

**TECHNIQUES ET MÉTHODES**

# Surveillance des pentes et des falaises instables

Conception et mise en œuvre des dispositifs de mesure -  
Acquisition et traitement de l'information



**guide technique**

# **Surveillance des pentes et des falaises instables**

Conception et mise en œuvre  
des dispositifs de mesure -  
Acquisition et traitement de l'information

FÉVRIER 2016



**TECHNIQUES ET MÉTHODES**

**Ce guide technique a été élaboré par un groupe de travail piloté par**

Céline Bourdeau Lombardi Ifsttar / Département Géotechnique, environnement, risques naturels et sciences de la terre

**et composé de**

Julien Arpaia	Cerema / Direction Territoriale Normandie-Centre ;
Laurent Dubois	Cerema / Direction Territoriale Centre-Est ;
Jean-Paul Duranthon	Cerema / Direction Territoriale Centre-Est ;
Sylvain Gardet	Cerema / Direction Territoriale Sud-Ouest ;
Margaret Herbaux	Cerema / Direction Territoriale Est ;
Patrice Maurin	Cerema / Direction Territoriale Méditerranée ;
Pierre Pothérat	Cerema / Direction Territoriale Centre-Est ;
René Stock	Cerema / Direction Territoriale Est ;
Gratien Vincelas	Cerema / Direction Territoriale Normandie-Centre.

**Ce guide technique a bénéficié des commentaires et remarques de** Sébastien Burlon, Jean-Louis Durville, Jean-Pierre Magnan, Philippe Reiffsteck.

**Cet ouvrage a été réalisé grâce au soutien du ministère de l'Écologie, du Développement Durable, et de l'Énergie (MEDDE).**

**Ce guide technique est destiné à actualiser et remplacer le guide LCPC de 1994 intitulé « Surveillance des pentes instables ».**

Comment citer cet ouvrage :

Ifsttar et Cerema, Surveillance des pentes et des falaises instables, Conception et mise en oeuvre des dispositifs de mesure - Acquisition et traitement de l'information. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2016. Techniques et méthodes, guide technique, GT11, 172 pages, numéro ISBN 978-2-85782-710-8

Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux - Ifsttar  
14-20 boulevard Newton - Cité Descartes - Champs-sur-Marne - 77447 Marne-la-Vallée cedex 2  
[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)

Les collections de l'IFSTTAR  
techniques et méthodes - guide technique - GT11  
ISBN 978-2-85782-710-8 – ISSN en cours d'attribution



Cet ouvrage est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International. Les termes de cette licence sont accessibles à l'adresse

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	<b>5</b>
<b>Partie 1. Élaboration d'une stratégie de surveillance d'un site instable</b>	
<b>1. Caractérisation du site</b> .....	<b>11</b>
1.1 Analyse des données existantes et observation du site .....	11
1.2 Élaboration d'un modèle géologique et géotechnique .....	12
1.3 Identification du mécanisme de rupture et du type de mouvement .....	13
1.4 Synthèse.....	22
<b>2. Dispositifs de mesure</b> .....	<b>25</b>
2.1 Grandeurs physiques à mesurer .....	25
2.2 Capteurs de mesure des mouvements .....	25
2.3 Capteurs de mesure des variables d'influence .....	29
2.4 Synthèse.....	32
2.5 Choix des capteurs en fonction de la typologie de l'instabilité.....	34
<b>3. Déploiement des dispositifs de mesure et surveillance du site</b> .....	<b>39</b>
3.1 Principe.....	39
3.2 Implantation des dispositifs de mesure .....	39
3.3 Définition des paramètres d'acquisition.....	42
3.4 Exigences de l'instrumentation.....	43
3.5 Fonctions de la surveillance .....	45
3.6 Instrumentation d'urgence .....	48
<b>4. Analyse des données</b> .....	<b>49</b>
4.1 Principe.....	49
4.2 Interprétation des données.....	49
4.3 Élaboration de modèles explicatifs ou prédictifs .....	51
4.4 Identification du type de mouvement et du mécanisme de rupture .....	57
4.5 Ajustement des paramètres de contrôle du système.....	57
4.6 Alertes et alarmes.....	58
<b>Conclusion</b> .....	<b>61</b>
<b>Références</b> .....	<b>63</b>

## Partie 2. Dispositifs de mesure

### Surveillance opérationnelle des sites instables

#### Mesure de déplacement et de déformation

DD1 Fissuromètre.....	69
DD2 Extensomètre.....	71
DD3 Mire à vernier.....	73
DD4 Distancemètre orientable à Fil Invar .....	75
DD5 Distancemètre optique.....	77
DD6 Pendule inverse .....	79
DD7 Capteur de déformation à fibre optique .....	81
DD8 Tachéomètre .....	83
DD9 GNSS (dont GPS).....	85
DD10 RADAR Ultra Large Bande.....	87
DD11 Scanner laser terrestre .....	89

<b>Mesure de rotation</b>	
RO1	Clinomètre ..... 91
RO2	Nivelle à vis micrométrique ..... 93
RO3	Inclinomètre ..... 95
<b>Mesure de vibration</b>	
V11	Vélocimètre, accéléromètre et géophone ..... 97
<b>Mesure de précipitation</b>	
PR1	Pluviomètre enregistreur ..... 99
PR2	Nivomètre ..... 101
PR3	Nivomètre à rayon cosmique ..... 103
<b>Mesure de hauteur d'eau</b>	
HE1	Limnigraphe ..... 105
HE2	Piézomètre ouvert ..... 107
<b>Mesure de pression interstitielle</b>	
P11	Cellule de pression interstitielle électrique ..... 109
<b>Mesure du débit</b>	
DE1	Débitmètre ..... 111
<b>Mesure des paramètres environnementaux</b>	
PE1	Sonde de température ..... 113
<b>Compréhension du comportement des sites instables</b>	
<b>Mesure de teneur en eau</b>	
TE1	Capteur de teneur en eau ..... 115
<b>Mesure des paramètres environnementaux</b>	
PE2	Hygromètre ..... 117
PE3	Anémomètre ..... 119
PE4	Girouette ..... 121
<b>Mesure de succion</b>	
SU1	Tensiomètre à charge hydrique ..... 123
SU2	Tensiomètre sans charge hydrique ..... 125

### Partie 3. Études de cas

<b>Compréhension des phénomènes</b>	
Cas 1	RN21, Astaffort (Lot-et-Garonne) ..... 131
Cas 2	Fort de Bainville sur Madon (Meurthe-et-Moselle) ..... 135
Cas 3	Villerville, Cricqueboeuf (Calvados) ..... 139
Cas 4	Nice Havrais, Sainte Adresse (Seine-Maritime) ..... 143
Cas 5	Mont Cabassou, Rémire-Montjoly (Guyane) ..... 147
Cas 6	Sallèdes (Puy-de-Dôme) ..... 151
<b>Conception d'un système de confortement</b>	
Cas 7	Petit Caporal, Boulogne-sur-Mer (Pas-de-Calais) ..... 155
<b>Surveillance des sites instables (contribution à la gestion de la sécurité)</b>	
Cas 8	Piton de la Becqua, la Perrière (Savoie) ..... 159
Cas 9	Versant des Ruines, Séchilienne (Isère) ..... 163
Cas 10	RN200, Quarcio (Haute-Corse) ..... 167
<b>Fiche bibliographique ..... 170</b>	
<b>Publication data form ..... 171</b>	

## Introduction

En présence d'une pente ou d'une falaise instable menaçant des personnes et des biens et pour laquelle des travaux de stabilisation ou de confortement ne sont pas techniquement ou économiquement envisageables (voire en l'attente de travaux de confortement), une solution efficace pour gérer le risque consiste à déployer un système de surveillance destiné à générer des alertes et des alarmes si l'évènement redouté se produit. Le choix d'un système de surveillance repose d'une part sur l'étude du site (identification du type de mouvement, de sa vitesse, de son extension, des conditions environnementales, *etc.*) et d'autre part sur l'évaluation des enjeux présents ou futurs sur le site ainsi que de leur vulnérabilité. Il doit être un compromis entre la solution proposée par le bureau d'études en charge des aspects techniques du projet de surveillance et les contraintes, notamment financières, du gestionnaire d'infrastructures, du maître d'ouvrage, de la commune ou de l'État (pour les sites à enjeux majeurs).

Pour évaluer la pertinence d'un système de surveillance, une étape préliminaire consiste souvent à observer le site puis à en assurer le suivi afin de mieux comprendre les phénomènes en jeu. On distingue ainsi les trois phases ci-dessous de la surveillance prise au sens large du terme :

### - La mise en observation du site

La mise en observation repose sur l'identification de signes d'instabilité naturels ou artificiels, visibles notamment sur des photographies ou sur des schémas multi-dates, permettant de mettre en évidence l'activité du site à une échelle de temps humaine. Elle n'implique pas de notion de périodicité de mesure mais est dictée par les conditions relatives au site (géologie, niveau d'activité probable, environnement, acuité du risque) et constitue souvent une étape préparatoire destinée à confirmer la réalité d'un risque à prendre en compte. D'une manière générale, elle permet de constituer une « mémoire objective » de l'état du site et de son évolution dont l'exploitation ultérieure pourra s'avérer particulièrement précieuse.

### - Le suivi du site

Il s'agit d'un examen périodique du site avec recueil de données qualitatives et quantitatives caractérisant son évolution. Les moyens mis en œuvre sont à la fois plus importants, plus complets et mieux ciblés que pour la mise en observation du site car la situation de risque confirmée justifie une prise en compte effective. Contrairement aux moyens utilisés dans la surveillance à proprement parler, le choix des moyens n'est ici pas contraint par la gestion de la sécurité. Le suivi impose cependant une fréquence de mesure régulière, éventuellement modulable en fonction des données et des événements, et une exploitation régulière des informations permettant d'actualiser la situation dans des délais compatibles avec une éventuelle mise en œuvre d'un programme de surveillance.

- **La surveillance du site** (au sens strict)

La surveillance, quant à elle, consiste à recueillir, souvent de manière automatisée, à exploiter et à interpréter périodiquement des données qualitatives et quantitatives caractérisant l'état d'un site et son évolution, avec pour objectif la gestion de la sécurité. Les méthodes et les moyens mis en œuvre sont liés à l'ampleur des phénomènes ainsi qu'aux enjeux. Ils recoupent en grande partie ceux utilisés dans le cadre du suivi, dès lors que ceux-ci sont compatibles, par leurs caractéristiques techniques et d'exploitation, avec les contraintes associées à un objectif de sécurité (nature des informations, performances, fiabilité, délai de mise en œuvre des capteurs et d'exploitation des mesures, etc.).

En complément du suivi qualitatif et quantitatif de l'évolution temporelle de paramètres (exemple : déplacements, piézométrie, etc.), il peut parfois être intéressant de mettre en œuvre des moyens de détection de phénomènes. Dans ce cas, on s'intéresse à des variables de type logique (tout ou rien) caractérisant un état ou le dépassement d'un seuil associé à une configuration de risque particulière. La détection correspond généralement à un processus automatique de surveillance ne nécessitant pas d'interprétation mais qui engendre une action automatique rapide visant à protéger les biens et les personnes éventuellement présents sur le site. À titre d'illustration, on peut citer l'exemple de la gestion de la sécurité sur les voies de chemin de fer en France. Depuis les années 1970, la SNCF équipe certaines de ses voies de filets détecteurs : leur rupture par un bloc rocheux détaché d'une paroi voisine entraîne automatiquement l'arrêt de la circulation ferroviaire.

La surveillance doit prendre en compte deux types d'**alertes** :

- les alertes techniques qui concernent l'état et le fonctionnement du dispositif de surveillance et identifient une situation de dysfonctionnement ou un besoin de maintenance préventive à court terme ;
- les alertes opérationnelles qui correspondent au dépassement de seuils fixés au préalable pour les variables d'alerte du système. Elles correspondent à un (ou plusieurs) scénario(i) d'aggravation possible(s) du risque. Elles doivent conduire à la mise en sécurité des populations menacées et des ouvrages.

La surveillance peut également permettre de concevoir un système de confortement adapté à partir de l'analyse des mesures effectuées.

Le présent guide, à destination des gestionnaires d'infrastructures, des maîtres d'œuvre et d'ouvrage et des bureaux d'études détaille la démarche permettant, d'un point de vue technique, l'élaboration d'une **stratégie de surveillance d'un site instable**. La démarche exposée n'inclut pas la prise en compte des enjeux et de la vulnérabilité d'un site et ne permet pas la mise au point d'une gestion de crise. Elle aborde exclusivement les aspects techniques liés à la surveillance des sites instables et comporte quatre étapes qui font l'objet des chapitres 1 à 4 : la caractérisation du site (chapitre 1), le choix des dispositifs de mesure (chapitre 2), le déploiement des dispositifs de mesures et la surveillance du site (chapitre 3) et l'analyse des données recueillies (chapitre 4). L'enchaînement de ces étapes dans un programme de surveillance d'un site instable est décrit sur la figure 1. La surveillance d'un site instable est un processus itératif dans lequel la connaissance du site est approfondie à partir de l'exploitation des données collectées. Il peut en résulter une modification des choix des dispositifs de mesure, de l'implantation des capteurs et des paramètres d'acquisition afin de mieux identifier les mécanismes de déformation et de rupture en jeu, l'objectif étant une meilleure gestion

du risque. Lorsque des procédures d'urgence sont nécessaires, une dérogation au schéma de la figure 1 présentée au chapitre 3 est possible.

La caractérisation du site (chapitre 1) comprend l'analyse des données déjà existantes et issues de l'observation du site, l'élaboration d'un modèle géologique et géotechnique et l'identification du type de mouvement de terrain et du mécanisme de rupture.

Le chapitre 2 décrit les dispositifs de mesure des grandeurs physiques utiles à la surveillance des pentes et des falaises instables.

Le chapitre 3 est consacré au déploiement des dispositifs de mesure, à la définition des paramètres d'acquisition, à la mise en forme des données, à leur validation et à leur transfert pour interprétation.

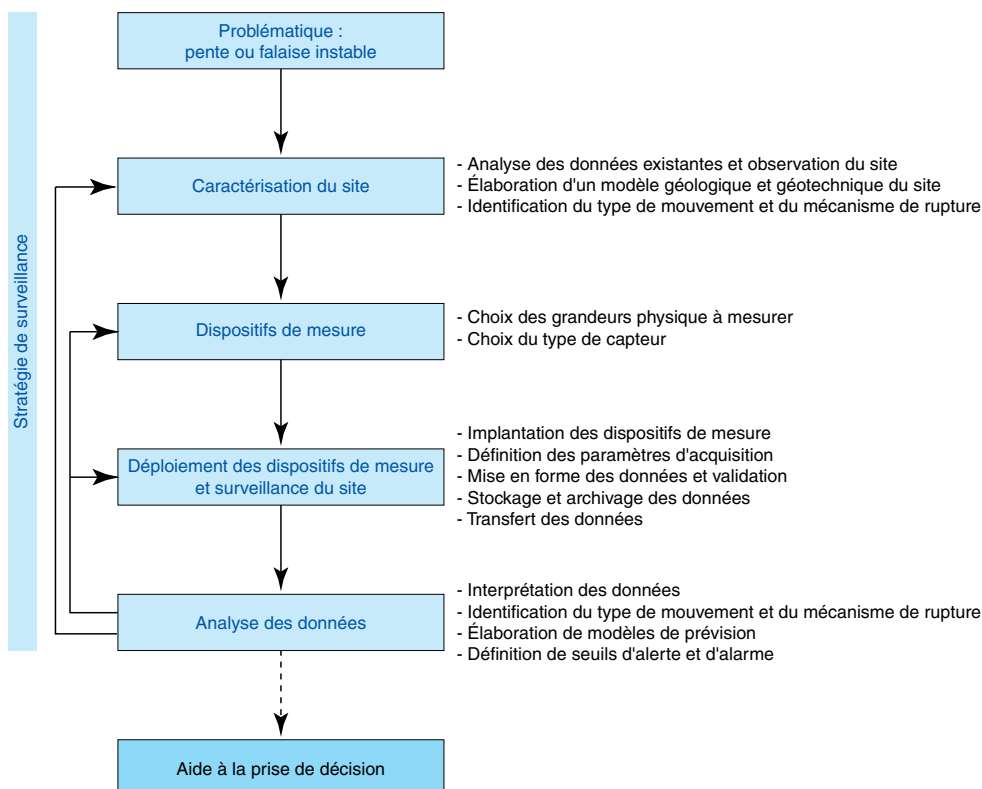
L'analyse des données recueillies (chapitre 4) comprend l'interprétation des mesures, l'identification ou la confirmation du type de mouvement et du mécanisme de rupture, l'élaboration de modèles de prévision et la définition de seuils d'alerte et d'alarme.

Des fiches synthétiques présentant les principales caractéristiques des capteurs utilisés pour la surveillance des sites instables sont données en partie 2.

Des études de cas mettant en œuvre l'observation, le suivi ou la surveillance des sites instables sont présentées en partie 3.

Figure 1

Déroulement d'un programme de surveillance d'une pente ou d'une falaise instable. Les flèches montantes révèlent un processus itératif : les données collectées lors de la surveillance du site instable permettent d'acquérir une meilleure connaissance du site et d'optimiser le choix des dispositifs de mesure, de l'implantation des capteurs et des paramètres d'acquisition



Exemple :  
mise en place d'un confortement,  
fermeture d'une route, évacuation d'un site, etc.





**Partie 1.**  
**Élaboration d'une stratégie  
de surveillance d'un site instable**



# Chapitre 1. Caractérisation du site

L'instrumentation et la surveillance d'une pente ou d'une falaise instable ne peuvent pas être réalisées sans une étude préalable détaillée du contexte géologique et géotechnique du site. Quatre types d'informations permettent de caractériser ce contexte :

- les sources documentaires liées au site ;
- les signes d'instabilité visibles sur le site ;
- les données géologiques et géotechniques caractérisant les sols et les roches du site ;
- le type de mouvement et le mécanisme de rupture qu'il est possible de présumer par le croisement des trois premières sources d'informations.

## 1.1 Analyse des données existantes et observation du site

L'étude d'un site instable débute par une recherche documentaire et une collecte des données existantes : cartes topographiques et géologiques, photographies aériennes multi-dates, plans de prévention des risques, documents d'urbanisme, arrêtés catnat, articles scientifiques, coupures de presse, etc. Ces différentes sources d'informations permettent de décrire les caractéristiques du site et renseignent sur les éventuels évènements passés.

De manière systématique, une visite du site (voire une enquête auprès des riverains) doit être effectuée pour identifier les signes visibles en surface pouvant traduire une instabilité. Cette visite vise à définir l'étendue des phénomènes et leur intensité. Il s'agit d'observer, sur le terrain, la végétation et le bâti, les manifestations en surface des mouvements de la pente ou de la falaise instable. Les principaux signes à mettre en évidence sont synthétisés dans le Tableau 1.

La collecte de toutes ces données permet de juger de l'état d'instabilité et de l'activité du site et, le cas échéant, de prévenir le gestionnaire du site pour prendre des mesures visant à assurer la sécurité des personnes et des biens.

Tableau 1  
Principaux signes d'instabilité à mettre en évidence sur un site potentiellement instable

Terrain	Végétation	Bâti
Rupture de pente	Basculement d'arbres	Fissurations sur les habitations et les chaussées
Bombement des terrains	Absence locale de végétation	Présence d'affaissements sur les chaussées
Présence d'escarpements	Végétation localement plus jeune	Trottoirs basculés
Présence de points hauts (« horsts ») et de dépressions (« grabens »)	Présence de végétation hygrophile ou de zones hydromorphes	Rupture de canalisation
Contre-pente et talus à regard amont		Désordres sur les ouvrages de soutènement
Présence d'éboulis		
Présence de fissures		
Présence de fractures fraîches sur les parois rocheuses		
Présence d'écoulements ou de zones humides permanents ou temporaires		

## 1.2 Élaboration d'un modèle géologique et géotechnique

### 1.2.1 Principe

L'observation seule des terrains de surface, notamment de leur topographie et de leur morphologie (pente, courbure, *etc.*), quoiqu'indispensable, ne suffit pas pour caractériser un site instable. Une étude détaillée décrivant le contexte géologique et géotechnique du site, les conditions hydrologiques et les facteurs d'instabilité externes est nécessaire. Pour ce faire, on s'appuie sur l'étude des cartes topographiques et géologiques et des données de sondages, notamment celles de la BSS (Banque de données du sous-sol) du BRGM. Ces données sont complétées, si besoin, par des campagnes de mesures géophysiques et la réalisation de nouveaux sondages, lesquels peuvent être valorisés par l'implantation de capteurs en profondeur. Le croisement de toutes ces informations permet de réaliser un modèle géologique et géotechnique du site qui doit comprendre au minimum des informations relatives :

- aux matériaux : sols (agencement spatial, nature, caractéristiques mécaniques, altération, compacité, *etc.*) ou roches (agencement spatial, nature, pendage, fracturation, fissuration, caractéristiques mécaniques, *etc.*) ;
- aux conditions hydrauliques (nappe libre ou en charge, résurgence, écoulements, *etc.*) ;
- aux facteurs externes au site susceptibles d'induire des instabilités.

Ce modèle, construit par un géologue ou un géotechnicien, permet d'élaborer des hypothèses pour expliquer le type de mouvement ou le mécanisme de rupture.

### 1.2.2 Conditions hydrologiques

Le contexte hydrologique d'un site est généralement difficile à définir et il peut être caractérisé par la présence d'une ou de plusieurs nappes. Dans le cas où une seule nappe est identifiée, celle-ci peut être libre ou en charge. Dans le cas où plusieurs nappes sont présentes, il s'agit de repérer les couches de terrain où les écoulements ont lieu. Les zones de résurgence doivent aussi être identifiées car elles peuvent être à l'origine de phénomènes d'érosion ou être obstruées en cas de gel. Ces conditions hydrologiques, liées à certains des facteurs externes présentés ci-dessous, peuvent varier en cours d'année. Il est donc nécessaire de les observer pendant un temps assez long pour estimer leur impact sur la stabilité des sols et des roches. Cependant, même lorsqu'une telle observation est possible, les données peuvent se révéler insuffisantes ; elles sont donc à analyser avec prudence compte tenu de la complexité des phénomènes.

### 1.2.3 Facteurs d'instabilité externes

La stabilité d'une pente ou d'une falaise peut être affectée par les facteurs externes suivants :

- les phénomènes climatiques : pluie, fonte des neiges, cyclone, mousson, cycle de gel-dégel, gradient thermique ;
- les phénomènes hydrologiques : modification des écoulements superficiels et profonds, érosion côtière, érosion de pied de versant par le lit d'un cours d'eau, diminution rapide du niveau d'une rivière en pied de versant, inondation, mise en eau d'un barrage ;

- les phénomènes sources de vibrations : séisme, vibration liée à une activité minière ou à la présence d'infrastructures ;
- les actions anthropiques : terrassement en pied de versant, surcharge en crête, maîtrise insuffisante des rejets d'eau et des écoulements en surface.

La présence d'eau, par le biais du développement de pressions interstitielles dans le massif instable de sols ou de roches, est souvent considérée comme le facteur déclenchant prépondérant.

## 1.3 Identification du mécanisme de rupture et du type de mouvement

### 1.3.1 Principe

Il s'agit de définir les principales composantes des mouvements (déplacement horizontal, déplacement vertical, rotation, profondeur, *etc.*), éventuellement l'amplitude et la vitesse de ces mouvements ainsi que les mécanismes de déformation et de rupture associés. L'identification de ces mécanismes n'est pas toujours évidente. C'est pour cela qu'avant même de mettre en place une surveillance, on dispose généralement quelques capteurs sur le site afin de déterminer de façon plus fiable la nature des phénomènes (phase de mise en observation).

Les composantes des mouvements d'une pente ou d'une falaise instable sont déterminées par la topographie ainsi que par la nature et la structure des terrains en place. Les sites où des sols meubles sont présents sont en général affectés par des glissements d'une couche de terrain sur une autre stable au niveau d'une surface de rupture bien identifiée, ou des mouvements d'ensemble sans surface de rupture (phénomènes de reptation, de solifluxion ou de fluage, notamment au sein de massifs de sols plastiques marneux, limoneux ou argileux relativement peu perméables). Les sites rocheux présentent en général des mouvements de chutes de pierres ou de blocs, des éboulements en masse, des phénomènes de fauchage, d'affaissement et d'effondrement. La nature des roches n'intervient que marginalement dans la déformabilité du massif, cette dernière étant en général influencée par l'organisation structurale du massif.

Les volumes mis en mouvement ainsi que les vitesses de déformation ou de déplacement des terrains varient significativement d'un mécanisme de rupture à l'autre. Les volumes varient, par exemple, entre quelques litres pour les chutes de pierres et de blocs et plusieurs millions de mètres cubes pour les éboulements en masse de type avalanche rocheuse. Les vitesses des mouvements varient de quelques millimètres par an (mouvements très lents de type fluage) à plusieurs mètres par seconde (mouvements très rapides de type éboulements rocheux ou coulées boueuses). Ces paramètres, souvent conditionnés par le contexte hydrologique, ont une influence primordiale sur l'extension des dommages.

À partir de ces différents éléments, il est possible de définir les types de mouvements de terrain suivants :

- les glissements ;
- les mouvements de reptation, de solifluxion et de fluage ;
- les coulées boueuses et les laves torrentielles ;

- les chutes de pierres, les chutes de blocs et les éboulements en masse ;
- le fauchage et l'affaissement ;
- les affaissements de grande extension.

De nombreux mouvements de terrain se présentent sous la forme de mécanismes composites qui combinent plusieurs des mécanismes types présentés ci-dessus.

L'identification du type de mouvement est importante car ce dernier conditionne en partie le choix des capteurs à déployer sur le terrain pour assurer une surveillance appropriée du site.

### 1.3.2 Glissements

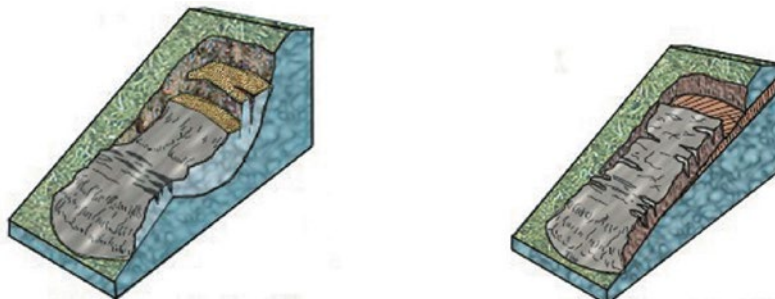
Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) d'une masse de terrain de volume et d'épaisseur variables, le long d'une surface de rupture inclinée ; cette dernière concentre l'essentiel des déformations. Le volume d'un glissement de terrain peut aller de quelques mètres cubes dans le cas d'un glissement de talus localisé à plusieurs millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant.

Parmi les mécanismes de rupture simples, on distingue deux types de glissements (figure 2) :

- les glissements **rotationnels** (figure 2a) sont caractérisés par une forte composante en basculement de la masse en mouvement le long d'une surface de rupture dont la forme est souvent assimilée à un cylindre à directrice circulaire ;
- les glissements **translationnels** ou **glissements plans** (figure 2b) se produisent lorsqu'il existe une interface en profondeur pouvant guider une rupture plane : couche de caractéristiques mécaniques médiocres, contact entre le manteau d'altération et le substratum, etc.

Figure 2

Représentation schématique de glissements de terrain rotationnels (2.a) et translationnels (2.b). La zone située entre la surface de rupture et le terrain naturel est la masse glissée. Elle se décompose comme suit : la partie supérieure des glissements, appelée tête, comporte en général un escarpement principal qui peut parfois atteindre plusieurs mètres de haut. Ce dernier peut être accompagné d'escarpements secondaires. Le corps du glissement est souvent le siège de fissures transversales perpendiculaires à la direction du mouvement. Le pied du glissement est souvent matérialisé par la présence d'un bourrelet.



2.a) Glissement rotationnel

2.b) Glissement translationnel

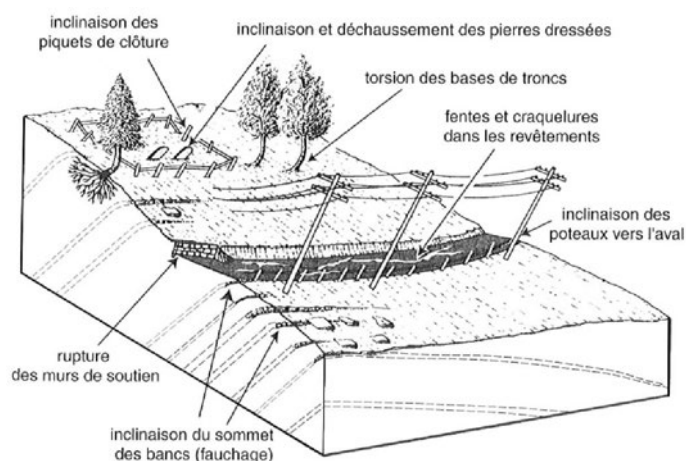
Source : Adapté d'après la classification de Varnes, 1978

### 1.3.3 Mouvements de reptation, de solifluxion et de fluage

Les versants constitués de formations meubles peuvent être le siège de mouvements d'ensemble sans surface de rupture. Ce sont des mouvements essentiellement superficiels caractérisés par une cinématique très lente à lente (1 mm/an à 1 cm/an), qui peuvent être continus ou saisonniers selon la tranche de sol affectée par les changements de teneur en eau et de température. Ils sont liés à des déformations irréversibles au sein de massifs de sols plastiques relativement peu perméables (marneux, limoneux ou argileux), selon deux mécanismes principaux :

- le **fluage** affectant des formations marneuses ou argileuses de grande épaisseur supportant une surcharge naturelle (plateau rocheux, falaise) ou anthropique (remblai). Ce phénomène diffus, généralement lent, est notamment lié aux processus complexes de vieillissement des matériaux au cours du temps (fatigue, altération chimique, variations cycliques des pressions d'eau, etc.).
- la (re)mise en mouvement des formations superficielles recouvrant un versant naturel en fonction des variations dans le temps de leur degré de saturation en eau. Avec l'augmentation de la teneur en eau des matériaux, on observe une accélération des phénomènes de reptation et une succession de petits glissements superficiels. La **reptation** (figure 3) désigne la migration très lente vers le bas des particules fines des premiers décimètres du sol sous l'action de la gravité, du travail des végétaux et des animaux, des infiltrations d'eau, des cycles de gel et de dégel, des variations thermiques, etc. Se développe alors un mouvement d'ensemble appelé **solifluxion**, favorisé par l'existence en profondeur d'horizons présentant des comportements mécaniques différents et caractérisé par une légère ondulation du couvert végétal («moutonnement», bourrelets).

Figure 3  
Phénomène de reptation



Source : Campy *et al.*, 2013

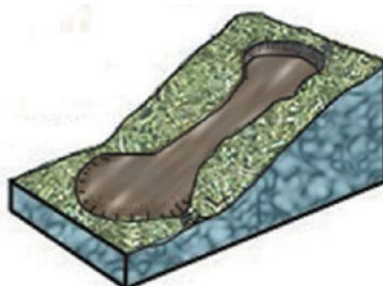
Ces mouvements peuvent évoluer par un phénomène de rupture progressive vers des glissements de terrain éventuellement accompagnés d'écroulements de falaises. Le déclenchement du glissement de terrain de la Roquette à Villequier en Vallée de Seine (Seine Maritime) en août 1969 a mobilisé un volume total de l'ordre de 400 000 m<sup>3</sup>, déstabilisant et entraînant l'écroulement de grands panneaux de craie qui constituaient le rebord du plateau crayeux.



### 1.3.4 Coulées boueuses et laves torrentielles

Il s'agit de mouvements de terrain proches de ceux d'un fluide dont la viscosité varierait dans d'assez larges proportions. Le matériau saturé peu ou non consolidé et de densité élevée est en mesure de transporter au niveau du front des cailloux, des blocs rocheux et des éléments divers, ce qui accentue encore sa force destructrice. Le phénomène peut commencer par un glissement évoluant en **coulée boueuse** qui prend de la vitesse et entraîne avec elle tous les matériaux instables présents sur son trajet, généralement à forte pente et facilement érodable (terres labourées ou brûlées, cendres volcaniques, terrains marno-argileux stériles et profondément ravinés). Le matériau charrié, à l'état de fluide visqueux contenant des blocs de taille métrique, provient généralement d'un glissement situé à l'amont et s'écoule dans un premier temps perpendiculairement à la pente puis dans un chenal ou dans des thalwegs existants. La coulée peut alors progresser sur des distances de plusieurs kilomètres avant de déposer sa charge en suspension dans des cônes de déjection aplatis, en pied de relief, ou dans des plaines d'épandage (figure 4). Ce type de mouvement peut être engendré par des fortes pluies, des cyclones, des séismes, *etc.*

Figure 4  
Représentation schématique des coulées boueuses



Source : Adapté d'après la classification de Varnes, 1978

Le volume des matériaux mobilisés varie de quelques dizaines à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes alors que les vitesses d'écoulement sont rapides à très rapides. Ainsi, les coulées boueuses les moins rapides se déplacent à la vitesse du millimètre par seconde comme ce fut le cas en mars 1943 à Bellevaux en Haute-Savoie alors que les coulées boueuses les plus rapides peuvent atteindre une vitesse d'une dizaine de mètres par seconde comme ce fut le cas en janvier 1982 au sud de San Francisco.

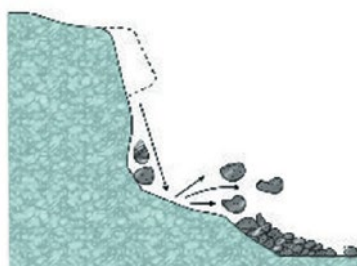
Dans un contexte de bassin torrentiel aux pentes instables, la mise en contact de matériaux déjà saturés et déstabilisés avec un apport d'eau soudain, d'origine météorique (violent orage) ou profonde (débouillage de karst, rupture de poches sous-glaciaires) peut conduire au déclenchement de **laves torrentielles** qui progressent alors très rapidement (plusieurs mètres par seconde) dans le chenal d'écoulement du torrent, par bouffées successives, érodant les berges du torrent (auto-alimentation), emportant tout sur leur passage et parcourant des distances pouvant dépasser le kilomètre.

### 1.3.5 Chutes de pierres, chutes de blocs, éboulements en masse et mouvements de versants rocheux sans surface de glissement

Les chutes de pierres, les chutes de blocs et les éboulements en masse (figure 5) sont des mouvements gravitaires qui affectent les massifs rocheux présentant de forts reliefs

(falaises ou versants raides) et prédécoupés par plusieurs familles de discontinuités naturelles (failles, fractures, diaclases, plans de stratification, de schistosité et de foliation). Ces dernières délimitent des compartiments pouvant évoluer vers la rupture en fonction de facteurs déclenchants externes ou internes d'origine naturelle (pluie, vent, gel-dégel, fonte de neige, séisme, racines d'arbres, érosion marine ou fluviale, fatigue, vieillissement, exposition au soleil, approfondissement de la couche active du pergélisol, etc.) ou anthropique (vibrations, etc.). Ces instabilités se présentent sous la forme de mécanismes variés présentés ci-dessous.

Figure 5  
Représentation schématique des chutes de pierres et de blocs



Source : Adapté d'après la classification de Varnes, 1978

- **Glissement plan ou « banc sur banc »** : il s'agit d'un mouvement de translation sur un plan unique de discontinuité dont le pendage est orienté vers l'aval avec mobilisation de la résistance au cisaillement de ce plan au cours du déplacement (figure 6).

Figure 6  
Glissement sur un plan de discontinuité (P1), avec remplissage argileux et venues d'eau, dans des schistes affectant un talus de déblai en phase travaux de l'autoroute A84 à Villedieu-les-Poêles (Manche). À gauche, vue d'ensemble du talus rocheux concerné par l'instabilité. À droite, vue depuis la fracture arrière principale du glissement



Crédit photos : Cerema/DTerNC

- **Glissement de dièdre** : il s'agit d'un mouvement de translation sur deux plans de discontinuité formant un dièdre dont l'arrête est orientée vers le vide avec mobilisation de la résistance au cisaillement de ces deux plans au cours du déplacement (figure 7).

Figure 7

Glissement d'un dièdre délimité par deux plans de discontinuité (P1 et P2) dans des schistes affectant un talus de déblai à Boucé (Orne)

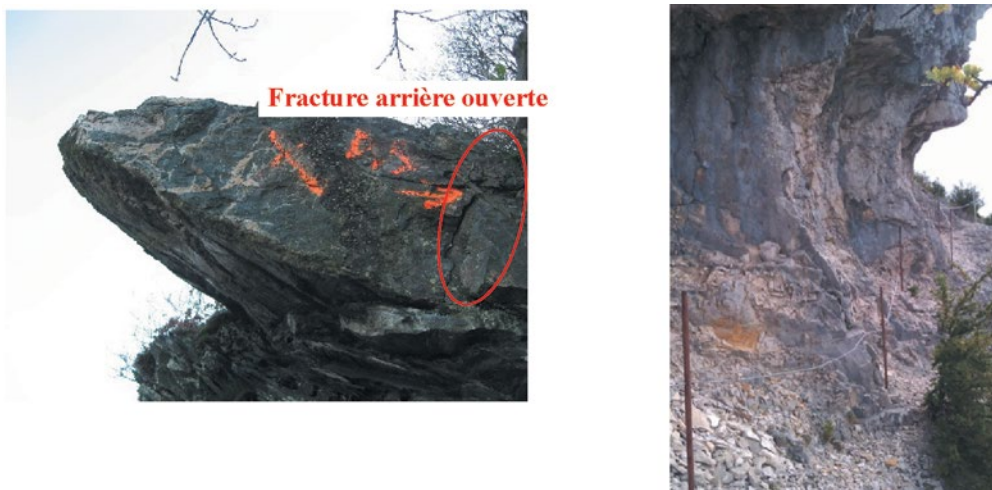


Crédit photo : Cerema/DTerNC

- **Rupture de surplomb** : il s'agit d'une rupture en traction d'un compartiment en surplomb, souvent délimité en arrière par une discontinuité ouverte, quasi-verticale, quasi-parallèle au front de falaise (figure 8) et caractérisée par l'existence de ponts rocheux se rompant progressivement.

