- 52887

52997

Document public

DOCUP 2002-2006
Cadre d 'intervention C5-03

Projet de recherche : Les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines de La Réunion

Module 3
Sous-module 3.2
Programme 2002

Auscultation des remparts de La Réunion

Moyens à mettre en œuvre

BRGM/RP –52887-FR

décembre 2003

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES & MINIÈRES - BIBLIOTHEQUE CENTRALE

BRGM
3 5000 00109406 8

Document public

DOCUP 2002-2006
Cadre d 'intervention C5-03

Projet de recherche : Les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines de La Réunion

Module 3
Sous-module 3.2
Programme 2002

Auscultation des remparts de La Réunion

Moyens à mettre en œuvre

BRGM/RP-52887-FR
décembre 2003

Étude réalisée dans le cadre du programme de recherche BRGM 02 RIS R10

C. Mathon

Mots clés : Ile de la Réunion, mouvements de terrain de grande ampleur, éboulements, remparts, instabilités, parois rocheuses.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Mathon C. (2003) – Auscultation des remparts de La Réunion. Moyens à mettre en oeuvre. BRGM RP-52887-FR –2 fig, 2 tab, 28p, 5 ann.

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre d'intervention C5.03 du DOCUP (soutenir la recherche et le développement sur les phénomènes de risques naturels), le BRGM s'est engagé dans la réalisation d'un programme de recherche sur les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines à La Réunion.

Le sous-module 3.2 du programme prévoit l'étude de la dynamique des remparts, escarpements rocheux qui délimitent les cirques et les grandes ravines et dont les hauteurs peuvent atteindre, voire dépasser, 1000 m. Une réflexion a été conduite, dans le cadre du programme 2002, sur les moyens à mettre en œuvre pour ausculter ces remparts, en s'inspirant des expériences conduites sur des sites semblables.

L'auscultation et la surveillance – quantifiées - des grands versants, à des fins opérationnelles, a beaucoup emprunté à la métrologie traditionnelle de la géotechnique, dérivée de la métrologie industrielle, ainsi qu'à la topométrie ; par ses exigences elle a cependant conduit à améliorer la fiabilité-en milieu très exposé- des matériels existants, au développement de centrales d'acquisitions intégrant les techniques de communication modernes – radio, réseau commuté, satellites, réseau GSM -, et de logiciels de pilotage des matériels et de traitement des données assurant des fonctions d'aide à la décision.
En matière de capteurs « classiques » *in situ*, l'issue des développements en cours de techniques de transmission fiables permettant de s'affranchir de liaisons filaires avec les centrales d'acquisition est très attendue ; les plus grands espoirs reposent cependant sur des techniques intégrantes telles que l'interférométrie radar au sol, capable de surveiller de grandes surfaces instables avec un appareillage réduit, totalement « déporté » des surfaces surveillées, ou l'écoute micro-sismique, permettant dans certaines conditions de détecter des précurseurs de rupture.

Concernant les remparts des cirques, par leurs hauteurs, leur verticalité et leurs développements, ils se prêtent mal à une transposition de dispositifs existants, et opérationnels, sur les grands versants instables, surveillés dans tous les cas dans le cadre d'opérations de protection civile. En effet, les techniques classiques mettant en œuvre par exemple les distancemètres électro-optiques, ou moins classiques, mais désormais opérationnelles dans de nombreux cas, comme l'interférométrie radar au sol, ne sont pas adaptées à la configuration des remparts qui ne peuvent être « visés » dans de bonnes conditions. Pour les mesures de distances électro-optiques, indépendamment des « fenêtres closes » par temps de brouillard et de fortes pluies, l'éloignement des vis-à-vis et les dénivelées par rapport aux îlets des cirques sont incompatibles avec une précision acceptable des mesures. Concernant l'interférométrie radar au sol, bien que la faisabilité et la qualité de la mesure soit indifférente aux conditions météorologiques, les surfaces à surveiller, *a priori*, sont telles qu'il faudrait multiplier le nombre de radars, d'où un investissement en matériel et en logistique rédhibitoire. Le parti pris a donc été de surveiller ponctuellement les mouvements éventuels des panneaux délimités par les crevasses présentes à l'arrière des falaises, à Maïdo et Mahavel. Le dispositif, constitué à ce jour de capteurs de déplacements potentiométriques (7 à Mahavel, 6 à Maïdo) installés à cheval sur les crevasses en question, sera complété par de la topographie de précision –nivellement et distancemétrie- ainsi que par des mesures inclinométriques « au sol » de manière à déterminer les déplacements absolus des panneaux dans les trois directions de l'espace.

SOMMAIRE

SYNTHÈSE 3

1. INTRODUCTION 6

2. LES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME DE SURVEILLANCE 7

1.1. LES ENTRÉES DU SYSTÈME 7
2.1.1. Paramètres à mesurer 7
2.1.2. Implantation des capteurs 9
2.1.3. Types de capteur 11
.1.4. La fréquence des mesures 11
2.1.5. La redondance des mesures 12

1.2. LE TRAITEMENT DES DONNÉES PAR LE SYSTÈME 13

1.3. LES SORTIES DU SYSTÈME ET LEUR EXPLOITATION 16

1.4. L' IMPLANTATION GÉOGRAPHIQUE DES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME 17

3. EXEMPLES DE SITES SURVEILLÉS 18

4. AUSCULTATION DES REMPARTS DE LA RÉUNION 19

4. BIBLIOGRAPHIE 22

Liste des figures

Figure 1 : Principe de la mesure inclinomètrique 20
Figure 2 : Schéma de principe de l'auscultation des remparts de La Réunion 21

Liste des tableaux

Tableau 1 : Différents matériels d'auscultation et leur utilisation 12
Tableau 2 : Eléments en faveur d'une surveillance automatisée 15
Tableau 3 : Différents systèmes de télétransmission 15

Liste des annexes

ANNEXE 1 : Le site de Nantua (Ain)

ANNEXE 2 : Les ruines de Séchilienne (Isère)

ANNEXE 3 : Falaise de Normandie

ANNEXE 4 : La Clapière (Alpes Maritimes)

ANNEXE 5 : Fiches de matériels utilisées dans l'auscultation des reliefs

GÉODÉSIE TERRESTRE

GÉODÉSIE SPATIALE G.P.S.

PHOTOGRAMMÉTRIE TERRESTRE ET AÉRIENNE

DISTANCEMÈTRE ÉLELECTRO-OPTIQUE

DISTANCEMÈTRE À FIL INVAR

EXTENSOMÈTRE À BASE LONGUE

EXTENSOMÈTRE À BASE COURTE

EXTENSOMÈTRE À FIBRE OPTIQUE

MIRE À VERNIER

PENDULE INVERSE

INCLINOMÈTRE DE FORAGE

STATION D'ÉCOUTE SISMIQUE

1. Introduction

Dans le cadre d'intervention C5.03 du DOCUP (soutenir la recherche et le développement sur les phénomènes de risques naturels), le BRGM s'est engagé dans la réalisation d'un programme de recherche sur les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines à La Réunion.

Le sous-module 3.2 du programme prévoit l'étude de la dynamique des remparts, escarpements rocheux qui délimitent les cirques et les grandes ravines et dont les hauteurs peuvent atteindre, voire dépasser, 1000 m.

Dans le but de comprendre les mécanismes de déformation de ces remparts, deux sites pilotes ont été sélectionnés dans le cadre du projet pour être instrumentés. Pour mener à bien l'auscultation de ces sites (Mahavel dans le massif de la Fournaise et rempart du Maîdo dans le massif du piton des Neiges), une réflexion a été conduite sur les moyens pouvant être mis en œuvre, en s'inspirant des expériences conduites sur des sites semblables.

L'auscultation et la surveillance – quantifiées - des grands versants, à des fins opérationnelles, a beaucoup emprunté à la métrologie traditionnelle de la géotechnique, dérivée de la métrologie industrielle, ainsi qu'à la topométrie ; par ses exigences elle a cependant conduit à améliorer la fiabilité-en milieu très exposé- des matériels existants, au développement de centrales d'acquisitions intégrant les techniques de communication modernes – radio, réseau commuté, satellites, réseau GSM -, et de logiciels de pilotage des matériels et de traitement des données assurant des fonctions d'aide à la décision.

