergétique pour une installation permanente,
- le temps de mesure nécessaire pour des mesures ponctuelles,
- le coût encore élevé des antennes.

6 – GNSS (suite)

2 – Géocube

Les géocubes sont des instruments de mesures développés par l'IGN. Ils devraient être prochainement industrialisés et commercialisés par la société Kyla, après une phase de tests encore en cours.

1 – Principe Le module de base du Géocube est constitué de :

- une carte **module GPS de faible coût** (60 €),
- une carte microcontrôleur,
- une carte mémoire incluant un microprocesseur à faible consommation,
- une carte radio permettant aux Géocubes de communiquer entre eux.

Les géocubes utilisent le principe du GPS différentiel : ils sont conçus pour fonctionner en réseau. En absolu, la précision est celle d'un module GPS automobile, en différentiel, on peut atteindre une précision millimétrique.



Géocube : à gauche bloc de base sur une couche de capteur, au centre capteur de qualité de l'air, à droite anémomètre.

6 – GNSS (suite)

2 – Géocube (suite)

2 – Applications Ces instruments ont à l'heure actuelle été testés sur le glissement-coulée de Super Sauze (Benoit et al., 2013). Les mesures GPS et météorologiques ont été exploitées, donnant de bons résultats (précision centimétrique en positionnement), mais l'instrument présentait des problèmes d'étanchéité, empêchant le fonctionnement de certains autres capteurs.

3 – Atouts Les atouts principaux du produit sont :

- l'**optimisation du fonctionnement** : le logiciel et le système d'exploitation permettent d'optimiser le fonctionnement du module de manière à limiter la consommation d'énergie. Le fonctionnement dans l'ordre de priorité des tâches effectuées par le système est paramétrable et modifiable à distance, via internet.
- la **précision liée à l'installation en réseau** : 1,5 mm en planimétrie et 3 mm en altimétrie
- l'**autonomie** : des panneaux solaires légers suffisent pour alimenter les géocubes, et leur autonomie sans soleil peut atteindre deux semaines.
- la **mesure multi-paramètres** : les géocubes ne sont pas uniquement des récepteurs GPS. Plusieurs couches de capteurs peuvent en effet être ajoutées sous le bloc GPS de base. Ces capteurs (température, radioactivité, piézomètre, météo, etc.) sont gérés et leurs mesures traitées par le même microprocesseur que celui du GPS.

6 – GNSS (suite)

3 – Références

GNSS « classique » A. Cina, M. Piras, H.I. Bendea (2014). Monitoring of landslides with mass market GPS : an alternative low cost solution. *The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk, Padova, 27–28 February 2013*. pp. 131-137

Heunecke, O., Glabsch, J., & Schuhbaeck, S. (2011). Landslide Monitoring Using Low Cost GNSS Equipment- Experiences from Two Alpine Testing Sites. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5(8), 661-669.

Géocube Benoit, L., Thom, C., Martin, O. (2013). Landslide monitoring using Geocubes, a wireless network of low-cost GPS receivers. *In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 15, p. 6995)*.

loemi.recherche.ign.fr/pdf/brochureGeocube1.pdf

7 – Mesures géophysiques en continu – sismique

Les méthodes de mesures sismiques en continu sont des **méthodes passives** (sans émission de signal). Elles consistent en l'enregistrement et l'analyse du bruit sismique.

On peut distinguer trois techniques :

- la mesure en continu du bruit sismique,
- l'écoute acoustique ou l'écoute microsismique d'un glissement,
- l'écoute acoustique le long d'un guide-onde actif.

1 – Mesure du bruit sismique en continu

La mesure du bruit sismique est une méthode couramment utilisée pour l'auscultation des glissements. Cette mesure effectuée en continu par un réseau de capteurs installés sur le glissement pourrait permettre d'identifier des signes précurseurs d'un événement.

1 – Principe Le bruit de fond sismique est composé d'une multitude d'ondes provenant de sources variées (houle, marées, activités humaines, etc.). Plusieurs méthodes permettent d'utiliser ce signal pour obtenir un **modèle du sous-sol** dans le cadre de l'auscultation des glissements de terrain.

Dans le cas de glissements dans des matériaux de type sol, avant une réactivation, les **propriétés élastiques** du milieu (état de contrainte, saturation) changent. Ces changements se traduisent par la **diminution des vitesses d'ondes sismiques** (V_s).

L'analyse spectrale du signal permet de localiser les terrains concernés par ces changements de propriétés.

2 – Applications Des études récentes semblent montrer que cette mesure peut permettre de **détecter des signes précurseurs de rupture** (Mainsant et al., 2012).