Figure 8

À gauche, surplomb avec fracture arrière ouverte dans des schistes et quartzites noirs à Revin (Ardennes).  
À droite, surplomb dans une falaise calcaire dû à la gélivité des bancs sous-jacents à Nantua (Ain)



Crédit photos : Cerema/DTerCE

- **Basculement vers le vide d'une colonne, d'une écaille ou d'un panneau** : il s'agit d'une rupture progressive en compression sous l'effet de la dégradation des caractéristiques mécaniques du massif rocheux en pied du compartiment délimité en arrière par une discontinuité ouverte (figure 9).

Figure 9  
Basculement vers le vide d'une colonne de craie à Canteleu (Seine-Maritime)



Crédit photo : Cerema/DTerNC

- **Éboulements en masse et éboulements en très grande masse** : des éboulements en masse peuvent parfois se produire. Ils présentent une dynamique spécifique dont les processus physiques complexes restent mal compris (lubrification, vaporisation précoce de l'eau au niveau de l'interface entre la masse éboulée en cours de propagation et le versant naturel, « fluidisation » de la masse éboulée du fait de fortes interactions entre les blocs, etc.). Les distances maximales de propagation peuvent atteindre plusieurs kilomètres et les vitesses sont généralement supérieures à 5 m/s et peuvent aller jusqu'à 100 m/s.

Parmi les récents éboulements en très grande masse, on peut citer :

- l'éboulement du mont Toc dans le lac réservoir d'un barrage dans la vallée du Vajont en Italie le 9 octobre 1963 (2 100 morts), qui a mobilisé un volume total d'environ 300 millions de m<sup>3</sup> selon un mécanisme principal de type « glissement plan ». Le site faisait l'objet d'un suivi débuté plusieurs années avant l'éboulement ;
- l'éboulement du Val Pola en Italie le 28 juillet 1987 (27 morts), qui a mobilisé un volume total d'environ 30 millions de m<sup>3</sup> selon un mécanisme principal de type « glissement plan ». Le site ne faisait pas l'objet d'un suivi particulier avant l'éboulement, une surveillance fut mise en place après.

Pour résumer, plusieurs classes d'instabilité peuvent être définies en fonction des volumes total et unitaire mobilisés. Celles-ci sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2  
Classes d'instabilité des chutes de pierres, chutes de blocs et éboulements en masse

Classes d'instabilité	Volumes en jeu
Chute de pierres	Volume unitaire inférieur à 10 dm <sup>3</sup>
Chute de blocs isolés	Volume unitaire inférieur à 1 m <sup>3</sup> (bloc) ou de l'ordre de quelques m <sup>3</sup> (gros bloc) Volume total inférieur à 100 m <sup>3</sup>
Éboulement en masse	Volume total de l'ordre de quelques centaines de m <sup>3</sup>
Éboulement en grande masse	Volume total compris entre 1 000 et 500 000 m <sup>3</sup>
Éboulement en très grande masse	Volume total supérieur à 500 000 m <sup>3</sup>

Après fragmentation de la masse éboulée, les blocs peuvent se propager en pied de falaise par l'intermédiaire d'une succession d'impacts et de rebonds désordonnés, avec des vitesses pouvant atteindre 30 à 40 mètres par seconde (figure 10).

Figure 10

À gauche, impacts liés à la propagation d'un bloc d'environ 30 tonnes dans un versant à Crolles (Isère).  
À droite, route frappée par un éboulement au niveau de l'Étroit du Siaix en Tarentaise (Savoie)



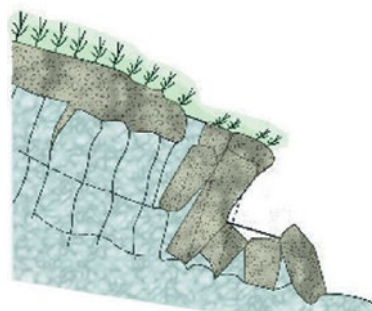
Crédit photos : Cerema/DTerCE

### 1.3.6 Fauchage et affaissement

Les mouvements de versants rocheux sans surface de glissement nette en profondeur présentent généralement une cinématique lente et correspondent à des mécanismes de fauchage ou d'affaissement.

- **Fauchage** : ce sont des mouvements de basculement des extrémités supérieures de bancs (ou feuillets) en direction de la vallée sous l'effet du poids propre des couches et d'une désorganisation du matériau rocheux (figure 11, figure 12). Ce phénomène se produit dans des massifs rocheux caractérisés par une anisotropie quasi-verticale (ou à pendage très redressé vers l'amont), parallèle à la vallée et caractérisée par des espacements relativement faibles. L'épaisseur de matériaux mobilisés peut être relativement importante et atteindre plusieurs dizaines de mètres. Avec la déstructuration progressive des bancs rocheux au niveau des zones de flexure en profondeur (étirement, glissement « feuillet sur feuillet » et distorsion), un mouvement de fauchage dans un versant peut évoluer en un glissement rocheux (cas du site de la Clapière dans les Alpes-Maritimes).

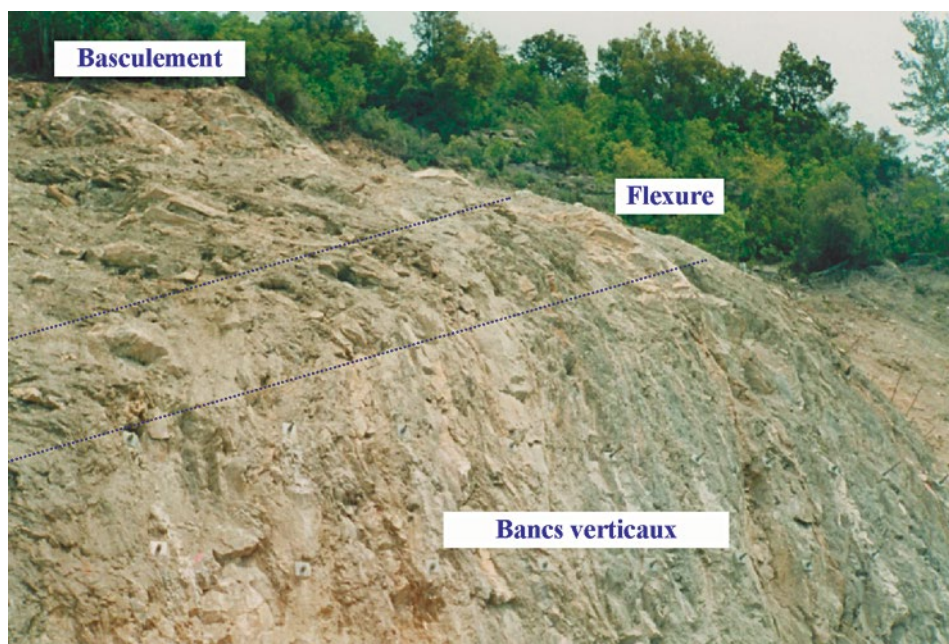
Figure 11  
Représentation schématique du fauchage



Source : Adapté d'après la classification de Varnes, 1978

Figure 12

Fauchage dans un talus de déblai taillé dans des schistes lustrés en Corse. Le talus de déblai a recoupé en travers-banc une structure géologique identifiée comme la manifestation d'un phénomène de fauchage



Crédit photo : Cerema/DTerNC

- **Affaissement** : ce sont des mouvements liés à des phénomènes de fluage dans des niveaux plastiques, argileux ou marneux, surchargés par un massif rocheux. Ce type de phénomène affecte par exemple la barre calcaire des Fêcles à Nantua (Ain). Cette dernière repose sur une assise marneuse et a tendance à s'affaisser et à se détacher du plateau de Don (dont elle est séparée par un large fossé d'effondrement) à une vitesse de l'ordre de quelques millimètres par an (figure 13).

Figure 13  
Barre des Fècles à Nantua (Ain)



Crédit photo : Cerema/DTerCE

### 1.3.7 Affaissements de grande extension

Les affaissements de grande extension ou phénomènes de subsidence suivant la terminologie anglaise sont souvent soudains et se traduisent par une vaste dépression topographique plus ou moins circulaire en surface et de faible profondeur. Ces affaissements peuvent être la conséquence de pompages souterrains, de l'évolution de vides en profondeur par dissolution naturelle de roches carbonatées ou évaporitiques, d'une évolution mal contrôlée de carrières ou de mines souterraines avec extraction de matières solides ou encore de phénomènes particuliers de suffosion correspondant à des processus d'érosion souterraine. La surveillance de ce type de mouvement de terrain n'est pas abordée dans ce guide.

## 1.4 Synthèse

Le Tableau 3 présente, pour chaque type de mouvement de terrain, le contexte géologique et géotechnique couramment observé, la représentation schématique du mécanisme de rupture et un ordre de grandeur des vitesses de déformation qui peuvent être mesurées.

Tableau 3  
Synthèse des typologies de mouvements de terrain et de leurs principales caractéristiques



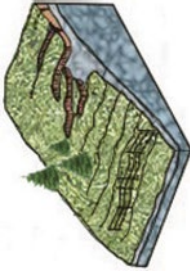




Type de mouvement	Contexte géologique et géotechnique couramment observé	Représentation schématique du mécanisme de rupture	Vitesse de déformation
<b>Glissement rotationnel</b>	Terrains meubles homogènes (talus de déblais ou de remblais).		Très variable : la vitesse peut être très lente (quelques centimètres par an) à modérée (quelques mètres par mois), voire rapide.
<b>Glissement translationnel</b>	Terrains présentant une interface plane de faibles caractéristiques mécaniques pouvant guider la rupture. Matériaux : colluvions saturées en eau, dalles rocheuses de grandes dimensions.		Variable : de modérée (quelques mètres par mois) à rapide (quelques mètres par jour), voire extrêmement rapide.
<b>Reptation, Solifluxion</b>	Terrains plastiques peu perméables (argiles, marnes).		Quelques millimètres par an pour la reptation. Quelques mètres par heure pour la solifluxion.
<b>Fluage</b>	Terrains généralement de très faible pente composés d'une couche résistante reposant sur une couche de plus faibles caractéristiques mécaniques.		De très lente à modérée.



Tableau 3 (suite)

Type de mouvement	Contexte géologique et géotechnique couramment observé	Représentation schématique du mécanisme de rupture	Vitesse de déformation
<b>Coulées boueuses et laves torrentielles</b>	Vallées étroites et canyons en montagne. Matériaux de type limon, sable, gravier fin et argile.		De rapide à extrêmement rapide (en fonction de la pente moyenne et de la consistance des matériaux qui constituent la coulée). Plusieurs mètres par seconde.
<b>Chutes de pierres, chutes de blocs, éboulements en masse</b>	Terrains rocheux de forte pente, falaises, zones côtières, berges des cours d'eau.		Très rapide à extrêmement rapide : plusieurs mètres par seconde à plusieurs dizaines de mètres par seconde.
<b>Fauchage et affaissement</b>	Formations rocheuses anisotropes fortement redressées.		En général lente et progressive (quelques centimètres par an).

# Chapitre 2. Dispositifs de mesure

## 2.1 Grandeurs physiques à mesurer

La conception d'un dispositif de mesure a pour objectif d'approfondir la connaissance du comportement de la pente ou de la falaise instable étudiée et de permettre, par le suivi temporel de paramètres, la gestion de la sécurité à proximité du site instable. Il s'agit de confirmer en particulier le type de mouvement et le mécanisme de rupture qui ont pu être mis en évidence au cours de la visite de terrain et de préciser le modèle géologique et géotechnique du site. Les grandeurs physiques les plus pertinentes doivent être mesurées pour compléter l'analyse du comportement du site. Ces grandeurs peuvent être réparties en deux classes :

- d'une part les **mouvements** qui comprennent les déplacements, les vitesses ou les accélérations ainsi que les déformations et les rotations. Ces grandeurs sont les plus simples à interpréter car elles fournissent des informations directes sur les mouvements du site instable. Bien que ces variables décrivent clairement les mouvements, ce ne sont pas nécessairement les plus pertinentes à mesurer car elles ne permettent pas toujours un délai de réaction suffisant lorsqu'un risque est identifié. Néanmoins, elles constituent une source d'informations nécessaire à l'analyse du comportement du site ;
- d'autre part, les **variables d'influence** qui comprennent les précipitations, les niveaux piézométriques, les pressions interstitielles, les débits des cours d'eau et des drains, les températures, les vibrations, *etc.* Ces variables ne traduisent pas directement l'activité du site. Le choix de les mesurer ou non doit s'appuyer sur une analyse préalable détaillée du comportement du site. Cependant, si elles sont correctement évaluées, ces variables (vibrations mises à part) peuvent permettre de disposer d'un délai de réaction plus long en cas de danger.

Ci-dessous sont présentés les différents types de capteurs permettant la surveillance des mouvements et des variables d'influence sur un site instable. Les caractéristiques techniques de ces capteurs sont résumées dans des fiches techniques présentées en partie 2 et accompagnées de quelques illustrations.

Lorsque les moyens financiers sont insuffisants pour permettre le déploiement de capteurs permettant d'effectuer un suivi temporel de paramètres ou lorsque les contraintes du site ne permettent pas ce déploiement de capteurs, on peut être amené à mettre en place des dispositifs de mesure rudimentaires pour assurer la sécurité à proximité du site instable (filets détecteurs le long des voies ferrées, *etc.*).

## 2.2 Capteurs de mesure des mouvements

### 2.2.1 Topographie

Les outils de mesure topographique permettent de déterminer, par rapport à une position de référence connue, les déplacements d'un point de la surface d'un site à partir de mesures répétées dans le temps. Le point mobile, souvent matérialisé par la présence d'un plot en béton ou d'une cible, et le point de référence ne sont pas liés l'un à l'autre.

On distingue généralement les instruments topographiques manuels traditionnels ou **théodolites** (mesure d'angles dans les plans horizontaux et verticaux) et les instruments topographiques automatiques comme les **distancemètres** (mesure de distances relatives ou absolues) et les **tachéomètres** (mesure à la fois de l'angle et de la distance entre le point mobile et le point de référence). Les développements introduits récemment en matière d'automatisation de la mesure permettent, moyennant la pose de nombreuses cibles, un suivi régulier de plusieurs dizaines de points sur un même site.

Ce type de mesure est à mettre en œuvre sur des sites relativement accessibles où il est possible de disposer des cibles. Il concerne essentiellement les mouvements de versants de grande ampleur (fauchage, éboulements en masse), les glissements de terrain ou les zones soumises à des phénomènes de reptation, de solifluxion ou de fluage.

### 2.2.2 Extensométrie

Les outils de mesure extensométrique permettent de déterminer les déformations tant superficielles que profondes d'un site instable. L'évaluation des déplacements et des déformations repose sur la mesure de la position du point considéré par rapport à un point stable ou au moins connu et pris comme point de référence. Le point mobile et le repère de référence sont physiquement reliés entre eux au moyen de dispositifs mécaniques. Le déplacement du point mobile dans le temps est déduit des variations de sa position par rapport au point de référence. Pour obtenir la mesure du déplacement par rapport à un système de coordonnées extérieur à la zone étudiée, il est nécessaire d'effectuer des levés topographiques afin de vérifier que le point pris comme référence est bien fixe dans le temps.

Les **distancemètres à fil d'Invar**, les **extensomètres** et les **fissuromètres** permettent de mesurer l'ouverture ou la fermeture de fissures. La **mire à vernier** permet de mesurer les variations de distance des deux points entre lesquels elle est placée ; elle s'utilise en général pour des fissures peu ouvertes. Les **capteurs à fibre optique** donnent accès aux déformations réparties tout au long de la fibre, avec une résolution spatiale inférieure au mètre, pour une portée de plusieurs kilomètres.

Les mesures extensométriques sont bien adaptées pour l'instrumentation des sites rocheux relativement accessibles. En effet, la pose des différents capteurs exige une intervention directe sur le site. Le positionnement des capteurs nécessite également une analyse précise du comportement du massif rocheux.

### 2.2.3 Traitement d'images

Les outils de **mesure photogrammétrique** utilisent le principe de la vision stéréoscopique pour reconstruire l'image tridimensionnelle d'un objet observé. Ils permettent ainsi de déterminer l'altimétrie et la planimétrie d'une surface au moyen d'au moins deux photographies de l'objet, prises de points de vue différents, depuis le sol ou d'un avion. Dans le cadre de l'étude des sites instables, cette méthode est employée pour mesurer, entre deux dates de prises de vue, les déformations du site et dresser une cartographie des variations morphologiques de la surface étudiée par rapport à sa morphologie initiale. Elle permet donc d'évaluer, avec une continuité spatiale, l'amplitude et la distribution spatiale des déplacements. Elle donne aussi accès à la position absolue des points si l'on inclut quelques points de calage repérés par géodésie classique. Selon l'emplacement et le type d'appareil photographique (analogique ou numérique) choisi,

on utilise la photogrammétrie terrestre (caméra située au sol) ou la photogrammétrie aérienne (caméra montée sur avion).

Les outils de mesure par **imagerie de face**, contrairement à la photogrammétrie qui requiert des prises de vue différentes, consistent en l'analyse d'une prise de vue unique pour un instant donné. Un appareil photographique haute-définition prend à intervalles de temps réguliers des photographies de la zone surveillée. Ces images sont traitées par la technique de corrélation d'images qui vise à retrouver, de manière automatique, pour chaque pixel d'une image de base, la position du pixel représentant le même objet sur une deuxième image. Une carte des déplacements est alors déduite. La qualité du post-traitement dépend de la résolution de l'appareil photographique : des résultats pertinents sont obtenus pour une résolution fine de l'ordre de la dizaine de centimètres.

Les outils de mesure photogrammétrique et par imagerie de face sont bien adaptés à l'observation de sites de grande ampleur difficilement accessibles.

## 2.2.4 Utilisation des ondes électromagnétiques

Le système satellitaire de positionnement d'un point au sol **GPS** (Global Positioning System) repose sur la mesure de la distance du point par rapport à au moins quatre satellites de la constellation américaine NAVSTAR ou de la constellation russe GLONASS (voire peut être dans le futur de la constellation européenne Galiléo) dont on connaît les coordonnées. Cette mesure permet un positionnement tridimensionnel absolu précis des points de la surface d'un site instable (Duranthon, 2000). Elle peut également être utilisée pour déterminer des distances relatives entre deux points, avec une précision de 2 à 5 mm en planimétrie et de 5 à 10 mm en altimétrie. Cette précision décroît fortement pour des temps d'observation courts.

Les outils de mesure par ondes RADAR (Radio Detection And Ranging) utilisent les propriétés de propagation des ondes électromagnétiques. Un objet cible (ou zone illuminée) interfère avec l'onde émise et réfléchit une partie de cette énergie (énergie rétrodiffusée). L'analyse comparée des signaux émis et rétrodiffusés permet d'extraire des informations sur la distance RADAR-cible (temps de vol aller-retour), les propriétés de rétrodiffusion de la cible et son mouvement (effet Doppler). La résolution en distance est directement liée à la largeur de la bande émise (typiquement quelques dizaines de MHz). La longueur d'onde et la taille de l'antenne (réelle ou synthétique) déterminent la résolution des radars imageurs. Les propriétés de rétrodiffusion des surfaces naturelles, notamment la contribution du couvert végétal et la pénétration des ondes dans le sol, sont principalement régies par la longueur d'onde (de quelques mètres à quelques mm). Une qualité remarquable des radars est leur capacité de fonctionnement quelque soient les conditions météorologiques. Parmi les développements récents, on peut citer le RADAR Ultra Large Bande (ULB) utilisé sur le site de Séchilienne en Isère (Pothérat *et al.*, 2010 ; Lemaître *et al.*, 2004).

Les outils de **mesure interférométrique** se développent à travers les systèmes SAR (Synthetic Aperture RADAR). Ce sont des systèmes RADAR qui exploitent la technique de l'antenne à ouverture synthétique et l'effet Doppler. L'interférométrie SAR est une technique fondée sur la comparaison de deux images RADAR d'un même scénario acquises depuis des angles de vue différents. En synthétisant une antenne fictive de grandes dimensions, dite à ouverture synthétique, et en combinant de façon cohérente les données saisies par le capteur dans les diverses positions occupées, les systèmes

SAR garantissent une résolution élevée, également dans la direction azimutale. Ils permettent de reconstruire la topographie de la surface du sol à des instants différents ainsi que de relever les éventuels déplacements qui se sont produits dans l'intervalle de temps entre l'acquisition des deux images. À l'intérieur de l'interférométrie, on distingue plusieurs techniques de mesure : **PSInSAR**, **GroundBased SAR**, **DInSAR**. D'autres développements sont actuellement en cours (par exemple, l'interférométrie **SqueeSAR**).

Les outils de **mesure par scanner laser** reposent sur le calcul du temps de vol d'une impulsion laser générée par un émetteur, réfléchi par la surface frappée et captée par le récepteur installé à bord de l'instrument. Le temps de vol, correspondant à l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant d'émission de l'impulsion et celui du retour, permet de déterminer la distance entre l'instrument et le point étudié. Deux types de mesures sont possibles : les mesures ponctuelles (effectuées avec des distancemètres laser, parfois intégrés dans des stations topographiques totales ou tachéomètres) et les balayages des surfaces effectués au moyen de scanner laser (laser terrestre - Terrestrial Laser Scanning ou **TSL** ; laser aéroporté - airborne laser scan ou **LIDAR** Light Detection And Ranging ; Buckley *et al.*, 2008). Avec un TSL, il est possible d'effectuer une cartographie des variations morphologiques de la surface étudiée par rapport à une lecture initiale de référence et donc d'évaluer avec une continuité spatiale l'ampleur des déplacements et leur distribution spatiale. Le balayage de la surface permet de reconstruire un modèle numérique tridimensionnel de la surface constitué d'un semis de points définis au moyen de quatre paramètres  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $k$ . Les trois premières valeurs représentent les coordonnées spatiales du point, la quatrième est le « coefficient de réflectivité ». Ce coefficient est lié à la quantité d'énergie restituée par la surface frappée : il permet de distinguer des matériaux différents ou, si les matériaux sont les mêmes, de définir l'état de conservation ou d'altération de la surface étudiée.

Ces outils de mesure utilisant les propriétés de propagation des ondes électromagnétiques sont très adaptés à l'observation de sites de grande ampleur peu accessibles et nécessitant des mesures de qualité. En France, ils concernent les sites de Séchillienne (Isère) et de la Clapière (Alpes-Maritimes) ou encore les falaises de craie en Normandie.

### 2.2.5 L'inclinométrie

Les rotations en surface et en profondeur peuvent être mesurées au moyen d'outils de type inclinométrique. Si l'on dispose d'une série temporelle de mesures, il est possible de calculer la vitesse de mouvement. Plusieurs instruments permettent d'accéder à cette mesure : **inclinomètres**, **pendules** (mesure du déplacement relatif d'un massif de sol par rapport à un repère stable), clinomètres ou **nivelles** (mesure du déplacement angulaire d'un élément de la surface du sol à l'aide d'un niveau à vis micrométrique de grande précision), *etc.* Ils diffèrent par leur mode d'installation.

Dans la surveillance des pentes instables, la mesure la plus importante est souvent celle des déplacements horizontaux en fonction de la profondeur car elle permet d'identifier les zones en mouvement dans le terrain et la position d'une éventuelle surface de rupture. Elle s'obtient à l'aide d'un inclinomètre permettant la mesure des rotations d'un tube solidaire du sol par rapport à la verticale et permet, par des mesures répétées dans le temps, d'évaluer les déplacements à partir d'une intégration numérique. L'inclinomètre permet aussi de définir si la direction du mouvement est constante avec la profondeur.

Les outils de mesure inclinométrique nécessitent des interventions directes sur le site pour la pose des capteurs et sont donc réservés à des sites plutôt accessibles. Ils sont souvent utilisés pour l'étude des mouvements de versants de grande ampleur. Lorsque les mouvements sont rapides, on évite d'utiliser des inclinomètres car ils peuvent être détériorés rapidement et ainsi rendus inutilisables.

### 2.2.6 Utilisation du bruit de fond

Cette méthode s'applique aux massifs rocheux. Le principe repose sur l'hypothèse qu'un éboulement rocheux est précédé par l'initiation et la propagation de la fracturation au sein du massif rocheux. Cette dernière se manifeste par une augmentation du nombre de craquements internes ou événements sismiques (nanoséismes, événements à haute fréquence), par une croissance de l'énergie sismique cumulée libérée et par une diminution de la fréquence propre du premier mode (résonance) du fait de la perte de rigidité au niveau du contact entre le massif stable et le compartiment rocheux instable. L'enregistrement des événements sismiques internes s'effectue en distribuant dans les zones intéressées un réseau de capteurs sismiques (**sismomètres, géophones**) à haute sensibilité enregistrant en continu et capables de capter les signaux générés par les processus internes de déformation du massif rocheux. Ces capteurs détectent également et enregistrent les signaux générés par des chutes de blocs. Un important travail de traitement du signal doit être réalisé a posteriori pour discriminer les différents types d'événements : séismes, craquements liés à la propagation de la fracturation dans le massif rocheux, chutes de blocs, *etc.* Ce type de mesure, dénommée « surveillance dynamique », a déjà été appliqué à la surveillance d'une écaille rocheuse calcaire dans les Alpes (Levy *et al.*, 2011). Plus largement, l'enregistrement du bruit de fond sismique est de plus en plus souvent réalisé dans les grands versants rocheux, comme à Séchillienne en Isère (Lacroix and Helmstetter, 2011). Cependant, cette technique ne peut être utilisée à l'heure actuelle comme une méthode de surveillance opérationnelle d'un site instable. En effet, elle présente les inconvénients suivants : nombre élevé de mesures à stocker et à traiter, discrimination complexe pour éliminer les signaux parasites, forte atténuation des ondes sismiques dans les massifs rocheux très fracturés ou poreux très amortissants, localisation délicate des foyers en profondeur, influence du gel ou de la houle, *etc.* L'analyse des mesures réalisées par ces capteurs nécessite donc des compétences pointues en matière de traitement du signal et fait encore l'objet de recherches.

## 2.3 Capteurs de mesure des variables d'influence

La mesure des grandeurs physiques qui ont une influence sur le comportement du site instable mais qui ne permettent pas directement de décrire son évolution en matière de mouvements comporte :

- la mesure des variables météorologiques et hydrologiques (précipitations, température et débit de cours d'eau et de drains) ;
- la mesure des variables hydrogéologiques (hauteur d'eau, teneur en eau, pressions interstitielles et succion), le suivi des paramètres géochimiques et isotopiques des eaux souterraines ;
- la mesure des vibrations externes.

### 2.3.1 Météorologie et hydrologie

La mesure des grandeurs météorologiques et hydrologiques consiste dans un premier temps à déterminer la hauteur des précipitations (pluie et neige) au moyen de **pluviomètres** et de **nivomètres**. Ces capteurs doivent si possible être implantés à l'endroit où se fait l'alimentation. Dans les régions montagneuses en effet, les précipitations peuvent être significativement différentes sur deux zones proches différemment exposées. L'altitude et l'exposition au vent ont également une influence sur les hauteurs de neige mesurées.

Dans les massifs rocheux où l'alternance de phénomènes de gel-dégel dans les fractures peut être à l'origine de chutes de blocs, il peut être intéressant de mesurer la température au moyen de **sondes de température**.

Pour évaluer les volumes d'eau qui entrent et qui sortent d'une instabilité, on peut mettre en place des **débitmètres**.

On peut également, pour mieux comprendre le comportement du site instable, mesurer l'humidité de l'air au moyen d'hygromètres, et la vitesse et la direction du vent au moyen d'anémomètres et de girouettes. Ces paramètres contribuent à l'évaluation de l'évapotranspiration sur le site. Ils permettent donc de calculer, à partir des précipitations brutes enregistrées sur le site et d'une évaluation du ruissellement, les quantités d'eau qui s'infiltrent réellement dans les terrains et alimentent les nappes souterraines.

Ces différentes mesures ne doivent pas être négligées car elles permettent de décrire de manière générale l'influence de l'eau sur le comportement du site. Dans le cas des glissements de terrain, les variations du niveau piézométrique sont souvent corrélées aux hauteurs de précipitations mais avec un décalage temporel de plusieurs jours. Dans le cas des coulées boueuses, il est très utile de positionner un pluviomètre au niveau de la zone de stockage de matériaux susceptibles d'être mis en mouvement. Des **limnigraphes** ou des systèmes de fils équipés de masses à différentes hauteurs au-dessus du lit de la rivière permettent de contrôler les niveaux d'eau et les hauteurs de matériaux déplacés. Si ces dispositifs sont placés suffisamment en amont de la zone à protéger, ils peuvent contribuer au déclenchement d'alertes en cas de dépassement de seuils prédéfinis.

### 2.3.2 Hydrogéologie

La mesure des grandeurs hydrogéologiques permet de quantifier l'influence de l'eau sur le comportement du massif de sol ou de roche. Dans le cas où une nappe est présente, les grandeurs mesurées sont la hauteur d'eau (niveau piézométrique) ou les pressions interstitielles. Dans le cas où il n'y a pas de nappe, il s'agit de mesurer la teneur en eau des terrains ou éventuellement leur succion. Ces derniers paramètres, dont l'influence sur la stabilité est difficile à évaluer, sont utilisés davantage pour acquérir une meilleure compréhension du comportement du site que pour sa surveillance.

La mesure du niveau piézométrique ou des pressions interstitielles permet de déterminer les variations du toit des nappes libres ou des nappes en charge dans les terrains. Ces variations sont directement liées aux variations du volume d'eau dans les couches de sol. Les mesures se font dans des forages équipés de tubes piézométriques ouverts dans les sols relativement perméables (sables et graves) dans lesquels on descend une **sonde piézométrique** pour effectuer la mesure (manuellement ou automatiquement).

Dans les sols peu perméables (limons et argiles), on utilise des **sondes de mesure de pression interstitielle**, placées notamment dans la partie inférieure de la zone instable (à proximité de la surface de rupture supposée) afin d'y caractériser les pressions interstitielles, les contraintes effectives et la résistance au cisaillement. Les mesures périodiques ou les mesures réalisées en continu avec des systèmes d'acquisition automatiques permettent la recherche de corrélations entre l'évolution temporelle des pressions interstitielles et la variation des paramètres météorologiques (hauteur des précipitations notamment) et des autres grandeurs physiques surveillées (déformations superficielles et profondes, *etc.*).

La mesure de la teneur en eau au moyen de **capteurs de teneur en eau** ou par mesure directe après prélèvement d'échantillons de sols et la mesure de la succion au moyen de **tensiomètres** permettent de déterminer les volumes d'eau dans le massif de sol ou de roche. Ces grandeurs peuvent être mesurées en fonction du temps à différentes profondeurs par des moyens manuels ou automatiques.

Le suivi des paramètres géochimiques et isotopiques des eaux souterraines au moyen de **traceurs naturels** (température, pH, conductivité, isotopes - O, S -, concentrations en cations solubles -  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  - et en oxyanions solubles -  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  -) ou **artificiels** (injection dans le terrain de traceurs chimiques comme l'éosine ou la fluorescéine, *etc.*) a pour objectif d'améliorer la connaissance des mécanismes de déformation du site, à travers notamment la caractérisation des circulations d'eau. En l'absence de piézomètres ou avant leur implantation, les traçages naturels et artificiels peuvent permettre de définir, à faible coût (notamment pour les traçages naturels), les zones où l'eau s'infiltré (altitude moyenne, *etc.*), les zones où elle circule et le lien avec les mécanismes de déformation.

Ces mesures hydrogéologiques sont donc très utiles pour la compréhension des phénomènes d'infiltration d'eau d'origine météorique et l'étude de l'évolution de la ou des nappe(s). Comme les mouvements d'un site instable sont souvent précédés de variations du niveau piézométrique ou des pressions interstitielles, la mesure de ces grandeurs peut constituer la base d'un système d'alertes.

### 2.3.3 Vibrations externes

Il s'agit des vibrations générées par les explosions de nature anthropique (tirs à l'explosif), certains travaux (battage de palplanches) et les séismes. Ces derniers sont susceptibles de déclencher des instabilités de pente, principalement pour des événements sismiques de magnitude supérieure à 5 sur l'échelle de Richter. L'enregistrement des vibrations s'effectue en distribuant dans les zones intéressées un réseau de capteurs sismiques (**sismomètres, géophones, accéléromètres**) à haute sensibilité enregistrant en continu et capables de capter les signaux générés par ces événements sismiques. Cependant, compte tenu du caractère très soudain et très bref de ce type d'évènement, lorsqu'il survient, il est en général trop tard pour générer une alerte visant à la gestion de la sécurité dans la zone concernée. Ce type de capteur ne permet donc pas une surveillance opérationnelle d'un site instable mais il peut être utilisé a posteriori pour comprendre les mécanismes à l'origine de la rupture (notamment les effets de site).



## 2.4 Synthèse

Les principaux capteurs actuellement disponibles sur le marché pour une surveillance opérationnelle d'un site instable sont rassemblés dans le Tableau 4 en fonction de la grandeur physique mesurée. Les caractéristiques techniques de ces capteurs et de l'acquisition associée sont détaillées dans le chapitre 3 et résumées dans des fiches techniques présentées dans la partie 2 accompagnées de quelques illustrations.

Tableau 4  
Grandeurs physiques mesurées et capteurs associés pour la surveillance opérationnelle des sites instables.

Grandeurs physiques	Capteurs	Applications
Déplacement et déformation	Fissuromètre, Extensomètre, Mire à vernier	Ouverture d'une fissure entre deux blocs
	Distancemètre	Distance d'un point par rapport à un point de référence
	Pendule inverse	Déplacement transversal de la surface par rapport à une zone scellée en fond de trou
	Fibre optique	Déformations réparties sur un grand linéaire
	Tachéomètre	Position relative d'un point dans l'espace
	GPS	Positions relative et absolue d'un point
	RADAR	Distance d'une multitude de points par rapport à un point de référence
	Scanner laser	Position d'une multitude de points
Rotation	Clinomètre (dont nivelle)	Rotation par rapport à l'horizontale
	Inclinomètre	Rotation par rapport à la verticale
Vibration	Vélocimètre / Accéléromètre	Vitesse / Accélération particulière
	Géophone	Vitesse particulière
Précipitation	Pluviomètre	Hauteur de pluie
	Nivomètre	Hauteur de neige
Hauteur d'eau	Limnigraphe	Hauteur d'eau dans un cours d'eau
	Piézomètre	Hauteur de la nappe
Pression interstitielle	Capteur de pressions interstitielles	Pressions interstitielles
Débit	Débitmètre	Débit d'un cours d'eau ou d'un drain
Température	Sonde de température	Température

Pour les sites à **enjeux majeurs**, une surveillance multi-capteurs est souvent nécessaire pour gérer le risque. C'est le cas du site du Mont de la Saxe à Courmayeur (Italie) dans les Alpes où l'occurrence probable d'un éboulement d'un compartiment de 265 000 m<sup>3</sup> a entraîné le déploiement de multiples capteurs : antennes GPS, caméras, cibles infrarouges, inclinomètres, piézomètres et débitmètres (figure 14).

Figure 14

Surveillance multi capteurs du site du Mont de la Saxe, au nord-est de la ville de Courmayeur (Italie), à la sortie du tunnel du Mont-Blanc. Les mouvements en surface sont suivis au moyen d'antennes GPS (14.a, figure de gauche), de caméras (14.a, figure de gauche) et de cibles infrarouges (14.a, figure de droite). Les mouvements en profondeur sont suivis au moyen d'inclinomètres (14.b, figure de gauche). Les niveaux d'eau dans l'instabilité sont suivis au moyen de piézomètres (14.b, figure de gauche) et de débitmètres (14.b, figure de droite).



14.a Suivi des paramètres en surface

Crédit photos : Cerema/DTerCE



14.b Suivi des paramètres en profondeur

Crédit photos : Cerema/DTerCE

## 2.5 Choix des capteurs en fonction de la typologie de l'instabilité

Les phénomènes d'instabilité présentent une grande diversité tant au niveau des matériaux affectés que des volumes en jeu et de la cinématique des mouvements. Les exemples ci-dessous montrent que le choix des capteurs doit être adapté à la typologie des instabilités. C'est ainsi que l'on ne choisira pas le même système pour surveiller des zones affectées par des mouvements étendus ou des mouvements ponctuels, des mouvements superficiels ou des mouvements profonds, des mouvements rapides ou des mouvements lents. Lors du choix des capteurs, on doit également prendre en compte l'importance des enjeux, les budgets disponibles et l'environnement du site.

### 2.5.1 Glissement avec une surface de rupture

Dans le cas d'un versant instable où une surface de rupture est présumée, l'instrumentation peut être la suivante :

- des inclinomètres interceptant la surface de rupture afin de déterminer le déplacement et la vitesse du sol à différentes profondeurs, l'épaisseur de terrain en mouvement par rapport au massif supposé stable et la direction du glissement. Si ces paramètres évoluent au cours du temps, cela peut être un signe de changement de comportement du site. Les inclinomètres sont constitués d'un tube inclinométrique et d'un capteur qui peut être une sonde inclinométrique mobile ou fixe installée dans le tube inclinométrique. Les inclinomètres doivent être placés en amont, dans le corps et en aval du glissement. La détermination de la longueur de l'inclinomètre repose sur une analyse de la carte géologique, l'observation de sondages carottés et l'enregistrement éventuel puis l'étude de paramètres de forage et d'autres diagraphies différées (imagerie de paroi, microsismique, radioactivité naturelle, etc.). Si la déformée du tube inclinométrique n'est pas dans un même plan, cela peut être lié à un défaut de scellement, la présence de deux couches de terrain qui n'ont pas le même comportement, le vrillage ou le flambage du tube inclinométrique, etc. Lorsque les moyens dont on dispose sont plus rudimentaires ou lorsqu'il n'est pas possible de réaliser des forages, on peut mettre en place des nivelles en surface du sol. Celles-ci permettent d'avoir accès à l'évolution en surface des rotations par rapport à l'horizontale ;
- des piézomètres ouverts de manière à caractériser les variations de la piézométrie sur l'épaisseur de sol considérée. Ces piézomètres ouverts peuvent être équipés de capteurs automatiques. Ils permettent de vérifier le lien entre les déplacements et la piézométrie voire d'établir par la suite des modèles prédictifs ;
- des capteurs de pressions interstitielles au niveau supposé de la surface de rupture afin de disposer de la valeur réelle des pressions interstitielles permettant d'évaluer les contraintes effectives et ainsi d'estimer le frottement mobilisable le long de cette surface ;
- un pluviomètre afin de corrélérer le niveau piézométrique et la pluviométrie pour préciser le régime hydrogéologique du site. Les variations du niveau piézométrique sur un site peuvent être décalées dans le temps par rapport aux précipitations lorsque la nappe n'est pas alimentée de manière préférentielle par l'infiltration des eaux de pluie mais par des circulations d'eau souterraines ;

- un tachéomètre peut être utilisé pour suivre l'évolution de plusieurs points du glissement.