En matière de capteurs « classiques » *in situ*, l'issue des développements en cours de techniques de transmission fiables permettant de s'affranchir de liaisons filaires avec les centrales d'acquisition est très attendue ; les plus grands espoirs reposent cependant sur des techniques intégrantes telles que l'interférométrie radar au sol, capable de surveiller de grandes surfaces instables avec un appareillage réduit, totalement « déporté » des surfaces surveillées, ou l'écoute micro-sismique, permettant dans certaines conditions de détecter des précurseurs de rupture.

Dans le présent rapport seront exposées les techniques actuelles de surveillance, avec quelques exemples de suivis opérationnels, les techniques en devenir, puis celles que l'on a prévu de mettre en œuvre sur deux remparts de La Réunion.

2. Les éléments du système de surveillance

La définition d'un système de surveillance se décompose en trois familles d'éléments dont il faut décider de la composition et de l'organisation :

- l'entrée du système : elle est constituée des paramètres d'évolution représentatifs du phénomène, qui vont faire l'objet d'étude ;

- le mode de traitement : celui-ci transforme les données brutes mesurées *in situ* en grandeurs adaptées à l'interprétation et les met à disposition pour action ;

- l'exploitation : elle comporte l'interprétation, en termes de sécurité, des sorties du système, en vue de définir les alertes et alarmes avec à l'aval les actions à mener dans les différents scénarios possibles qui ont été envisagés.

1.1. LES ENTRÉES DU SYSTÈME

Le choix des paramètres à suivre ou des phénomènes à détecter découle essentiellement des réponses que l'on peut donner aux questions suivantes :

- quoi mesurer ? quoi détecter ? faut-il mesurer un ou plusieurs paramètres ?
- où mesurer ? en un ou plusieurs points ?
- avec quels types de capteurs ?
- à quelle fréquence les mesures doivent-elles être acquises ?
- a-t-on besoin d'une information redondante ?

Par ailleurs, l'inspection visuelle de l'ensemble du site constitue une source riche d'informations à ne pas négliger. Cet examen peut être périodique, ou continu dans les cas d'urgence (présence d'un veilleur sur le site). On peut citer aussi la surveillance par camera vidéo.

2.1.1. Paramètres à mesurer

Les paramètres que l'on cherchera à mesurer sont de deux types :

- paramètres d'évolution du phénomène (c'est-à-dire les grandeurs cinématiques) ;

- paramètres influant sur le mouvement : piézométrie, précipitations, température (cas de la fonte des neiges, par exemple).

L'utilisation de ce dernier type de paramètres suppose qu'un modèle prévisionnel, plus ou moins élaboré, ait été établi.

De façon générale, on cherchera à disposer à la fois des grandeurs immédiatement représentatives du mouvement que sont les grandeurs cinématiques, et des grandeurs

dont l'influence sur le phénomène est connue (de façon qualitative ou par le biais d'un modèle plus ou moins empirique) les pressions interstitielles et les précipitations, voire les vibrations dans les cas de falaises rocheuses ébranlées par des tirs à l'explosif. Dans les cas où ces grandeurs ne sont pas directement interprétables (ce peut être du fait de la connaissance imparfaite que l'on a du phénomène, d'un manque de temps d'observation, etc.) ou lorsque ces grandeurs ne sont pas pertinentes, ou lorsqu'elles ne sont pas accessibles, **on se limitera à la mesure de grandeurs cinématiques.**

La mesure des pressions interstitielles et des apports d'eau par précipitations présente le double intérêt de permettre :

- une meilleure compréhension du phénomène, de son mécanisme et de son évolution dans le temps, ce qui permet d'améliorer la qualité, la fiabilité et la précision de la surveillance ;

- une augmentation du délai disponible entre l'alerte et l'alarme. Cette augmentation se fait malheureusement en général au détriment de la fiabilité de la prévision.

La surveillance des précipitations a été utilisée également à l'échelle régionale l'alerte est lancée lorsqu'un seuil de précipitations est dépassé, correspondant à un aléa fort de glissement de terrain dans toute la région, et des dispositions préventives sont prises.

Le choix des paramètres physiques à mesurer se fait en considérant dans l'ordre :

- le type de phénomène et sa cinématique (mouvements diffus, mouvements ponctuels notamment) ;
- l'expérience et les corrélations régionales dont on peut disposer ;
- les délais de préavis disponibles comparés à ceux nécessaires ;
- la sécurité demandée par le gestionnaire de l'ouvrage ;
- le coût du projet.

Lorsqu'on surveille un glissement de terrain qui a fait l'objet de travaux de stabilisation, les paramètres de contrôle de l'efficacité de l'ouvrage de confortement peuvent également être mesurés. Par exemple. on peut mesurer les débits des drains dans le cas d'un confortement par drainage, le déplacement d'un ouvrage de soutènement, la déformation de clous, etc.

On trouvera ci-après la liste des grandeurs susceptibles d'être mesurées :

- grandeurs cinématiques
  - position (x,y,z),
  - distance (entre un point fixe et un point mobile),
  - déformation (déplacement relatif de deux points mobiles),
  - rotation en un point ;

- météorologie, hydrologie
  - pluviosité,
  - hauteur de neige.
  - température,
  - débit de cours d'eau ;

- hydrogéologie
  - hauteur d'eau des puits,
  - pressions interstitielles,
  - débit de drains ;
- vibrations (cause de déclenchement).

L'émission acoustique a été utilisée comme indicateur de pré-rupture qui précède la phase paroxysmique d'un mouvement. L'interprétation des signaux (comptage, calcul d'énergie, analyse du contenu fréquentiel) s'avère cependant délicate, et aujourd'hui cette méthode n'est pas validée dans une perspective de surveillance.

2.1.2. Implantation des capteurs

Le choix de l'implantation des capteurs est essentiel, puisqu'il peut conditionner la réussite d'une surveillance. Il est lié à une bonne compréhension du mécanisme du phénomène, et de son évolution future.

On dispose *a priori* de plusieurs possibilités pour placer les capteurs de type cinématique :

- dans La partie la plus active du phénomène ;
- en périphérie, afin de surveiller une extension possible des mouvements ;
- en amont, au point de départ du phénomène, dans le cas de mouvements avec une distance de propagation importante ;
- au niveau de l'ouvrage menacé.

Un critère pratique ne peut pas être négligé : l'accessibilité délicates de certaines zones peut rendre très difficile l'installation de capteurs.

Deux options principales se présentent : capteurs au niveau de la zone active du phénomène ou capteurs sur l'ouvrage à protéger. La première procède d'une démarche de prévision de la rupture, alors que la seconde est orientée vers la détection et l'alerte à des fins de sécurité immédiate :

➢ **Capteur dans la partie la plus active du phénomène.**

Le capteur est placé au niveau de la surface de rupture (dans le cas d'un glissement : inclinométrie en forage) ou de la discontinuité active (dans le cas d'un massif rocheux : extensométrie), quand cela est possible ; sinon, on effectue des mesures de déplacements on un ou plusieurs points de la surface. Il faut noter en particulier que l'identification *a priori* des discontinuités les plus actives n'est pas toujours facile dans un massif rocheux parcouru par de nombreuses fractures : c'est normalement au cours de la période d'observation que cette identification a pu être réalisée, à l'aide de repères ou de témoins placés sur un grand nombre de discontinuités. Il faut également garder à l'esprit que le phénomène peut se modifier dans le temps : une surface de rupture dans un glissement peut devenir inactive au profit dune autre. Pour les phénomènes à propagation importante (coulée boueuse, chute de blocs, etc.), on cherchera à installer des capteurs ou des détecteurs très à l'amont dans la trajectoire, pour gagner en délai d'alarme. Lorsque l'on craint une

extension latérale ou régressive du phénomène, venant déstabiliser des zones actuellement stables, on peut également être conduit à installer des capteurs de déplacement dans les zones concernées.

➢ **Capteur situé au voisinage immédiat de l'ouvrage.**

Si l'on ne peut aisément accéder au cœur du phénomène (inaccessible physiquement, ou mal localisé : falaise libérant çà et là des blocs, par exemple), ou si l'on veut doubler une mesure effectuée dans le glissement, on peut être conduit à une solution de suivi de déformation, ou de détection (seuil de déformation admissible de l'ouvrage) juste à l'amont de l'ouvrage, ou même 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.