3 – Limite La conception du réseau de capteurs dépend principalement de la profondeur supposée des déplacements. Plus la surface de cisaillement sera peu profonde, plus les capteurs devront être rapprochés entre eux et donc plus le réseau devra être dense. Si l'on veut pouvoir observer l'ensemble d'un glissement, cette méthode est **appropriée lorsque la surface de cisaillement principale n'est pas trop superficielle**.

7 – Mesures géophysiques en continu – sismique (suite)

2 – Écoute microsismique / Écoute acoustique

L'écoute microsismique est à différencier de la mesure du bruit sismique : l'écoute microsismique s'attache à **isoler dans le bruit de fond les signaux produits par des ruptures dans le glissement**. L'écoute microsismique et l'écoute acoustique sont deux techniques similaires, la différence résidant dans le type de capteur et donc le type de signal « écouté ».

1 – Principe Lors d'un événement (rupture, friction, cisaillement, impact, etc.) dans un glissement, l'énergie élastique est convertie en une onde élastique (acoustique ou sismique). Cette onde élastique va être enregistrée par les capteurs positionnés sur le glissement de terrain (sismomètres, géophones, accéléromètres, hydrophones, transducteurs piézoélectriques), en même temps que le bruit sismique.

Le filtrage et traitement du signal (analyse du contenu fréquentiel) permet d'isoler les ondes élastiques liées aux événements et d'obtenir potentiellement les informations suivantes :

- le **nombre d'événements** (répartition temporelle),
- l'**amplitude** de l'événement, liée à l'énergie libérée,
- la **localisation** de la source (répartition spatiale),
- le **mécanisme** de l'événement.

2 – Applications Des applications à des **glissements rocheux** (Zoppè et al., 2014) ont permis de détecter des micro-déformations dans le massif rocheux et de relier la quantité de signal avec les précipitations.

Dans les **glissements de type sol**, l'atténuation des ondes est plus importante et seuls les événements majeurs peuvent être identifiés (Tonnelier, 2012).

Afin d'améliorer la transmission du signal aux capteurs acoustiques, des **guide-ondes passifs** constitués de tubes d'acier enterrés dans le glissement sous le capteur ont été proposés par certains auteurs (Dixon et al., 2003), mais l'atténuation du signal reste trop importante pour que ce système soit utilisé pour des sols très argileux.

3 – Limite La détermination du mécanisme de la rupture est rarement atteinte, du moins de manière certaine, car les catalogues de types de sources existants ne sont pas suffisants (Tonnelier, 2012).

7 – Mesures géophysiques en continu – sismique (suite)

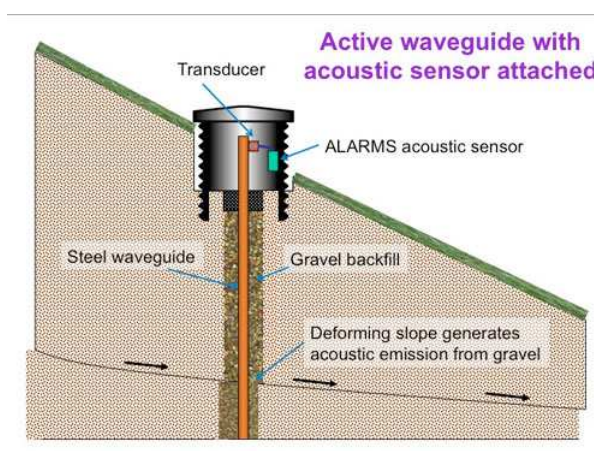
3 – Écoute acoustique le long d'un guide-onde actif

Dans le cas de glissements de terrain très argileux, l'écoute sismique est presque impossible compte-tenu de l'atténuation des ondes ou de l'absence d'événements d'amplitude suffisante. La méthode mise en place dans ce type de glissement consiste en l'installation d'un **guide-onde actif**.

1 – Principe Le guide-onde actif est composé d'un **tube d'acier enterré verticalement et entouré de gravier**. Lorsqu'un mouvement a lieu dans le glissement, il est transmis au gravier qui émet des ondes acoustiques par friction entre ses grains.

2 – Applications L'augmentation d'émission acoustique a pu être reliée au taux de déplacement par comparaison des mesures acoustiques avec des mesures inclinométriques (Dixon et al., 2014).

Le British Geological Survey et l'université de Loughborough produisent le capteur **Slope ALARMS**. Alimenté par batterie, il enregistre en continu et les données sont traitées en temps réel. Il peut ainsi servir de base à un système d'alerte.