## 2.5.2 Coulées boueuses

Dans le cas de coulées boueuses, la cinématique du phénomène fait que le délai dont on dispose pour gérer une alerte et une évacuation est généralement très court. Pour accroître ce délai, des capteurs, souvent rudimentaires, sont mis en place très à l'amont, à proximité de la zone où les coulées boueuses sont susceptibles de se développer (en aval d'une zone d'accumulation de matériaux qui a tendance à glisser). L'instrumentation que l'on peut mettre en œuvre est la suivante :

- un pluviomètre au niveau de la zone de stockage des matériaux ;
- un limnigraphe dans le torrent ou le talweg où la coulée boueuse est supposée se développer ;
- des fils équipés de masses à différentes hauteurs au-dessus du lit de la rivière ou sur le trajet supposé de la coulée boueuse afin de servir de détecteurs lors de l'occurrence d'une coulée et pour permettre d'estimer la hauteur de matériaux déplacés par la coulée en amont des zones à enjeu.

À titre d'illustration d'une surveillance opérationnelle d'une coulée boueuse, on peut citer le cas du glacier de Tête Rousse dans le massif du Mont-Blanc en Haute-Savoie. Le 12 juillet 1892, la vidange brutale d'une poche d'eau liquide de 200 000 m<sup>3</sup> contenue dans le glacier a conduit à la formation d'une énorme lave torrentielle qui a parcouru les vallées de Bionnassay et du Bon-Nant sur une distance de 14 kilomètres en environ 30 minutes et a mobilisé un volume total de matériaux estimé à 1 000 000 de m<sup>3</sup>. Cette coulée boueuse a fait 175 morts sur la commune de Saint-Gervais-les-Bains. Pour éviter qu'un scénario identique à celui de 1892 ne se reproduise, durant l'été 2010, en parallèle des travaux de pompage d'une nouvelle poche d'eau, une disposition spécifique ORSEC a été mise en place par la Préfecture de Haute-Savoie : elle visait à mettre en sécurité la population en cas d'occurrence d'une nouvelle lave torrentielle catastrophique. À partir de l'hypothèse d'une vitesse de propagation moyenne du front de la lave égale à 7 m/s, le temps de parcours entre le glacier de Tête Rousse et les premiers enjeux a été estimé à 15 minutes. Le dispositif de surveillance mis en place (figure 15) consiste en un système de détection de la lave torrentielle au plus près du glacier (rupture brutale du front du glacier ou vidange d'un débit minimal de 50 m<sup>3</sup>/s), couplé à une transmission des alarmes en temps réel (par téléphone et sous forme de sirènes tout au long du parcours de la coulée boueuse). Le système de détection est constitué de deux lignes de câbles tendus en travers du chenal d'écoulement immédiatement en aval du front du glacier. Les deux câbles verticaux de ces lignes sont fixés à deux ancrages au sol par l'intermédiaire de dispositifs fusibles métalliques, conçus pour rompre au-delà d'un certain degré de sollicitation : la rupture de ces fusibles en cas d'évènement catastrophique est détectée, ce qui génère des alarmes. Le système de détection est également complété par deux capteurs sismiques et par des boutons permettant de déclencher les alarmes manuellement sur le site si besoin.

Figure 15

Système de surveillance implanté sur le site du glacier de Tête Rousse dans le massif du Mont-Blanc en Haute-Savoie. Le système de détection (figure du haut) est constitué de deux lignes de câbles tendus en travers du chenal d'écoulement immédiatement en aval du front du glacier, zone d'initiation potentielle d'une lave torrentielle. La détection de la rupture du dispositif de mesure en cas d'évènement catastrophique entraîne le déclenchement d'une alarme et l'émission de sirènes d'évacuation de la population en aval (figure du bas).



Crédit photos : MYOTIS

### 2.5.3 Mouvements sans surface de rupture (fluage)

Dans le cas de mouvements sans surface de rupture, l'instrumentation à mettre en œuvre est très semblable à celle d'un glissement présentant une surface de rupture. La mise en place d'un inclinomètre, s'il est scellé sur une hauteur suffisante dans une zone de terrain stable, permet d'estimer l'épaisseur de terrain en mouvement, de détecter les éventuelles variations de la direction du mouvement avec la profondeur et l'éventuelle formation progressive d'une surface de rupture.

## 2.5.4 Chutes de pierres, chutes de blocs et éboulements en masse

Les chutes de pierres, les chutes de blocs et les éboulements en masse sont le résultat d'une lente évolution des versants rocheux liée soit à des processus d'altération ou d'érosion, soit à de lents mouvements d'affaissement, de fluage ou de fauchage. Pendant cette longue phase d'initiation, les déplacements demeurent très faibles. La phase de rupture est généralement très brutale compte tenu du comportement mécanique fragile des roches. Ainsi, les chutes de pierres font rarement l'objet d'une surveillance, en raison du caractère soudain de la rupture. Pour les chutes de blocs, la phase d'accélération est très rapide et la rupture quasi-instantanée ; ces phénomènes se prêtent donc aussi difficilement à la surveillance. Les éboulements en masse et en très grande masse quant à eux sont précédés d'une phase d'accélération pouvant s'étendre sur plusieurs heures ou plusieurs jours. Il est dans ce cas possible de mettre en œuvre une surveillance.

D'une manière générale, la surveillance d'un versant où des éboulements en masse sont suspectés peut reposer sur l'instrumentation suivante :

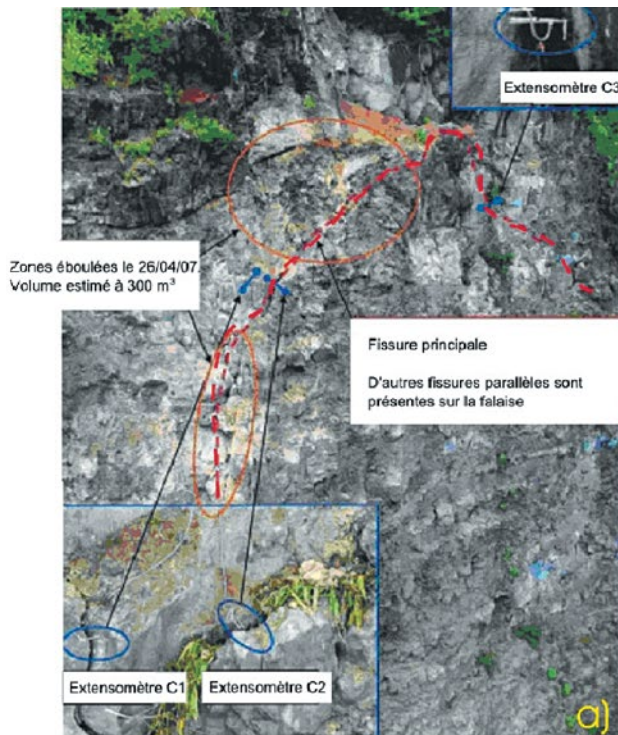
- fissuromètres, extensomètres, distancemètres en vue de détecter les déplacements différentiels d'un compartiment rocheux par rapport à un autre plus stable. Le choix de la position des différents appareils de mesure nécessite une analyse précise du comportement du massif rocheux ;
- tachéomètres qui permettent de mesurer, au cours du temps, les déplacements de points de la surface du terrain, généralement par rapport à un point de référence ;
- sismomètres et géophones : l'objectif de ces instruments est, par la mesure des craquements, de déceler une augmentation du nombre d'évènements microsismiques liés à la propagation de la rupture dans le massif rocheux, phénomène qui peut être précurseur d'un éboulement.

La mesure des pressions d'eau à des fins de surveillance est rarement mise en œuvre dans les massifs rocheux car les écoulements, souvent contrôlés localement par les réseaux de fractures, sont difficiles à caractériser.

À titre d'illustration, on peut citer le cas de la RN1, route du littoral entre Saint-Denis et le port de la Possession, à la Réunion. Depuis les années 1960, cette route est régulièrement le siège d'éboulements. Le 26 mars 2006, alors que le site n'était équipé d'aucun moyen de surveillance contre les chutes de blocs, la RN1 a été le siège d'un éboulement rocheux de 35 000 m<sup>3</sup> environ qui a recouvert l'ensemble de la chaussée et fait deux victimes (figure 16). Suite à cet évènement, une inspection du site et la comparaison visuelle de photographies prises à différentes époques a permis de mettre en évidence la présence d'une nouvelle écaille séparée du massif par une fissure ouverte de 15 cm, délimitant un volume potentiellement instable d'environ 10 000 m<sup>3</sup>. Une instrumentation constituée d'extensomètres a été mise en place par la société MYOTIS et les données rapatriées en temps réel, un personnel d'astreinte étant chargé d'alerter les autorités compétentes afin qu'un basculement du trafic coté mer soit mis en place en cas de dépassement d'un seuil prédéfini. Ce système de surveillance a bien fonctionné puisqu'il a conduit au basculement du trafic côté mer le 4 mai 2007, soit deux jours avant le nouvel éboulement survenu dans la nuit du 5 au 6 mai 2007. Ce dernier, d'un volume inférieur à celui de 2006 (4 000 m<sup>3</sup>), est resté contenu dans le piège à cailloux prévu à cet effet en pied de falaise.

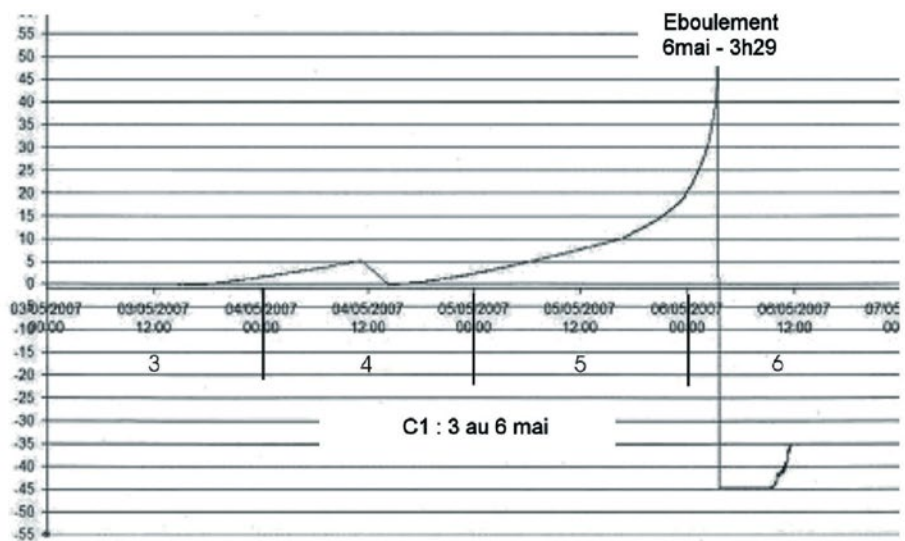
Figure 16

Dispositif de surveillance des falaises rocheuses sur la RN1, route du littoral entre Saint-Denis et le port de la Possession, à la Réunion. Ce dispositif, mis en place par la société MYOTIS, comprenait trois extensomètres notés C1, C2 et C3. Le 26/04/07, la partie sommitale de l'écaille, d'un volume estimé à 300 m<sup>3</sup>, s'est effondrée entraînant dans sa chute les extensomètres C1 et C2 qui ont été remis en place le 3 mai 2007. Les vitesses enregistrées par l'extensomètre C1 ont dépassé le seuil prédéfini de 5 mm/j deux jours avant la rupture qui s'est produite le 6 mai à 3h29. Cela n'a entraîné aucun dégât puisque le basculement du trafic côté mer avait été recommandé et mis en œuvre sur la base de ces mesures.



16.a Dispositif de surveillance

Crédit photo : Cerema/DTerCE



16.b Données mesurées par l'extensomètre C1

Source : Cerema/DTerCE

# Chapitre 3. Déploiement des dispositifs de mesure et surveillance du site

## 3.1 Principe

Le dispositif de mesure comprend en général des capteurs, un système d'acquisition, un système de transmission des données par câbles ou par un réseau sans fil et des unités auxiliaires d'alimentation. La définition d'une instrumentation passe par la définition des procédures relatives à l'installation des capteurs et autres éléments du système. Mais l'instrumentation d'un site instable ne se réduit pas à l'installation d'appareils sur le site. Elle nécessite, de la part du maître d'ouvrage, la mise en place des moyens nécessaires pour assurer le bon fonctionnement et la pérennité du système (entretien dans le cadre d'une maintenance régulière, personnel de permanence voire d'astreinte, *etc.*).

De façon générale, un programme de surveillance adapté doit permettre de disposer à la fois des grandeurs immédiatement représentatives du mouvement et des grandeurs dont l'influence sur le phénomène est connue ou suspectée de façon qualitative ou par le biais d'un modèle empirique (chapitre 4). Idéalement, la surveillance doit s'étaler sur une durée suffisamment longue pour permettre de déceler l'influence des conditions environnementales sur le comportement du site : de nombreux sites instables ont en effet un comportement saisonnier qui dépend des conditions météorologiques locales (température et précipitations).

Enfin, lorsqu'on surveille une pente ou une falaise instable qui a fait l'objet de travaux de stabilisation, les paramètres de contrôle de l'efficacité de l'ouvrage de confortement doivent également être mesurés au regard des prévisions et des hypothèses émises.

## 3.2 Implantation des dispositifs de mesure

### 3.2.1 Implantation des capteurs

Le choix de l'implantation des capteurs est une étape essentielle qui conditionne la réussite de la surveillance. Ce choix s'appuie sur une bonne compréhension du phénomène, de sa cinématique et de son évolution future. Celle-ci peut être obtenue grâce au modèle géologique et géotechnique du site, à dire d'expert nourri par des expériences passées (comparaison avec d'autres sites présentant des caractéristiques similaires), à partir de modèles prédictifs ou explicatifs (chapitre 4) ou sur la base de modélisations plus complexes du comportement du site en fonction des données disponibles (chapitre 4). Mais le choix de l'implantation des capteurs doit également prendre en compte certaines contraintes et en premier lieu les conditions de site.

**L'environnement du site** comprend différents facteurs comme le climat (présence de brouillard ou de givre), les interactions avec d'autres systèmes de transmission (pylônes EDF), les animaux qui peuvent détériorer le matériel, la végétation, le vandalisme, *etc.* L'évaluation de ces facteurs permet de définir les caractéristiques minimales que doit posséder l'instrumentation pour être opérationnelle.



**L'accessibilité du site** constitue également un paramètre essentiel à ne pas négliger pour le choix de l'implantation des capteurs. En fonction de l'accessibilité du site, du type de mesure, de la méthode d'acquisition et de transfert des données, on met en place ou non des capteurs sur ou à proximité du site instable. Dans le cas d'un site difficilement accessible, il convient de s'orienter vers des mesures à distance lorsque la grandeur à mesurer le permet. La mesure des déplacements d'un massif par exemple peut s'effectuer à distance sans même qu'il ne soit nécessaire de disposer des capteurs sur le terrain. On utilise pour cela l'imagerie de face, le scanner laser ou le RADAR ULB. En revanche, pour le suivi des pressions interstitielles, il n'est pas possible à l'heure actuelle d'effectuer des mesures sans mettre en place des capteurs sur le terrain. Les cellules de pression interstitielle peuvent néanmoins transmettre à distance les données qu'elles mesurent. Il en est de même pour le suivi des niveaux d'eau dans les tubes piézométriques, la mesure de l'ouverture de fissures par extensomètres ou le suivi des déformations en forage par inclinomètres.

Le schéma d'implantation des capteurs est fonction du nombre de points de mesure. Ce dernier dépend principalement du type de phénomène surveillé, de son hétérogénéité et de son étendue. La règle générale est d'implanter des capteurs :

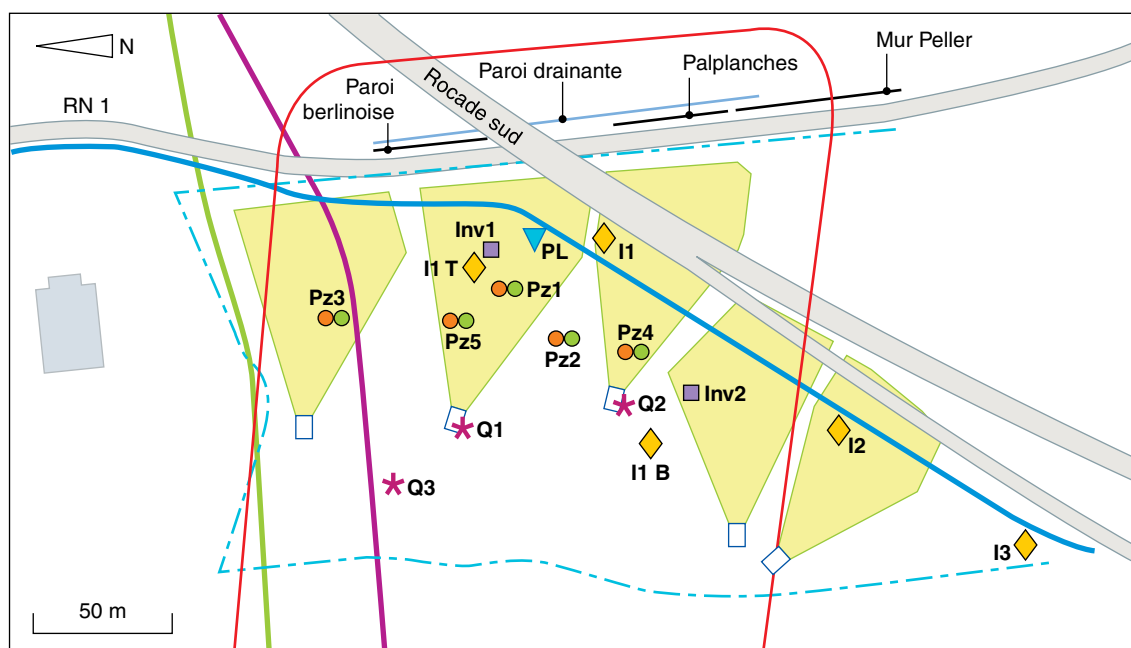
- dans la partie la plus active du phénomène, l'objectif étant de prévenir la rupture. Les capteurs sont placés au niveau de la surface de rupture (dans le cas d'un glissement de terrain : inclinomètre en forage) ou au niveau des discontinuités actives (dans le cas d'un massif rocheux : extensomètre). On effectue également des mesures en un ou plusieurs points de la surface ou en profondeur car le phénomène peut évoluer dans le temps et l'espace : une surface de rupture dans un glissement peut par exemple devenir inactive au profit d'une autre ;
- en périphérie (capteurs dits témoins), afin de surveiller une extension possible des mouvements (extension latérale ou régressive du phénomène venant déstabiliser progressivement des zones initialement stables) ou pour servir de calage sur des points fixes et permettre si besoin de corriger une éventuelle dérive des capteurs (influence thermique, usure de l'appareil, etc.) ;
- en amont, au point de départ du phénomène, dans le cas de mouvements avec une distance de propagation importante. C'est le cas notamment pour les coulées boueuses ;
- au niveau de l'ouvrage menacé, l'objectif étant la détection et l'alerte à des fins de sécurité immédiate. Lorsqu'on ne peut aisément accéder au cœur du phénomène (linéaire important de falaises générant des chutes de blocs très localisées), ou si l'on veut doubler une mesure effectuée dans le corps du glissement, on peut opter pour une solution de suivi de déformation ou de détection juste à l'amont de l'ouvrage voire sur l'ouvrage. La mesure directe sur ouvrage présente l'avantage d'offrir en général une plus grande fiabilité mais les délais d'alarme sont alors très réduits.

Lorsqu'on mesure simultanément plusieurs paramètres en vue de rechercher des corrélations entre eux, il est judicieux de placer les capteurs correspondants à proximité immédiate les uns des autres afin de s'assurer que les conditions de site sont identiques pour tous les capteurs (mesure de la pression interstitielle et du déplacement au niveau de la surface de rupture lorsque la pression interstitielle locale contrôle les mouvements).

On présente à titre d'illustration sur la figure 17 le schéma d'implantation des capteurs adopté sur le site du Petit Caporal à Boulogne-sur-Mer.

Figure 17

Schéma d'implantation des capteurs sur le site du Petit Caporal à Boulogne-sur-Mer. Les enjeux sur ce site sont les suivants : voies de circulation, canalisations d'eau et de gaz, habitations. La plupart des capteurs sont implantés dans l'emprise du glissement de terrain. L'inclinomètre I3, situé en périphérie du glissement de terrain, peut servir de référence et permettre d'évaluer une possible extension des phénomènes. Une redondance des dispositifs de mesure (ici les piézomètres et les inclinomètres) est mise en place pour palier les limites de chaque dispositif (voir partie 2 sur les dispositifs de mesure). Le lecteur trouvera plus d'informations sur ce cas en partie 3.



● Piézo-électrique (Pz)	— Eau potable Ø 700
● Piézo ouvert (Pz)	— Assainissement Ø 800
■ Pendule inverse (Inv)	— Gaz Ø 400
◆ Inclinomètre (I)	■ Zone équipée de drains subhorizontaux
★ Débitmètre (Q)	— Glissement
▼ Pluviomètre (PL)	- - - Limite du drainage agricole

Source : Cerema/DTerNP

### 3.2.2 Implantation des autres éléments du système

L'implantation des éléments du système dépend de la configuration du site, du type de surveillance choisi et de la localisation du gestionnaire. Le système d'acquisition et de transfert des données peut être situé au voisinage des capteurs dans la zone instable si le mouvement ne présente pas de risque de forte accélération.

Certaines fonctions du système peuvent être remplies en différents points d'implantation physique de celui-ci, comme le montrent les exemples ci-dessous :

- certains capteurs possèdent la capacité de signaler un dysfonctionnement et de transmettre d'eux-mêmes une mesure ou une détection ;

- le système d'acquisition sur site peut assurer des fonctions plus ou moins complexes : depuis une simple acquisition avec validation sommaire et stockage-tampon jusqu'à l'exécution de traitements élaborés et l'envoi de signaux d'alerte ;
- en période de crise, il peut être judicieux que le traitement et l'interprétation des données se fassent en temps réel sur le site, un spécialiste et un responsable de l'alarme étant sur place.

### 3.3 Définition des paramètres d'acquisition

La fréquence d'acquisition des mesures doit être déterminée en fonction de la vitesse d'évolution présumée de la grandeur mesurée. Elle dépend du délai d'acquisition qui peut être défini comme le temps nécessaire à l'aboutissement de l'ensemble de la procédure permettant l'acquisition et l'enregistrement d'une série de mesures sur site. Ce paramètre varie en fonction de la nature des données, de la complexité du dispositif mis en œuvre et de son degré d'intégration.

La fréquence d'acquisition des mesures peut ensuite être ajustée pour tenir compte du délai nécessaire à l'exécution des mesures prévues en cas d'alerte d'une part, et pour tenir compte de la cinématique reconnue ou supposée du phénomène d'autre part. Si la rupture est soudaine et si les délais d'évacuation sont importants, la surveillance est par définition inefficace mais elle n'est pas forcément sans intérêt : elle peut permettre par exemple de prévenir les secours ou d'empêcher des accidents en chaîne. Si la grandeur évolue rapidement et qu'une alarme est susceptible d'être activée sur la base de l'analyse de cette évolution, alors une acquisition rapide est nécessaire. Dans le cas contraire, on peut se satisfaire d'une fréquence d'acquisition lente, voire d'un simple relevé manuel des mesures à intervalle de temps régulier. Mais dans tous les cas, il est nécessaire de réviser régulièrement la fréquence d'acquisition afin qu'elle traduise au mieux l'évolution du site.

Dans un premier temps, on peut effectuer des **mesures manuelles** qui nécessitent une intervention de techniciens sur le site, à une fréquence déterminée. En fonction des vitesses mesurées, on peut augmenter la fréquence de mesure avec un rapatriement automatique des données : on parle dans ce cas de **relevés à distance** ou **télémesures**. Puis, dans un second temps, on peut faire du **suivi en temps réel** avec un contrôle journalier des courbes de déplacement et la définition de seuils associés au déclenchement d'alertes et d'alarmes pour des dépassements de vitesse jugés suffisants pour mener à la rupture. Une mauvaise accessibilité du site limite dans la pratique la fréquence d'acquisition des mesures d'un système manuel. On utilise en général des fréquences comprises entre plusieurs mesures par minute (cas nécessairement automatisé) et quelques mesures par an. Cette fréquence d'acquisition n'est pas nécessairement fixe dans le temps. Il est intéressant de la moduler en fonction de l'évolution de la cinématique du phénomène ou en fonction de la saison. Par ailleurs, la fréquence d'acquisition des mesures n'est pas nécessairement égale à la fréquence de stockage des données dans un système automatisé, toutes les mesures n'étant en général pas stockées.

En fonction des caractéristiques du site, des mécanismes en jeu, de leur évolution prévisible et des objectifs de sécurité, la fréquence et le mode d'acquisition peuvent varier :

#### - **Mode périodique**

La fréquence de mesure peut être mensuelle à pluriannuelle, le plus souvent déterminée en fonction des facteurs climatiques (cycle saisonnier, fonte des neiges, alternance saison sèche et saison humide). Le mode périodique est applicable aux phénomènes évoluant lentement ou à un stade d'évolution précoce.

#### - **Mode permanent discontinu**

L'ensemble des moyens de surveillance est toujours opérationnel, actif ou en état de veille. Les données sont recueillies de manière discontinue avec une périodicité variable. Pour une périodicité inférieure à la journée (périodicité horaire et moins), on parle de mode permanent discontinu fréquent.

#### - **Mode continu**

Les données sont recueillies de manière continue mais leur transmission et leur gestion au sein du système de suivi sont généralement assurées selon un mode discontinu fréquent.

### **3.4 Exigences de l'instrumentation**

Les systèmes d'instrumentation sont soumis à des conditions spécifiques qui doivent être prises en compte dans la conception de l'instrumentation et l'évaluation des données de suivi. Ces conditions incluent :

- l'interaction mécanique, hydro mécanique ou thermo mécanique entre les composants du dispositif de mesure et le milieu environnant ;
- les conditions environnementales qui sont souvent difficiles à apprécier (les eaux souterraines, les perturbations électromagnétiques, les alternances de chaleur et de froid ou de gel et de dégel) et peuvent affecter les composants embarqués ;
- la vulnérabilité de la communication des données du système dans le cas de mesures à longue distance.

Lors de la conception de l'instrumentation, les exigences ci-dessous doivent être respectées.

#### **3.4.1 Robustesse**

Les composants d'un système de surveillance doivent être suffisamment robustes pour affronter les conditions environnementales du site. Cette exigence concerne le matériel utilisé (la qualité du câble de mesure, la résistance à la corrosion des capteurs, *etc.*), la sécurité des systèmes de surveillance face aux éléments naturels (contre un risque de surtension, adopter des mesures de protection contre la foudre), aux conditions météorologiques (notamment au gel-dégel) et aux actions anthropiques (perturbation due à des travaux de construction, vandalisme).

Dans la communication des données, les grandes longueurs de câbles peuvent poser problème du fait de possibles pertes de signal. La transmission du signal sans fil permet de palier cette limite. Toutefois, la couverture incomplète de la zone surveillée ou une topographie accidentée peuvent empêcher sa mise en œuvre.

### 3.4.2 Fiabilité des mesures

Pour permettre une interprétation pertinente des mesures des capteurs, il est essentiel d'évaluer et de tenir compte de tous les facteurs susceptibles d'affecter la grandeur physique mesurée et d'influencer la qualité du signal des capteurs. Les facteurs classiques sont les changements de température et de pression atmosphérique. On doit choisir des capteurs appropriés qui limitent ces effets : capteurs de déplacement à compensation de température ; piézomètres compensés en pression ; extensomètres à tiges avec un matériau de faible coefficient de dilatation thermique, *etc.*

### 3.4.3 Redondance

Une redondance dans les données mesurées, même si elle a un coût supplémentaire, doit être mise en œuvre. Elle permet :

- d'assurer le bon fonctionnement du système en cas de dysfonctionnement d'un de ses composants. Pour ce faire, on installe plus de capteurs que le nombre théoriquement nécessaire (duplication des capteurs de même principe de mesure) ;
- de compenser des insuffisances inhérentes à certaines techniques. Pour ce faire, on met en place des capteurs de principes de mesure différents en des points voisins (principe de « diversification »). Les mesures de distance par géodésie infrarouge par exemple deviennent inopérantes par forte pluie ou par brouillard. Les visées optiques ne peuvent être pratiquées de nuit. Pour palier ces limites, le tachéomètre mis en place sur le site de Séchilienne (Isère) a été doublé par le RADAR ULB qui permet de mesurer les déplacements par tout temps ;
- de valider périodiquement les mesures de capteurs électriques par des appareils manuels afin de disposer d'un minimum d'informations en cas de défaillance électrique. On peut, par exemple, doubler des extensomètres à fil tendu automatiques par des extensomètres à bases manuelles pour mesurer des ouvertures de fissures. On peut effectuer des relevés réguliers du niveau des nappes au moyen de détecteurs de niveau d'eau manuels en plus des mesures par piézomètres automatiques. On peut enfin doubler une sonde de mesure de pression interstitielle électrique par une sonde pneumatique ;
- de s'affranchir des problèmes de fiabilité des appareils de mesure et de détecter d'éventuelles mesures erronées. Cela permet d'éviter le déclenchement intempestif à distance d'alarmes à partir, par exemple, d'un dépassement de seuil d'un capteur unique qui peut être non représentatif de la réalité du phénomène. Pour ce faire, on peut effectuer des mesures avec une fréquence d'acquisition bien supérieure à ce qui serait nécessaire compte tenu de la cinématique du phénomène. On peut aussi disposer sur le site plusieurs capteurs de principes de mesure identiques ou différents et comparer les mesures. Cependant, il se peut, lorsqu'on dispose deux capteurs identiques sur un site en des points voisins (par exemple, deux nivomètres, comme cela a été fait sur le site de La Clapière, dans les Alpes-Maritimes), que ces derniers ne donnent pas la même mesure, alors qu'à l'échelle du site, le paramètre suivi ne devrait pas varier. Dans ce cas, il est nécessaire de vérifier la pertinence de l'implantation des capteurs sur le site.

### 3.4.4 Stabilité des signaux des capteurs

Comme un ré-étalonnage des capteurs intégrés de façon permanente dans un dispositif de surveillance n'est guère possible, une attention particulière doit être accordée à la stabilité des signaux de mesure des capteurs électriques. Il convient de s'assurer que le signal est suffisamment stable sur toute la période de surveillance.

### 3.4.5 Contrôle de l'erreur de zéro (offset) et de l'étalonnage

Pendant la période de surveillance, le fonctionnement satisfaisant du système de surveillance doit être assuré. Ceci, en particulier, s'applique à la commande du signal de sortie à zéro. S'ils sont accessibles, les capteurs et les composants du système d'acquisition doivent être re-calibrés à intervalles de temps réguliers. L'intervalle entre deux réétalonnages doit être en conformité avec les recommandations du fabricant, mais en aucun cas il ne doit être supérieur à deux ans. D'autres re-calibrages peuvent devenir nécessaires dans les applications de mesures spécifiques. Les opérations de contrôle et de ré-étalonnage doivent être prouvées et documentées.

## 3.5 Fonctions de la surveillance

Indépendamment de la localisation physique et de la hiérarchie relative entre les différents composants d'un système de surveillance, ce dernier remplit généralement les fonctions ci-dessous. Celles-ci doivent être assurées dans un temps assez court pour permettre une surveillance opérationnelle du site instable.

### 3.5.1 Acquisition et mise en forme

Cette fonction consiste à interroger et « lire » un capteur (on utilise aussi le terme « scrutation »), à numériser et à convertir en grandeur physique la mesure, autrement dit, à rendre la donnée exploitable.

En fonction des exigences de la surveillance et des conditions de site, la collecte des données peut être manuelle ou automatisée.

- **Collecte manuelle des données** : lorsque les délais et l'accessibilité du site l'autorisent, une surveillance manuelle peut être suffisante. Cependant, il faut prendre en compte les délais d'exploitation des mesures (dépouillement, interprétation, analyse) qui sont généralement longs et le critère économique (frais de personnels importants pendant généralement une longue période). La surveillance manuelle peut être adaptée à des cas de surveillance pendant un temps limité (ouvrage provisoire). Enfin, il faut veiller à l'enregistrement correct des mesures, ce dernier pouvant parfois être effectué par du personnel local non spécialiste. Il est recommandé de préparer un bordereau à remplir lors du relevé des mesures.
- **Collecte automatisée des données** : ce choix est en général justifié par des considérations d'accessibilité du site, par l'importance de l'enjeu et surtout par la nécessité d'un temps de réponse bref entre la mesure et l'action appropriée (cas de la surveillance en continu qui implique des fréquences de mesure horaires, voire plus importantes). L'avantage de l'automatisation du système de surveillance est de permettre la détection et le déclenchement d'alertes sans intervention humaine immédiate, et donc très rapidement. Mais il ne faut pas pour autant négliger les inspections visuelles du site.

### **3.5.2 Validation**

Cette fonction consiste à s'assurer de la validité de la mesure par comparaison avec la plage de mesure du capteur, les mesures antérieures, les valeurs données par d'autres capteurs (cas par exemple d'un capteur manuel doublé par un capteur électrique ou entre plusieurs capteurs du même site), par vérification du bon fonctionnement des capteurs, par comparaison de l'écart-type de plusieurs mesures rapprochées avec une valeur de référence. Certaines validations peuvent être automatisées mais l'intervention du spécialiste est toujours nécessaire pour valider définitivement une mesure, avec notamment la vérification du bon fonctionnement du capteur (contrôle de la dérive dans le temps, utilisation d'un capteur témoin).

### **3.5.3 Tests après chaque acquisition et combinaison de mesures**

Cette fonction consiste à calculer des moyennes temporelles ou spatiales pour obtenir une ou des grandeurs jugées représentatives de l'évolution du phénomène. On évalue s'il y a dépassement de seuils prédéfinis fixés en valeur absolue (déplacement cumulé, vitesse) ou fonctions des mesures précédentes (comparaison avec une valeur prédite par extrapolation, cf. chapitre 4).

### **3.5.4 Stockage et archivage**

Le stockage des mesures permet par la suite l'interprétation du phénomène, mais on ne stocke pas forcément toutes les mesures, notamment lorsque le système est automatique. On peut mettre en place un stockage temporaire sur le site qui est vidé périodiquement par télétransmission ou lorsqu'un agent se déplace physiquement sur le site. À noter que les mesures en continu (automatisées) fournissent une masse énorme de données et peuvent poser des problèmes d'encombrement de mémoire. Une solution parfois adoptée consiste à ne stocker une nouvelle mesure que si elle est significativement différente de la précédente. L'archivage des données brutes et des produits générés doit garantir la pérennité et l'accessibilité des informations sur une durée au moins égale à celle du projet. Les supports de stockage envisagés (par exemple, base de données) doivent satisfaire à cette exigence.

### **3.5.5 Transmission des mesures**

Le mode de transmission des données doit prendre en compte le fait que la liaison entre les capteurs et la centrale d'acquisition d'une part ou entre cette dernière et l'exploitant du système d'autre part peut être rompue lors de l'instabilité. Il faut donc chercher à protéger les moyens de transmission sans toutefois éloigner les instruments de mesure de la zone de mesure la plus pertinente vis à vis des mouvements. On peut être amené à choisir la télétransmission.

### **3.5.6 Génération d'alertes et d'alarmes**

Lorsqu'un phénomène annonciateur d'une rupture probable est détecté, cette fonction est activée pour déclencher une série d'actions visant à protéger les biens et les personnes présents sur le site.

### 3.5.7 Dépouillement de routine

Cette fonction consiste à éditer des tableaux et des graphiques, définir des corrélations, comparer les nouvelles données avec un modèle de prévision simple, calculer un indice représentatif du phénomène, (chapitre 4) *etc.* Il s'agit d'une phase de production qui correspond à la génération des informations et des produits élaborés à partir des données brutes. Elle suppose au préalable l'identification des différents types d'informations et de produits à fournir aux utilisateurs. La nature des produits est précisée en distinguant, d'une part, les produits délivrés en temps réel de ceux élaborés en temps différé et, d'autre part, les informations systématiques de celles produites à la demande.

### 3.5.8 Diffusion

Cette fonction correspond à la mise à disposition des utilisateurs des données produites par la surveillance. Elle requiert :

- l'identification du ou des supports utilisés pour la distribution des données ;
- la définition du type d'information à transmettre et l'identification des utilisateurs. La pluralité des acteurs impliqués dans la gestion des risques conduit à différencier et à adapter la nature et le format des informations diffusables en fonction de leurs besoins et des niveaux de connaissances techniques respectifs. En parallèle, les types d'informations susceptibles d'être fournies en retour par les utilisateurs ainsi que leurs éventuels modes de diffusion (nature et phasage des mesures de sécurité, délais de mise en œuvre des dispositions du plan de secours et délais de préavis) doivent être déterminés ;
- la prise en compte du temps de réponse, c'est-à-dire le délai séparant la fin d'une phase d'acquisition de la fourniture des informations traitées aux différents utilisateurs. Ce paramètre inclut les temps de traitement, de contrôle qualité, de formatage et de transmission des données. Il varie en fonction de la complexité du dispositif, de l'intégration du système, de la « qualité » des modèles interprétatifs mais aussi de la nature des aléas et des enjeux. La disponibilité du (ou des) spécialiste(s) chargé(s) de la validation des données et de leur interprétation est à prendre en compte dans l'évaluation des délais propres aux situations de veille et de crise qui peuvent nécessiter l'instauration d'astreintes ou de permanences pour les personnes chargées de suivre l'évolution du site instable. Les données diffusées peuvent être utilisées par les spécialistes en charge du suivi du site pour activer un plan de secours ou plus simplement pour évacuer des équipes travaillant sur le site ou à proximité.

Il faut aussi définir les modalités de contrôle du système : réglage des seuils, de la fréquence d'acquisition, de la fréquence de stockage, des tâches automatisées. Il est nécessaire de définir qui a accès à ce contrôle. De même, il faut définir la façon dont on s'assure du bon fonctionnement du système.