Le nombre de points de mesure nécessaires dépend principalement du type de phénomène surveillé, de son hétérogénéité et de son étendue (cf. exemple de La Clapière où la grande extension du glissement a conduit à placer, dans l'emprise du glissement, une trentaine de cibles pour les mesures de distance) ; le critère de fiabilité est également à prendre en compte.

Pour les grandeurs cinématiques la règle générale pourrait être d'installer deux capteurs au minimum : l'un dans la partie la plus active du phénomène et l'autre à proximité immédiate de l'ouvrage, ou bien les deux dans la partie la plus active du phénomène. Dans certains cas, il peut être recommandé d'implanter des capteurs-témoins sur une base fixe, pour mettre en évidence et corriger une éventuelle dérive des capteurs (influence thermique, usure de l'appareil...).

Pour le suivi de la piézométrie, lorsque l'influence de la nappe est notable, on place les cellules de mesures des pressions interstitielles au niveau de la surface de rupture. Il est souhaitable d'avoir au minimum trois cellules : une en amont du glissement, une dans la zone de mouvements importants (dans la pente), une en pied de pente ou à proximité immédiate de l'ouvrage. Lorsque des horizons avec des caractéristiques hydrogéologiques particulières ont été repérés (aquifères en charge, lentilles perméables, etc.), un intérêt particulier doit être accordé à l'hydrogéologie du versant, et un nombre important de cellules sera mis en place. Le cas des mouvements rocheux est plus difficile car les écoulements se font généralement dans des fissures ; aussi la mesure des pressions d'eau à des fins de surveillance est-elle rarement effectuée dans les massifs rocheux.

Pour le suivi des précipitations, lorsqu'elles ont une influence et qu'on estime que le délai de réponse entre l'apport hydrique et l'accélération du phénomène peut permettre un gain de temps d'alerte, on peut installer sur le site un pluviomètre ou un nivomètre,. ou à défaut se contenter des informations recueillies par les stations météorologiques existant à proximité du site. Il est préférable de placer les pluviomètres ou nivomètres à l'endroit où se fait l'alimentation (alimentation amont ou alimentation sur place par écoulement vertical, selon le site). Il faut prêter attention à l'implantation des appareils ; des obstacles peuvent fausser la représentativité des mesures d'un pluviomètre dans les régions montagneuses, les précipitations peuvent être très différentes sur deux zones proches mais différemment exposées ; l'altitude et l'exposition au vent jouent beaucoup sur les hauteurs de neige.

Il convient de noter qu'il est judicieux, lorsqu'on mesure simultanément plusieurs paramètres en vue de rechercher des corrélations entre eux, de placer les capteurs correspondants à proximité immédiate les uns des autres (par exemple pression interstitielle et déplacement au niveau de la surface de rupture).

2.1.3. Types de capteur

L'annexe 1 propose une série de fiches relatives aux principaux dispositifs de mesure utilisés pour la surveillance des mouvements de terrain. La plupart d'entre eux existent sous deux formes : capteur automatique dont la mesure nécessite l'utilisation d'une centrale d'acquisition qui peut être laissée sur le terrain, capteur "manuel" dont la mesure nécessite la présence sur le terrain d'un technicien. Le choix de l'un ou l'autre type de capteur dépend principalement de la fréquence des mesures et du bilan économique du projet de surveillance.

Il est prudent, lorsque des capteurs électriques sont utilisés, de doubler ponctuellement certains appareils avec des appareils manuels afin de valider périodiquement la mesure, d'une part, et de pouvoir disposer d'un minimum d'information en cas de défaillance électrique, d'autre part. À titre indicatif, des extensomètres à fil tendu automatiques pourront être doublés par des extensomètres à base manuelle, un servo-accéléromètre en forage par un tube inclinométrique, une sonde de pression interstitielle électrique par une sonde pneumatique.

Dans certains cas, la cinématique du phénomène associé aux contraintes de délai d'alarme peut imposer l'utilisation de capteurs à court temps de réponse ou de détecteurs.

Les critères de précision, de mesure (on suppose que la précision nécessaire a été définie lors de l'étude du phénomène), de plage de mesure, de longévité et de coût seront également pris en compte lors du choix des capteurs (cf tableau ci-après). Ainsi, un glissement dont la vitesse moyenne atteint quelques cm/j n'exige pas la même précision de mesure qu'un autre dont les déplacements ne sont que de quelques cm/an).

.1.4. La fréquence des mesures

Elle peut être imposée par le délai nécessaire à l'exécution des mesures prévues en cas d'alerte, d'une part, et par la cinématique reconnue ou supposée du phénomène, d'autre part. Si la rupture ne prévient pratiquement pas, et si les délais d'évacuation sont importants, la surveillance est d'avance 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.

Une mauvaise accessibilité limite dans la pratique la fréquence de 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 n'est pas nécessairement fixe dans le temps. Au contraire, il est intéressant de moduler la fréquence des mesures en fonction de l'évolution de la cinématique du phénomène ou *a priori* en fonction de la saison.

Matériel de mesures	Manuel Automatique	Utilisation	Vulnérabilité	Coût
Mire à vernier	M	Mesure de déplacements	faible	faible
Fisuromètre	M/A	Mesure de déformations	faible	faible
Distancemètre à fil invar	M/A	Mesure de déplacements	élevée	faible
Distancemètre électro-optique,	M/A	Mesure de déplacements	élevée	moyen
Extensomètre	MA	Mesure de déformations	moyenne	faible
Pendule inverse	M/A	Mesure de déplacements	élevée	moyen
Servo-accéléromètre en forage	A	Mesure de rotations	moyenne	moyen
Inclinomètre	M	Mesure de rotations	moyenne	élevée
Détecteur de rupture	A	Détection d'un changement d'état	moyenne	faible
Détecteur de contact	A	Détection d'un dépassement de seuil	moyenne	faible
SAR Interférométrie radar au sol	A	Mesure de déplacements	moyenne	élevé
Géophone	A	Mesure de vibrations acoustiques	élevée	moyen

Tableau 1 : Différents matériels d'auscultation et leur utilisation

2.1.5. La redondance des mesures

Il est souvent justifié de suivre des grandeurs physiques différentes, ou des grandeurs identiques en des endroits différents, ou des grandeurs identiques en des endroits voisins mais avec des méthodes différentes, ou encore d'effectuer des mesures avec une fréquence bien supérieure à ce qui serait nécessaire compte tenu de la cinématique du phénomène.

Cette redondance des informations acquises permet :

- de s'affranchir en partie des problèmes de fiabilité dans le temps des matériels, de compenser des insuffisances inhérentes à certaines techniques ; par exemple, les mesures de distance par infrarouge deviennent inopérantes par forte pluie, les visées optiques ne peuvent être pratiquées la nuit etc. ;
- de lever des incertitudes que l'on a sur le comportement du mouvement. En particulier, par le biais de moyennes glissantes et de comparaison d'écarts-types, les phénomènes parasites (comme des mouvements vibratoires dans le cas de mesures extensométriques) peuvent être éliminés.

Dans le cas d'un enjeu important et lorsqu'une télésurveillance est utilisée, la redondance est très recommandée. Elle permet d'éliminer un dépassement de seuil sur un capteur, qui serait non représentatif de la réalité (parasitage électronique, etc.), et donc d'éviter le déclenchement intempestif à distance d'une alarme (décision d'évacuation, etc.).

1.2. LE TRAITEMENT DES DONNÉES PAR LE SYSTÈME

Il s'agit d'abord de choisir entre une surveillance automatisée, partiellement ou totalement, et une surveillance manuelle (tableau suivant).

• surveillance manuelle : lorsque les délais et l'accessibilité du site l'autorisent, une surveillance manuelle peut être suffisante. Cette solution est d'autant plus intéressante que l'on disposera facilement de personnel pour effectuer les mesures. 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, parfois effectuées par du personnel local non spécialiste. Il est recommandé de préparer un bordereau à remplir lors du relevé.

• **Surveillance automatisée.**

Ce choix est en général justifié par des considérations d'accessibilité (grandes distances, accès pénibles ou dangereux) et surtout par la nécessité d'un temps de réponse bref (cas de la surveillance en continu qui implique des fréquences de mesure horaires, voire plus serrées) et de l'importance de l'enjeu. Un avantage de l'automatisation du système de surveillance est de permettre la détection et le déclenchement d'alertes sans intervention humaine immédiate, donc très rapides. Mais il ne faut pas pour autant négliger les inspections visuelles du site.