Capteur slope ALARMS

3 – Limites Ce système présente deux limites :

- l'information obtenue est **ponctuelle**, comme celle d'un inclinomètre ;
- la mesure obtenue n'est pas aussi précise que celle fournie par l'inclinométrie : en particulier, elle **ne donne pas la profondeur de la surface de rupture**.

7 – Mesures géophysiques en continu – sismique (suite)

4 – Atouts et limites communs aux méthodes sismiques

Les méthodes sismiques sont relativement récentes dans leur application de surveillance des glissements. Elles sont également assez peu répandues et le retour d'expériences nécessaire à l'établissement d'une méthodologie fiable est encore insuffisant.

1 – Atouts Cependant, les méthodes sismiques permettent d'obtenir des informations spécifiques :

- une meilleure **compréhension du mécanisme de glissement** grâce à l'analyse de la répartition spatiale et temporelle, de l'amplitude et du mécanisme des événements,
- l'accès à des **signes précurseurs des mouvements** (émission acoustique, événements, modification des caractéristiques mécaniques).

D'autre part, toutes ces méthodes sont appropriées pour l'installation sous forme d'un **réseau de capteurs fonctionnant en continu**.

2 – Limites Les limites principales des méthodes résident dans :

- le coût du réseau de capteurs et son entretien sur le site,
- la nécessité d'avoir au préalable des **modèles géophysiques précis**, par les méthodes sismiques actives usuelles, de la tomographie ou des reconnaissances géotechniques.
- le **volume de données** et de traitement nécessaire,
- la difficulté d'utiliser ces méthodes en temps réel (sauf dans le cas du capteur slope ALARMS),
- l'importance de l'interprétation et donc du facteur humain.

7 – Mesures géophysiques en continu – sismique (suite)

5 – Références

Mesure du bruit sismique en continu Mainsant, G., Larose, E., Brönnimann, C., Jongmans, D., Michoud, C., & Jaboyedoff, M. (2012). Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* (2003–2012), 117(F1).

Écoute microsismique / Écoute acoustique Zoppè G., Costa, G., Dixon, N., Spriggs, M.P., Marcato, G. (2014). Microseismicity and acoustic emission for landslide monitoring (North-East Italy). *Engineering geology for society and territory*.

Dixon, N., Hill, R., & Kavanagh, J. (2003). Acoustic emission monitoring of slope instability: development of an active waveguide system.

Tonnellier, A. (2012). *Écoute sismique des glissements de terrain dans les roches argilo-marneuses : détection et identification des sources intervenant dans la progression des glissements. Thèse. Université de Strasbourg.*

Écoute acoustique le long d'un guide-onde actif Dixon, N., Moore, R., Spriggs, M., Smith, A., Meldrum, P., & Siddle, R. (2015). Performance of an acoustic emission monitoring system to detect subsurface ground movement at Flat Cliffs, North Yorkshire, UK. *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 2* (pp. 117-120).

<http://www.slopealarms.com/>

8 – Mesures géophysiques en continu – électrique

Les méthodes électriques permettent de remonter à des informations en rapport avec les **conditions hydrogéologiques** :

- la géométrie des nappes et les zones de circulation des eaux en profondeur,
- la porosité, la saturation, la densité et la conductivité des sols en place ainsi que leurs variations spatiales et temporelles.

Les conditions hydrologiques dans les glissements sont souvent reliées aux déplacements. **Dans un site où une relation a été établie**, l'observation par méthode électrique peut permettre d'identifier des éléments déclencheurs, et donc d'anticiper la réactivation d'un glissement.

Deux méthodes d'instrumentation existent et sont présentées ci-après :

- la mesure de la résistivité du sous-sol et de la polarisation provoquée,
- la mesure du potentiel spontané.

1 – Résistivité et polarisation provoquée

La mesure de la résistivité et de la polarisation provoquée peut être réalisée avec le même dispositif.

1 – Principe La **résistivité** du sol dépend de la porosité, de la saturation, de la conductivité des fluides et de la quantité d'argile. Les variations de résistivité observées sont ainsi présumées provenir de la **variation de la saturation et de la conductivité**, puisque les autres paramètres sont stables à l'échelle de temps considérée.

La technique de **polarisation provoquée** consiste en l'injection d'un courant dans le sol et la mesure de la diminution des différences de potentiel au cours du temps. Celle-ci dépend de la conductivité hydraulique et de la présence de minéraux métalliques dans le sol : elle peut ainsi servir à identifier la partie du signal liée aux minéraux métalliques (Marescot et al., 2008).