En général, l'automatisation porte sur le ou les points suivants :

- acquisition-stockage ;
- transmission ;
- évaluation préliminaire des données ;
- génération d'alertes et d'alarmes.



Le format des données, leur acquisition, leur transmission et leur traitement constituent un ensemble indissociable influencé par de nombreux paramètres. Ces quatre aspects de la surveillance des pentes et falaises instables présentent de forts degrés d'interdépendance, les choix effectués pour l'un de ces aspects ayant souvent des répercussions sur les autres. Le format des données dépend essentiellement du volume d'informations à transmettre. Il est donc lié au nombre de paramètres mesurés et à leur fréquence d'acquisition. Le transfert de ces données ne pose toutefois plus en général de problème de nos jours.

### **3.6 Instrumentation d'urgence**

Dans certaines situations d'urgence, le choix des composants du système de surveillance et de leur implantation peut être guidé par des considérations pratiques, comme la disponibilité du matériel, afin de fournir des éléments d'information permettant de gérer la crise dans les plus brefs délais.

# Chapitre 4. Analyse des données

## 4.1 Principe

L'exploitation des données issues de la surveillance doit permettre d'expliquer, de modéliser et de prévoir l'évolution future du site instable en fonction des variables qui influencent les mouvements, l'objectif étant à terme de fournir les éléments permettant de déclencher une alerte puis une alarme si des seuils fixés par ailleurs ont été franchis. La définition des seuils n'est toutefois pas associée à la surveillance à proprement parler car ceux-ci ne relèvent pas uniquement des acteurs réalisant la surveillance du site. Les valeurs des différents seuils sont fixées dans le cadre de l'élaboration d'une stratégie de surveillance.

La fiabilité de la surveillance est donc étroitement liée à sa capacité à prévoir la rupture. Cette prévision reste délicate. Dans certains cas, l'accélération des mouvements peut laisser penser qu'une rupture brutale est proche et celle-ci ne se produit finalement pas, les mouvements ralentissant les années suivantes (cas du glissement de La Clapière dans les Alpes-Maritimes). Dans d'autres cas, une prévision correcte de la rupture est confirmée par les événements (cas de l'éboulement de La Perrière en Savoie).

La surveillance d'un site instable est en général associée aux tâches suivantes :

- l'interprétation des données recueillies ;
- l'élaboration de modèles explicatifs ou prédictifs ;
- l'ajustement des paramètres de contrôle du système de surveillance ;
- le traitement des alertes techniques et opérationnelles ainsi que des alarmes.

Ces tâches ne sont pas déterminées préalablement à l'étude du site instable : elles traduisent bien souvent une accumulation progressive de données qui permet une compréhension plus fine des phénomènes.

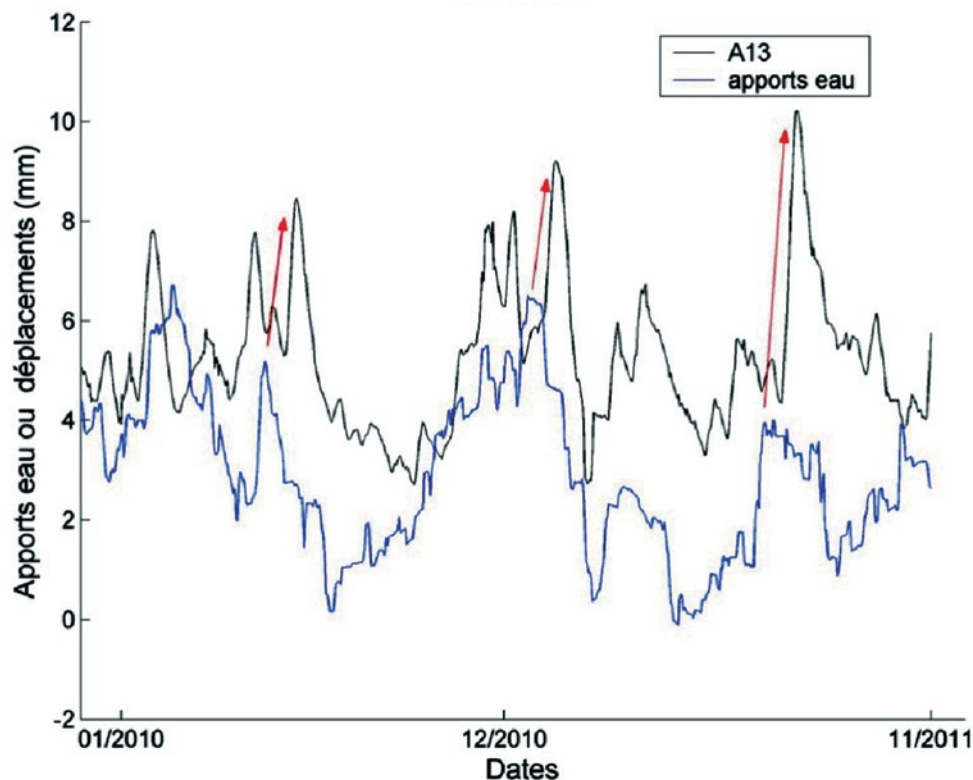
Dans ce chapitre, chacune des tâches ci-dessus est décrite et quelques outils liés à leur mise en œuvre sont présentés.

## 4.2 Interprétation des données

L'analyse des mesures débute en général par la représentation graphique des données collectées. Le spécialiste s'intéresse en particulier à l'évolution, au cours du temps, des paramètres mesurés (déplacements, pluies instantanées et pressions interstitielles), de leurs dérivées (vitesses, accélérations), des variables cumulées, ou de tout autre paramètre significatif de l'évolution des différents facteurs suivis. Par la superposition sur un même graphique de l'évolution de deux paramètres, il cherche à repérer graphiquement des corrélations entre ces paramètres : un changement dans ces corrélations peut permettre de déceler des modifications significatives du régime cinématique du site. On présente à titre d'illustration (figure 18) les relations entre les apports d'eau et les déplacements mesurés sur le site de Séchillienne (Isère) : cette figure montre une accélération systématique des déplacements après une période de pluies intenses.

Figure 18

Étude de la sensibilité du versant de Séchilienne (Isère) aux apports hydriques (Chanut, 2012). La courbe bleue donne les apports d'eau enregistrés à la station météorologique située en haut du Mont-Sec. Les déplacements journaliers mesurés au niveau de l'extensomètre A13 situé en limite de la zone active de l'instabilité (courbe noire) présentent une accélération systématique après les périodes d'intenses précipitations (flèches rouges). Le lecteur trouvera plus d'informations sur ce cas en partie 3.

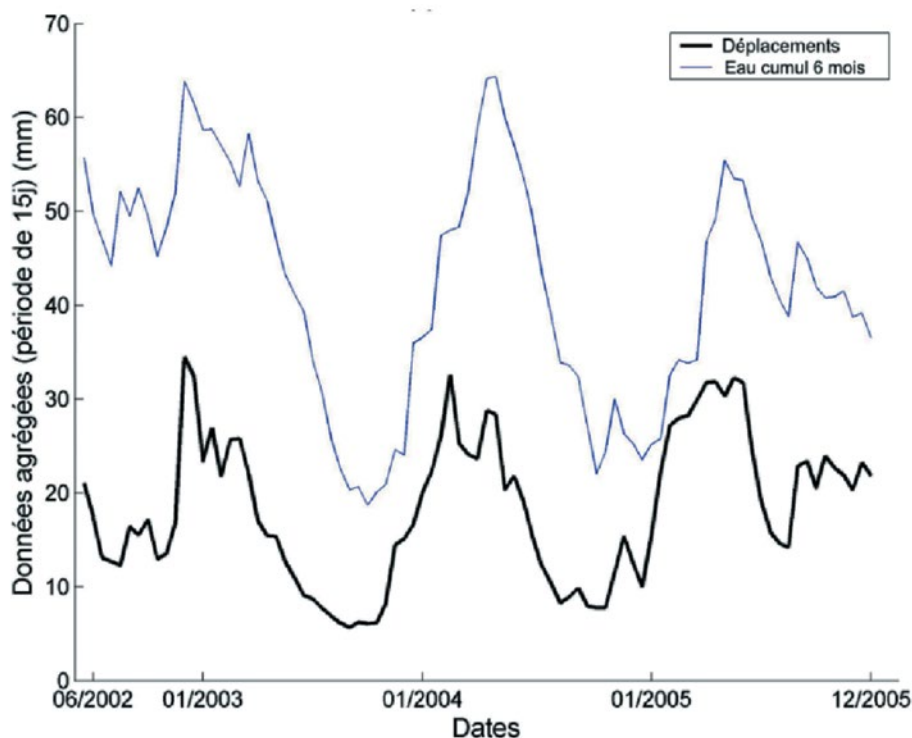


Source : Chanut, 2012

Une analyse plus approfondie des données mesurées sur ce site montre que les déplacements dépendent non seulement de la pluviométrie journalière mais aussi de l'historique des précipitations : ainsi, la figure 19 montre qu'une corrélation nette apparaît entre les déplacements mesurés et agrégés sur 15 jours et les apports d'eau cumulés sur six mois et pondérés de sorte que les apports d'eau récents aient plus de poids que les apports d'eau plus anciens. La superposition sur un même graphique de deux types de données avec un décalage temporel peut donc permettre de détecter des liens entre des phénomènes dont les évolutions sont déphasées. Ce déphasage peut s'expliquer par le fait que le massif est très déstructuré.

Figure 19

Étude de la sensibilité du versant de Séchilienne (Isère) aux apports hydriques (Chanut, 2012). Mise en évidence d'une corrélation nette entre les déplacements mesurés au niveau de l'extensomètre A13 et agrégés sur 15 jours (courbe noire) et les apports d'eau pondérés et cumulés sur une période de six mois (courbe bleue). Le lecteur trouvera plus d'informations sur ce cas en partie 3.



Source : Chanut, 2012

Cette phase d'analyse, bien que rudimentaire, n'est donc pas à négliger car elle permet d'apporter une quantité significative d'informations sur le comportement du site instable.

### 4.3 Élaboration de modèles explicatifs ou prédictifs

L'élaboration de modèles explicatifs ou prédictifs par un ou plusieurs spécialiste(s) est une tâche très complexe du fait du nombre important de paramètres à intégrer et de l'hétérogénéité des terrains. Comme les mouvements de terrains sont liés, dans un grand nombre de cas, aux variations du niveau piézométrique, elles-mêmes conditionnées par les événements pluvieux dont la prévision est complexe, il est difficile de créer des modèles prédictifs fiables. Le plus souvent, il faut se satisfaire de modèles explicatifs qui ont une capacité prédictive limitée. Ces modèles sont calés sur les données recueillies lors de la surveillance du site. S'ils sont correctement calés et que l'évolution du site se poursuit suivant les mêmes conditions, alors il n'y a pas de raison évidente pour que les valeurs prévues par les modèles diffèrent significativement des données mesurées. C'est ainsi que l'on peut détecter de manière assez précise des changements de comportement du site.

Il existe une grande variété de modèles explicatifs ou prédictifs. Quelques-uns de ces modèles sont brièvement présentés ci-dessous.

### 4.3.1 Modèles d'extrapolation

Les modèles d'extrapolation visent à prévoir l'évolution d'une quantité mesurée à partir des points de mesure recueillis précédemment. En extrapolant ces mesures, on cherche à prédire la date de la rupture, autrement dit l'instant où les vitesses ou les déplacements tendent vers l'infini. Il peut aussi être instructif d'analyser la moyenne des grandeurs mesurées sur une période de temps donnée si le signal est trop perturbé pour être analysé tel quel.

À titre d'illustration, on présente ci-dessous les modèles d'extrapolation utilisés comme des outils d'aide à la décision lors de la gestion de crise associée à l'éboulement rocheux survenu à La Perrière (Savoie, 73) le 24 mars 1999.

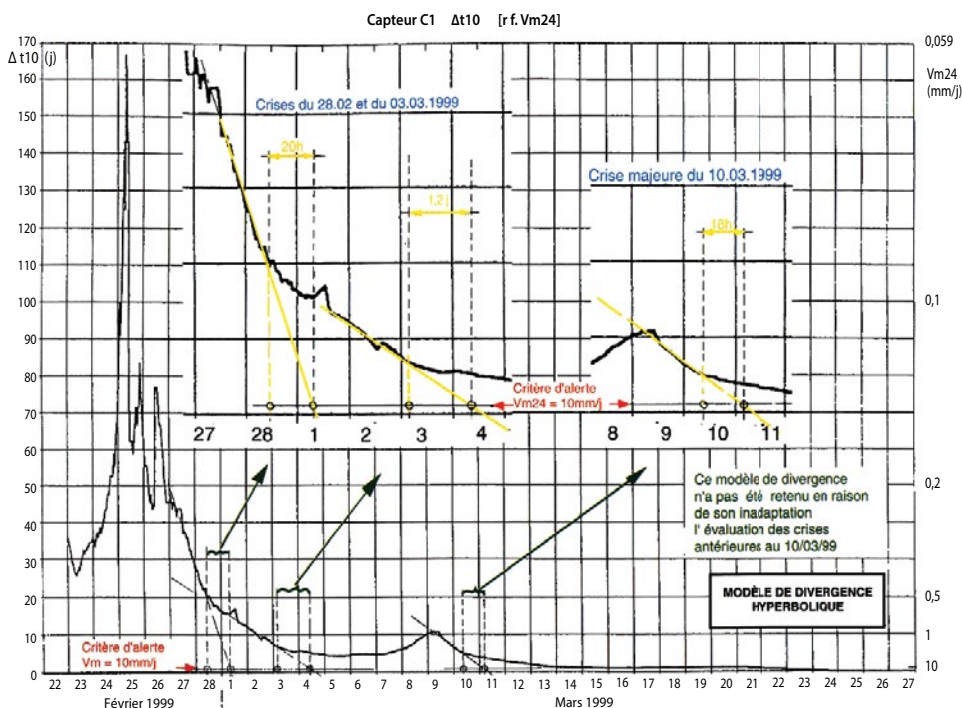
Sur ce site suivi depuis plus de 25 ans, la surveillance a consisté en l'analyse de la variable :

$$\Delta t_{10} = \frac{10}{V_{m24}}, \text{ où :}$$

- $V_{m24}$ , exprimée en mm/j, désigne la vitesse moyenne des déplacements calculée sur une période glissante de 24 heures et réactualisée toutes les 15 minutes ;
- $\Delta t_{10}$ , exprimé en jours, correspond à l'intervalle de temps nécessaire pour enregistrer un déplacement de 10 mm en considérant une vitesse constante et égale à  $V_{m24}$ .

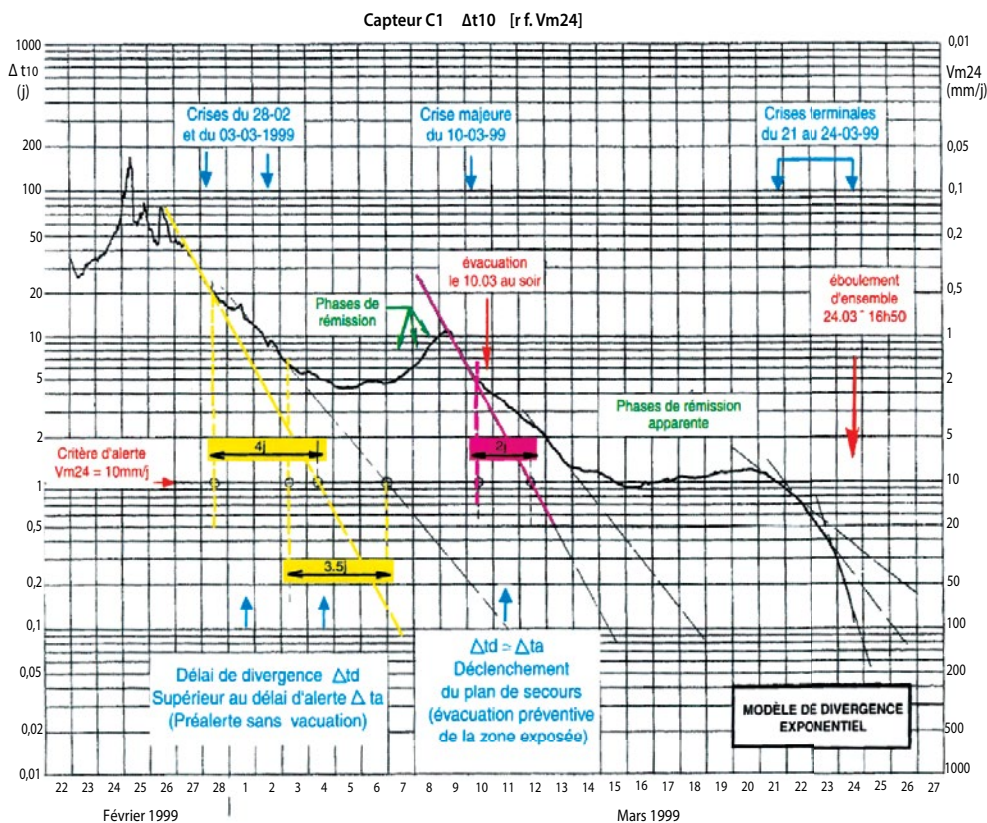
Deux modèles d'extrapolation, hyperbolique (selon une relation de la forme :  $\Delta t_{10} = f(t)$ ) et exponentiel (selon une relation de la forme :  $\log \Delta t_{10} = f(t)$ ), ont permis aux experts de formuler des pronostics quant au délai prévisible jusqu'à l'instant où  $V_{m24}$  atteindrait la valeur critique de 10 mm/j (soit  $\Delta t_{10} = 1$  j). Ce seuil de vitesse de 10 mm/j, fixé a priori compte tenu de la connaissance préalable du phénomène (contexte géologique, mécanisme de rupture et cinématique), était considéré comme le seuil au-delà duquel le site évoluerait irrémédiablement vers la rupture. La pertinence des deux modèles a été validée par leur application à des crises antérieures à la crise terminale de mars 1999. Des exemples de graphiques mettant en œuvre cette méthode sont présentés sur la figure 20.

Figure 20  
Modèles d'extrapolation, hyperbolique (20.a) et exponentiel (20.b), appliqués au cas de l'éboulement rocheux de la Perrière en Savoie (). Le lecteur trouvera plus d'informations sur ce cas en partie 3.



20.a Modèle hyperbolique

Source : Effendiantz et Rochet, 2000



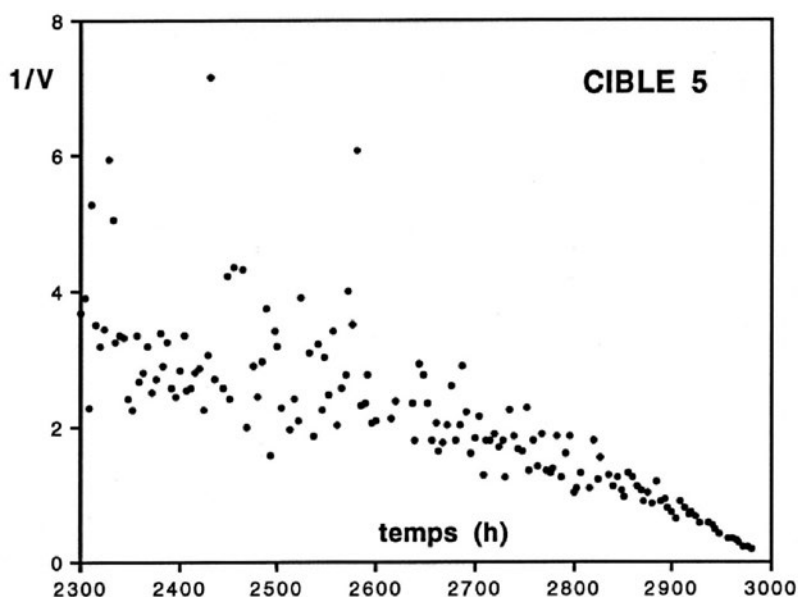
20.b Modèle exponentiel

Source : Effendiantz et Rochet, 2000

Un modèle d'extrapolation hyperbolique a également été appliqué au site de la Clapière dans les Alpes-Maritimes afin de prévoir a posteriori l'instant d'une rupture. La figure 21 donne l'inverse de la vitesse mesurée au niveau d'une cible équipée d'un trièdre et suivie par un distancemètre infrarouge automatique, avec plusieurs mesures par jour. Cette cible a été emportée par une rupture d'un volume de quelques milliers de mètres cubes. L'extrapolation de la courbe donnant l'inverse de la vitesse de cette cible sur les derniers jours avant la rupture s'est révélée a posteriori juste.

Figure 21

Évolution du paramètre  $1/V$  (où  $V$  représente la vitesse d'une cible équipée d'un trièdre et suivie par un distancemètre infrarouge) au cours du temps sur le site de la Clapière dans les Alpes Maritimes. L'extrapolation de la courbe a permis de prévoir a posteriori l'instant de la rupture.



Source : Cerema/DTerMéditerranée

### 4.3.2 Modèles de calage

L'objectif des modèles de calage est en général de définir une fonction décrivant le plus fidèlement possible l'évolution d'un paramètre mesuré en fonction d'un autre, typiquement l'évolution de la piézométrie en fonction de la pluviométrie ou l'évolution des déplacements en fonction de la piézométrie. Ces modèles peuvent être fondés sur une description plus ou moins physique des phénomènes ou au contraire être complètement empiriques. À partir de modèles calés sur des mesures passées, on compare les prédictions des modèles aux nouvelles mesures : toute divergence observée est le signe d'un changement de comportement du site qui peut être annonciateur d'une rupture.

Ce type de modèle a par exemple été appliqué au site du Nice Havrais à Sainte-Adresse (Seine-Maritime) pour lequel on a pu établir une relation non linéaire entre la déformation angulaire mesurée au jour  $n$  par un inclinomètre et la hauteur piézométrique mesurée au jour  $n-1$  (voir l'étude de ce cas présentée en partie 3).

Dans cette catégorie, on présente à titre d'illustrations les modèles ci-dessous.

### Modèle liant la charge hydraulique à la pluviométrie

$$H_{n+1} = (H_n - H_{\min})e^{-\beta} + H_{\min} + \gamma_1 P_n + \gamma_2 P_{5n} + \gamma_3 P_{10n} - \gamma_4 T_n$$

$H_n$  est la charge hydraulique au jour  $n$  ;

$H_{\min}$  est la charge hydraulique minimale de la nappe ;

$P_n$  est la hauteur de pluie du jour  $n$  ;

$P_{xn}$  est la hauteur de pluie des  $x$  derniers jours ;

$T_n$  est la température au jour  $n$  ;

$\gamma_i$  est un coefficient de calage ;

$\beta$  est un coefficient de calage quantifiant la vitesse de vidange de la nappe.

Une fois établie la corrélation entre la charge hydraulique et la pluviométrie, il peut être intéressant de rechercher un lien entre la charge hydraulique et le déplacement ou la vitesse.

### Modèles liant la vitesse à la charge hydraulique

$$V_{n+1} = V_n e^{-\beta} \frac{H_{n+1}}{H_n}$$

$$V_{n+1} = \beta e^{H_n/\gamma}$$

$V_n$  est la vitesse de déplacement au jour  $n$  ;

$H_n$  est la charge hydraulique au jour  $n$  ;

$\beta$  et  $\gamma$  sont des coefficients de calage.

### Modèle « réservoir »

Gervreau (1991) a développé un modèle « réservoir » qui relie l'hydrologie à la cinématique du site. Alfonsi (1997) a adapté ce modèle pour créer le modèle présenté ci-dessous qui s'apparente à un système constitué d'un réservoir d'accumulation d'eau dont la vidange suit une loi exponentielle et auquel on associe une relation linéaire simple entre la hauteur d'eau cumulée et la vitesse estimée du glissement. Ce modèle a été utilisé avec succès pour prévoir les vitesses de déplacement du site de la Clapière dans les Alpes Maritimes (figure 22) :

$$H_j = \alpha \cdot (P_{j-k} + N_{j-k}) + H_{j-\Delta t} e^{-\beta \Delta t}$$

$$V_j = V_{j-\Delta t} \cdot H_j / H_{j-\Delta t}$$

$\Delta t$  représente l'incrément en temps ;

$H_j$  and  $H_{j-\Delta t}$  sont les niveaux d'eau dans le réservoir pour les jours  $j$  et  $j-\Delta t$  ;



$V_j$  and  $V_{j-\Delta t}$  sont les vitesses de déplacement pour les jours  $j$  et  $j-\Delta t$  ;

$\alpha * (P_{j-k} + N_{j-k'})$  représentent les contributions des précipitations et de la neige des jours  $j-k$  et  $j-k'$  à l'augmentation du niveau d'eau dans le réservoir ;

$j-k$  simule le temps nécessaire pour que le front d'eau atteigne la nappe.

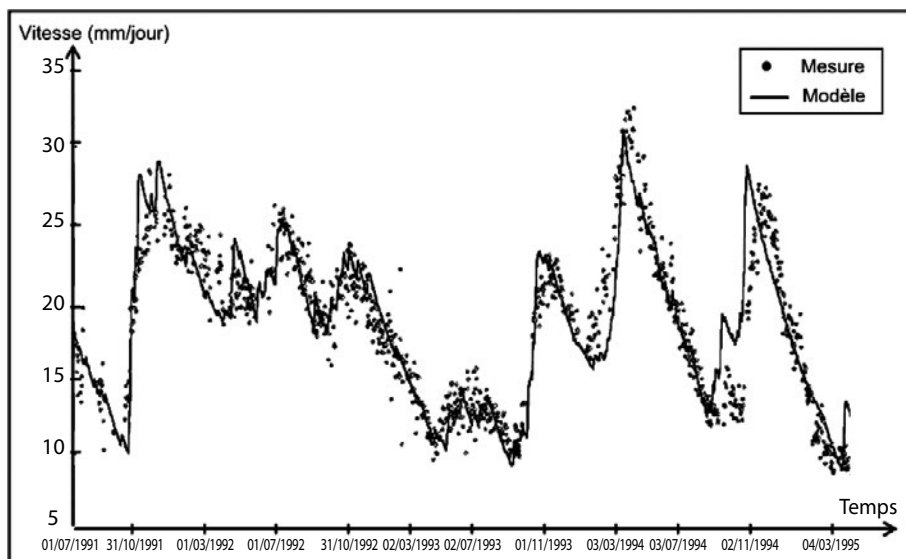
Dans ce modèle, on suppose qu'il y a simultanée entre l'élévation du niveau piézométrique et l'occurrence de mouvements.

$\alpha$  est le paramètre de recharge de la nappe. Il dépend de la porosité du sol ;

$e^{-\beta \Delta t}$  simule la diminution du niveau d'eau dans le réservoir suite à l'écoulement de l'eau dans le massif de sol, le facteur  $\beta$  caractérisant la perméabilité du sol.

Figure 22

Comparaison entre les vitesses mesurées (points) et les vitesses prédites par le modèle (trait continu) pour un repère situé en partie supérieure de l'instabilité de La Clapière dans les Alpes-Maritimes (Alfonsi, 1997).



Source : Alfonsi, 1997

### 4.3.3 Modèles avancés

On présente ci-dessous, à titre d'information, deux autres types d'approches qui peuvent être mises en œuvre pour analyser le comportement d'un site instable. À ce jour, ces méthodes ne sont pas utilisées pour la surveillance opérationnelle des sites instables car elles nécessitent beaucoup de données (et donc de longues fenêtres d'observation et de mesure) et des temps d'analyse des mesures peu compatibles avec la réactivité attendue d'un dispositif de surveillance opérationnelle.

#### Approche statistique

Si l'on parvient à établir une corrélation entre les déplacements et les précipitations et qu'en parallèle de cela, on peut, à partir d'études statistiques de données météorologiques, prédire les précipitations futures, on peut prédire les mouvements du site. Ce type d'approche, qui requiert une instrumentation et une durée d'observation importantes, est à l'heure actuelle au stade de la recherche. Elle est en particulier

limitée par les incertitudes relatives aux précipitations. Par ailleurs, elle ne permet pas de progresser dans la connaissance des mécanismes du mouvement de terrain car elle constitue une « boîte noire » où la physique des phénomènes n'est pas réellement prise en compte.

### **Approche mécanique**

L'approche mécanique est fondée sur l'analyse des conditions d'équilibre du site et leur mise en équation. Des calculs de stabilité permettent de définir un coefficient de sécurité pour des surfaces de rupture prédéfinies. Des calculs numériques par la méthode des éléments finis, mettant en œuvre notamment des lois de comportement complexes et des couplages hydro mécaniques élaborés peuvent aussi être réalisés mais ils restent rares car encore au stade de la recherche.

#### **4.3.4 Utilisation des différents types de modèles**

L'élaboration de modèles explicatifs ou prédictifs n'est pas une fin en soi. Elle doit répondre à un objectif précis qui est en général :

- la prévision des mouvements du site, avec éventuellement un objectif ultérieur de définition d'un système de confortement et la réalisation de travaux. Cela passe nécessairement par l'observation du site et l'élaboration de modèles dont les résultats sont confrontés aux mesures et adaptés si besoin ;
- le déclenchement d'alertes et d'alarmes, ce qui implique nécessairement la mise au point de modèles prédictifs relativement fiables, éprouvés sur d'autres sites et adaptés aux conditions du site.

#### **4.4 Identification du type de mouvement et du mécanisme de rupture**

Les données issues de l'instrumentation permettent d'affiner la caractérisation du site : type de mouvement, extension de la zone potentiellement instable et mécanismes de déformation et de rupture. Ces données doivent être complétées par des visites de terrain régulières qui ont pour objectif d'identifier d'éventuels nouveaux signes d'instabilité pouvant traduire des modifications du comportement du site (accélération ou décélération des mouvements, extension de la zone potentiellement instable, *etc.*).

#### **4.5 Ajustement des paramètres de contrôle du système**

En fonction de la cinématique observée des mouvements, il peut être nécessaire de procéder à des ajustements des paramètres de contrôle du système : adaptation des fréquences d'acquisition, de tests de dépassement de seuils ou de stockage des données, modification des seuils de déclenchement d'alerte, *etc.* On peut également être amené à revoir le choix des capteurs, leur localisation, leur nombre, afin d'améliorer la surveillance du site.

## 4.6 Alertes et alarmes

La surveillance d'un site instable peut être associée à la notion d'alerte et parfois d'alarme définie comme le dernier degré de l'alerte. L'émission d'une alerte à partir de la définition de seuils est un exercice complexe qui exige en général l'analyse d'un grand nombre de données.

### 4.6.1 Alertes

On distingue :

- les alertes techniques qui annoncent un dysfonctionnement des appareils mettant en cause leurs fonctions principales ;
- les alertes opérationnelles, qui sont liées au dépassement de seuils fixés sur les variables d'alerte du système ou à la détection d'un phénomène considéré comme inquiétant, et correspondent à un scénario d'aggravation possible du risque. Elles peuvent entraîner suivant les cas :
  - un renforcement de la surveillance (en matériel, en personnel) ;
  - l'évaluation de la situation par des spécialistes ;
  - la transmission de l'alerte aux autorités responsables de la sécurité ;
  - la mise en préalerte et la définition de scénarii d'actions formalisés sous la forme d'un plan de secours. Il existe en général plusieurs niveaux gradués d'alerte avant le déclenchement éventuel d'une alarme.

L'optimisation du système implique de connaître et de comprendre le phénomène afin de mettre en place des seuils d'alerte les plus précis possibles. Considérons par exemple un seuil en vitesse : s'il est placé trop bas, on risque de déclencher de nombreuses fausses alertes ; s'il est placé trop haut, il y a un risque d'absence d'alerte lors de la rupture.

La détermination d'un seuil au-delà duquel les mouvements sont susceptibles d'être rapides ou importants reste, à l'heure actuelle, très délicate. Aussi la méthode « essai - erreur - correction » pendant une période de test qui couvre au moins deux saisons pluvieuses est-elle généralement utilisée, si toutefois la nature en laisse le temps.

La prise en compte du temps, c'est-à-dire des délais entre la détection des mouvements par les techniciens et la mise en place des actions qui en découlent par le gestionnaire du site (par exemple, évacuation du site), constitue un point capital dans un dispositif de surveillance.

Si l'on note :

- $t_0$  : l'instant où apparaît un phénomène précurseur décelable de la rupture (début d'accélération, très fortes précipitations) ;
- $t_1$  : l'instant de la rupture (début de la phase paroxysmale ou départ d'un volume qui va se propager) ;
- $t_2$  : l'instant où les biens et les personnes présents sur le site sont atteints ;
- $t'_0$  : l'instant où, grâce à l'analyse et à l'interprétation des données de l'instrumentation, on décèle effectivement le phénomène précurseur ;

- $t'_1$  : l'instant où l'alarme est donnée par le gestionnaire du site ;
- $t'_2$  : l'instant où les mesures de prévention définies par le gestionnaire sont opérationnelles.

Si l'on admet que l'instant  $t_0$  représente le signe annonciateur de la rupture le plus à l'amont possible (et d'une fiabilité suffisante), la durée  $t_2 - t_0$  représente le délai maximum disponible pour une surveillance qui ne se limiterait pas à constater a posteriori l'occurrence du phénomène.

La durée  $t'_2 - t_0$ , c'est-à-dire l'intervalle de temps séparant la première annonce de divergence du phénomène et le moment où les moyens d'intervention sont mis en place, doit être minimisée, ce qui conduit à :

- minimiser  $t'_0 - t_0$ , c'est-à-dire augmenter la fréquence de mesure, améliorer la précision des mesures ou essayer de prendre en compte un évènement précurseur plus pertinent ;
- minimiser  $t'_1 - t'_0$ , c'est-à-dire augmenter la rapidité du traitement des données et accélérer la phase d'interprétation ;
- minimiser  $t'_2 - t'_1$ , c'est-à-dire optimiser l'organisation de la gestion de l'alarme, ce qui n'est plus du ressort des techniciens.

## 4.6.2 Alarme

L'alarme est le signal annonçant l'existence d'un danger imminent. Elle entraîne l'exécution des mesures d'urgence. Ces mesures peuvent être automatiques (allumage d'un feu rouge - figure 23 -, fermeture d'une route, déclenchement d'une sirène, etc.) ou demander une intervention humaine. Dans ce dernier cas, des règles d'action en cas de déclenchement d'alarme doivent avoir été définies au préalable. Ces consignes précisent les différentes procédures qui doivent être mises en application dans les différents types de situations susceptibles de se produire.

Figure 23

Surveillance du glissement de terrain de la Médaille à Fort-de-France (Martinique) au moyen d'un tachéomètre (photo de gauche). La détection d'une instabilité entraîne l'activation d'un feu rouge qui stoppe la circulation sur cette portion de la route (photo de droite).



Crédit photos : Cerema/DTerCE

Il faut par ailleurs envisager à l'avance les circonstances pouvant conduire à la levée de l'état d'alarme dans le cas où la rupture ne se produit pas (ralentissement du mouvement après un pic de vitesse) : sur quels critères pourra-t-on décider cette levée ? Le seuil de retour à la normale est-il le même que le seuil de déclenchement de l'alarme ?

# Conclusion

Dans ce guide, nous nous sommes attachés à décrire, d'un point de vue technique, la démarche permettant d'élaborer une stratégie de surveillance d'un site instable.

Situations de crise mises à part, celle-ci doit comporter les quatre étapes suivantes :

- la **caractérisation du site** (chapitre 1) qui découle de l'observation du site, de l'analyse des données existantes et de la réalisation éventuelle d'investigations complémentaires. La caractérisation du site aboutit à l'élaboration d'un modèle géologique et géotechnique du site ainsi qu'à la description du type de mouvement instable et du mécanisme de rupture (tableau 3) ;
- la **définition des dispositifs de mesure** (chapitre 2). Il s'agit, pour le type de mouvement identifié dans l'étape précédente, de déterminer les grandeurs physiques à mesurer pour préciser la connaissance que l'on a des mouvements du site instable, d'une part, et des variables d'influence, d'autre part. Pour mesurer ces grandeurs physiques, on dispose de plusieurs types de capteurs (tableau 4) dont les caractéristiques principales sont synthétisées dans des fiches « dispositifs de mesure » présentées en partie 2 ;
- **l'instrumentation et la surveillance du site** (chapitre 3) qui consistent en la mise en place des dispositifs de mesure (capteurs et centrales d'acquisition) sur le site instable ainsi qu'en la gestion de l'acquisition des données des mesures, la vérification de leur pertinence / fiabilité et leur diffusion à l'équipe en charge d'interpréter ces données, dans un délai raisonnable pour la gestion de la sécurité. L'instrumentation du site doit prendre en compte les contraintes liées à l'environnement du site, à son accessibilité ainsi qu'aux interactions avec d'autres systèmes éventuellement présents sur le site. Une fois mis en place, il faut également assurer la maintenance des dispositifs de mesure ;
- **l'analyse des données** (chapitre 4) dont la fonction est de fournir au gestionnaire du site instable les éléments permettant de juger de la sécurité des enjeux éventuellement présents sur ou à proximité du site instable. L'objectif de cette phase est donc d'élaborer des modèles de prévision de la rupture permettant si besoin la définition de seuils d'alertes et d'alarmes.

La notion de temps apparaît comme un paramètre primordial dans la surveillance :

- il existe un délai, lié à la typologie et à la cinématique de l'instabilité, entre la pose d'instruments de mesure et leur capacité à fournir suffisamment de données pertinentes pour pouvoir élaborer des modèles de prévision de la rupture ;
- il existe un second délai entre la détection des mouvements par les techniciens à partir des données de la surveillance et la mise en place des actions prévues par le gestionnaire du site en cas de danger.

La surveillance d'un site instable a par ailleurs un coût, parfois substantiel, selon le système de surveillance à mettre en œuvre. La dimension économique ne doit pas être prépondérante dans les questions touchant à la sécurité, cependant elle constitue un élément de décision à ne pas négliger. À ce titre, il convient de rappeler qu'une stratégie d'instrumentation convenablement choisie présente un coût modeste par rapport à

une solution a posteriori de mise hors de danger définitive des personnes et des biens menacés.