Indépendamment de leur localisation physique et de leur hiérarchie relative, on peut

distinguer huit fonctions que doit remplir le système, toutes n'étant pas nécessairement remplies sur certains sites :

➢ acquisition : cette fonction consiste à interroger et « lire » un capteur (on utilise aussi le terme scrutation), à numériser et convertir en grandeur physique la mesure. Des dispositifs électriques d'anti-parasitage peuvent être installés si nécessaire ;

➢ validation : par comparaison avec les mesures antérieures, par comparaison avec les valeurs données par d'autres capteurs (capteur manuel en double sur un capteur électrique ou comparaison entre plusieurs capteurs du site), par vérification du fonctionnement correct des capteurs, par comparaison avec la plage de mesure du capteur, par comparaison de l'écart-type de plusieurs mesures rapprochées avec une valeur de référence (précision de l'appareil). Certaines validations peuvent être automatisées mais l'intervention du spécialiste est toujours nécessaire pour valider définitivement une mesure, avec notamment vérification du bon fonctionnement du capteur (contrôle de la dérive dans le temps, utilisation d'un capteur témoin) ;

➢ combinaisons de mesures moyennes, temporelles ou spatiales, pour obtenir une ou des grandeurs jugées représentatives de l'évolution du phénomène ;

➢ stockage : le stockage des mesures permet interprétation du phénomène, mais l'on ne stockera pas forcément toutes les mesures selon que le système est manuel ou automatique. On peut avoir un stockage temporaire sur le site, vidé périodiquement par télétransmission ou en se déplaçant physiquement. A noter que les mesures en continu (automatisées) fournissent une masse énorme de données et posent 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 ;

➢ transmission des mesures entre capteurs et centrale d'acquisition, entre centrale d'acquisition et exploitant du système, transmission des alertes. On peut être amené à choisir la télétransmission (cf. tableau page suivante) ;

➢ tests après chaque acquisition : dépassement de seuils définis à l'avance, fixés en valeur absolue (déplacement cumulé, vitesse...) ou fonction des mesures précédentes (comparaison avec une valeur prédite par extrapolation..) ;

➢ génération d'alertes et d'alarmes : appel téléphonique du centre d'exploitation, mise au rouge d'un feu, etc.

Acquisition et transmission	- éloignement du site par rapport au centre d'exploitation, absence de personnel qualifié sur place ; - accessibilité difficile du site ; - nécessité de mesures très fréquentes (cas du temps réel en particulier) pendant une longue durée.
Traitements divers	- simplicité du phénomène ; - cas du temps réel ; - traitements de base : automatisation à prévoir systématiquement.
Production d'alertes et d'alarmes	- possible voire recommandée pour les alertes de premier niveau ; - pour les alarmes : cas du temps réel, d'un processus peu complexe, d'enjeux peu considérables.
Mise en place de dispositifs de sécurité	- cas de dispositions simples (allumage d'un feu rouge..).

Tableau 2 : Eléments en faveur d'une surveillance automatisée

Liaison	Utilisation	Vulnérabilité	Contraintes	Avantages
Câble électrique	Locale	Orages, humidité, chutes de blocs, faune	Limité en longueur	Faible coût, mise en œuvre rapide
Fibre optique	Locale	Chutes de blocs, faune	Mise en place difficile, coût	Fiable, grande capacité
Radioélectrique terrestre	Locale ou extérieure	Orages	Autorisations réglementaires	Grande distance possible
Radioélectrique spatiale	Extérieure	Orages	Fenêtres de communication	Pas de problèmes de relief
Réseau téléphonique commuté	Extérieure	Orages, parasites	Faibles débits	Installation facile si ligne proche
Liaison spécialisée	Extérieure		Coût	Liaison permanente

Tableau 3 : Différents systèmes de télétransmission

➢ dépouillement de routine, édition de tableaux et de graphiques, corrélations, comparaison avec un modèle de prévision simple, calcul d'un indice représentatif du phénomène, etc .

Il faut aussi définir les modalités de contrôle du système : réglage des seuils, de la fréquence d'acquisition, de la fréquence de stockage, des priorités de gestion 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 ;
- transmissions ;
- transformations des données, tests, générations d'alertes et d'alarmes.

1.3. LES SORTIES DU SYSTÈME ET LEUR EXPLOITATION

Le système de surveillance fournit en sortie deux types d'information l'évolution dans le temps de paramètres physiques du mouvement et de facteurs influant sur celui-ci, et les messages d'alerte et d'alarme.

Les évolutions dans le temps des paramètres physiques du mouvement sont analysées et interprétées par le spécialiste. Cette exploitation consiste en général :

- à déterminer l'évolution au cours du temps des différents paramètres mesurés :déplacements, pluies instantanées, pressions interstitielles, etc.;

- à calculer et représenter graphiquement des vitesses, des accélérations. des variables cumulées, ou tout autre paramètre significatif de l'évolution du mouvement.

Dans le but de connaître les relations entre les différents paramètres, des courbes représentant un paramètre en fonction d'un autre, à un même instant ou avec un déphasage, peuvent être calculées : déplacement en fonction de la pression interstitielle par exemple, ou pression interstitielle en fonction de la pluie cumulée de la semaine précédente, etc. La mise en relation de certains paramètres peut permettre de déceler des changements significatifs de danger.

Enfin, le spécialiste pourra également introduire les données de mesure dans un modèle de prévision si tant est qu'une modélisation du phénomène ait pu être élaborée. La comparaison de la dernière mesure et de la valeur prévue par le modèle peut constituer un indicateur d'évolution défavorable et donc engendrer une alerte.

L'optimisation du système implique de connaître et de comprendre le phénomène afin de mettre en place les seuils d'alerte et d'alarme les plus précis possibles. Si un seuil de vitesse par exemple est placé trop bas, il y a risque de fausses alertes ; s'il est placé trop haut, il y a 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 tests qui couvre au moins deux saisons pluvieuses est-elle

généralement utilisée, si toutefois la nature en laisse le temps
Au total, les exploitations des mesures conduisent généralement le spécialiste à proposer un ajustement des paramètres de contrôle du système de surveillance (modification des seuils de déclenchement d'alerte, adaptation des fréquences d'acquisition, de tests de dépassement de seuils, ou de stockage, en fonction de la cinématique observée du mouvement,. etc.) et, le cas échéant, à avertir le maître d'ouvrage d'une situation d'alerte ou d'alarme.

À noter que la fiabilité de la surveillance est étroitement liée à la capacité de prévoir la rupture. Cette prévision reste très délicate par exemple, les accélérations du glissement de La Clapière en 1986 et 1987 *(cf* § 2.3) auraient pu laisser prévoir une rupture brutale au début de 1988, rupture qui ne s'est pas produite, le glissement ayant au contraire ralenti les trois années suivantes. Dans d'autres cas, une prévision correcte de la rupture a été confirmée par les événements. Différentes techniques graphiques permettent d'estimer, à partir dune courbe d'évolution en phase d'accélération, le moment de la rupture. Leur principe consiste à déterminer l'abscisse temporelle de l'asymptote verticale de la courbe, correspondant à un déplacement ou à une vitesse infinie.

Les messages d'alerte sont destinés au gestionnaire de l'ouvrage qui exécute un plan de secours adapté aux informations reçues. Certaines actions consécutives à une alerte ou une alarme peuvent être déclenchées sans intervention humaine dans le cas d'un système de surveillance entièrement automatique en général, ce déclenchement automatique (fermeture d'une route, par exemple) est accompagné d'un envoi de message au gestionnaire de la sécurité, qui l'avertit de l'alarme.

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, par exemple) : 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 d'alarme ?

1.4. L' IMPLANTATION GÉOGRAPHIQUE DES ÉLÉMENTS DU SYSTÈME

Suivant la configuration du site et de l'ouvrage, suivant le type de surveillance choisi, suivant la localisation du gestionnaire de la sécurité, on peut envisager plusieurs schémas pour l'implantation des éléments du système.

Une organisation typique de surveillance automatisée place les capteurs dans la zone instable, le terminal avec micro-ordinateur au voisinage de celle-ci, en lieu sûr ; les postes de traitement et de contrôle chez le gestionnaire du risque et auprès du géotechnicien. Cela suppose au moins deux types de transmissions : celles entre capteurs et terminal (filaires, par exemple, si les distances sont faibles) et celles entre le terminal et les gestionnaires du site (réseau téléphonique commuté, etc.).