2 – Applications La mesure de la résistivité en continu est la méthode électrique la plus avancée. Elle est en particulier bien adaptée à la surveillance du permafrost. Dans le cadre du projet Safeland, un système de surveillance de glissements (TEMPEL) basé sur cette technique a été développé (Supper et al., 2011). Les résultats de la surveillance montrent que les réactivations des glissements, provoquées par des pluies intenses, ont été précédées par une chute de la résistivité des terrains.

8 – Mesures géophysiques en continu – électrique (suite)

2 – Potentiel spontané

La mesure du potentiel spontané détecte les **courants électriques naturels dans le sous-sol**.

1 – Principe Les courants électriques naturels peuvent être d'origine : électrocinétique, thermoélectrique ou électrochimique.

Les courants électrocinétiques sont créés par l'interaction entre les fluides interstitiels et la surface des pores. Les anomalies de potentiel spontané peuvent donc être interprétées comme des mouvements de fluides à l'intérieur du glissement.

2 – Applications Des anomalies de potentiel spontané ont pu être reliées à des événements pluvieux sur un glissement rocheux (Meric et al., 2006). Les données obtenues ont également permis de calculer une vitesse d'écoulement de l'eau circulant dans le glissement.

3 – Atouts et limites communs aux méthodes électriques

Les méthodes électriques ne donnent pas d'information directe sur les mouvements. Elles permettent de suivre les conditions hydrogéologiques et les circulations d'eau.

1 – Atouts Les conditions hydrogéologiques dans un glissement sont souvent reliées à son activité. Les méthodes électriques peuvent ainsi permettre :

- d'établir une **relation entre les conditions météorologiques et hydrogéologiques**,
- d'établir une **relation entre les conditions hydrogéologiques et l'activité du glissement**, par un couplage avec une instrumentation permettant de suivre les déplacements,
- de **prévoir une augmentation de l'activité d'un glissement**, lorsque cette relation a été établie.

2 – Limites L'installation d'un réseau d'électrodes sur un glissement rencontre plusieurs difficultés :

- leur entretien,
- leur sensibilité à la température et aux conditions météorologiques,
- leur inadéquation pour des glissements trop rapides (modification de l'écartement des électrodes).

D'autre part, l'absence de routine de calcul adaptée **ne permet pas d'utiliser les méthodes électriques pour des mesures en temps réel**, et donc pour un système de surveillance.

8 – Mesures géophysiques en continu – électrique (suite)

4 – Références

Résistivité et polarisation provoquée Supper, R., Jochum, B., Kim, JH., Ottowitz, D., Pfeiler, S., Baron, I., Römer, A., Lovisolo, M., Moser, G. (2011). The TEMPEL geoelectrical monitoring network for landslides : highlights of recent monitoring result. *Geoelectric monitoring* p144

Marescot, L., Monnet, R., & Chapellier, D. (2008). Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps. *Engineering Geology*, 98(1), 18-28.

Potentiel spontané Meric, O., Garambois, S., & Orenge, Y. (2006). Large gravitational movement monitoring using a spontaneous potential network. *19th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*.

Conclusion

Le développement de nouveaux capteurs et l'amélioration de la chaîne de gestion des données a permis au cours des dernières années l'essor de nouvelles techniques ou de nouveaux instruments pour le suivi des glissements de terrain.

Ces nouvelles technologies présentent d'importantes avancées, réelles ou potentielles, comme leur précision, l'augmentation du nombre de mesures, la diminution des coûts. Leurs capacités de mesure en continu ainsi que de couplage avec des méthodes de transmission des données à distance ouvre également de nouvelles perspectives pour la surveillance des sites en temps réel.

Cependant, certaines des méthodes présentées restent du domaine de la recherche et ont été insuffisamment expérimentées jusqu'ici pour pouvoir proposer des procédures d'installation, de calcul ou d'analyse. Leur utilisation nécessite ainsi certaines précautions, en particulier la combinaison avec des instrumentations conventionnelles et le besoin d'utilisateurs suffisamment familiers des technologies.

Les perspectives dans le domaine de l'instrumentation in situ concernent ainsi principalement l'amélioration et la standardisation de ces méthodes, ainsi que la création de capteurs plus résistants, moins coûteux et moins consommateurs d'énergie. À plus long terme, l'intégration de données issues de différents types de capteurs dans une seule interface facile d'utilisation serait le but à atteindre.

Rédigé le,	Validé le,	Validé le,
Mélanie BOURDIN	Agnès JOSEPH, responsable de l'unité Géomécanique	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