La pertinence de l'instrumentation repose sur les compétences techniques des intervenants de la chaîne de surveillance en matière de géologie, de géotechnique, d'instrumentation, de métrologie, d'analyse des données, *etc.*

Pour éviter de délicats problèmes de responsabilité, il est important que le contrat qui lie les intervenants de la chaîne de surveillance au gestionnaire de la sécurité du site instable définisse clairement la mission demandée aux intervenants de la chaîne de surveillance, pour ce qui est de la conception, de l'installation et de l'exploitation du système de surveillance. En tout état de cause, les intervenants de la chaîne de surveillance ne sont pas les responsables ultimes de la sécurité. Ce n'est en particulier pas à eux qu'incombe la tâche de déclencher une alarme entraînant certaines dispositions préventives ou curatives. Cette responsabilité est du ressort du gestionnaire d'infrastructures, du maître d'ouvrage, de la commune, voire de l'État pour les sites à enjeux majeurs.

# Références

- Alfonsi, P.** (1997). Relation entre les paramètres hydrologiques et la vitesse dans les glissements de terrains Exemple de la Clapière et de Séchilienne (France). *Revue Française de Géotechnique* 79 : 3-12.
- BRGM** (2010). Rapport d'expertise. Avis sur la stabilité d'une corniche. Commune de Bainville-sur-Madon (54). BRGM/RP-58017-FR (Janvier 2010).
- Buckley S., Howell J., Enge H. and Kurz T.** (2008). Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. *Journal of the Geological Society*. Volume 165, pp. 625-638.
- Campy M., Macaire J.-J. et Grosbois C.** (2013). *Géologie de la surface – 3<sup>ème</sup> édition – Erosion, transfert et stockage dans les environnements continentaux*. Édition Dunod.
- Chanut M.-A.** (2012). Ruines de Séchilienne : mise en évidence de relations entre déplacements de surface et apports hydriques. Rapport de recherche interne au CETE de Lyon. Opération de Recherche 11R093 de l'Ifsttar.
- Duranthon J.-P.** (2000). Application de la méthode GPS de localisation par satellite à la surveillance de sites naturels instables. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*. Numéro 228, pp. 47-57.
- Durville J.-L., Gouin T., Pouget P. et Sève G.** (1994). Surveillance des pentes instables. *Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées*.
- Effendiantz L. et Rochet L.** (2000). Suivi d'une instabilité rocheuse jusqu'à l'éboulement. Commune de la Perrière (Savoie). *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 226, Mai, juin 2000, réf. 4312. Pp. 47-56.
- Gervreau (1991)**. Étude et prévision de l'évolution des versants naturels en mouvement. Coll. Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LCPC, n° GT 47.
- Lacroix P. and Helmstetter A.** (2011). Location of seismic signals associated with micro-earthquakes and rockfalls on the Séchilienne rockslide, French Alps. *Bulletin of the Seismological Society of America* 101 (1), 341-353.
- Lemaître F., Poussière J.-C., Duranthon J.-P. et Effendiantz L.** (2004). Utilisation du RADAR sol pour la surveillance des mouvements de terrain. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*. Numéro 249, pp. 19-34.
- Levy C., Jongmans D. and Baillet L.** (2011). Analysis of seismic signals recorded on a prone-to-fall rock column (Vercors massif, French Alps). *Geophysical journal international*. Volume 186 (1). pp. 296-310.
- Norme afnor géotechnique NF P 94-156**. Norme française sur les « Sols : reconnaissance et essais – Mesures à l'inclinomètre ».
- Pothérat P., Lemaître F., Duranthon J.-P. et 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.
- Sève G. et Pouget P.** (1998). Stabilisation des glissements de terrain. *Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées*.
- Varnes, D.J.** (1978). Slope movements types and processes. In Schuster, R.L. and Krizek, R.J. editors, *Landslides: analysis and control*, volume 176, pages 11-33. National Academic Press, Washington, USA.





## **Partie 2.**

# **Dispositifs de mesure**



## Liste des fiches techniques

### Surveillance opérationnelle des sites instables

#### Mesure de déplacement et de déformation

DD1	Fissuromètre .....	69
DD2	Extensomètre .....	71
DD3	Mire à vernier .....	73
DD4	Distancemètre orientable à Fil Invar .....	75
DD5	Distancemètre optique .....	77
DD6	Pendule inverse .....	79
DD7	Capteur de déformation à fibre optique .....	81
DD8	Tachéomètre .....	83
DD9	GNSS (dont GPS) .....	85
DD10	RADAR Ultra Large Bande .....	87
DD11	Scanner laser terrestre .....	89

#### Mesure de rotation

RO1	Clinomètre .....	91
RO2	Nivelle à vis micrométrique .....	93
RO3	Inclinomètre .....	95

#### Mesure de vibration

VI1	Vélocimètre, accéléromètre et géophone .....	97
-----	--	----

#### Mesure de précipitation

PR1	Pluviomètre enregistreur .....	99
PR2	Nivomètre .....	101
PR3	Nivomètre à rayon cosmique .....	103

#### Mesure de hauteur d'eau

HE1	Limnigraphe .....	105
HE2	Piézomètre ouvert .....	107

#### Mesure de pression interstitielle

PI1	Cellule de pression interstitielle électrique .....	109
-----	---	-----

#### Mesure du débit

DE1	Débitmètre .....	111
-----	------------------	-----

#### Mesure des paramètres environnementaux

PE1	Sonde de température .....	113
-----	----------------------------	-----

### Compréhension du comportement des sites instables

#### Mesure de teneur en eau

TE1	Capteur de teneur en eau .....	115
-----	--------------------------------	-----

#### Mesure des paramètres environnementaux


PE2	Hygromètre .....	117
PE3	Anémomètre .....	119
PE4	Girouette .....	121

#### Mesure de succion

SU1	Tensiomètre à charge hydrique .....	123
SU2	Tensiomètre sans charge hydrique .....	125

**Remarque** : un ordre de grandeur du coût des différents matériels est donné à titre indicatif dans chacune des fiches. Il correspond au coût pour l'année 2015.



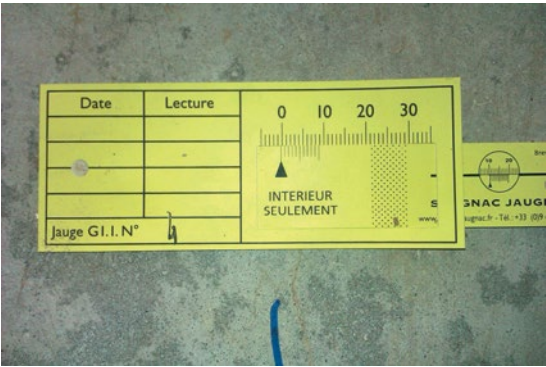
DOMAINE D'UTILISATION	Ouverture de fissures Déplacement relatif entre deux points												
GRANDEUR MESURABLE	Déplacement												
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>Le fissuromètre est constitué de deux éléments scellés de part et d'autre de la fissure. On mesure directement le mouvement relatif en X, Y et Z des deux compartiments situés de part et d'autre de la fissure. Une mesure de référence est réalisée après séchage du scellement. Les mesures sont manuelles et réalisées à l'aide d'un pied à coulisse.</p> <p>Figure DD1.1 Fissuromètre</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerSO</p>												
CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	<table border="1"> <tr> <td>Étendue de mesure</td> <td>de 0 à 17 mm en X et Y ; 10 mm en Z</td> </tr> <tr> <td>Exactitude</td> <td>0,1 mm</td> </tr> <tr> <td>Température de fonctionnement</td> <td>- 20 à + 40°C</td> </tr> <tr> <td>Grandeur d'influence</td> <td>température</td> </tr> <tr> <td>Temps de réponse</td> <td>&lt; 1 s</td> </tr> <tr> <td>Alimentation électrique</td> <td>non</td> </tr> </table>	Étendue de mesure	de 0 à 17 mm en X et Y ; 10 mm en Z	Exactitude	0,1 mm	Température de fonctionnement	- 20 à + 40°C	Grandeur d'influence	température	Temps de réponse	< 1 s	Alimentation électrique	non
Étendue de mesure	de 0 à 17 mm en X et Y ; 10 mm en Z												
Exactitude	0,1 mm												
Température de fonctionnement	- 20 à + 40°C												
Grandeur d'influence	température												
Temps de réponse	< 1 s												
Alimentation électrique	non												
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, vandalisme												
DURÉE DE VIE	> 10 ans												
MAINTENANCE	Une fois par an												
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	Supérieur à 400 € (hors protection complémentaire éventuelle)												

<p>CONTRAINTES D'UTILISATION</p>	<p>Mise en place par un spécialiste, notamment pour une profondeur de scellement adaptée en cas de rocher à caractéristiques mécaniques médiocres ou en cours d'évolution. Utilisation d'un gabarit de pose qui facilite l'alignement des deux éléments constituant le matériel de mesure.</p>
<p>COMMENTAIRES</p>	<p>Capteur de grande fiabilité et très robuste dans le temps éprouvé sur plusieurs dizaines d'années. Les appareils en alliage inoxydable ont une bonne résistance à la corrosion. Les mesures ne peuvent être réalisées à distance.</p>

DOMAINE D'UTILISATION	Ouverture de fissures. Déplacement relatif entre deux points												
GRANDEUR MESURABLE	Déplacement												
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>On mesure indirectement la variation de distance entre deux points. Le capteur de déplacement est constitué d'une tige métallique coulissante. Il est fixé au moins d'un côté et peut être au contact ou fixé de l'autre côté du dispositif sur l'élément à surveiller. La mesure peut être facilement automatisée. La mesure du signal électrique (4-20 mA) est convertie en déplacement par étalonnage préalable.</p> <p>Figure DD2.1 Extensomètre</p>  <p>Crédit photo : ITMSOIL</p>												
CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	<table border="1"> <tr> <td>Étendue de mesure</td> <td>&lt; 450 mm</td> </tr> <tr> <td>Exactitude</td> <td>de 0,1 à 0,01 mm</td> </tr> <tr> <td>Température de fonctionnement</td> <td>- 20 à + 80°C</td> </tr> <tr> <td>Grandeur d'influence</td> <td>température</td> </tr> <tr> <td>Temps de réponse</td> <td>&lt; 1 s</td> </tr> <tr> <td>Alimentation électrique</td> <td>Batterie 12 à 24 V</td> </tr> </table>	Étendue de mesure	< 450 mm	Exactitude	de 0,1 à 0,01 mm	Température de fonctionnement	- 20 à + 80°C	Grandeur d'influence	température	Temps de réponse	< 1 s	Alimentation électrique	Batterie 12 à 24 V
Étendue de mesure	< 450 mm												
Exactitude	de 0,1 à 0,01 mm												
Température de fonctionnement	- 20 à + 80°C												
Grandeur d'influence	température												
Temps de réponse	< 1 s												
Alimentation électrique	Batterie 12 à 24 V												
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, conditions météorologiques, vandalisme												
DURÉE DE VIE	> 20 ans												
MAINTENANCE	Une fois par an, à adapter en fonction de l'agressivité du milieu												
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	De 400 à 800 € (hors système de lecture et d'acquisition automatique)												



<p>CONTRAINTES D'UTILISATION</p>	<p>Mise en place par un spécialiste, notamment pour une profondeur de scellement adaptée en cas de rocher à caractéristiques mécaniques médiocres ou en cours d'évolution.</p>
<p>COMMENTAIRES</p>	<p>Capteur de grande fiabilité et robuste dans le temps éprouvé sur une vingtaine d'années. L'étalonnage réalisé avant la pose doit être régulièrement contrôlé. Le dispositif doit être recalé lorsque l'étendue de mesure risque d'être dépassée.</p> <p>Il existe des extensomètres à corde vibrante utilisés principalement pour la surveillance des fondations profondes ou des barrages. Les extensomètres à base longue permettent le suivi de l'ouverture de grandes fissures. Ces derniers emploient un fil en acier invariable.</p>

DOMAINE D'UTILISATION	Ouverture de fissures. Déplacement relatif entre deux points. Déplacement unidirectionnel												
GRANDEUR MESURABLE	Déplacement												
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>On mesure la variation de distance entre deux points, à partir d'une mesure de référence. Cette dernière doit être réalisée après un temps de séchage du scellement. La mesure se fait visuellement par lecture directe comme pour un pied à coulisse.</p> <p>Figure DD3.1 Mire à vernier</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerSO</p>												
CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	<table border="1"> <tr> <td>Étendue de mesure</td> <td>200 mm</td> </tr> <tr> <td>Exactitude</td> <td>± 0,5 mm</td> </tr> <tr> <td>Température de fonctionnement</td> <td>- 20 à + 40°C</td> </tr> <tr> <td>Grandeur d'influence</td> <td>température</td> </tr> <tr> <td>Temps de réponse</td> <td>&lt; 1 s</td> </tr> <tr> <td>Alimentation électrique</td> <td>non</td> </tr> </table>	Étendue de mesure	200 mm	Exactitude	± 0,5 mm	Température de fonctionnement	- 20 à + 40°C	Grandeur d'influence	température	Temps de réponse	< 1 s	Alimentation électrique	non
Étendue de mesure	200 mm												
Exactitude	± 0,5 mm												
Température de fonctionnement	- 20 à + 40°C												
Grandeur d'influence	température												
Temps de réponse	< 1 s												
Alimentation électrique	non												
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, vandalisme												
DURÉE DE VIE	> 5 ans												
MAINTENANCE	Une fois par an												
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	Moins de 100 € (hors pose)												

CONTRAINTES D'UTILISATION	Mise en place par un spécialiste, notamment pour une profondeur de scellement qui peut dépasser 15 cm en cas de rocher à caractéristiques mécaniques médiocres ou en cours d'évolution.
COMMENTAIRES	Capteur de grande fiabilité et très robuste dans le temps éprouvé sur plusieurs dizaines d'années. Dans certaines conditions, la lecture peut être faite à distance. Emploi courant sur ouvrages d'art et bâtiments.

# Distancemètre orientable (Do) à Fil Invar

DD4

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Mesure de l'ouverture de fissures, de l'écartement de piles de barrage, de déformations de voûte en tunnel</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Déplacement, distance</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Le principe de mesure consiste à placer entre deux repères implantés dans la structure une chaîne de mesure constituée de l'appareil type Do, d'un fil de mesure appelé « fil maître » et de rallonges permettant de centrer l'appareil dans sa plage de mesure.</p> <p>Figure DD4.1 Système DO2</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p> <p>Figure DD4.2 Système DO1</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 400 mm à plusieurs m
	Exactitude	Pour le Do1 : $\pm 0,16$ mm Pour le Do2 : $\pm 0,04$ mm
	Température de fonctionnement	- 20 à + 80°C
	Grandeur d'influence	température
	Temps de réponse	< 1 s
	Alimentation électrique	Pont de mesures 12 V
	VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, intempéries
DURÉE DE VIE	> 10 ans	
MAINTENANCE	Une fois par an pour étalonnage	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	11 k€ pour le lot complet (appareil + fils)	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Le distancemètre orientable à Fil Invar doit être mis en place par un spécialiste. Une formation d'une heure est requise pour son utilisation.	
COMMENTAIRES	Capteur de grande fiabilité et très robuste dans le temps ; capteur éprouvé sur plusieurs dizaines d'années.	

# Distancemètre optique

DD5

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Mesure de l'ouverture de fissures, de l'écartement de piles de barrage ou de pont.</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Déplacement, distance.</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Le principe de mesure consiste à placer entre deux repères implantés dans la structure une chaîne de mesure constituée de l'appareil type Do5 et d'un prisme réflecteur.</p> <p>Figure DD5.1 Distancemètre optique</p>   <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 400 mm à plusieurs dizaines de m
	Exactitude	± 0,4 mm
	Température de fonctionnement	- 20 à + 80°C
	Grandeur d'influence	température, pression
	Temps de réponse	< 5 s
	Alimentation électrique	Batterie 12 V
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, intempéries, vandalisme	
DURÉE DE VIE	> 2 ans	
MAINTENANCE	Une fois par an pour étalonnage	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	vendu uniquement en prestation de service par le Cerema/DTerCE.	
CONTRAINTES D'UTILISATION	aucune	
COMMENTAIRES	Capteur de grande fiabilité éprouvé sur plusieurs années.	

# Pendule inverse

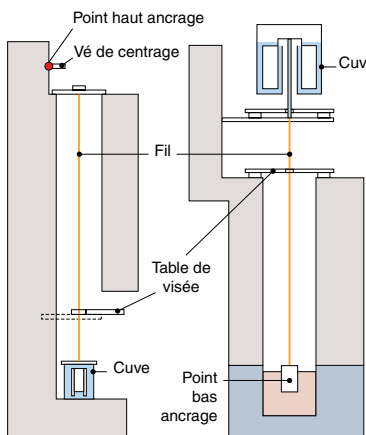
DD6

DOMAINE D'UTILISATION	Déplacement relatif d'un massif de sol, de structures ou de fondations d'édifices, par rapport à un horizon/repère stable.
GRANDEUR MESURABLE	Déplacements selon 1 ou 2 axes

PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE

On mesure les déplacements relatifs horizontaux de deux points éloignés situés sur une verticale. Le point bas est matérialisé par un ancrage cimenté au fond d'un forage de gros diamètre ( $\varnothing$  800 mm à adapter en fonction des déplacements). Le fil tendu verticalement à l'aide d'un flotteur est observé à l'aide d'une table de visée solidaire du point haut. La mesure de la position du fil se fait directement à l'aide d'une table de visée. La télémessure est possible grâce à une table de mesure par effet inductif.

Figure DD6.1  
Pendule inverse



Pendules direct et inversé

Crédit photo : TELEMAT

Figure DD6.2  
Pendule inverse





Crédit photo : Cerema/DTerSO



CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	± 15 mm
	Exactitude	0,1 mm
	Température de fonctionnement	- 10 à + 40°C
	Grandeur d'influence	température
	Temps de réponse	< 1 s
	Alimentation électrique	Batterie 24 V ou secteur pour les mesures automatiques
VULNÉRABILITÉ	Humidité, dépassement de l'étendue de mesure, vandalisme	
DURÉE DE VIE	> 10 ans	
MAINTENANCE	Deux fois par an (niveau d'eau dans la cuve et oxydation)	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	7 k€ (hors automatisation et forage)	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Mise en place par un spécialiste	
COMMENTAIRES	Matériel très robuste dans le temps éprouvé sur plusieurs dizaines d'années. Simple d'utilisation. Coût élevé.	

# Capteur de déformation répartie à fibre optique (CFO)

DD7

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Surveillance d'ouvrages ou de mouvements de terrain</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Déformation, distance, température</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Analyse de la diffusion d'une impulsion lumineuse dans une fibre optique. Les performances en matière de résolution en température et en déformation ou spatiale varient en fonction du type de diffusion (Raman, Brillouin ou Rayleigh).</p> <p>Figure DD7.1 Différents conditionnements de CFO</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DERDI-CER</p> <p>Figure DD7.2 Mise en œuvre de CFO en tranchée</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DERDI-CER</p>


CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de - 5000 à + 15000 $\mu\epsilon$ (« $\mu\epsilon$ » signifie micro déformation c'est-à-dire déformation en micro-mètre par unité de longueur)
	Exactitude	de $\pm 2$ à $\pm 20 \mu\epsilon$
	Température de fonctionnement	- 40 à + 80°C
	Grandeur d'influence	température compensable
	Temps de réponse	de 30 s à quelques minutes
	Alimentation électrique	dépend du type d'appareil d'interrogation de la fibre optique choisi
VULNÉRABILITÉ	Varie selon le type de conditionnement	
DURÉE DE VIE		
MAINTENANCE	Aucune	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	De un à plusieurs dizaines d'euros par mètre de fibre selon le type de conditionnement choisi.	
CONTRAINTES D'UTILISATION	<p>Le choix du conditionnement doit être adapté au type d'ouvrage ou de terrain étudié.</p> <p>Suivant la technologie et les performances désirées, l'appareil d'interrogation de la fibre optique peut atteindre un coût de plusieurs dizaines de milliers d'euros (location possible).</p>	
COMMENTAIRES	Capteur permettant d'instrumenter des ouvrages linéaires (de quelques mètres à plusieurs dizaines de kilomètres).	

DOMAINE D'UTILISATION	Détermination des mouvements X, Y, Z
GRANDEUR MESURABLE	Déplacement
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>Détermination des coordonnées X, Y, Z d'une cible (prisme réflecteur ou surface rétro réfléchissante) visée depuis un tachéomètre en station, dans un référentiel de type cartésien (sur de petites distances) ou de type projection (X,Y sur ellipsoïde et Z par rapport au géoïde).</p> <p>Le tachéomètre mesure les distances inclinées, angles horizontaux et verticaux qui permettent de calculer les coordonnées X, Y, Z du point visé. Les relevés peuvent être manuels ou automatiques.</p> <p>Figure DD8.1 Tachéomètre utilisé pour la surveillance du site de Séchillienne, Isère</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	> 1 mm de déplacement lorsque la distance station de mesure-cible est comprise entre 2 m et 1 800 m
	Exactitude	$\pm 1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ par km sur la distance mesurée pour une distance de visée (distance station-cible) comprise entre 2 m et 1 800 m ; $\pm 0,00015 \text{ gr}$ sur les angles.
	Température de fonctionnement	- 20 à + 50°C
	Grandeur d'influence	réfraction et conditions atmosphériques
	Temps de réponse	temps réel ou différé
	Alimentation électrique	Batterie 12 V ou secteur
	VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, visibilité réduite par mauvais temps (pluie/neige/brouillard), instabilité du support
DURÉE DE VIE	> 5 ans	
MAINTENANCE	Sans objet	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	Tachéomètre : de 15 k€ à 35 k€ Prisme réflecteur : de 130 € à 300 € (hors support)	
CONTRAINTES D'UTILISATION	aucune	
COMMENTAIRES		

# GNSS (Global Navigation Satellite System)

DD9

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Détermination de mouvements X, Y, Z</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Mouvements X, Y, Z</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Le système de positionnement par satellites GNSS est le nom général des systèmes de navigation satellitaires fournissant une couverture globale de géo-positionnement à usage civil.</p> <p>Il permet la détermination d'un vecteur dX dY dZ (dans un système de coordonnées cartésien géocentrique) entre deux points (au minimum) équipés chacun d'un récepteur GNSS (GPS/Glonass/Galileo) ainsi que la mesure simultanée en mode différentiel (différence des coordonnées entre deux points enregistrés pendant la même période).</p> <p>Les calculs peuvent être réalisés soit en temps réel (RTK) lorsqu'il existe une liaison GSM/GPRS ou UHF entre les deux stations de mesure soit a posteriori en temps différé (PPK).</p> <p>Figure DD9.1 Antenne GPS sur un trépied. La bande jaune au sol dans l'axe de l'antenne symbolise le repère de mesure</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p>

## PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE

Figure DD9.2

Télesurveillance du site de Séchilienne, par méthode GNSS, en mode différentiel. Le dispositif comprend : l'antenne GNSS ; des panneaux photovoltaïques (alimentation du récepteur et de la centrale d'acquisition dans l'armoire) et le système d'acquisition automatique des données. Le repère de référence est situé sur le versant opposé



Crédit photo : Cerema/DTerCE et matériel INERIS

## CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL

Étendue de mesure	mouvement décelable à partir de 5 mm. Distance entre points mesurés : de quelques mètres à plusieurs kilomètres.
Exactitude	± 5 mm suivant X,Y ; ± 10mm suivant Z
Température de fonctionnement	- 40 à + 65°C
Grandeur d'influence	perturbations ionosphériques, multi trajets, masques
Temps de réponse	temps réel ou différé
Alimentation électrique	Batterie 12 V, secteur

## VULNÉRABILITÉ

Chutes de blocs, neige sur antenne

## DURÉE DE VIE

> 5 ans

## MAINTENANCE

Sans objet

## ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT

Récepteur GPS : de 5 k€ à 25 k€ hors accessoires de télesurveillance.


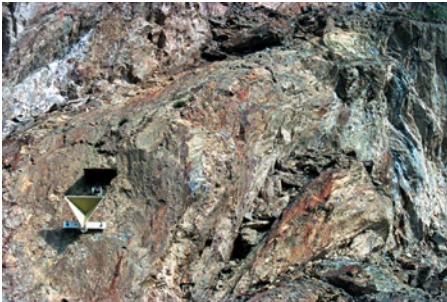
## CONTRAINTES D'UTILISATION

Aucune

## COMMENTAIRES

# RADAR Ultra Large Bande (RADAR ULB)

DD10

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Surveillance tout temps et à grande distance des déformations superficielles d'un versant ; ouverture de fractures</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Deux types de mesures peuvent être réalisées suivant que l'on dispose ou non une cible sur le terrain :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sur trièdres : déplacements, distances absolues et différentielles</li> <li>- sur sol nu : déformations, mouvements</li> </ul>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Le RADAR ULB émet une onde électromagnétique qui se réfléchit sur un trièdre et revient vers le RADAR. La mesure du temps de vol A/R (aller/retour) est convertie en distance (~ 150 m / <math>\mu</math>s). Les ondes RADAR sont peu sensibles à la pluie et au brouillard, d'où la capacité tout temps du dispositif. Des réflecteurs « référence » doivent être placés sur des points fixes pour compenser les effets atmosphériques.</p> <p>Figure DD10.1 RADAR ULB utilisé pour la surveillance du site de Séchilienne, Isère</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p> <p>Figure DD10.2 Une cible visée par le RADAR ULB sur le site de Séchilienne, Isère</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p>



CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 0 à 6 km
	Exactitude	± 0,2 mm à 1 200 m
	Température de fonctionnement	- 10 à + 40°C
	Grandeur d'influence	air, température, neige
	Temps de réponse	< 5 s
	Alimentation électrique	220 V AC pour une utilisation sous 24 V en CC
	VULNÉRABILITÉ	Chutes de bloc, verglas
DURÉE DE VIE	> 10 ans	
MAINTENANCE	Deux fois par an	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	De 80 k€ à 150 k€ hors accessoires de mesures (trièdres, etc.)	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Aucune	
COMMENTAIRES		

# Scanner laser terrestre

DD11

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Modélisation 3D de sites naturels ou d'ouvrages de génie civil. Comparaison de modèles surfaciques</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Position X, Y, Z</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Relevé sous forme de nuages de points X, Y, Z géoréférencés à l'aide d'un scanner laser à balayage en mode statique. Lorsque plusieurs stations sont nécessaires pour couvrir les scènes à scanner, l'assemblage nécessite alors de géoréférencer chaque scène (à l'aide de cibles relevées précisément en X, Y, Z ou par la détermination des paramètres de position et d'orientation du scanner). Il est également possible de caler les nuages de points entre eux par un recouvrement important. Le nuage de points permet différents types de post traitement (2D ou 3D) : vues en plan, coupes, maillages, objets 3Dsolid, photomodèles, etc. Il existe deux types d'instruments correspondant à deux types de mesures : temps de vol et mesure de phase. Le premier est plus lent mais il a davantage de portée que le second.</p> <p>Figure DD11.1 Scan laser 3D Leica</p>  <p>Crédit photo : Sintégra</p> <p>Figure DD11.2 Exemple de relevé par scan laser</p>  <p>Crédit photo : Sintégra</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 0,5 m à 2 000 m selon l'instrument choisi, le type de surface, sa réflectivité et l'angle d'incidence
	Exactitude	± 3 mm à 50 mm (selon l'instrument)
	Température de fonctionnement	0° à +50°C
	Grandeur d'influence	réflectivité des surfaces, angle d'incidence, humidité de l'air, particules en suspension
	Temps de réponse	aperçu en temps réel et post traitement en temps différé
	Alimentation électrique	Batterie 12 V ou secteur
	VULNÉRABILITÉ	Mauvais temps (pluie/neige/brouillard/froid), instabilité du support, réflectivité des surfaces.
DURÉE DE VIE	3 à 6 ans	
MAINTENANCE	Sans objet	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	Scanner laser : de 50 k€ à 125 k€	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Aucune	
COMMENTAIRES		

# Clinomètre

**RO1**

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Mesure de variations d'inclinaison suivant une ou deux directions par rapport à une verticale. Surveillance de terrains naturels, de fondations, de parois et d'ouvrages (ponts, barrages).</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Angle</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Les clinomètres sont équipés de servo-accéléromètres ou de pendules magnéto-résistants sans contact qui délivrent un signal proportionnel à la variation d'angle et mesurable en tension ou en courant.</p> <p>Figure RO1.1 Clinomètre fixe</p>  <p>Crédit photo : Géoinstrumentation – ClinoS</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 0 à 50 degrés
	Exactitude	de 0,07 % à 2 % de l'étendue de mesure
	Température de fonctionnement	- 40° à + 85°C
	Grandeur d'influence	déplacement angulaire
	Temps de réponse	quelques secondes
	Alimentation électrique	6 à 24V CC
	VULNÉRABILITÉ	Placé en extérieur, le matériel ne doit pas subir de chocs ou de déplacements, vandalisme.
DURÉE DE VIE	Plusieurs années (matériel robuste et étanche pour une utilisation en milieu extérieur).	
MAINTENANCE	Pas de maintenance particulière sur les appareils mis en place sur site mais vérification ponctuelle de la rigidité et de la fixation de l'ancrage. Contrôle périodique des instruments portatifs grâce à des bancs d'étalonnage.	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	~ 1 500 € pour un clinomètre bi-axial (montage à tige filetée).	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Nécessite des déplacements fréquents de l'unité de mesure dans le cas des instruments portatifs.	
COMMENTAIRES	Un capteur de température peut être intégré dans le boîtier du clinomètre afin de corriger la dérive thermique et de permettre la mise en évidence de possibles fluctuations saisonnières liées aux variations thermométriques. Certains modèles de clinomètre peuvent être submersibles jusqu'à une certaine profondeur.	

# Nivelle à vis micrométrique

RO2

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Contrôle de la stabilité des ouvrages et détermination des mouvements du sol sur une zone donnée.</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Déplacement angulaire</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>L'appareil de mesure est constitué d'une embase, d'un niveau à bulle tournant autour d'un axe de rotation horizontal et d'une vis micrométrique. Lors de la mesure, l'embase est mise en contact avec une plaque support de mêmes dimensions, scellée au terrain ou à la structure : la bulle du niveau est alors mise à zéro à l'aide de la vis micrométrique et l'on mesure ainsi l'angle de la plaque support par rapport à l'horizontale.</p> <p>Figure RO2.1 Nivelle</p>   <p>Crédit photo : Cerema/ DTerNC</p>


CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	$\pm 0 - 0,1$ rad
	Exactitude	$\pm 2.10^{-4}$ rad
	Seuil de détection	- 40° à + 85°C
	Grandeur d'influence	sans objet
	Temps de réponse	aucun
	Alimentation électrique	aucune
VULNÉRABILITÉ	Faible car il s'agit d'une mesure manuelle et seule reste sur le terrain la plaque support.	
DURÉE DE VIE	Plusieurs années si la nivelle est correctement protégée dans son étui de rangement.	
MAINTENANCE	Sans objet	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	~ 1 k€	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Mesure manuelle. Dans le cas de mesures sur le sol, il convient de coller la plaque support sur un plot en béton ancré dans le sol (forage à la tarière de diamètre 15 cm minimum, profondeur de 0,5 à 1 m) afin d'éviter les déformations de surface dues aux variations de température, au gel, <i>etc.</i>	
COMMENTAIRES	Mesure qui peut être mise en œuvre rapidement ; appareil facile d'emploi et mesure peu coûteuse.	

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Mesure des déformations</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Angles, déplacements</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Un tube vertical déformable est scellé (coulis déformable) dans un forage dont les derniers mètres sont ancrés dans le substratum stable. Une sonde inclinométrique raccordée à un appareil de mesure est descendue dans les rainures du tube par pas de 50 cm et on mesure, dans une ou deux directions orthogonales, l'angle d'inclinaison du tube. La mesure initiale sert de mesure de référence, les mesures suivantes permettent d'évaluer les déformations du terrain à différentes profondeurs au cours du temps.</p> <p>Figure RO3.1 Extrémité d'un tube inclinométrique et valise électronique de mesure (alimentation des capteurs, traitement des signaux de sortie, visualisation et stockage des données)</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerEst, Chantier RD 12-Epinal, 2011</p> <p>Figure RO3.2 Différents types de tubes inclinométriques</p>  <p>Crédit photo : Promafor</p> <p>Figure RO3.3 Tube inclinométrique carré</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerEst, Neuves-Maisons, 2014</p>



CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	± 0-5 degrés
	Exactitude	± 2.10 <sup>-4</sup> à 2.10 <sup>-6</sup>
	Température de fonctionnement	- 5 à + 60°C
	Grandeur d'influence	température
	Temps de réponse	entre 3 s et 10 s
	Alimentation électrique	piles, batteries, panneaux solaires
VULNÉRABILITÉ	Température	
DURÉE DE VIE	> 20 ans selon le type de matériau constituant le tube inclinométrique.	
MAINTENANCE	Etalonnage régulier requis de l'ensemble des appareils constituant la chaîne de mesure inclinométrique.	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Outil de mesure (sonde, valise électronique) : entre 5 et 10 k€.</li> <li>- Pose du tube inclinométrique (forage + fourniture) : entre 3 et 5 k€ (selon la profondeur du forage).</li> </ul>	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Mise en place par un spécialiste à l'aide d'une foreuse et d'une machine à injection de coulis. Pour minimiser les pertes de coulis, prévoir la mise en place autour du tube inclinométrique d'une chaussette extensible. Nécessité de protéger la tête du tube en surface par une bouche à clef ou un regard.	
COMMENTAIRES	Ces mesures suivent la norme NF P 94-156 sur les mesures à l'inclinomètre. Elles permettent de caractériser le volume de matériaux en mouvement à condition que l'implantation des inclinomètres et les fréquences de mesure aient été définies de manière judicieuse avec l'assistance du géotechnicien. Le relevé de la position de la tête de l'inclinomètre permet de contrôler le dépouillement en cas de problème d'ancrage du tube.	

# Vélocimètre, accéléromètre et géophone

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Détection, quantification et datation des vibrations (bruit de fond sismique) se propageant dans un massif en mouvement.</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Accélération (accéléromètre) ou vitesse (vélocimètre, sismomètre et géophone) des déplacements du sol.</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Les sismomètres et les géophones sont des capteurs mécaniques solidaires du sol (enterrés ou scellés) basés sur le principe du pendule inertiel avec amortissement. La tension en sortie d'un capteur une composante est proportionnelle à l'amplitude des déplacements du sol selon la composante verticale ou une composante horizontale. Un capteur trois composantes permet d'enregistrer les vibrations selon trois directions orthogonales et d'accéder aux déplacements du sol en trois dimensions. Les mesures sont automatiques et peuvent être réalisées avec un seul capteur ou un réseau de capteurs.</p> <p>Figure VI1.1 Géophone une composante mis en place par l'INERIS sur le site Séchilienne, Isère</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Exactitude	< 0,01 $\mu\text{m/s}$
	Température de fonctionnement	- 15 à + 60°C
	Grandeurs d'influence	-activités anthropiques (pas), conditions environnementales (vent dans les arbres), champs magnétiques, conditions météorologiques (humidité)
	Alimentation électrique	8 à 16 VCC
	Fréquence propre	$\geq 4$ Hz pour les géophones, de 0,2 à 2 Hz pour les sismomètres à courte période et $\leq 0,05$ Hz pour les sismomètres à longue période
	Fréquence de coupure supérieure	jusqu'à 10 kHz pour les géophones, jusqu'à 100 Hz pour les sismomètres à courte période, jusqu'à 40 Hz pour les sismomètres à longue période
	Dynamique	$\geq 120$ dB
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, surtension, vandalisme	
DURÉE DE VIE	> 2 ans	
MAINTENANCE	Sans objet	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	De 500 à 10 k€	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Le choix du capteur dépend du rapport entre sa fréquence propre et la fréquence des déplacements du sol. La masse des capteurs à longue période est élevée (> 10 kg). Un traitement numérique des signaux enregistrés est nécessaire pour extraire l'information utile.	
COMMENTAIRES	Dans les mouvements de terrain, on utilise généralement des vélocimètres ou des géophones, les accéléromètres étant réservés à la mesure de mouvements forts de type séismes. La mise en œuvre de tels capteurs dans le domaine de la surveillance des pentes instables relève encore du domaine de la recherche.	

# Pluviomètre enregistreur

DOMAINE D'UTILISATION	Définir la hauteur de pluie
GRANDEUR MESURABLE	Précipitations
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>Mesure et totalisation sur un diagramme enregistreur ou un compteur numérique des hauteurs de pluie ; estimation des intensités des précipitations. Un cône de 400 ou 1 000 cm<sup>2</sup> de surface recueille l'eau qui est ensuite dirigée vers un premier auget. Lorsque ce dernier est plein, il bascule brusquement, ce qui provoque la fermeture brève d'un circuit électrique et le déversement de l'eau à l'extérieur. Le second auget se place en position remplissage et bascule à son tour lorsque la quantité d'eau requise est atteinte (8g/0.2 mm pour un cône de 400 cm<sup>2</sup> et 20 g/0.2 mm pour un cône de 1 000 cm<sup>2</sup>). Les impulsions sont enregistrées par une station d'acquisition automatique et l'enregistrement continu permet de déterminer les hauteurs d'eau et l'intensité des précipitations. Il existe aussi des pluviomètres avec des augets de contenance 0,1 ou 0,5 mm d'eau. Pour les précipitations solides : possibilité d'ajout d'un chauffage afin de faire fondre la neige contenue dans le cône.</p> <p>Figure PR1.1 Pluviomètre</p>  <p>Crédit photo : Météo France</p>


CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 0 à plusieurs centaines de mm/h
	Exactitude	± 4 %
	Température de fonctionnement	-20°C à +60°C
	Grandeur d'influence	vent et température
	Temps de réponse	quelques ms
	Alimentation électrique	batterie ou secteur
VULNÉRABILITÉ	Vent (crée des turbulences qui rejettent les précipitations légères hors du cône).	
DURÉE DE VIE	Plusieurs années	
MAINTENANCE	Nettoyage régulier du cône. Contrôle de l'horizontalité de la platine et de la bague réceptrice.	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	~ 2 k€	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Éviter les terrains en pente et la proximité d'obstacles. Selon une recommandation de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), la surface de la bague réceptrice du pluviomètre doit se situer entre 0,5 et 2 m du sol. À Météo-France, la hauteur de mesure conventionnelle est de 1 m.	
COMMENTAIRES	Il existe également des pluviomètres enregistreurs à détection optique utilisant un faisceau laser transmis à un capteur. Lorsque les gouttes traversent le faisceau, elles projettent une ombre sur le capteur qui mesure alors le taux de précipitation.	