De nombreuses variantes sont envisageables :

- certains capteurs témoins peuvent être implantés en zone stable, à l'extérieur du secteur en mouvement ; d'autres systèmes de mesure agissent à distance

(distancemètre électro-optique ; localisation par satellite ; systèmes Doris ou GPS, notamment) ;
- le terminal peut être situé au voisinage des capteurs, en zone instable si le mouvement est lent et sans risque de forte accélération ;
- des relais peuvent exister : balise radioélectrique entre un groupe de capteurs et le terminal, satellite entre le site et le centre d'exploitation (système Argos, par exemple, mais débit de transmission des données faible).

Certaines fonctions du système peuvent être remplies en différents points d'implantation physique de celui-ci, avec une certaine latitude de choix :

- le matériel associé à un capteur peut être plus ou moins « intelligent » et posséder ou non la capacité de signaler un dysfonctionnement, de transmettre de lui-même une mesure ou une détection, etc. ;
- le terminal sur site peut assurer des fonctions plus ou moins complètes 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. Exemples de sites surveillés

Ils sont présentés en annexe. Ce sont :

- le site de Nantua (Ain) ; (cf. annexe 1) ;
- les ruines de Séchilienne (Isère) (cf. annexe 2) ;
- une falaise de Normandie (cf. annexe 3) ;
- La Clapière (Alpes Maritimes) (cf. annexe 4).

4. Auscultation des remparts de La Réunion

Par leurs hauteurs, leur verticalité et leurs développements, les remparts des cirques se prêtent mal à une transposition de dispositifs existants, et opérationnels, sur les grands versants instables, surveillés dans tous les cas dans le cadre d'opérations de protection civile. En effet, les techniques classiques mettant en œuvre par exemple les distancemètres électro-optiques, ou moins classiques, mais désormais opérationnelles dans de nombreux cas, comme l'interférométrie radar au sol, ne sont pas adaptées à *la configuration des remparts qui ne peuvent être « visés » dans de bonnes conditions.* Pour les mesures de distances électro-optiques, indépendamment des « fenêtres closes » par temps de brouillard et de fortes pluies, l'éloignement des vis-à-vis et les dénivelées par rapport aux îlets des cirques sont incompatibles avec une précision acceptable des mesures. Concernant l'interférométrie radar au sol, bien que la faisabilité et la qualité de la mesure soit indifférente aux conditions météorologiques, les surfaces à surveiller, *a priori*, sont telles qu'il faudrait multiplier le nombre de radars, d'où un investissement en matériel et en logistique rédhibitoire. Le parti pris a donc été de surveiller ponctuellement les mouvements éventuels des panneaux délimités par les crevasses présentes à l'arrière des falaises, à Maïdo et Mahavel.

La première partie de cette instrumentation a consisté en la pose de **capteurs de déplacements** à cheval sur les crevasses en question. Il s'agit de capteurs potentiométriques de course utile 25 mm dont la précision constructeur est de ± 25 µm. Ils sont reliés à une station d'acquisition autonome -alimentée par batterie- interrogeable à distance par modem GSM.

Le site de Mahavel comporte sept (7) capteurs, celui du Maïdo six (6). Sur chacun des sites cinq (5) crevasses sont surveillées, la plus éloignée de la falaise en étant distante d'une centaine de mètres. L'ensemble est opérationnel depuis octobre 2003.

La suite du projet verra le dispositif existant, qui ne peut mesurer que des déplacements relatifs et non directionnels entre les panneaux délimités par les crevasses, complété de la manière suivante :

☞ **topographie de précision**

➢ *nivellement de précision (# 0,1 mm) de points situés de part et d'autre des* crevasses à l'aide d'un tachéomètre de précision. Le cheminement sera rattaché à un point de référence extérieur au secteur crevassé ;

➢ mesures de distances horizontales –précision # 1 mm- entre les points contrôlés et le point de référence, à l'aide d'un distancemètre électro-optique (faisceau laser infrarouge).

☞ **inclinométrie**

➢des capteurs inclinométriques pourront être disposés entre les crevasses surveillées. Leur plage de mesure est de ±10° par rapport à la verticale, avec une précision de 1/100 de degré. Localement, 2 capteurs pourront être couplés à 90° (ou mise place de capteurs 2 axes) pour déterminer une direction exacte du mouvement par composition des 2 directions.

Les capteurs sont reliés à la station d'acquisition.

L'ensemble de ce dispositif à redondance partielle permettrait d'apprécier les composantes principales des mouvements détectés –affaissement et / ou rotation de la tête ou du pied des panneaux- et par suite, d'envisager une approche des mécanismes *mis en jeu dans la déstabilisation des remparts*.