DOMAINE D'UTILISATION	Météorologie												
GRANDEUR MESURABLE	Hauteur de neige												
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>On mesure la distance entre le capteur et une surface cible afin d'estimer indirectement les profondeurs de neige et les niveaux d'eaux.</p> <p>Figure PR2.1 Station météo équipée d'un pluviomètre, d'un anémomètre, d'un capteur de température et d'humidité relative, d'une girouette et d'un nivomètre</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p>												
CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	<table border="1"> <tr> <td>Étendue de mesure</td> <td>0,5 à 10 m</td> </tr> <tr> <td>Exactitude</td> <td>± 1 cm ou 0,4 % de la distance à la cible</td> </tr> <tr> <td>Température de fonctionnement</td> <td>- 45°C à + 50°C</td> </tr> <tr> <td>Grandeur d'influence</td> <td>aucune</td> </tr> <tr> <td>Temps de réponse</td> <td>&lt; 1 s</td> </tr> <tr> <td>Alimentation électrique</td> <td>de 9 à 18V CC</td> </tr> </table>	Étendue de mesure	0,5 à 10 m	Exactitude	± 1 cm ou 0,4 % de la distance à la cible	Température de fonctionnement	- 45°C à + 50°C	Grandeur d'influence	aucune	Temps de réponse	< 1 s	Alimentation électrique	de 9 à 18V CC
Étendue de mesure	0,5 à 10 m												
Exactitude	± 1 cm ou 0,4 % de la distance à la cible												
Température de fonctionnement	- 45°C à + 50°C												
Grandeur d'influence	aucune												
Temps de réponse	< 1 s												
Alimentation électrique	de 9 à 18V CC												
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, vandalisme												

DURÉE DE VIE	> 10 ans
MAINTENANCE	Sans objet
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	1 300 € hors support, alimentation électrique et centrale d'acquisition.
CONTRAINTES D'UTILISATION	Aucune
COMMENTAIRES	Capteur très robuste

# Nivomètre à rayon cosmique (NRC) de type EDF

PR3

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Météorologie</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Hauteur de neige</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Le télé-nivomètre vertical a pour fonction de mesurer la hauteur de neige et son équivalent en eau au sol. Cet appareil fonctionne grâce à un capteur sensible à certains rayonnements naturels (ex : soleil) qui interagissent avec l'eau du manteau neigeux. Certaines particules issues de cette réaction sont mesurables et leur nombre par unité de temps est fonction de la quantité d'eau traversée par le rayonnement. Le capteur implanté dans le sol détecte les particules et calcule l'équivalent en eau du manteau neigeux. Une mesure de la température de l'air est nécessaire pour faire une correction sur la vitesse de propagation du son.</p> <p>Figure PR3.1 Nivomètre</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p>

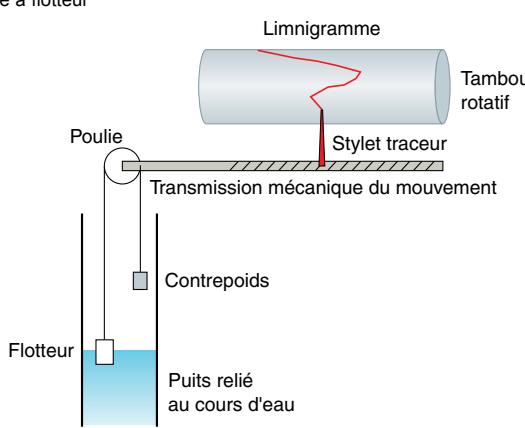



CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	<b>Capteur de hauteur de neige :</b>	
	Étendue de mesure	de 0 à 6 m
	Exactitude	> à 0,2 % de la pleine échelle
	Température de fonctionnement	de - 40°C à + 60°C (pour une couche d'air homogène).
	<b>Capteur de température (intégré dans un abri température miniature normalisé Météo) :</b>	
	Étendue de mesure	de -40°C à + 60°C
	Exactitude	> 0,5 % pleine échelle
Alimentation électrique	de 9 à 24 V CC	
Temps de mesure	< 1 s	
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, vandalisme	
DURÉE DE VIE	> 10 ans	
MAINTENANCE	Une à deux fois par an pour l'étalonnage du nivomètre.	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	15 k€ (matériel)	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Un nivomètre doit être placé sur une surface plane, normalement ensoleillée et dégagée. Mise en place par un spécialiste.	
COMMENTAIRES	Capteur de grande fiabilité et très robuste.	

# Limnigraphe

HE1

DOMAINE D'UTILISATION	Mesure des variations de niveau d'un cours d'eau
GRANDEUR MESURABLE	Niveau d'eau

PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>Il existe deux types de limnigraphe :</p> <p>Le limnigraphe à flotteur maintient un flotteur à la surface de l'eau grâce à un contrepoids (figure du haut).</p> <p>Le limnigraphe « bulle à bulle » mesure la pression de la colonne d'air contenu dans le tube (photo du bas).</p> <p>Figure HE1.1 Limnigraphe à flotteur</p>   <p>Sources : DDT Dordogne</p>
-------------------------------	--

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	0-5 m
	Exactitude	5 mm
	Température de fonctionnement	0 à + 80°C
	Grandeur d'influence	température
	Temps de réponse	immédiat
	Alimentation électrique	piles ou panneau solaire
VULNÉRABILITÉ	Sans objet	
DURÉE DE VIE		
MAINTENANCE	Une fois par an pour nettoyage	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	10-20 k€	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Mise en place par un spécialiste	
COMMENTAIRES	Capteur de grande fiabilité et très robuste dans le temps éprouvé sur plusieurs dizaines d'années.	

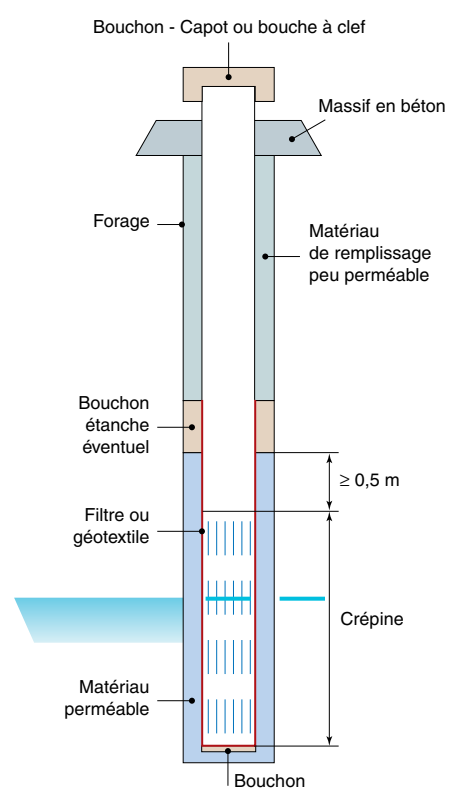
# Piézomètre ouvert HE2

DOMAINE D'UTILISATION	Mesure de la charge hydraulique dans un massif aquifère
GRANDEUR MESURABLE	Niveau d'eau

Un piézomètre est composé d'un tube mis en place dans une cavité artificielle réalisée par forage. Le tube est crépiné sur une hauteur judicieusement déterminée, au niveau de la nappe dont on cherche à connaître les fluctuations. La mesure est réalisée au moyen d'une sonde électrique qui est descendue dans le tube jusqu'au niveau de l'eau qui permet le contact électrique, contact détecté en surface par la production d'un son ou l'allumage d'une ampoule.

PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE

Figure HE2.1  
Piézomètre



Source : ARVOR Géotechnique

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 0 à 30 m
	Exactitude	1 cm de hauteur d'eau
	Température de fonctionnement	- 20 à +75°C
	Grandeur d'influence	aucune
	Temps de réponse	< 1 s (dans les sols perméables)
	Alimentation électrique	piles
VULNÉRABILITÉ	Sensible aux défauts d'étanchéité, vandalisme	
DURÉE DE VIE	5 à 15 ans selon la qualité des matériaux mis en œuvre (notamment le bouchon étanche)	
MAINTENANCE	Une à deux fois par an, nettoyage du tube par vidange	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	De 700 à 3 k€, selon les caractéristiques du forage	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Réalisation d'un forage puis mise en place par des opérateurs expérimentés. La pose du piézomètre doit faire l'objet d'une validation par le géologue/ l'hydrogéologue qui a demandé sa réalisation.	
COMMENTAIRES	Matériel de grande fiabilité, très robuste dans le temps et éprouvé sur plusieurs dizaines d'années. Problème de temps de réponse dans les sols peu perméables : dans ce type de sol, il faut utiliser des cellules de pression interstitielle (CPI).	

Mesure de hauteur d'eau

# Cellule de pression interstitielle (CPI) électrique

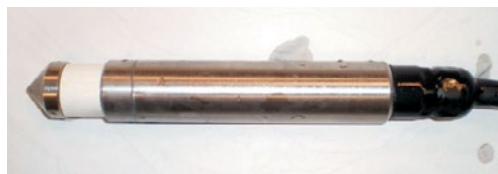
P11

DOMAINE D'UTILISATION	Mesure de la pression de l'eau dans un massif de sol peu perméable.
GRANDEUR MESURABLE	Pression d'eau (sols saturés)

PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE

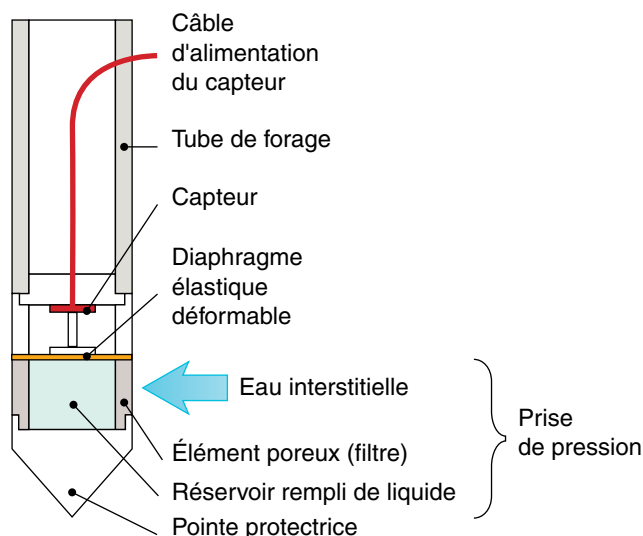
La CPI est placée à la profondeur visée dans un forage tubé temporairement. Autour de la CPI, le forage est rempli de sable propre sur lequel on réalise un bouchon étanche en bentonite. Le courant sorti du capteur 4-20 mA est mesuré. La pression est ensuite déduite d'une courbe d'étalonnage. La surpression est calculée en comparant le résultat des mesures entre deux CPI, dont une est située en zone neutre à la même altitude.

Figure PI1.1  
CPI



Crédit photo : Cerema/DTerSO

Figure PI1.2  
Schéma de fonctionnement d'une CPI



Source : guide LCPC, 1977

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 0 à 20 mm, de 0,1 à 5 MPa
	Exactitude	0,1 % de l'élément de mesure
	Température de fonctionnement	- 20 à + 80°C
	Grandeur d'influence	température
	Temps de réponse	< 1s
	Alimentation électrique	Batterie 12 ou 24 V
VULNÉRABILITÉ	Travaux de terrassement, foudre, vandalisme	
DURÉE DE VIE	> 4 ans	
MAINTENANCE	Aucune	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	De 400 à 800 € hors pose	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Mise en place par un spécialiste. Pas plus de deux CPI par forage. Mise en place d'une CPI en zone hors influence.	
COMMENTAIRES	<p>Les mesures de la pression de l'eau dans les sols doivent suivre la norme NF P 94-157-2.</p> <p>La CPI est une alternative aux piézomètres. Capteur de grande fiabilité et robuste dans le temps éprouvé sur une vingtaine d'années. Le capteur doit toujours être saturé. Des sondes à contre pression de gaz permettent également les mesures de pression. Celles-ci se posent de manière similaire aux CPI électriques et sont moins coûteuses à l'achat. Les mesures se font uniquement ponctuellement et manuellement à l'aide d'un appareil de mesure spécifique. Cet appareil applique par une tubulure une pression de gaz qui décolle la membrane de la sonde PAC et qui permet au gaz de s'échapper par la seconde tubulure. La pression interstitielle correspondant à ce décollage est mesurée directement sur un manomètre.</p>	

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Mesure du débit des sources, petits écoulements présents dans un versant.</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Débit</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>Mesure de débit dans les canaux découverts au moyen de déversoirs à paroi mince. Les déversoirs à paroi mince autorisent un écoulement libre, sans contrainte de mise en charge, permettant de calculer directement le débit en fonction de la lame d'eau.</p> <p>Figure DE1.1</p>  <p>Crédit photos : Cerema/DTerMed</p>



CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 0 à 200 m <sup>3</sup> /h
	Exactitude	± 1 %
	Température de fonctionnement	- 20 à + 80°C
	Grandeur d'influence	Température (gel)
	Temps de réponse	< 1 s
	Alimentation électrique	Batterie 12 V
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, végétation (chutes d'arbres en particulier), vandalisme.	
DURÉE DE VIE	> 2 ans si entretenu régulièrement.	
MAINTENANCE	Une fois par mois	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	3 k€ à 15 k€	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Le chenal doit être exempt de limon, de végétation et d'obstructions qui peuvent avoir des effets nuisibles sur les conditions d'écoulement spécifiées pour l'installation.	
COMMENTAIRES	<p>Appareillage simple et robuste, d'un coût d'entretien réduit.</p> <p>La mise en place peut nécessiter des petits travaux de terrassement pour s'assurer que l'ensemble des eaux est collecté par le déversoir.</p> <p>Il est possible de compléter le dispositif en mettant en place un enregistreur à ultrasons pour la lecture de la hauteur de la lame d'eau.</p>	

# Sonde de température

<p>DOMAINE D'UTILISATION</p>	<p>Météorologie</p>
<p>GRANDEUR MESURABLE</p>	<p>Température</p>
<p>PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE</p>	<p>La mesure de la température s'effectue à l'aide d'une sonde thermométrique à résistance de platine, généralement nommée Pt100 (fil de platine dont la résistance vaut <math>100 \Omega</math> à <math>0^{\circ}\text{C}</math>). Ce type de thermosonde est destiné à la mesure de la température de l'air sous abri, à 10 cm et à 50 cm au-dessus du sol mais il permet également la mesure de la température de la surface du sol et du sol à différentes profondeurs.</p> <p>Figure PE1.1 Station météo équipée d'un pluviomètre, d'un anémomètre, d'un capteur de température et d'humidité relative, d'une girouette et d'un nivomètre</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de - 30°C à + 70°C
	Exactitude	0,5°C
	Température de fonctionnement	- 50°C à + 200°C
	Grandeur d'influence	radiation solaire
	Temps de réponse	< 220 ms
	Alimentation électrique	5-30 V DC
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs, vandalisme	
DURÉE DE VIE	> 10 ans	
MAINTENANCE	Aucune	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	60 €	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Il est impératif de mettre la sonde de température dans un abri à ventilation naturelle (coût supplémentaire de 135 €). Disposer d'une sonde ultra précise n'est réellement utile que si l'équipement électronique est de précision suffisante, et surtout si le couplage mécanique et thermique entre la sonde et le milieu à étudier est réellement maîtrisé car il peut à lui seul introduire une erreur de plusieurs degrés.	
COMMENTAIRES		

# Capteur de teneur en eau (Time Domain Reflectometry TDR)

TE1

DOMAINE D'UTILISATION	Mesure de la teneur en eau volumique des sols
GRANDEUR MESURABLE	Quantité d'eau dans un volume de sol donné (mesure indirecte)
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>Mesure du temps de propagation d'une impulsion électromagnétique dans un guide d'onde enfoui dans le sol. Ce temps, mesuré par réflexion du signal, est corrélé à la constante diélectrique apparente du sol qui est fonction de la quantité d'eau présente dans le sol.</p> <p>Figure TE1.1 Perçage des avants trous</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DERDI-CER</p> <p>Figure TE1.2 Remblayage du capteur</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DERDI-CER</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 0 à 100 %
	Exactitude	0,2 %
	Température de fonctionnement	- 15 à + 50°C
	Grandeur d'influence	Masse volumique du sol, conductibilité électrique du sol
	Temps de réponse	quelques secondes
	Alimentation électrique	de 7 à 24 V
VULNÉRABILITÉ	Aucune	
DURÉE DE VIE	> 4 ans	
MAINTENANCE	Aucune	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	De 700 à 900 €	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Nécessite un étalonnage pour certains types de sol.	
COMMENTAIRES	<p>Il s'agit d'un capteur à électronique intégrée. On peut l'enterrer sous terre. Lorsqu'on utilise un grand nombre de capteurs, il est préférable d'opter pour la technologie avec sondes passives et boîtier électronique déporté avec multiplexage des capteurs.</p> <p>Il existe aussi d'autres méthodes, non destructives, de mesure de la teneur en eau d'un sol, cependant la méthode TDR semble la plus utilisée.</p>	

DOMAINE D'UTILISATION	Météorologie
GRANDEUR MESURABLE	Humidité relative (HR) de l'air (et capteur de température intégré).
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>Mesure de la variation d'impédance capacitive ou résistive de l'air.</p> <p>Figure PE2.1 Station météo du site de Séchilienne (Isère) équipée d'un pluviomètre, d'un anémomètre, d'un capteur de température et d'humidité relative (hygromètre), d'une girouette et d'un nivomètre</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p> <p>Figure PE2.2 Hygromètre</p>  <p>Crédit photo : matériel Campbell Scientific</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 0 à 100 % d'HR
	Exactitude	$\pm 2$ % entre 10 et 90 % d'HR ; $\pm 4$ % entre 0 et 100 % d'HR
	Température de fonctionnement	compensé à mieux que $\pm 2$ % de - 20°C à + 60°C
	Grandeur d'influence	température
	Temps de réponse	< 15 s
	Alimentation électrique	de 6 à 16V CC
	VULNÉRABILITÉ	Vandalisme
DURÉE DE VIE	Plusieurs années mais il est préférable de changer régulièrement la partie sensible du capteur.	
MAINTENANCE	Vérifier une fois par mois que l'abri n'est pas encombré de poussière ou de terre ; nettoyer le filtre présent à l'extrémité du capteur afin d'éliminer les débris éventuels.	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	Quelques centaines d'euros	
CONTRAINTES D'UTILISATION	se met en place sous abri ; sensible aux effets de la poussière et de la terre.	
COMMENTAIRES	Montage aisé sur un mât par une bride inox. Sortie numérique du signal au format SDI-12, compatible avec de nombreux matériels.	

DOMAINE D'UTILISATION	Météorologie
GRANDEUR MESURABLE	Vitesse du vent
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>Mesure de la vitesse de rotation d'un axe vertical comportant trois coupelles hémisphériques.</p> <p>Figure PE3.1 Station météo du site de Séchilienne (Isère) équipée d'un pluviomètre, d'un anémomètre, d'un capteur de température et d'humidité relative, d'une girouette et d'un nivomètre</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p> <p>Figure PE3.2 Anémomètre</p>  <p>Crédit photo : matériel Campbell Scientific</p>



CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	de 1 à 60 m/s pour une précision maximale ; résiste à des bourrasques de 100 m/s
	Exactitude	± 0,3 m/s de 1 à 60 m/s et ± 1,0 m/s de 60 à 100 m/s
	Température de fonctionnement	- 50 à + 70°C
	Grandeur d'influence	aucune
	Temps de réponse	immédiat
	Alimentation électrique	aucune, tension induite par rotation du moulinet
	VULNÉRABILITÉ	Vandalisme
DURÉE DE VIE	Environ 10 ans mais varie en fonction du climat	
MAINTENANCE	Remplacement du roulement à bille en cas de bruit	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	Quelques centaines d'euros	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Contrôle visuel et sonore régulier pour s'assurer de la bonne rotation des coupelles.	
COMMENTAIRES	Faible encombrement (diamètre du moulinet : 12 cm), se monte directement sur un mât de diamètre 25,4 mm, est souvent associé à une girouette pour constituer un moniteur de vent. D'autres technologies sont disponibles : par exemple les anémomètres sans pièce en mouvement tels que les anémomètres à fil chaud ou les anémomètres ultrasoniques capables de mesurer aussi la direction vent.	

## Compréhension du comportement des sites instables

### Mesure des paramètres environnementaux

# Girouette PE4

DOMAINE D'UTILISATION	Mesure de la direction du vent
GRANDEUR MESURABLE	Position angulaire
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>Mesure de la position d'équilibre, sous l'action du vent, d'un dispositif asymétrique composé d'une plaque mince libre en rotation autour d'un axe vertical.</p> <p>Figure PE4.1 Station météo du site de Séchilienne (Isère) équipée d'un pluviomètre, d'un anémomètre, d'un capteur de température et d'humidité relative, d'une girouette et d'un nivomètre</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DTerCE</p> <p>Figure PE4.2 Girouette</p>  <p>Crédit photo : matériel Campbell Scientific</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Étendue de mesure	360° d'angle mécanique. Seuil de démarrage 0,6 m/s ; vitesse maximale 75 m/s.
	Exactitude	± 2° pour des vents stables > 5 m/s
	Température de fonctionnement	- 50°C à +70°C
	Grandeur d'influence	aucune
	Temps de réponse	immédiat
	Alimentation électrique	15 V maximum
	VULNÉRABILITÉ	Vandalisme
DURÉE DE VIE	Environ 10 ans sur site « normal »	
MAINTENANCE	Aucune	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	Quelques centaines d'euros	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Aucune	
COMMENTAIRES	D'autres technologies sont disponibles tels que les anémomètres ultrasoniques capables de mesurer la direction du vent selon les trois axes orthogonaux.	

# Tensiomètre à charge hydrique

SU1

DOMAINE D'UTILISATION	Mesure de la succion ou du potentiel matriciel d'un sol.
GRANDEUR MESURABLE	Pression
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>La dépression d'une colonne d'eau désaérée, en équilibre avec la succion régnant dans le sol par l'intermédiaire d'une bougie poreuse en contact étroit avec le sol, est mesurée par un capteur de pression. L'utilisation d'un capteur de pression électronique permet un suivi automatique de l'évolution des pressions.</p> <p>Figure SU1.1 Tensiomètre</p>  <p>Crédit photo : Cerema/DERDI-CER</p>

CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	Utilisé principalement à des fins de recherche, le tensiomètre possède les caractéristiques suivantes :	
	Étendue de mesure	de + 100 à - 85 kPa
	Exactitude	± 0,5 kPa
	Température de fonctionnement	> 0°C
	Grandeur d'influence	aucune
	Temps de réponse	continu
	Alimentation électrique	10, 12 ou 24 V suivant le modèle
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs	
DURÉE DE VIE	Plusieurs années	
MAINTENANCE	Vérifier la saturation de la bougie, notamment en période sèche.	
ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	De 200 à 400 €	
CONTRAINTES D'UTILISATION	Utiliser une tarière adaptée pour la mise en place du capteur afin de s'assurer du bon contact entre la bougie et le sol. Vérifier la saturation de la bougie en période sèche.	
COMMENTAIRES	<p>Capteur à préserver du gel et nécessitant de la maintenance. D'autres technologies sans maintenance sont disponibles mais fournissent des résultats moins précis.</p> <p>Les mesures peuvent être relevées à l'aide d'une centrale d'acquisition de données.</p>	

# Tensiomètre sans charge hydrique

SU2

DOMAINE D'UTILISATION	Mesure de la succion ou du potentiel matriciel d'un sol												
GRANDEUR MESURABLE	Pression (mesure indirecte)												
PRINCIPE OU MÉTHODE DE MESURE	<p>Mesure de la résistivité d'un bloc de gypse en contact avec un corps hydrophile lui-même en équilibre avec la teneur en eau du sol. La résistivité mesurée présente une relation quasi-linéaire avec la tension du sol.</p> <p>Figure SU2.1 Bougie (bloc de gypse) du tensiomètre solidaire de la canne de mise en place et tarière à main de mise en place de la bougie dans le sol</p>  <p>Crédit photo : Challenge Agriculture</p>												
CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL	<p>Utilisé principalement à des fins de recherche, le tensiomètre possède les caractéristiques suivantes :</p> <table border="1"> <tr> <td>Étendue de mesure</td> <td>de 0 à - 200 kPa</td> </tr> <tr> <td>Exactitude</td> <td>± 10 kPa</td> </tr> <tr> <td>Température de fonctionnement</td> <td>&gt; 0°C</td> </tr> <tr> <td>Grandeur d'influence</td> <td>compensé en température</td> </tr> <tr> <td>Temps de réponse</td> <td>continu</td> </tr> <tr> <td>Alimentation électrique</td> <td>mesure de résistivité (l'appareil de mesure injecte un courant et on mesure la tension aux bornes du capteur).</td> </tr> </table>	Étendue de mesure	de 0 à - 200 kPa	Exactitude	± 10 kPa	Température de fonctionnement	> 0°C	Grandeur d'influence	compensé en température	Temps de réponse	continu	Alimentation électrique	mesure de résistivité (l'appareil de mesure injecte un courant et on mesure la tension aux bornes du capteur).
Étendue de mesure	de 0 à - 200 kPa												
Exactitude	± 10 kPa												
Température de fonctionnement	> 0°C												
Grandeur d'influence	compensé en température												
Temps de réponse	continu												
Alimentation électrique	mesure de résistivité (l'appareil de mesure injecte un courant et on mesure la tension aux bornes du capteur).												
VULNÉRABILITÉ	Chutes de blocs. Le tensiomètre peut être enterré pour limiter sa vulnérabilité												
DURÉE DE VIE	De 5 à 7 ans												
MAINTENANCE													

ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT	De 50 € à 100 €
CONTRAINTES D'UTILISATION	Utiliser une tarière adaptée pour la mise en place afin d'assurer un bon contact entre la bougie et le sol.
COMMENTAIRES	Moins précis que la technologie avec charge hydrique. Ne désamorce pas en cas de sol très sec. Ne craint pas le gel. Peut être utilisé avec un boîtier d'acquisition spécifique ou une centrale d'acquisition adaptée.

## **Partie 3.**

### **Études de cas**





## **Liste des études de cas**

### **Compréhension des phénomènes**

Cas 1	RN21, Astaffort (Lot-et-Garonne).....	131
Cas 2	Fort de Bainville sur Madon (Meurthe-et-Moselle).....	135
Cas 3	Villerville, Cricqueboeuf (Calvados).....	139
Cas 4	Nice Havrais, Sainte Adresse (Seine-Maritime).....	143
Cas 5	Mont Cabassou, Rémire-Montjoly (Guyane) .....	147
Cas 6	Sallèdes (Puy-de-Dôme) .....	151

### **Conception d'un système de confortement**

Cas 7	Petit Caporal, Boulogne-sur-Mer (Pas-de-Calais) .....	155
-------	---	-----

### **Surveillance des sites instables (contribution à la gestion de la sécurité)**

Cas 8	Piton de la Becqua, la Perrière (Savoie).....	159
Cas 9	Versant des Ruines, Séchillienne (Isère).....	163
Cas 10	RN200, Quarcio (Haute-Corse) .....	167



# RN 21, Astaffort (Lot-et-Garonne)

### Surveillance d'un glissement de terrain et d'un mur de soutènement

#### ■ Objet

Depuis 2008, la chaussée de la RN 21, déviation pour poids lourds à Astaffort en Lot-et-Garonne, présente des fissures longitudinales sur plus de 100 m (figure Cas1.1) ainsi que des affaissements centimétriques. Sur cette zone, la route est en profil mixte avec un talus au relief marqué. En bas de ce talus de remblai, un mur de soutènement en pierres sèches, de 2 m de hauteur, est dans un état de ruine avancée (figure Cas1.2).

Figure Cas1.1  
Désordres sur la RN 21, août 2012



Crédit photo : Cerema/DTerSO

Figure Cas1.2  
Mur de soutènement, février 2012



Crédit photo : Cerema/DTerSO

#### ■ Enjeux

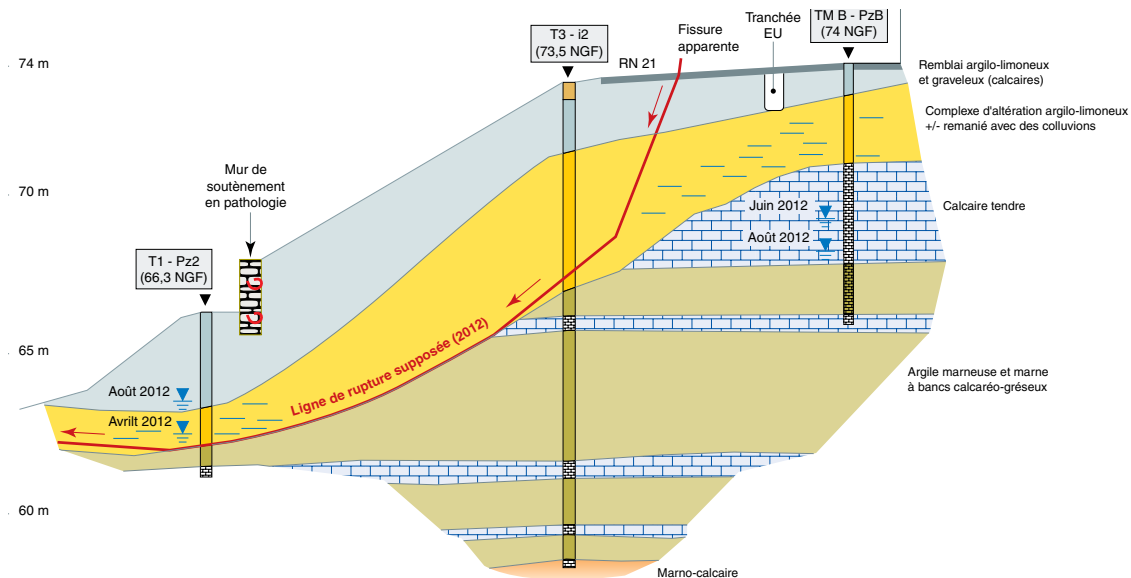
Voie de circulation (RN) sans déviation courte pour les poids-lourds.

#### ■ Instrumentation

L'instrumentation suivante a été mise en place :

- 3 tubes inclinométriques (installés en décembre 2008) afin de déterminer la vitesse d'évolution du massif et l'éventuelle profondeur de la ligne de rupture (seul l'inclinomètre i2 est représenté dans la figure Cas1.3) ;
- 4 tubes piézométriques répartis sur la zone d'étude et équipés de sondes automatiques de pression ;
- 5 nivelles à vis micrométrique et platine à billes afin de suivre les mouvements du mur de soutènement.

Figure Cas1.3  
Schéma de fonctionnement du site



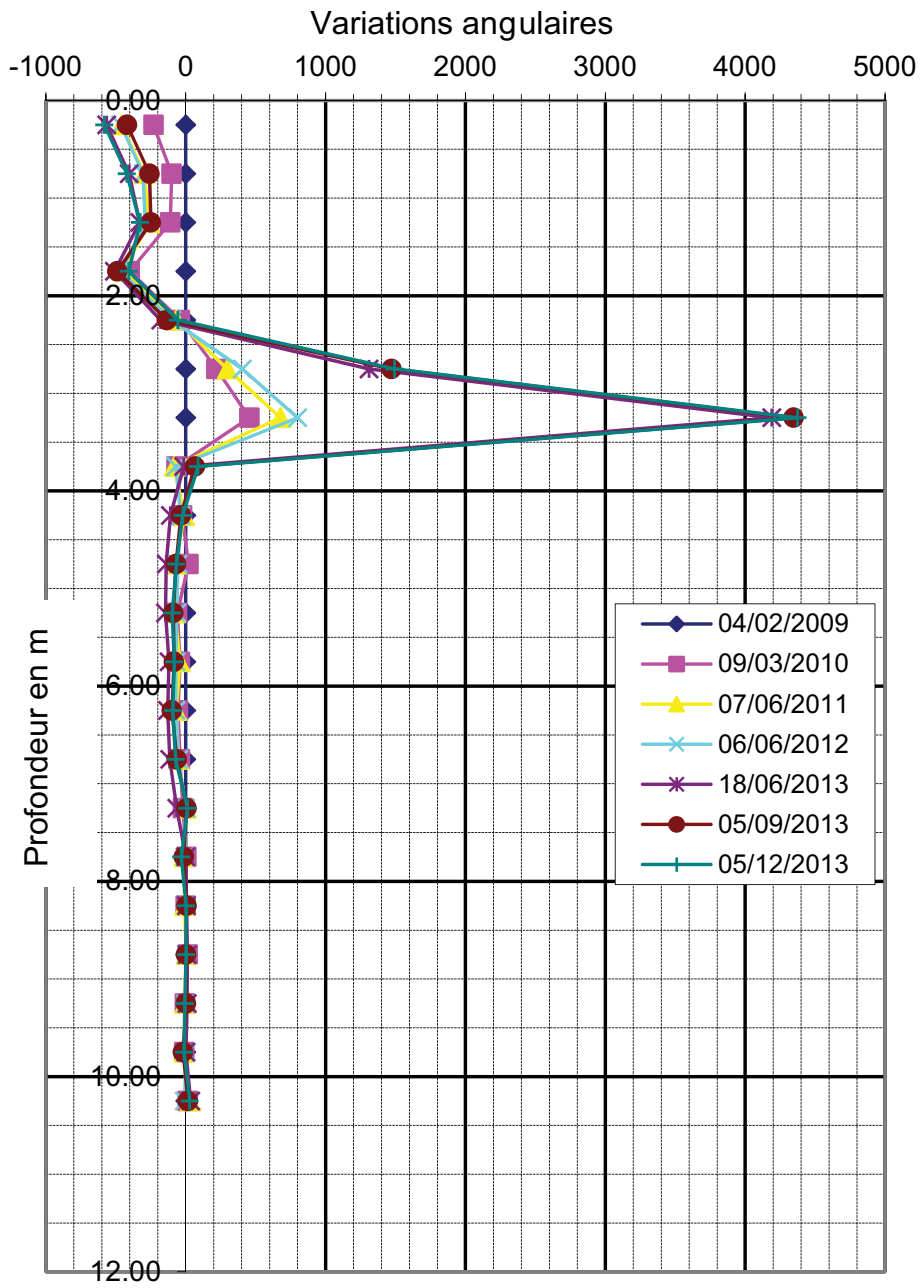
« T » signifie que les sondages ont été effectués à la tarière (à main ou mécanique). « Pz » signifie piézomètre.  
« i » signifie inclinomètre.

Source : Cerema/DTerSO

## Résultats

La surveillance des mouvements (figures Cas1.4 et Cas1.5) a montré que la ligne de rupture correspondait, vers 4 m de profondeur, à l'interface entre les remblais d'épaulement et une couche d'altération des argiles marneuses. Le suivi piézométrique a montré que les couches d'altération étaient temporairement ou en permanence gorgées d'eau lors des infiltrations des eaux météoriques dans les remblais et que l'eau s'accumulait au toit des marnes. Des mouvements irréguliers du mur ont été mis en évidence. Cette déstructuration résulte d'un mouvement d'ensemble des remblais sur les altérites avec entraînement de l'ouvrage entièrement construit dans ces remblais. Les vitesses d'évolution sont très lentes (quelques millimètres par an) selon le guide technique « Stabilisation des glissements de terrain » du LCPC (1998).

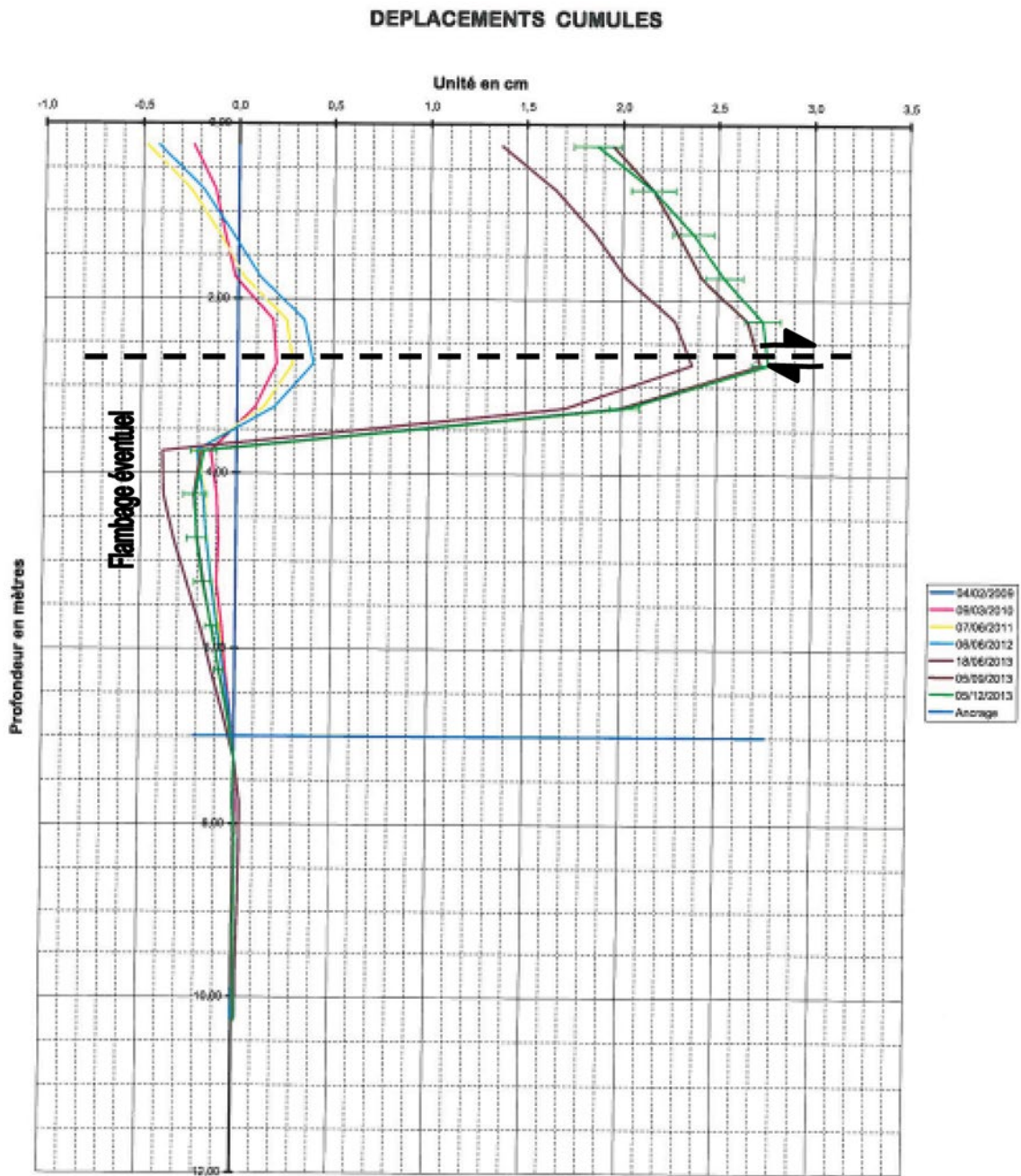
Figure Cas1.4  
Mesure des variations angulaires entre février 2009 et décembre 2013



L'épaisseur de matériaux instables est de l'ordre de 4 m.