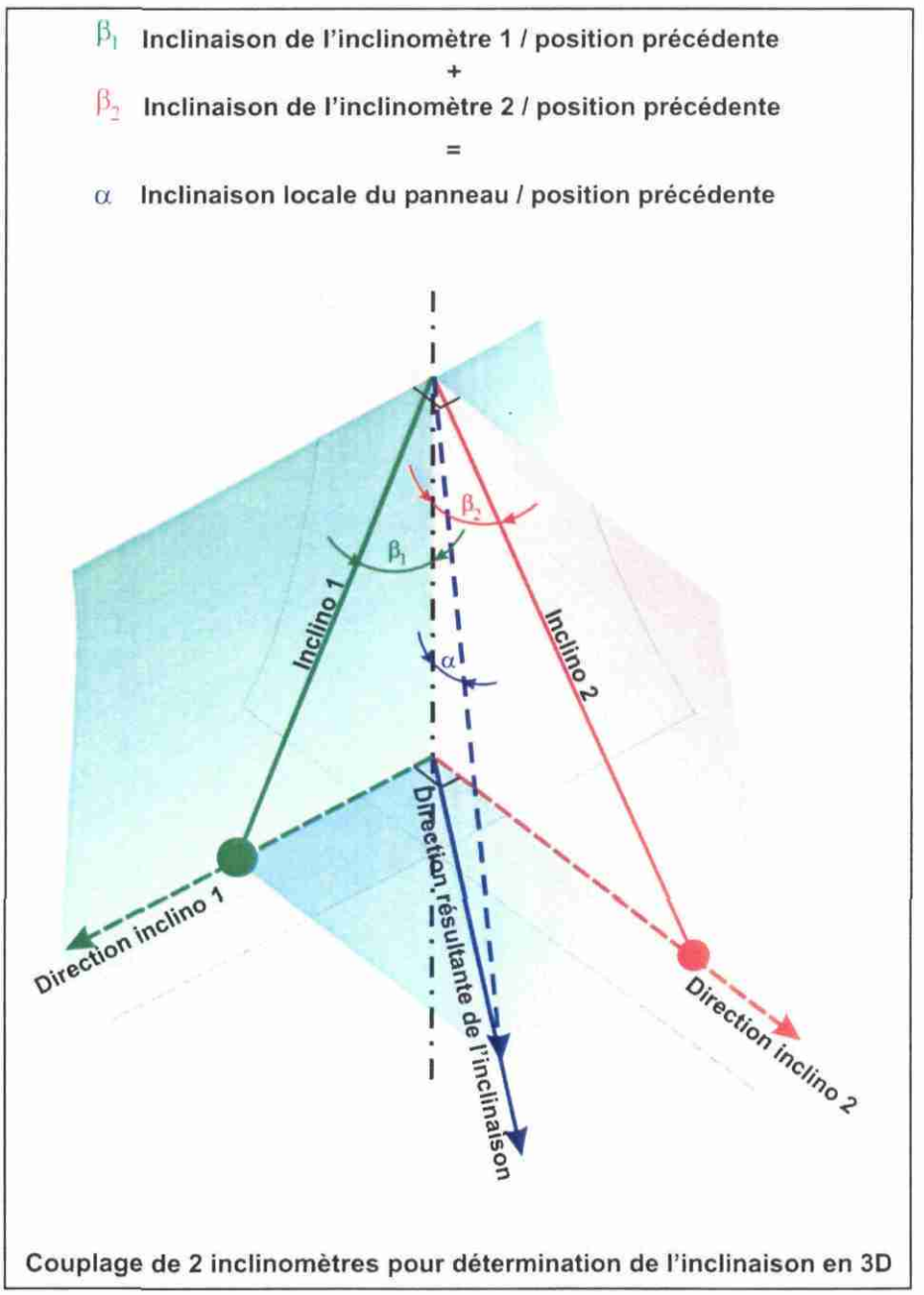


Figure 1 : Principe de la mesure inclinométrique

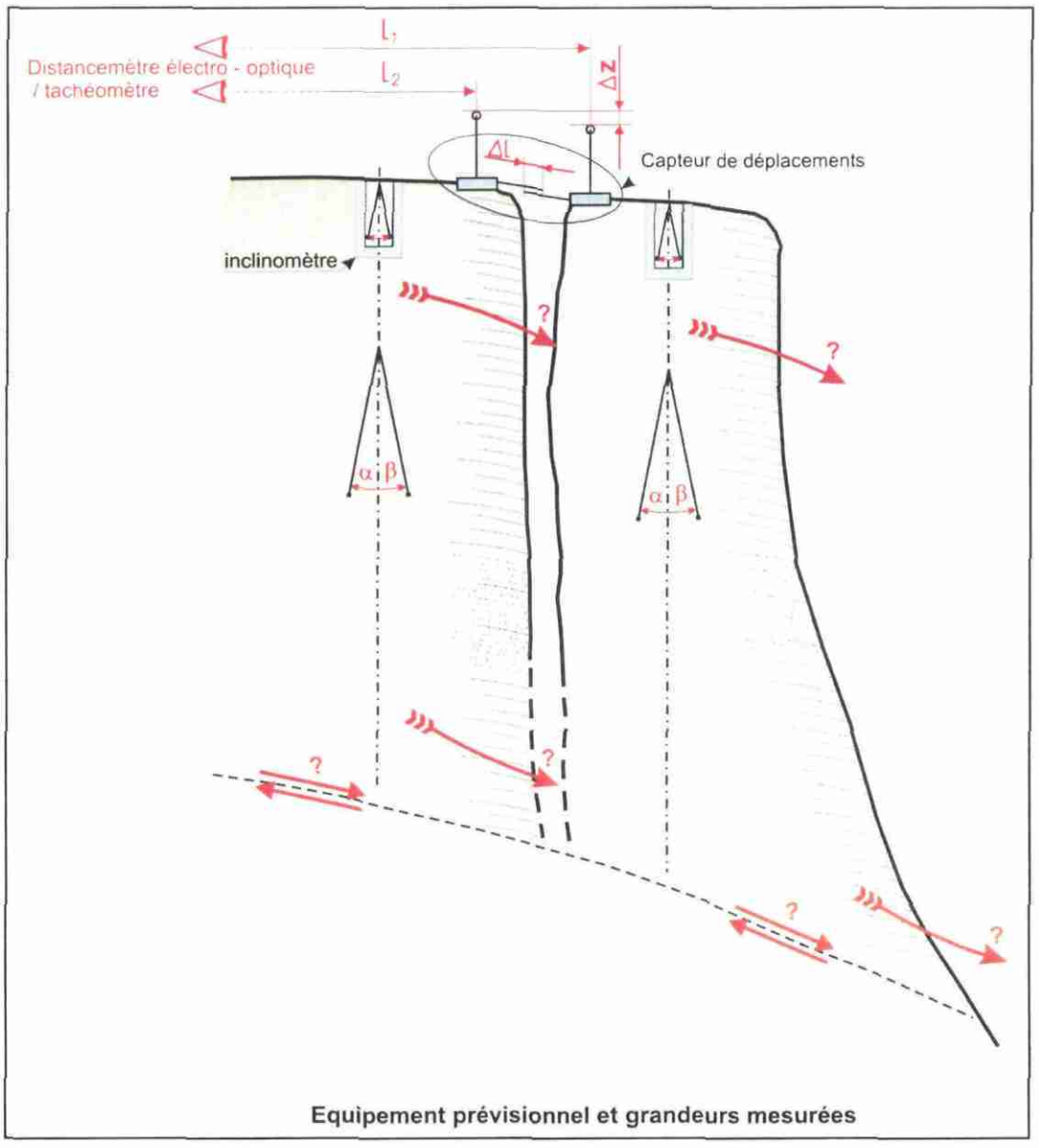


Figure 2 : Schéma de principe de l'auscultation des remparts de La Réunion

4. BIBLIOGRAPHIE

DE MUYNCK P. (2002) – Ecoute microsismique appliquée à la détection des effondrements des falaises crayeuses. INERIS. Rapport de stage d'ingénieur encadré par G. Senfaute.

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. N° 228. Sept-Oct 2000. pp. 47-57.

Le GPS et les métiers du génie civil. Journées GPS 2000 du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2000.

CARNEC C., DELACOURT C. (2000). Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, Gardanne, France. Journal of Applied Geophysics. Vol. 43, n°1, pp 43-54.

LASSIAZ P. (1999) – Auscultation géodésique annuelle du site dit des Ruines de Séchilienne (Isère) – Cabinet SINTEGRA.

CARNEC C., FABRIOL H. (1999) – Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro Prieto geohtermal field, Baja California, Mexico, using SAR interferometry. Geophysical research letters, vol. 26, n° 9, May 1999, pp 1211-1214.

LEROI E. et al (1998) - La surveillance des mouvements de terrain. Rapport BRGM R 40361.

BOTTON S, DUQUENNE F., EGELS Y., EVEN M., WILLIS P. (1996) – GPS localisation et navigation. Editions Hermes.

Projet national ITELOS (1994) – Télésurveillance des ouvrages d'art et des sites. Ed. Kirk, 442 p.

LCPC (1994) – Surveillance des pentes instables. Guide Technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 125 p.

DUNNICLIFF J. (1993) – Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. Chichester, J. Willey and son, 557 p.

MIRGON C., LEROI E., MOUROUX P., BOUR M.(1993) – La propagation en grande masse des mouvements de terrain : inventaire et analyse des modèles existants. Rap BRGM R 37764.

Les travaux de prévention des risques naturels : mouvements de versants de grande ampleur. Séminaire de Nainville-les-Roches. Juin 1991.

EVRARD H., GOUIN Th., BENOIT A., DURANTHON J-P (1990) – Séchilienne. Risque majeur d'éboulements en masse. Point sur la surveillance du site. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 165. Janv-Fév. Pp 7-16.

ANTOINE P., CAMPOROTA P., GIRAUD A., ROCHET L., (1987) – La menace d'écroulement aux Ruines de Séchilienne (Isère). Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° 150-151. Juil-Août 1987. pp. 55-64.

GIRARDI L. (1981) — Propagation des vibrations dans les sols homogènes ou stratifiés. Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics. N° 397 Sept. 1981 - série sols et fondations n° 177 pp. 31-66

Mc CARTER M.K., WILLSON J.E (1972) — Strength versus energy dissipation in sandstone. New horizons in rock mechanics (14 th symposium on rock mechanics June 1972) pp. 223-245 (éd. by H.R. HARDY and R. STEFANKO)

ROSSMANITH H.P., FOURNEY W.L. (1982) — Fracture initiation and Stress wave diffraction at cracked interfaces in layered media. I Brittle/ Brittie transition. Rock mechanics - vol. 14 n° 4 pp. 209-234.

SZENDREI M.E., FREEME C.R. (1970) - Road responses to vibration tests. Journal of the soil mechanics and foundations division - vol. 96 n° SM 6 - nov. 1970 pp. 2099-2124.

BROCH J.T. (1980) - Mechanical vibration and shock measurements. (Ed. BRUEL & KJAER)

RANDALL R.B. (1977) - Application cf BRUEL of KJAER equipment to frequency analysis. (Ed. BRUEL & KJAER)

HARDY H.R. (1977) - Emergence of acoustic emission/microseismic activity as a tool in geomechanics. Proceedings first conferenoe on acoustic emission, microseismic activity in geologic structure and materials. June 1975 - pp. 13-31. Series on Rock and soil mechanics. Vol. 2 (1974/1977) n° 3 - ed. by HARDY H.R. and LEIGETON F.W. - Trans Tech. Publications.