Source : Cerema/DTerSO

Figure Cas1.5  
Déplacements cumulés



L'annotation « flambage » symbolise une zone dans laquelle le tube est mal scellé). « Pz » signifie piézomètre.  
« i » signifie inclinomètre.

Source : Cerema/DTerSO

### Compréhension des phénomènes

# Fort de Bainville-sur-Madon (Meurthe-et-Moselle)

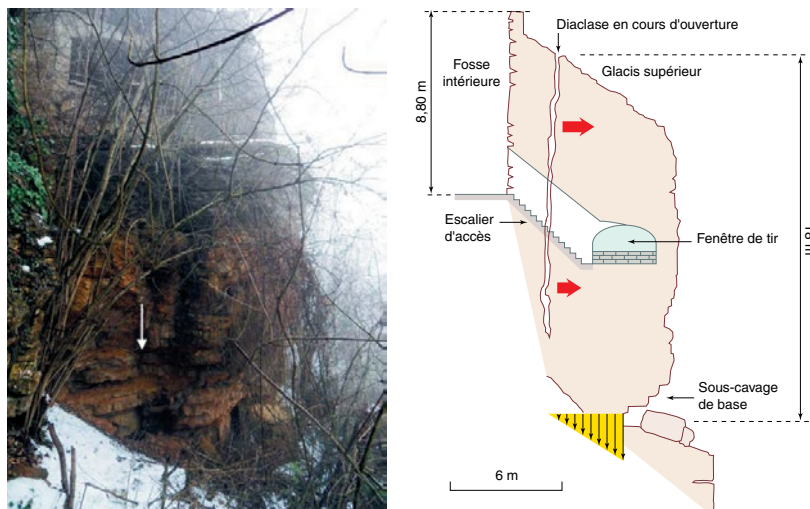
Cas2

## Surveillance d'une colonne rocheuse

### ■ Objet

Une étude de stabilité a été réalisée en janvier 2010 par le BRGM au droit de la colonne rocheuse du Fort de Bainville sur Madon (figure Cas2.1). Elle a montré que le bloc rocheux instable formait un dièdre délimité par deux diaclases ouvertes. La colonne avait subi des déplacements mais ces derniers étaient globalement lents (environ 3 mm en 9 mois). Les observations (repères sur plaque métallique) et les calculs préliminaires de stabilité réalisés semblaient montrer que le basculement de la colonne était peu probable à court terme. Avant d'envisager la suppression définitive du risque, soit de manière active, soit de manière passive, il a été recommandé de mettre en place un dispositif de surveillance de la colonne rocheuse afin de quantifier sa vitesse de déplacement et de statuer sur l'occurrence de sa ruine.

Figure Cas2.1  
Photo du site et schéma explicatif



Source : BRGM, 2010

### ■ Enjeux

Sécurité des habitants qui résident en aval de la colonne rocheuse.

### ■ Instrumentation

Une centrale d'acquisition Geol-Logger associée à 3 fissuromètres à fils (figures Cas2.2 à 4) et un clinomètre bi-axial (figure Cas2.5) ont été mis en place en février 2011 afin de suivre l'évolution du massif rocheux surplombant la zone habitée en contrebas du Fort de Bainville-sur-Madon.



Figure Cas2.2  
Fissuromètre 1



Figure Cas2.3  
Fissuromètre 2



Figure Cas2.4  
Fissuromètre 3



Figure Cas2.5  
Clinomètre



Crédit photos : Cerema/DTerEst

Les fissuromètres 1 et 2 sont fixés sur des platines en inox ancrées sur la paroi rocheuse à l'aide de chevilles à expansion. Une protection contre les chutes de gouttes d'eau a été mise en place sur les deux capteurs. Le fil est attaché sur un crochet en inox fixé par une cheville plastique.

Le fissuromètre 3 est placé à l'extérieur. Le câble de liaison a été placé sous une gaine métallique de protection et descend le long du mur vers la centrale d'acquisition. Pour protéger l'ensemble, un capot de protection en inox a été mis en place.

Le clinomètre a été fixé sur le mur dans la direction du glissement attendu.

Une centrale d'acquisition, placée juste à l'entrée de la coursive, enregistre les déplacements. Tous les câbles arrivent au niveau du coffret, ainsi que l'alimentation électrique nécessaire à la recharge de la batterie interne.

Une mesure est réalisée toutes les 5 minutes pour la gestion des alarmes par envoi de message SMS. L'enregistrement des mesures s'effectue toutes les 3 heures.

Deux seuils ont été définis sur les mesures effectuées au clinomètre et ont été ajustés après quelques jours de fonctionnement du système :

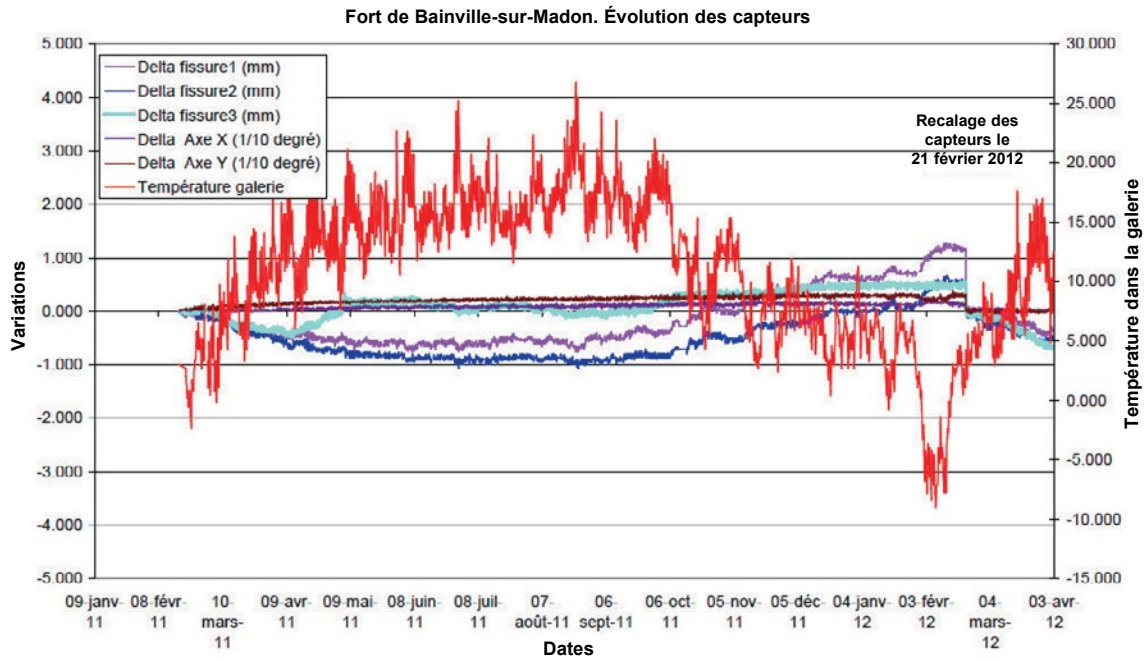
- un seuil haut correspondant à une ouverture de la fissure ;
- un seuil bas correspondant à une fermeture de la fissure.

Aucun seuil n'a été défini sur les mesures effectuées au clinomètre.

## ■ Résultat

Après la mise en place des capteurs, une première série de mesures a été réalisée pour obtenir les valeurs initiales. La centrale d'acquisition enregistre les mesures de déplacements et envoie automatiquement un SMS si l'un des fissuromètres dépasse les valeurs seuils préalablement fixées (5 mm de déplacement). Les mesures sont collectées une fois par mois via une clé 3G depuis février 2011. Aucun grand déplacement n'a été mesuré à ce jour. De très légères fluctuations ont été observées suite à des variations importantes de température mais ces déplacements restent inférieurs à 1 mm (figure Cas2.6).

Figure Cas2.6  
Ouverture des fissures mesurées au cours du temps



Source : Cerema/DTerEst



# Villerville, Cricquebœuf (Calvados)

### Surveillance de deux glissements de terrain de grande ampleur

#### ■ Objet

Sur 7 km entre Trouville-sur-Mer et Cricquebœuf, le versant côtier, en bordure du plateau crayeux, est affecté par quatre glissements de terrain actifs, de grande ampleur, séparés par des vallons à drainage permanent : les « Roches Noires », les « Creuniers », le « Cirque des Graves » et les « Fosses du Macre ». Les surfaces de glissement de ces mouvements complexes sont situées au niveau de l'interface entre les formations superficielles de pente et les formations géologiques en place (en particulier argileuses). Ces glissements correspondent à la remise en mouvement des épaisses formations solifluées d'âge quaternaire (épaisseur courante : environ 20 m). Ils sont caractérisés par des mouvements anciens permanents présentant une cinématique lente (5 à 20 cm par an), avec des phases d'accélération brutale liées à l'intensité de l'érosion marine et à l'élévation des niveaux piézométriques des nappes et des circulations d'eau dans les formations superficielles de pente (en relation étroite avec les précipitations). Au cours des dernières décennies, six grandes phases de réactivation des glissements de terrain sont ainsi connues, pendant les hivers 1966-1967, 1974-1975, 1981-1982, 1987-1988, 1994-1995 et 2000-2001 (figure Cas3.1).

#### ■ Enjeux

La régression des glissements de terrain vers l'amont menace actuellement de nombreuses habitations et la RD513 (fermeture en mars 2001). Une dizaine de villas ont été gravement endommagées ou détruites et un camping fermé à Villerville en janvier 1982.

#### ■ Instrumentation

À partir de 1982, un système de surveillance a été mis en place par le CETE Normandie-Centre et l'Université de Caen sur les glissements de terrain du « Cirque des Graves » (superficie de 60 ha) et des « Fosses du Macre » (superficie de 20 ha). Il comprend :

- 3 tubes inclinométriques ;
- 21 puits et tubes piézométriques crépinés ouverts (dont un automatique) ;
- 90 embases permettant de réaliser des mesures au moyen d'une nivelle à vis micrométrique ;
- 87 repères topographiques placés sur des plots en béton ;
- 2 dispositifs de surveillance comportant des tassomètres reliés à des feux de signalisation permettant ainsi d'interrompre la circulation sur la RD513 en cas de reprise notable des mouvements affectant la chaussée (figure Cas3.2).

Le suivi régulier s'est progressivement arrêté à partir de 1988 puis a repris à partir de 2002 à l'initiative de l'Université de Caen.

Figure Cas3.1  
Glissement de terrain du « Cirque des Graves » en mars 2001



Crédit photo : DIREN Basse-Normandie - SIDPC du Calvados

Figure Cas3.2  
Feu permettant l'interruption de la circulation sur la RD513 au niveau de la photographie de la figure Cas3.1 en cas de reprise des mouvements d'affaissement de la chaussée



Crédit photo : DIREN Basse-Normandie - SIDPC du Calvados

Aujourd'hui, l'instrumentation comprend :

- 8 tubes inclinométriques ;
- 15 tubes piézométriques crépinés ouverts (dont 4 automatiques) ;
- 18 repères topographiques placés sur des plots en béton ;
- 1 station GPS en temps réel ;
- 1 station météorologique.

## ■ Résultat

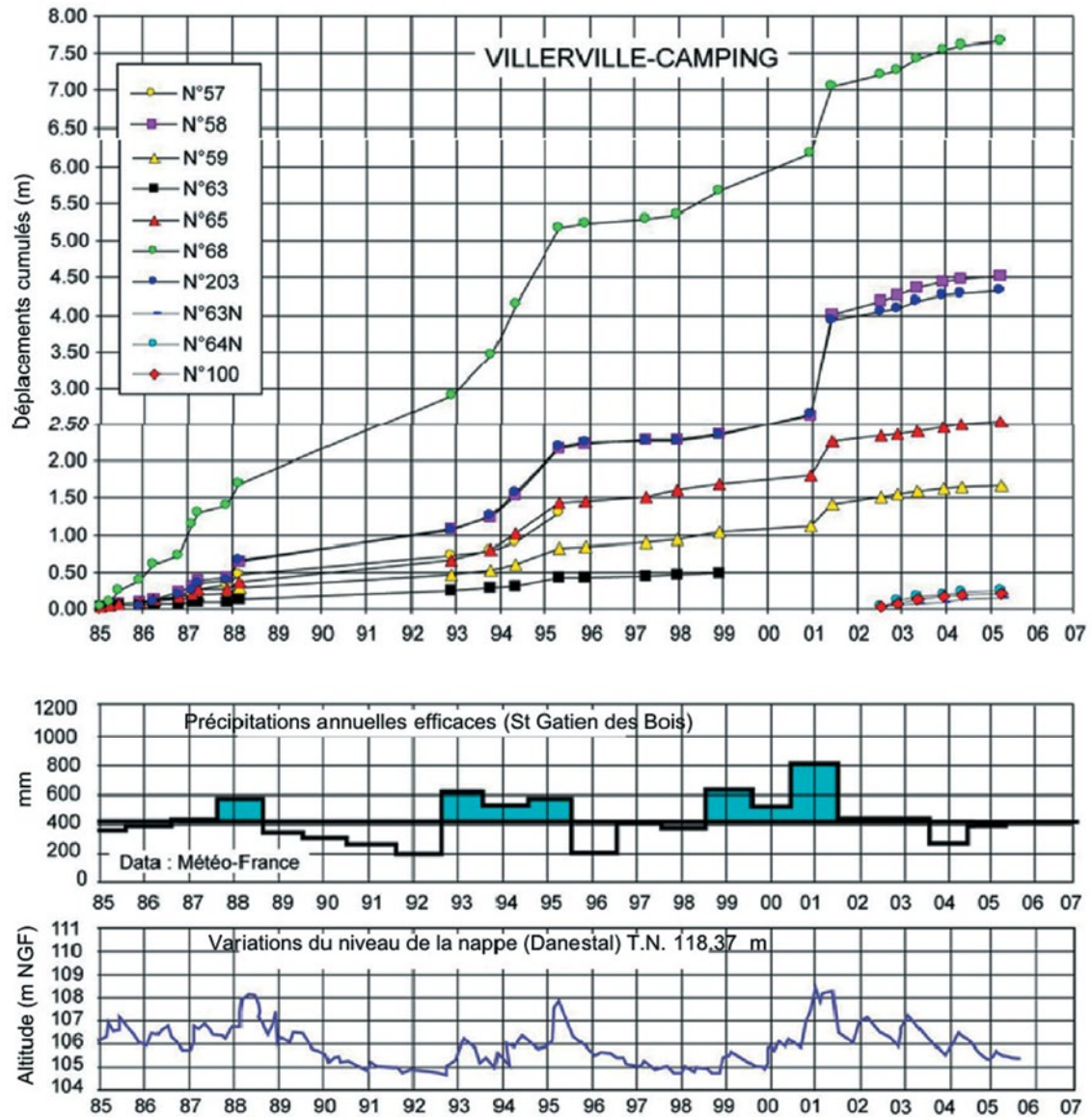
L'objectif de l'instrumentation des deux glissements de terrain est double :

- suivi de l'évolution des phénomènes ;
- définition de corrélations entre déplacements, pression interstitielles et pluviométrie.

Les mesures réalisées depuis 1982 ont permis de mettre en évidence :

- une alimentation rapide des circulations d'eau dans les formations superficielles de pente (existence d'un délai de 4 à 5 jours entre le début d'un épisode de pluie efficace positive et l'élévation du niveau piézométrique) ;
- un seuil piézométrique critique au-delà duquel les déplacements en surface s'accroissent. L'existence de ce seuil explique les phases d'accélération brutale des déplacements en surface observées en 1988, 1995 et 2001 succédant à un (ou plusieurs) hiver(s) très pluvieux (figure Cas3.3).

Figure Cas3.3  
 Comparaison entre les déplacements en surface, les mesures piézométriques et les données pluviométriques depuis 1985



Source : Université de Caen, BRGM et Météo France



# Nice Havrais, Sainte-Adresse (Seine-Maritime)

### Surveillance d'un glissement de terrain de grande ampleur

#### ■ Objet

Le versant côtier de la baie de Seine au niveau du quartier résidentiel du Nice Havrais à Sainte-Adresse, près du Havre, est affecté par un glissement de terrain ancien et de grande ampleur, déjà connu lors de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Le versant a cependant été urbanisé au début du XX<sup>e</sup> siècle moyennant la réalisation de travaux de drainage importants. Le glissement de terrain s'est réactivé une première fois en 1925, puis en 1944 suite aux différentes dégradations subies par le site pendant la Seconde Guerre Mondiale. Les mouvements se poursuivent depuis cette date (figure Cas4.1). La masse en mouvement est constituée de panneaux de craie effondrés, de sables remaniés et de colluvions de pente. Elle est le siège d'importantes circulations d'eau alimentées par les nappes de la Craie et des Sables Verts de l'Albien. La surface de glissement se situe à l'interface entre les éboulis et les argiles du Kimméridgien qui présentent de très faibles caractéristiques mécaniques.

#### ■ Enjeux

Seules deux habitations ainsi que des voiries subsistent actuellement dans la zone du glissement de terrain (environ 3 ha).

#### ■ Instrumentation

Le glissement de terrain a été instrumenté et suivi pendant deux périodes : 1985 - 1991 puis à partir de 2004.

Entre 1985 et 1991, le CETE Normandie-Centre a mis en place :

- 5 tubes inclinométriques ;
- 6 tubes piézométriques crépinés ouverts ;
- 12 embases permettant de réaliser des mesures au moyen d'une nivelle à vis micrométrique ;
- 1 pendule inverse équipé de deux capteurs potentiométriques de déplacement et d'un câble vertical dans un forage de diamètre égal à 40 cm, ancré à 13,2 m de profondeur en deçà de la surface de glissement située à 12 m de profondeur (figure Cas4.2). La course utile du dispositif est environ égale à 30 cm. Le flotteur annulaire, réalisé à l'aide de bouées maritimes, exerce une poussée verticale d'environ 650 N. La cuve annulaire métallique est traitée contre la corrosion et est partiellement enterrée. L'eau dans la cuve contient de l'antigel et en surface une couche d'huile évite l'évaporation ;



- 1 sonde électrique de mesure de pression interstitielle placée dans un tube piézométrique crépiné ouvert. La liaison entre les trois capteurs de déplacement et de mesure de pression interstitielle et la centrale était filaire, le pas d'acquisition fixé à 24 h. Les données étaient récupérées périodiquement (2 à 3 fois par an) par un transfert manuel sur ordinateur. Le dispositif automatisé a fonctionné entre le 1<sup>er</sup> octobre 1989 et le 31 juillet 1991.

Figure Cas4.1  
Rue et escalier affectés par le glissement de terrain



Figure Cas4.2  
Cuve et flotteur du pendule inverse



Crédit photos : CEBTP

À partir de 2004, l'instrumentation mise en place par le CEBTP est composée de :

- 7 tubes inclinométriques (trois relevés manuels par an) ;
- 3 tubes piézométriques crépinés ouverts (trois relevés manuels par an) ;
- 10 embases pour des mesures au moyen d'une nivelle (trois relevés manuels par an) ;
- 1 tube inclinométrique équipé de 6 sondes inclinométriques biaxiales fixes, dont 1 située à 12,5 m de profondeur au niveau de la surface du glissement ;
- 1 sonde électrique de mesure de pression interstitielle placée dans un tube piézométrique crépiné ouvert.

Une centrale d'acquisition prend en charge les 6 sondes inclinométriques fixes et la sonde de mesure de pression interstitielle, le pas d'acquisition est fixé à 24 h. Ce dispositif de mise en observation peut être transformé en dispositif de surveillance avec la transmission en temps réel des mesures à l'opérateur de surveillance (services techniques de la mairie de Sainte-Adresse) *via* une ligne téléphonique et deux modems. La valeur de la vitesse journalière des déplacements au niveau de la surface de glissement pouvant être considérée comme seuil d'alerte a été fixée à 10 mm/j.

Les données pluviométriques sont fournies par la station météorologique voisine du Cap de la Hève.

## ■ Résultat

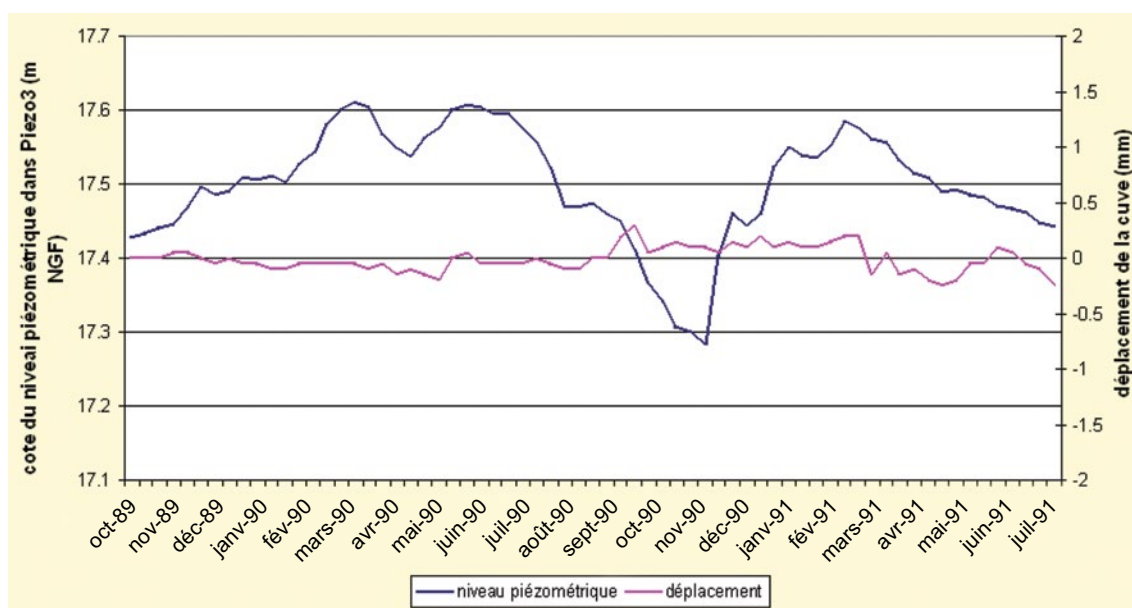
L'objectif de l'instrumentation de ce site est double : suivi de l'évolution du phénomène et définition de corrélations entre déplacements, pression interstitielles et pluviométrie.

La période de fonctionnement du premier dispositif automatisé (1<sup>er</sup> octobre 1989 - 31 juillet 1991) a correspondu à une période de déficit pluviométrique et de déplacements pratiquement nuls (figure Cas4.3).

Les mesures réalisées depuis 2004 ont permis de mettre en évidence :

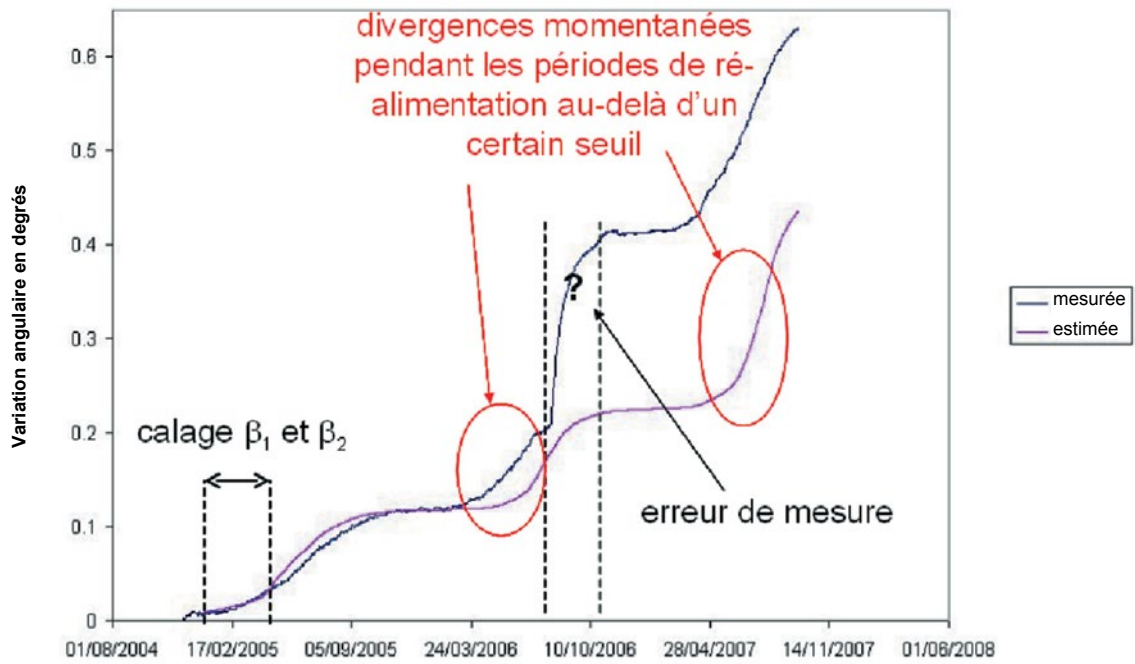
- une alimentation lente de la nappe (corrélation entre le niveau piézométrique et le cumul de précipitations sur 6 mois) ;
- une faible plage de variation du niveau piézométrique ;
- un seuil piézométrique critique au-delà duquel les déplacements en surface s'accroissent ;
- une relation non linéaire entre la déformation angulaire  $\Delta\alpha$  au jour (i+1) mesurée par la sonde inclinométrique fixe à 12,5 m de profondeur et le niveau piézométrique h au jour (i) :  $\Delta\alpha(i+1) = \beta_1 \cdot \exp\left(\frac{h(i)}{\beta_2}\right)$ , avec  $\beta_1$  et  $\beta_2$  constantes (figure Cas4.4).

Figure Cas4.3  
Résultats du suivi sur la période 1989-1991



Source : Cerema/DTerNC

Figure Cas4.4  
Résultats du suivi sur la période 2005-2007



Source : CEBTP

# Mont Cabassou, Rémire-Montjoly (Guyane)

## Surveillance d'un glissement de terrain de grande ampleur

### ■ Objet

Le 19 avril 2000, suite à des pluies exceptionnelles, un glissement de terrain de grande ampleur (400 000 m<sup>3</sup>) s'est déclenché au niveau du versant nord du Mont Cabassou à Rémire-Montjoly, près de Cayenne. Le mouvement, qui présentait un mécanisme complexe, a évolué en coulée boueuse très rapide (consistance quasi-liquide) recouvrant le tracé de la RN3 sur un linéaire de 200 m et détruisant une usine. Ce glissement - coulée a coûté la vie à dix personnes.

Culminant à + 157 m NGG, le Mont Cabassou est l'un des nombreux « mornes » se détachant de la surface d'érosion que constitue la plaine côtière de l'Île de Cayenne. Il s'agit d'un dôme de gneiss, recoupé par des filons de microgabbros et recouvert d'une épaisse couverture de latérites et de colluvions de pente (de l'ordre d'une vingtaine de mètres). Le substratum rocheux fissuré est le siège d'une nappe captive alimentée par les infiltrations des eaux météoriques au niveau du sommet du morne. Un glissement de terrain ancien présentant une cinématique lente était connu dans la partie inférieure argileuse du versant nord du morne. Le facteur déclenchant du glissement de terrain du 19 avril 2000 pendant la grande saison des pluies est une très forte mise en charge hydraulique dans le substratum rocheux.

### ■ Enjeux

Seul un groupe d'habitations subsiste en aval du glissement de terrain. La RN3 a été déviée à plus de 250 m de la limite de propagation maximale du glissement du 19 avril 2000.

### ■ Instrumentation

L'objectif principal de la surveillance mise en place sur ce site est de détecter d'éventuelles reprises de mouvements de terrain de grande ampleur. La partie inférieure du versant nord du morne a été instrumentée et suivie à partir de février 2004. La surveillance comprend :

- 2 tubes inclinométriques en PVC de hauteurs égales à 31 et 38 m, ancrés sur une hauteur d'au-moins 5 m dans le substratum rocheux stable (figure Cas5.1) ;
- 2 tubes piézométriques ouverts, crépinés sur une hauteur de 5 m dans la partie supérieure fissurée du substratum rocheux (figure Cas5.1) ;
- 6 repères topographiques placés sur une même ligne de niveau et sur des massifs en béton de section carrée 0,35 m x 0,35 m, ancrés à 0,7 m de profondeur (figure Cas5.2).

Les mesures sont réalisées sur le site par le LBTPG et un géomètre-expert (1 à 6 relevés manuels par an, généralement une mesure avant et après la grande saison des pluies)

puis transmises au Cerema/DTerNC où les données inclinométriques brutes sont traitées au moyen du logiciel CAPITOU 2000 (Cerema/DTerSO).

Figure Cas5.1  
Têtes d'un tube inclinométrique et d'un tube piézométrique  
(cerclées en bleu)



Figure Cas5.2  
Repères topographiques (cerclés en bleu)



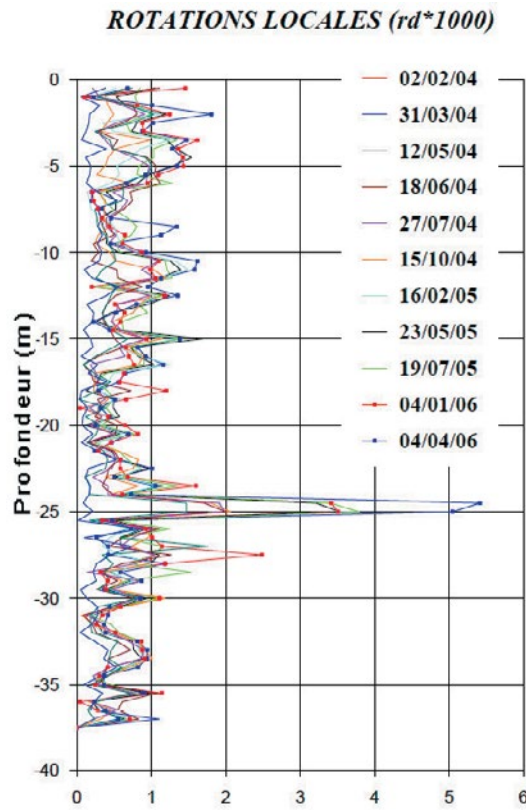
Crédit photos : Cerema/DTerNC

## ■ Résultat

Les mesures réalisées entre 2004 et 2010 ont permis de mettre en évidence :

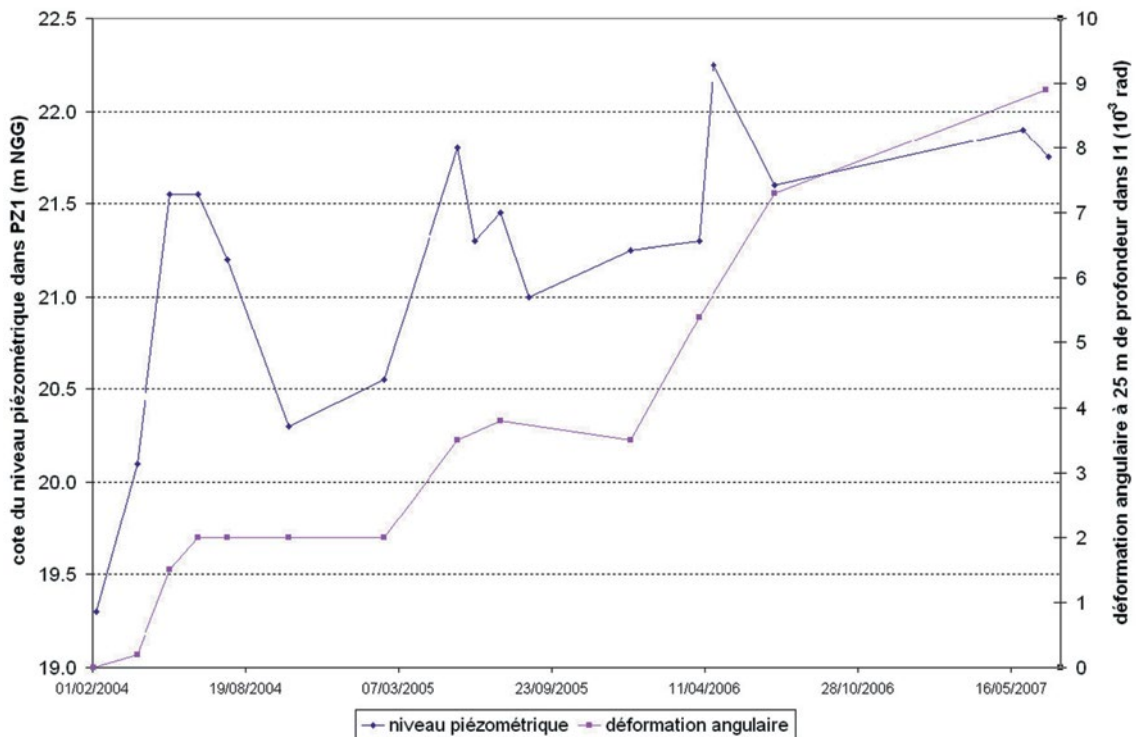
- l'existence de très faibles mouvements résiduels (figure Cas5.3) le long de la surface de rupture du glissement de terrain ancien connu dans la partie inférieure du versant nord du morne. Ces mouvements se produisent au cours des mois très pluvieux (cumul mensuel de pluies supérieur à 600 mm avec plusieurs journées caractérisées par un cumul quotidien de pluies supérieur à 100 mm) et lorsque le niveau piézométrique de la nappe est supérieur à une certaine valeur seuil (seuil critique), figure Cas5.4 ;
- la persistance de très fortes charges hydrauliques dans le substratum rocheux (hauteurs d'eau maximales en charge comprises entre 17,7 m et 22,7 m) ;
- les variations saisonnières du niveau piézométrique de la nappe captive sont comprises entre 1,2 et 2,3 m ;
- l'existence de mouvements lents de reptation sur l'ensemble du versant (déplacements des repères topographiques compris entre 7 et 13 mm/an en moyenne).

Figure Cas5.3  
Suivi inclinométrique de 2004 à 2006 (surface de rupture à 24 m de profondeur).



Source : Cerema/DTerNC

Figure Cas5.4  
Résultats du suivi sur la période 2004- 2007



Source : Cerema/DTerNC



# Sallèdes (Puy-de-Dôme)

### Surveillance d'un glissement de terrain de grande ampleur (site expérimental)

#### ■ Objet

Le site expérimental de Sallèdes, géré par le Cerema/DTerCE, occupe un versant naturel instable de pente moyenne égale à 7 degrés. Il est constitué par une couche épaisse de 6 à 10 m de colluvions argileuses reposant sur un substratum marno-calcaire à litage horizontal. La surface de glissement se développe au niveau de l'interface entre les colluvions argileuses et le substratum.

Depuis la fin des années 1970, les recherches menées sur ce site ont suivi deux axes principaux :

- l'étude du comportement mécanique du versant en fonction de l'évolution des pressions interstitielles et de la construction de deux remblais expérimentaux (A en 1978 et B en 1980). L'édification du remblai A de 5,5 m de haut a conduit à la rupture brutale du versant au cours du chantier. La construction du remblai B de 3,4 m de haut, voisin du remblai A, n'a pas entraîné la rupture du versant ;
- l'étude du fonctionnement hydrogéologique du versant (étude de la zone non saturée et des relations entre la pluviométrie, les pressions interstitielles et le débit d'un cours d'eau en aval immédiat du site).

#### ■ Enjeux

Une route départementale (RD14) à faible trafic traverse la zone de glissement et constitue l'unique enjeu sur ce site.

#### ■ Instrumentation

L'instrumentation mise en place lors de l'édification du remblai A et suivie jusqu'à la rupture comportait :

- 8 tubes inclinométriques ;
- 54 sondes de mesure de pression interstitielle à contre-pression (sondes pneumatiques à volume constant) ;
- 13 embases permettant de réaliser des mesures au moyen d'une nivelle à vis micrométrique ;
- 109 repères topographiques ;
- 4 extensomètres ;
- 2 capteurs de pression totale ;
- 2 témoins de rupture.



L'instrumentation mise en place lors de l'édification du remblai B et suivie jusqu'en 1994 comportait :

- 11 tubes inclinométriques ;
- 19 sondes de mesure de pression interstitielle à contre-pression ;
- 8 embases permettant de réaliser des mesures au moyen d'une nivelle à vis micrométrique ;
- 26 repères topographiques ;
- 4 extensomètres ;
- 2 capteurs de pression totale ;
- 4 témoins de rupture.

L'instrumentation mise en place à partir de 2004 dans le cadre du projet RiskYdrogeo dans la zone du remblai B comporte :

- 2 tubes inclinométriques (permettant des relevés manuels) ;
- 2 tubes piézométriques crépinés ouverts équipés de 2 capteurs de pression relative ;
- 1 pluviomètre ;
- 1 capteur de hauteur d'eau permettant la mesure du débit du ruisseau en aval du site expérimental au niveau d'un seuil construit dans son lit (figure Cas6.1). Ce seuil a une forme complexe, triangulaire en partie inférieure et rectangulaire en partie supérieure rendant l'écoulement critique. Une visite mensuelle est réalisée pour entretenir le seuil, éviter les embâcles et réaliser des mesures manuelles de contrôle ;
- 1 centrale d'acquisition autonome (pas d'acquisition : 5 minutes), reliée au réseau téléphonique et pouvant être interrogée à distance.

Figure Cas6.1  
Seuil pour la mesure du débit du cours d'eau en aval du site expérimental.