KNILL J.L., FRANKLIN J.A. and MALONE A.W. (1968) — A study of acoustic emission from stressed rock. (57 ref. bibliographiques). Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. vol. 5 n° 2 pp. 87-121 - Jan. 1968

OHNAKA M., MOGI K. (1981) - Frequency dependence of acoustic emission activity in rock under incremental, uniaxial compression. Buli. of the earthquake research institute - vol. 56 (1981) pp. 67-89

TAUBER V.F. (1980) — Etude de l'émission acoustique dans le cas de la fracturation de roches salines sous compression uniaxiale. (en allemand), Z. Geol. Wiss. BERLIN - vol. 8 n° 12 -pp. 1.521-1.527

KURITA K., FUJII N. (1979) - Stress memory of cristallyne rocks in acoustic emission. Geophysical research letters - vol. 6 n° 1 (jan. 1979) pp. 9-22

REMOND M.C., CHRETIEN N. (1973) - Etude de l'émission acoustique des roches soumises à des sollicitations mécaniques. Revue d'acoustique n° 23 - pp. 333-339

GOWD T.N. (1980) - Factors affecting the acoustic emission response of triaxially compressed rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 17 n° 4 - pp. 219-223

RONG Chen. (1979) — Acoustic emission of rocks under triaxial compression with various stress paths. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 16 n°6 - pp. 401-405

BOYCE G.M., KOERNER R.M., Mc CABE W.M., LORD A.E. (.1981) - Acoustic emission signatures of various rock types in tension. Materials evaluation. 39 (oct. 1981) pp. 1051-1056

STESKY R.M. (1975) - Acoustic emission during high-temperature frictional sliding. Pageoph. (BIRKEL4USER Verlag, BASEL) vol. 113 pp. 31-43

KOERNER R.M., ASCE M., LORD A.E., Mc CABE W.M., CURRAN J.W. (1976) - Acoustic emission behaviour of granulai' soils. Journ. of the geotech. engin. division - vol. 102 n° GT 7 (July 1976) pp. 761-773

KOERNER R.M., ASCE M., LORD A.E., Mc CABE W.M. (1977) - Acoustic emission behavior of cohesive soils. Journ. Geotech. engin. div. -vol. 103 n° GT 8 (Aug. 1977) pp. 837-850

Proceedings firts conference on acoustic emission/microseismic activity in geologic structures and materials. (June 1975). Ed. by HARDY B.R. and LEIGETON F.W. 1977. Trans. Tech. Publications

Proceedings second conference on acoustic emission/microseismic activity in geoLogic structures and materials (Nov. 1978). Ed. by HARDY H.R. and LEIGHTON F.W. 1980 - Trans. Techn. Publications

RINDORF H.J. (1981) — Acoustic emission source location in theory and in practice. Technical review - BRUEL & KJAER n° 2 - 1981

MOGI K. (1968) - Source location of elastic shocks in the fracturing process in rocks. Buil. Earthquake research institute - 46 -pp. 1103-1125

PERAMI R., THENOZ B. (1969) - Comparaison de comportements de divers granites soumis à des essais uniaxiaux de microfissuration. Revue de l'Industrie Minérale - juillet 1969 - pp. 50-62

HABIB P. (1969) - Fissuration et mécanique des roches (1969). Revue de l'Industrie Minérale. 2ème colloque sur la fissuration des roches - PARIS janvier 1969 - n° spécial juillet 1969

THILL R.E. (1972) - Acoustic methods for monitoring failure in rock.
(60 Ref. bibliographiques). New Horizons in rock mechanics. Proceeding 14ème symposiwn on rock mechanics (June 1972) -pp. 649-687

FARRAN J., PERAMI R. (1974) — Microfissuration, déformation et compressibilité des roches sous charges triaxiales. Advanoes in rock mechanics. Report of current

research. Vol. II - Tome A pp. 138-143.
PERAMI R. (1971) - Contribution à l'étude expérimentale de la microfissuration des roches sous actions mécaniques et thermiques. Thèse Doctorat es sciences naturelles. N° d'ordre 440 - Université de TOULOUSE

WOJTKOWIAK F. (1978) - Comportement mécanique d'une micrite et d'une granodiorite. Contribution à l'étude de la fissuration provoquée par sollicitations mécaniques. Thèse 3ème cycle. Université d'ORLEANS

CHUGH Y.P., HARDY H.R., STEFANKO R. (1972) — An investigation of the frequency spectra of microseismic activity in rock under tension. Proceedings Tenth rock mechanics symposiun (Austin 1968) -pp. 73-113., AIME, NEW-YORK

LORD A.E., KOERNER R.M. (1974) - Acoustic emission response of dry sous. J. testing Eval., USA., t.2, n° 3 - pp. 159-162

BYERLEE J.D. (1974) — Acoustic emission in rock during fluid injection. Advances in rock mechanics. Reports of current research. Vol. II -tome A - pp. 633-637 – dans *proceedings first conference on acoustic emission* (cité précédemment [19])

BYERLEE J.D., LOCKNER D. - Acoustic emission during fluid injection into rock - pp. 87-98

POWER D.V. - Acoustic emissions following hydraulic fracturing in a gas well. pp. 291-308

SHUCK L.Z., KEECH T.W. - Monitoring acoustic emission from propagating fractures in petroleum reservoir rocks. pp. 309-336

ZOBACK M.D., RUMMEL F., JUNG R., RALEIGH C.B. (1977) - Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. - Vol. 14 -pp. 49-58

BERTRAND L., BOUILLEAU M., WOJTKOWIAK F. (1982) - Banc d'essai de fracturation hydraulique. Note technique n° 4/82 - Département Génie Géologique - BRGM

KAPPELMEVER O., RUMMEL F. (1980) - Investigations on an artificially created frac in a shallow and low permeable environment. Proceedings of the second International Seminar on the results of EC Geothermal Energy research (STRASBOURG, 4-6 March 1980) - Ed. by A.S. STRUB and P. UNGEMACH - Commission of the european communities

LEYDECKER G. (1981) - Seismische Ortung hydraulish erzengter Brüiche im Geothermik Frac Projekt Falkemberg. BGR - HANOVRE - archiv. Nr. 86-549 (étude et 4150 A en collaboration avec Prakia-Seismos)

KOERNER-R.M., Mc CABE W.M., LORD A.E. (1981) — Overview of acoustic emission monitoring of rock structures. Rock Mechanics - Vol. 14. pp. 27-35

STATEHAM R.M., MERRILL R.M. (1979) — Acoustic emission techniques applied to slope stability problems. Rockslides and avalanches, 2. Ch. 26 - pp. 577-593 - (Ed. Barry VOIGHT)

NOVOSAD S., BLAHA P., KNELJZLIK J. (1977) - Geoacoustic methods in the slope stability investigation. Buil. Int. Ass. Engineering Geology n° 16 - pp. 229-231

Mc CABE W.M., KOERNER R.M., LORD A.E. (1979) — Acoustic emission (microseismic) monitoring for ground control. R.E.T.C. Proceedings vol. 1 - ah. 51 - pp. 879-897

HARDY H.R. (1982) - Evaluation of the mechanical stability of underground storage facilities using microseismic techniques. ISRM Symposium - Aachen. 26-28/05/1982 - Vol. 1 - pp. 41-56 - (Ed. A.A. BALKEMA)

PAULSSON B.N.P., KING M.S. (1980) - Between hole acoustic surveying and monitoring of a granitic rock mass. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. - Vol. 17 - pp. 371-376

RAO M.V.M.S., GOWD T.N. (1979) - A study of acoustic emission from stressed rocks and rockmasses. Journal of mines, Metals & Fuels t. 27 n° 3 (March 1979) - pp. 80-85

WOULFF G., Mc GETCHIN T.R. (1976) - Acoustic noise from volcanoes Theory and experiment. Geophys. J.R. Abstr. Soc. Vol. 45 pp. 601-616

GROUPE DE TRAVAIL N°3 DE L'AFTES (1979) - Point actuel sur les appareils de mesure de vibrations. Tunnels et ouvrages souterrains n° 36 - pp. 335-345

HATANO H., MORI E. (1976) - Acoustic emission transducer and its absolute calibration. Acoust. Soc. An. Vol. 59 n° 2 - pp. 344-349

HARDY H.R. (1971) - Recent application of microseismic activity to experimental rock mechanics. Rock fracture - Proceedings of the international synrposium on rock mechanics (FRANCE 1971) 11.10

LAUSSON J. (1982) - Surveillance des grands ouvrages souterrains par auscultation sismique. Journées d 'études sur l'auscultation des ouvrages (ENPC-PARIS) 29—30/11/1982