Crédit photo : Cerema/DTerCE

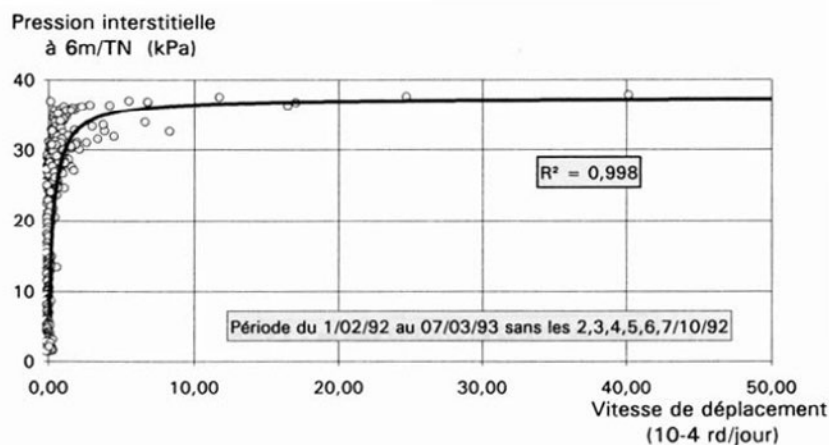
## ■ Résultat

Les mesures réalisées sur ce site à partir de 1978 ont permis :

- de comprendre le fonctionnement hydrogéologique du versant ;
- d'établir des relations entre la pression interstitielle au jour (i+1) d'une part et la pression interstitielle au jour (i), l'évapotranspiration et la pluviométrie d'autre part ;
- d'établir des relations entre la pression interstitielle et le débit du cours d'eau ;
- de mettre en évidence un seuil piézométrique critique au-delà duquel les déplacements en surface s'accélèrent (figure Cas6.2) ;
- d'affiner les méthodes d'analyse de stabilité des versants (analyse probabiliste, calcul en déformation, prise en compte du fluage) et de dimensionnement de solutions de confortement (clouage vertical par pieux) et de stabilisation (drainage).

Figure Cas6.2

Relation entre déplacements et pressions interstitielles (T.N. signifie « terrain naturel »). L'axe horizontal présente les vitesses de rotation du tube inclinométrique au niveau de la surface de rupture ; ces dernières sont étroitement corrélées aux vitesses de déplacement en surface sur ce site.



Source : Cerema/DTerCE



## Mise en observation et suivi des sites instables

### Conception d'un système de confortement

# Petit Caporal, Boulogne-sur-Mer (Pas-de-Calais) ex RN1 – Liaison A16-Port

Cas7

### Stabilité de la partie aval d'un versant de colline

#### ■ Objet

Le site du Petit Caporal se trouve sur le flanc d'une colline bordée dans sa partie aval par la Liane à l'entrée de Boulogne-sur-Mer (figure Cas7.1). Les mouvements concernent une zone d'environ 220 m de long pour 200 m de large avec une pente d'environ 5,5 degrés et la surface de rupture plane se situe à environ 7 m de profondeur.

Figure Cas7.1  
Vue d'ensemble du site du Petit Caporal



Crédit photo : Cerema/DTerNP

#### ■ Enjeux

Voies de circulation, réseaux d'eau et de gaz, habitations

#### ■ Instrumentation

De nombreux dispositifs de mesures ont été mis en place pour suivre l'évolution du site : pluviomètre, sondes de température, piézomètres, inclinomètres, pendule-inverse (figure Cas7.2). Les mesures réalisées automatiquement plusieurs fois par jour permettent après lissage de suivre les déplacements du site (figure Cas7.3).

#### ■ Résultat

Le recueil de ces données a permis de suivre depuis les années 1970 le comportement du glissement de terrain. Il est en fait délimité dans sa longueur par la RN1 à l'amont et le cours d'eau de la Liane à l'aval. Depuis les années 1980, divers travaux ont été

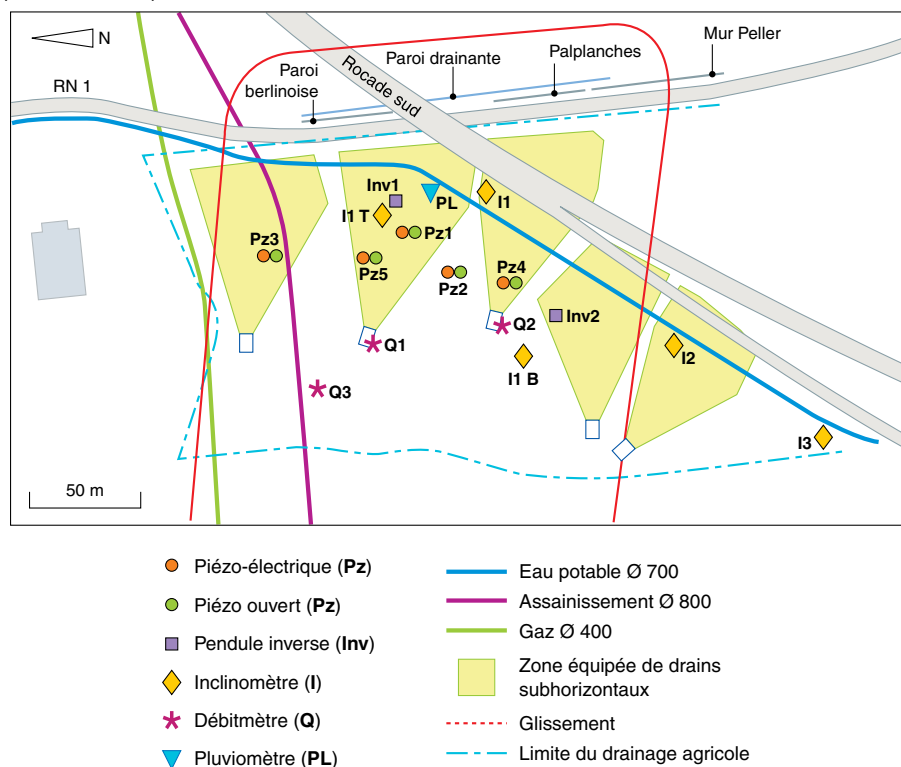
entrepris pour stabiliser ce site avec notamment la pose de drains subhorizontaux. Une paroi drainante a été mise en place en amont du glissement au niveau de la RD940 pour limiter les apports d'eau en provenance du haut de la colline. Des pompes permettant l'évacuation de l'eau sont aussi présentes à ce niveau. Ces travaux ont permis de réduire les déplacements annuels à une valeur comprise entre 5 et 10 mm environ alors qu'ils étaient de l'ordre de plusieurs centimètres auparavant.

L'aménagement de la zone dans le cadre de l'opération A16-Port a nécessité de stabiliser un peu plus le glissement de terrain. Deux mesures ont donc été prises :

- la première consistait à remplacer dans la partie basse du glissement les terrains présentant des caractéristiques médiocres par des matériaux graveleux présentant un angle de frottement relativement élevé. Cette opération, débutée en 1999, a été très vite abandonnée car les bûches ouvertes au bas du glissement faisaient craindre pour la stabilité d'ensemble du versant. Les mesures effectuées instantanément avec le pendule inverse montraient des déplacements relativement importants sur des périodes de temps assez courtes (figure Cas7.3) ;
- la seconde mesure a consisté à clouer le glissement en réalisant durant l'année 2002, 400 pieux à la tarière creuse d'un diamètre de 0,8 m et de 16 m de profondeur. Ces pieux, instrumentés au moyen de cordes vibrantes, interceptent le plan de glissement majeur et permettent en théorie de ralentir voire d'arrêter celui-ci. Très rapidement, des efforts significatifs ont été mesurés dans les pieux.

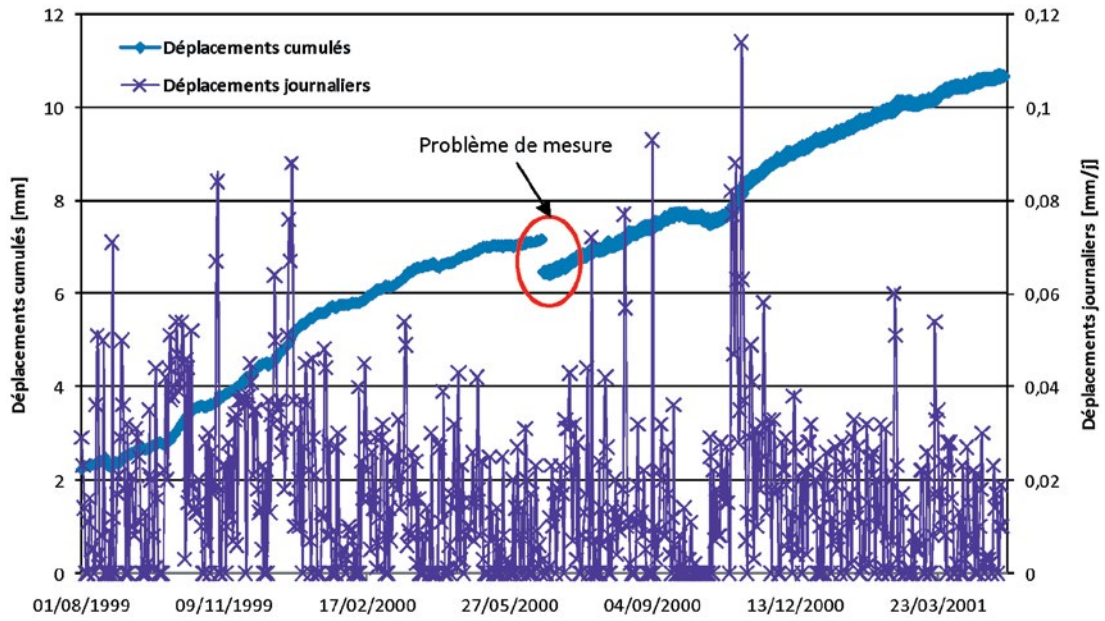
Depuis cette date, le glissement de terrain ralentit peu à peu mais il semble qu'un mouvement résiduel perdure, correspondant à un « écoulement » du sol entre les pieux.

Figure Cas7.2  
Schéma d'implantation des dispositifs de mesure.



Source : Cerema/DTerNP

Figure Cas7.3  
 Mesures obtenues au moyen du pendule-inverse.



Source : Cerema/DTerNP



# Piton de la Becqua, La Perrière (Savoie)

### Surveillance d'une instabilité rocheuse jusqu'à la rupture

#### ■ Objet

Suite à un éboulement rocheux de 1000 m<sup>3</sup> survenu en 1974 sur la commune de La Perrière dans la vallée de Bozel en Savoie, une étude spécifique d'aléa a été réalisée par le Cerema/DTerCE. Elle a mis en évidence un compartiment rocheux potentiellement instable d'environ 1 500 m<sup>3</sup> au niveau du Piton de la Becqua en amont du hameau Saint-Jean. Cet éperon de grès et de schistes a été instrumenté dès 1975 pour détecter d'éventuels mouvements. Les mouvements mesurés s'amplifiant à partir de l'hiver 1990-1991, une surveillance automatisée a été mise en place en 1992 et a été poursuivie après la construction de deux merlons pare-blocs en 1996 et en 1997 pour protéger le hameau vis à vis d'aléas secondaires.

#### ■ Enjeux

En 1999, le hameau Saint-Jean (qui comprend la mairie de La Perrière) comptait environ 350 habitants. Il était partiellement protégé contre un éboulement par deux merlons pare-blocs.

#### ■ Instrumentation

Le système de télésurveillance mis en place sur ce site en 1992 comprenait :

- trois capteurs de déplacement potentiométriques linéaires (course maximale égale à 125 mm, précision égale à  $\pm 0,01$  mm, figure Cas8.1), dont un de référence permettant de mesurer l'écartement des fractures délimitant le compartiment instable ;
- une sonde de température PT100 (étendue de mesures :  $-30^{\circ}\text{C}$  à  $+72^{\circ}\text{C}$ ).

Il a été complété par :

- deux ensembles de repères permettant des mesures manuelles d'écartement de fractures (au moyen d'un mètre ruban ou d'un pied à coulisse) pour recalibrer les données des capteurs de déplacement automatisés ou poursuivre la surveillance en cas de panne de ces derniers (Figure Cas8.2) ;
- dix cibles géodésiques pour la réalisation de mesures ponctuelles par distancemétrie infrarouge.



Figure Cas8.1  
Capteur de déplacement automatisé



Figure Cas8.2  
Repères pour mesures manuelles



Crédit photos : Cerema/DTerCE

Le système d'acquisition (centrale et ordinateur dédié) a été installé dans les locaux de la mairie de La Perrière, le personnel municipal assurant le suivi du site et transmettant les données au Cerema/DTerCE. Un logiciel, mis au point spécifiquement par le Cerema/DTerCE, a permis la gestion complète de l'installation sur le site, du traitement des mesures brutes aux messages d'alerte téléphoniques en cas de dépassement de seuil d'un capteur. Le pas d'acquisition a été fixé à 1 heure, puis ramené à 15 minutes pendant la crise terminale. Les liaisons entre les capteurs et le système d'acquisition étaient filaires.

Le dispositif de télésurveillance était intégré dans le Plan de secours spécialisé (PSS) communal.

## ■ Résultat

La surveillance a permis :

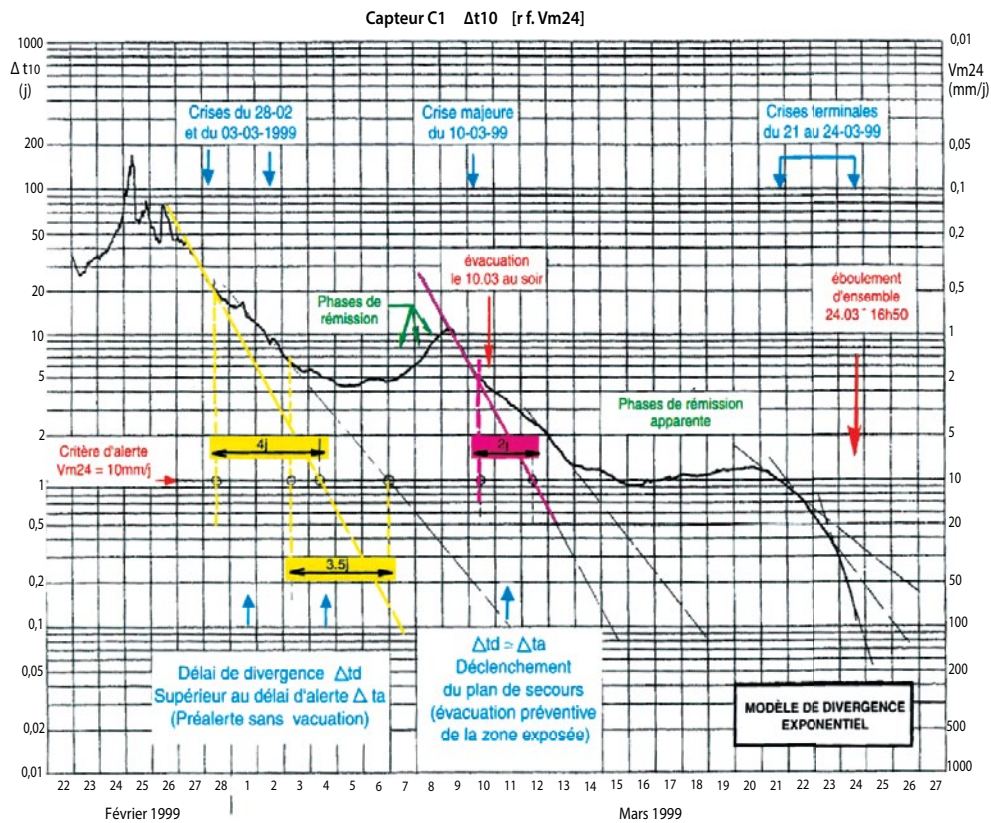
- de décrire le régime cinématique du compartiment instable depuis 1975 : la vitesse des mouvements a augmenté nettement, mais de manière discontinue dans le temps (existence de paliers de plus en plus courts). Elle est passée d'environ 4 mm/an en 1975 à 500 mm/j le jour de la rupture (24 mars 1999, figure Cas8.3). Cette évolution traduit la progression des ruptures internes (selon un mécanisme principal de glissement), des phénomènes de fatigue dans le massif rocheux et une réactivité de plus en plus forte de ce dernier aux conditions climatiques (précipitations et gel) ;
- d'identifier la date à partir de laquelle l'instabilité rocheuse a évolué nettement vers la rupture (1<sup>er</sup> mars 1999, date à laquelle la vitesse des mouvements a dépassé le seuil d'alerte fixé à 1mm/j) ;
- de tester, au cours de la crise terminale, plusieurs modèles de divergence (figure Cas8.4). Les pronostics des experts quant au délai de rupture se fondent sur les résultats de ces modèles de divergence ;
- de participer à la gestion de la crise terminale, le modèle de divergence validé ayant été considéré comme un outil fiable d'aide à la décision.

Figure Cas8.3  
Cicatrice de l'éboulement du 24 mars 1999



Crédit photo : Cerema/DTerCE

Figure Cas8.4  
Application du modèle de divergence exponentiel à la gestion de grise



Source : Cerema/DTerCE

Le modèle de divergence le plus approprié au suivi de l'évolution temporelle du site est un modèle exponentiel : la variable étudiée dépend de la vitesse moyenne calculée sur une période glissante de 24 heures, réactualisée toutes les 15 minutes pendant la crise terminale. Le seuil de vitesse au-delà duquel les experts estimaient que le site évoluerait irrémédiablement vers la rupture a été fixé a priori à 10 mm/j. Le modèle de divergence permet d'estimer le délai entre l'instant d'une mesure et l'instant où la vitesse des mouvements atteint la valeur seuil préalablement définie.

L'analyse des résultats du modèle de divergence a notamment permis :

- d'activer, 14 jours avant la rupture, la phase du Plan de secours spécialisé (PSS) prévoyant l'évacuation de la population menacée (67 habitants), la coupure d'une route départementale et la mise en place de la cellule de crise ;
- de maintenir la décision d'évacuation de la population pendant une longue période de rémission de 7 jours, durant laquelle la vitesse des mouvements s'est stabilisée à une valeur élevée, proche de la valeur seuil de 10 mm/j.

L'éboulement du 24 mars 1999 a concerné un volume total de matériaux égal à 1500 m<sup>3</sup>, le bloc principal d'un volume d'environ 60 m<sup>3</sup> s'est arrêté dans le versant 70 m en amont du merlon pare-bloc principal. La décision d'évacuation de la population a été levée quelques jours après suite à la réalisation de travaux de purge et au reprofilage à l'explosif de la cicatrice de l'éboulement.

# Versant des Ruines, Séchilienne (Isère)

### Surveillance d'un mouvement de versant de grande ampleur

#### ■ Objet

Le versant des Ruines est situé en rive droite de la basse vallée de la Romanche sur la commune de Séchilienne, à environ 26 km au sud-est de Grenoble. L'ensemble du versant, sur une superficie de 70 ha, est concerné par un mouvement de grande ampleur caractérisé par une cinématique lente (vitesses de 1 à 10 cm/an). Les mécanismes de déformation du versant sont complexes : décompression du massif rocheux, fatigue, basculement vers la vallée des parties supérieures de lanières constituées de schistes et de grès, affaissement de la partie sommitale du versant, etc. Le mouvement de versant a été initié par le retrait du glacier qui occupait la vallée il y a 10 000 ans environ. Au sein du mouvement de versant, s'individualise un compartiment, d'une superficie de 3 ha et d'un volume de 3 millions de m<sup>3</sup>, appelé « zone frontale » : les mouvements y sont beaucoup plus grands et se sont accélérés nettement à partir de l'hiver 1984-1985. La rupture de l'ensemble de cette zone frontale, selon une succession de plusieurs éboulements en grande masse, est probable. Le volume en mouvement interdisant toute solution de confortement ou de stabilisation, une surveillance a été mise en place dès 1985 (figure Cas9.1).

#### ■ Enjeux

Les enjeux menacés sont situés au fond de la vallée de la Romanche. Une instabilité sur ce site pourrait conduire au remplissage de la vallée très étroite puis à la création d'un lac de barrage naturel et d'une vague se propageant vers la zone urbaine de Grenoble et notamment vers les usines chimiques de Jarrie. Des mesures ont été entreprises pour réduire la vulnérabilité du site. Les 97 habitations du hameau de l'Île Falcon (commune de Saint-Barthélémy-de-Séchilienne) ont été évacuées entre 1997 et 2011. La RD1091 (ex-RN91), qui passait au pied du versant des Ruines, a été déviée en 1986 sur la rive opposée de la Romanche et son nouveau tracé est protégé par un merlon de 12 m de haut capable de contenir l'ensemble du volume éboulé de la zone frontale. Les travaux d'une nouvelle déviation sur le versant opposé de la vallée ont débuté au printemps 2012 et se sont achevés en 2015. Un lit de secours a été aménagé pour la Romanche entre le merlon de protection et l'actuelle RD1091. Une galerie de reconnaissance a été creusée dans le versant opposé de la vallée en vue de la réalisation future d'une galerie de dérivation hydraulique. Un lotissement de la commune de Séchilienne est susceptible d'être inondé en cas de concomitance entre la rupture de la zone frontale et une crue de la Romanche.

#### ■ Instrumentation

Les capteurs intégrés progressivement dans le système de télésurveillance à partir de 1985 sont répartis sur l'ensemble du versant. On compte :

- 33 extensomètres à fil (précision :  $\pm 0,5$  mm, pas d'acquisition : 1 h, figure Cas9.2) ;

- 67 cibles géodésiques qui permettent de réaliser des mesures par distancemétrie infrarouge au moyen d'une station automatisée située dans le terminal de Montfalcon sur le versant opposé (précision :  $\pm 3 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$ , pas d'acquisition : 2 h, figures Cas9.2 et Cas9.3) ;
- 42 repères (trièdres réflecteurs) qui permettent de réaliser, par tout temps, des mesures de distance automatisées au moyen d'un RADAR Ultra Large Bande (ULB) situé dans le terminal de Montfalcon (précision estimée inférieure ou égale à 0,5 mm par kilomètre de trajet soit  $\pm 0.05 \text{ ppm}$ , pas d'acquisition : 1 h, figures Cas9.2 et Cas9.4)
- deux pluviomètres et plusieurs sondes de température PT100.

Figure Cas9.1  
Capteur de déplacement automatisé



Crédit photos : Cerema/DTerCE

Figure Cas9.2  
Repères pour mesures manuelles



Ce dispositif est complété par :

- une sonde de mesure de pression interstitielle installée dans un forage à 140 m de profondeur ;
- deux tubes inclinométriques d'une hauteur comprise entre 145 et 150 m scellés dans des forages profonds ;
- une surveillance par mesures GPS (dont trois mesures en temps réel) ;
- un dispositif d'observation microsismique géré par l'INERIS et l'Université de Grenoble ;
- des extensomètres manuels dans le versant et dans des galeries souterraines.

Figure Cas9.3  
Station de mesures automatisée



Crédit photos : Cerema/DTerCE

Figure Cas9.4  
RADAR ULB



Le logiciel GeSSRI (Gestion de la Surveillance des Sites Rocheux Instables), mis au point par le Cerema/DTerCE en 2000, permet la gestion complète de l'installation, des deux terminaux de mesure sur le site (Montfalcon et Thiébauds) et du centre d'exploitation situé dans les locaux du Cerema/DTerCE à Bron. Le logiciel assure le pilotage des acquisitions, le transfert des informations, la mise à disposition des données, la délivrance de messages d'alerte téléphoniques en cas de dépassement de seuil d'un capteur, *etc.*

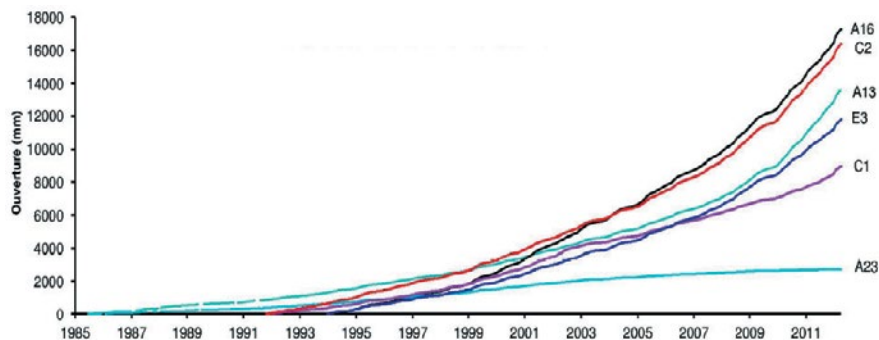
Le dispositif de télésurveillance est intégré dans un Plan de Secours Spécialisé (PSS).

## ■ Résultat

La surveillance a permis :

- de décrire le régime cinématique du versant depuis 1985 : la vitesse des mouvements dans la zone frontale a augmenté nettement, mais de manière discontinue dans le temps (existence de paliers de plus en plus courts). Cette évolution traduit la progression des ruptures internes et des phénomènes de fatigue dans le massif rocheux (figure Cas9.5) et une réactivité de plus en plus forte de ce dernier aux conditions climatiques (précipitations) ;
- de valider le modèle géologique établi à la fin des années 1990, permettant d'expliquer les mécanismes complexes de déformation du versant ;
- de détecter les signes précurseurs d'éboulements importants caractérisés par la divergence des déplacements de cibles (éboulement de 35 000 m<sup>3</sup> en novembre 2006).

Figure Cas9.5  
Ouverture des fractures délimitant la zone frontale depuis 1985



Source : Cerema/DTerCE

Le logiciel GeSRRI, comprenant un module d'expertise avec plusieurs modèles de divergence déjà implémentés, participe à la gestion de la crise terminale comme outil d'aide à la décision.

# RN200, Quarcio (Haute-Corse)

Cas10

## Surveillance d'un glissement de terrain

### ■ Objet

La RN200 relie la commune d'Aléria sur la côte orientale à la ville de Corté au cœur de la Corse. Avant l'année 2000, le tracé de la RN200 comportait une zone particulièrement sinueuse dans laquelle les poids lourds ne pouvaient pas se croiser. Des travaux ont donc été entrepris pour remédier à cette situation. Dès le début des terrassements, à l'automne 2000, le déblai du Quarcio, situé dans des schistes lustrés, a montré des mouvements de terrain importants. Après plusieurs tentatives infructueuses de stabilisation du site (terrassement, butée, drainage vertical, etc.), le chantier a dû être interrompu en 2005 sans toutefois atteindre la cote définitive du projet.

### ■ Enjeux

La RN200 représente un axe routier important pour les liaisons Est-Ouest de la Corse.

### ■ Instrumentation

Après l'arrêt du chantier en 2005, une instrumentation a été mise en place sur le site. Elle a consisté en la pose de trois inclinomètres profonds, de deux cellules de pression interstitielle (notées CPI 1 et CPI 2 sur la figure Cas10.1) et d'une cellule piézométrique avec enregistreur automatique.

### ■ Résultat

Les inclinomètres ont permis de mettre en évidence un glissement fossile, profond d'une dizaine de mètres et non détecté lors des études préalables (voir position de la surface de rupture sur la figure Cas10.1).

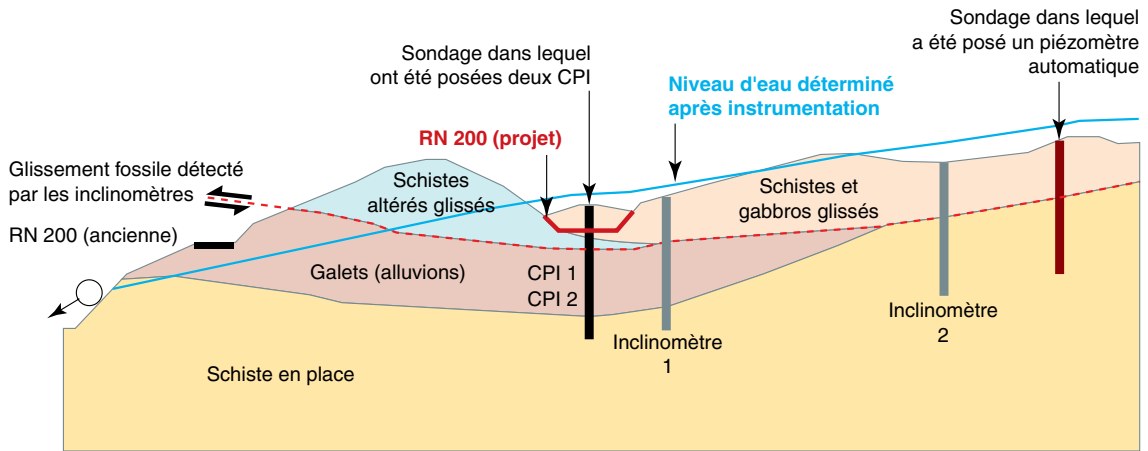
La CPI 2 posée dans le substratum a montré des pressions d'eau très importantes (cote du niveau d'eau au-dessus du terrain naturel) qui ont conduit rapidement à la ruine de cette cellule (figure Cas10.2).

Pour stabiliser le site, le profil en long a été rehaussé et une butée de pied a été mise en place avec des drains verticaux profonds afin de diminuer les surpressions hydrauliques.

Par la suite, les inclinomètres ont permis de montrer l'efficacité du confortement avec une baisse importante des déplacements mesurés (figure Cas10.3).

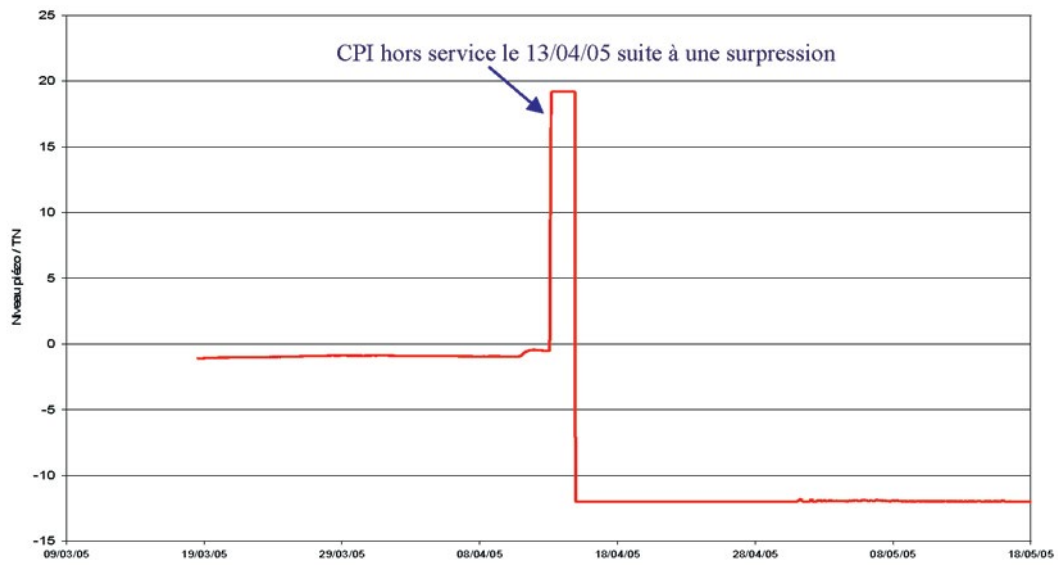


Figure Cas10.1  
Interprétation géologique et hydrogéologique réalisée sur la base des mesures effectuées sur le site



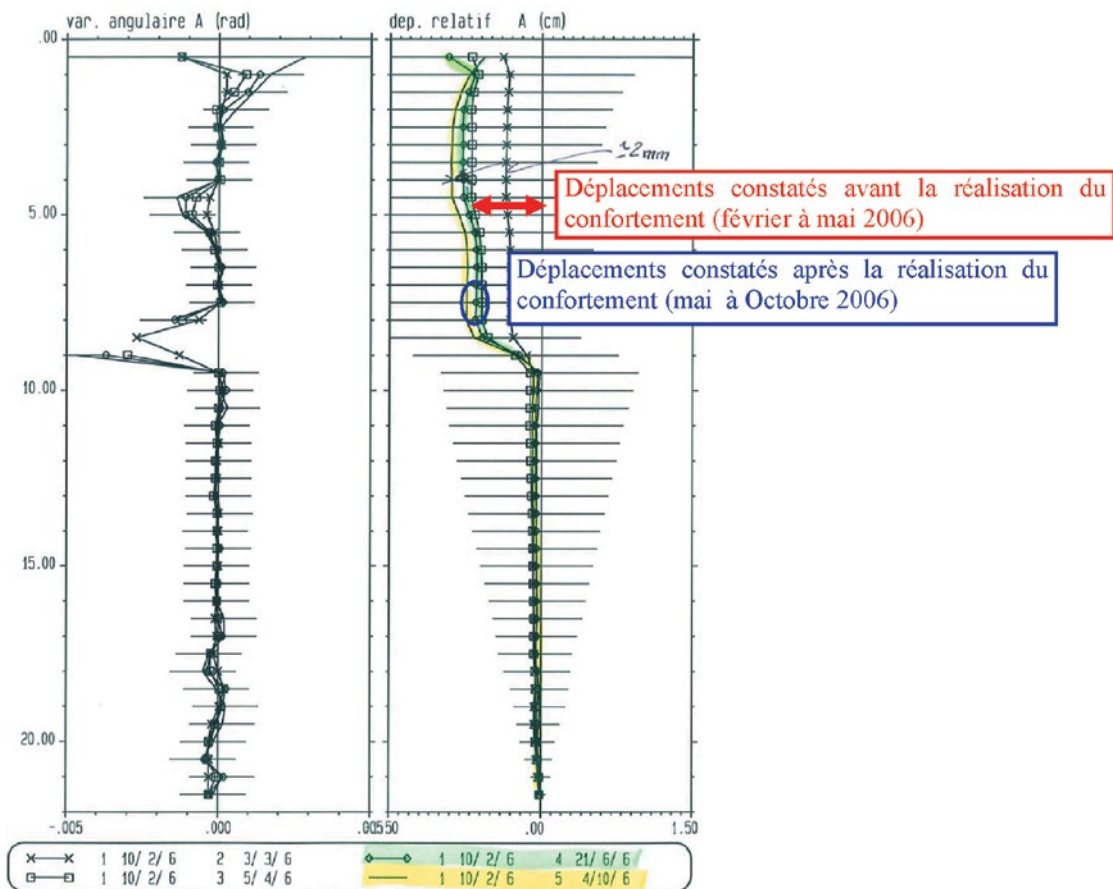
Source : Cerema/DTerMéditerranée

Figure Cas10.2  
Mesures de la pression interstitielle dans la cellule CPI 2



Source : Cerema/DTerMéditerranée

Figure Cas10.3  
 Mesures multi-dates de l'inclinomètre 1 effectuées avant et après la mise en place de la solution de confortement



Source : Cerema/DTerMéditerranée

# Fiche bibliographique

<b>Collection</b> techniques et méthodes		<b>Sous-collection</b> guide technique	
<b>ISSN</b> En cours d'attribution	<b>ISBN</b> Papier 978-2-85782-709-2 Pdf 978-2-85782-710-8 Epub 978-2-85782-711-5	<b>Réf.</b> GT11	
<b>Titre</b> Surveillance des pentes et des falaises instables			
<b>Sous-titre</b> Conception et mise en œuvre des dispositifs de mesure - Acquisition et traitement de l'information			
<b>Coordinateur</b> Céline Bourdeau Lombardi			
<b>Auteurs</b> Ifsttar et Cerema			
<b>Date de publication</b> Février 2016		<b>Langue</b> Français	
<b>Résumé</b> En présence d'un site instable menaçant des personnes et des biens et pour lequel des travaux de stabilisation ou de confortement ne sont pas envisageables, une solution efficace pour gérer le risque consiste à déployer un système de surveillance destiné à générer des alertes. Le présent guide, à destination des gestionnaires, des maîtres d'œuvre et d'ouvrage et des bureaux d'études, détaille la démarche permettant d'élaborer une stratégie de surveillance. Il comporte 4 étapes : la caractérisation du site (chapitre 1), le choix des dispositifs de mesure (chapitre 2), leur déploiement et la surveillance du site (chapitre 3), l'analyse des données (chapitre 4). Il n'inclut pas la mise au point d'une gestion de crise. Des fiches présentant les caractéristiques des capteurs fréquemment utilisés pour la surveillance des sites instables et des études de cas sont présentées en parties 2 et 3.			
<b>Mots clés</b> Mouvement de terrain, instrumentation, surveillance			
<b>Nbre de pages</b> 172			

# Publication data form

<b>Collection</b> techniques and methods		<b>Sub-collection</b> technical guide	
<b>ISSN</b> undergoing attribution	<b>ISBN</b> Print 978-2-85782-709-2 pdf 978-2-85782-710-8 Epub 978-2-85782-711-5		<b>Ref.</b> GT11
<b>Title</b> Supervision of slopes and unstable cliffs			
<b>Subtitle</b> Design and implementation of the devices of measure- Acquisition and data processing			
<b>Coordinator</b> Céline Bourdeau Lombardi			
<b>Authors</b> Ifsttar and Cerema			
<b>Publication date</b> February 2016		<b>Language</b> French	
<b>Summary</b> It is not always possible to stabilize or reinforce unstable slopes. An effective management strategy for reducing loss of life and economic losses due to landslides is to deploy a monitoring system aimed at alerting people exposed to the landslide hazard. This document provides guidelines to design a monitoring system. It is divided into four sections: the characterization of the site (chapter 1), the choice of sensors (chapter 2), the deployment of sensors and site monitoring (chapter 3), the processing of collected data (chapter 4). The main sensors used to monitor unstable slopes and case studies are respectively described in parts 2 and 3.			
<b>Key Words</b> Landslide, sensor, monitoring			
<b>Number of pages</b> 172			



En présence d'un site instable menaçant des personnes et des biens et pour lequel des travaux de stabilisation ou de confortement ne sont pas envisageables, une solution efficace pour gérer le risque consiste à déployer un système de surveillance destiné à générer des alertes. Le présent guide, à destination des gestionnaires, des maîtres d'œuvre et d'ouvrage et des bureaux d'études, détaille la démarche permettant d'élaborer une stratégie de surveillance. Il comporte 4 étapes : la caractérisation du site (chapitre 1), le choix des dispositifs de mesure (chapitre 2), leur déploiement et la surveillance du site (chapitre 3), l'analyse des données (chapitre 4). Il n'inclut pas la mise au point d'une gestion de crise. Des fiches présentant les caractéristiques des capteurs fréquemment utilisés pour la surveillance des sites instables et des études de cas sont présentées en parties 2 et 3.



ISSN : en cours d'attribution  
Ref : GT11  
Photo credit : Cerema  
Février 2016