JOSIEN J.P. (1982) — Les effets dynamiques des pressions de terrain.
Coups de terrain. Communication la 7° conférence internationale sur les pressions de terrains – 20-24/09/1982 (BELGIQUE)

REVALOR R. (1982) — Surveillance sismo acoustique d'une longue taille en activité à forte vitesse d'avancement. Journées d'études -Auscultation des ouvrages ENPC-PARIS

DUMOUSSEAU P., ROGET J. (1982) —l'émission acoustique au contrôle des fuites. Mesures, Application de Régulation, Automatisme - N° de novembre 1982

OBERT L., DUVALL W.I. (1967) - Rock mechanics & the design of structures in rock - John Wiley

Catalogues constructeurs/fournisseurs de matériels.
TELEMAC 77220 GRETZ ARMAINVILLIERS – France
SENSOREX 94 420 LE PLESSIS TREVISE

ANNEXES

ANNEXE 1 : Le site de Nantua (Ain)

ANNEXE 2 : Les ruines de Séchilienne (Isère)

ANNEXE 3 : Falaise de Normandie

ANNEXE 4 : La Clapière (Alpes Maritimes)

ANNEXE 5 : Fiches de matériels utilisées dans l'auscultation des reliefs

GÉODÉSIE TERRESTRE

GÉODÉSIE SPATIALE G.P.S.

PHOTOGRAMMÉTRIE TERRESTRE ET AÉRIENNE

DISTANCEMÈTRE ÉLELECTRO-OPTIQUE

DISTANCEMÈTRE À FIL INVAR

EXTENSOMÈTRE À BASE LONGUE

EXTENSOMÈTRE À BASE COURTE

EXTENSOMÈTRE À FIBRE OPTIQUE

MIRE À VERNIER

PENDULE INVERSE

INCLINOMÈTRE DE FORAGE

STATION D'ÉCOUTE SISMIQUE

Annexe 1 :

Le site de NANTUA (Ain)

Instrumentation et surveillance réalisée

par le CETE de Lyon.

Le site et le mouvement de terrain

Les corniches calcaires qui surplombent la cluse de Nantua sont découpées par des fractures en masses rocheuses instables, de volumes estimés à 1 000 m3 en moyenne Le processus est favorisé par les contrastes climatiques.

Les enjeux et l'objectif de sécurité

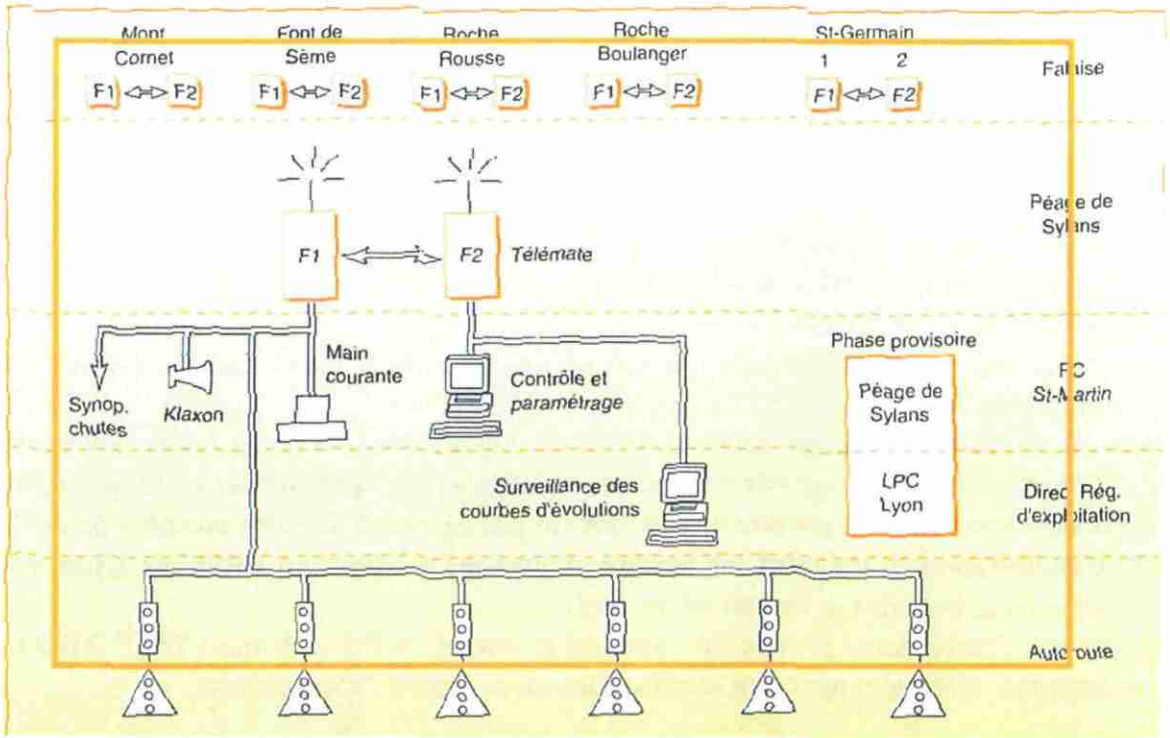
Bien qu'avec une probabilité très faible, l'autoroute A 40 est directement menacée par les éboulements rocheux, et ce malgré une conception de l'ouvrage qui minimise les risques, et la mise en place de protections. La durée de propagation jusqu'à la chaussée est estimée entre 25 et 30 secondes. L'objectif assigné à la surveillance est de détecter le plus tôt possible un départ de masse rocheuse (en moins de 5 secondes), d'interrompre alors le trafic et de vider la plate-forme routière dans la zone considérée, afin d'éviter si possible le « coup au but".

Le dispositif de surveillance

Chaque masse rocheuse est équipée de détecteurs de rupture (au moins deux) boucles en fibres optiques reliant le volume instable et le massif stable en arrière. La coupure des fibres optiques entraîne le déclenchement d'une alerte technique ou d'une alarme, selon le cas. Le dispositif est complété par un suivi automatisé de l'ouverture des fractures (capteurs potentiométriques ou inductifs précision 1/10 ou 1/100 de mm suivant le type) et de la température.
Les liaisons en falaise (système de détection) sont assurées par fibre optique, ce qui évite les surtensions lors des orages.
La transmission des alertes et des mesures se fait par deux balises radioélectriques (400 MHz) indépendantes, vers un terminal situé à la station de péage de Sylans. En cas de défaillance du système de transmission des alertes, celles-ci peuvent emprunter la balise vouée aux mesures.
Toute activation d'un détecteur (départ d'une masse) déclenche une alerte gérée par le responsable de la sécurité de l'autoroute.

Les mesures sont transmises au terminal toutes les 15 minutes. A noter que l'enregistrement sur une année de l'ouverture des fractures a permis de mettre en évidence la «respiration» saisonnière d'une masse rocheuse, d'amplitude 3 mm environ.

Le système de surveillance comprend également des filets détecteurs placés au bord amont de l'autoroute, qui permettent de confirmer qu'un bloc a atteint la chaussée et de localiser la chute.



Annexe 2 :

LES RUINES DE SÉCHILIENNE (Isère)

Instrumentation et surveillance réalisée par le CETE de Lyon.

Le site et le mouvement de terrain

Il s'agit d'un mouvement complexe, combinant glissement et fauchage, affectant plusieurs dizaines de millions de mètres cubes de schistes métamorphiques en rive droite de la vallée de la Romanche. Le fond de vallée est à 350 m d'altitude, alors que l'escarpement sommital se situe vers 1 100 m la zone en mouvement est difficilement accessible.

Les enjeux et l'objectif de sécurité

Il faut considérer le risque primaire (recouvrement brutal du fond de vallée -lotissement et route nationale n°91- par les éboulis) et les risques induits (inondation par montée des eaux de la Romanche derrière le barrage naturel et inondation à l'aval en cas de rupture brutale de ce barrage). Par ailleurs on peut distinguer :
- un scénario avec chute de 2 ou 3 millions de mètres cubes, probable à court terme, et pour lequel la route nationale, déviée dès les premières chutes de blocs, est en principe à l'abri ;
- un second scénario correspondant à l'hypothèse, plus lointaine, d'une rupture affectant une ou plusieurs dizaines de millions de mètres cubes.

La surveillance mise en place doit permettre de fermer la route et d'évacuer les populations menacées un plan de secours a été élaboré dans cette perspective par la Sécurité civile.

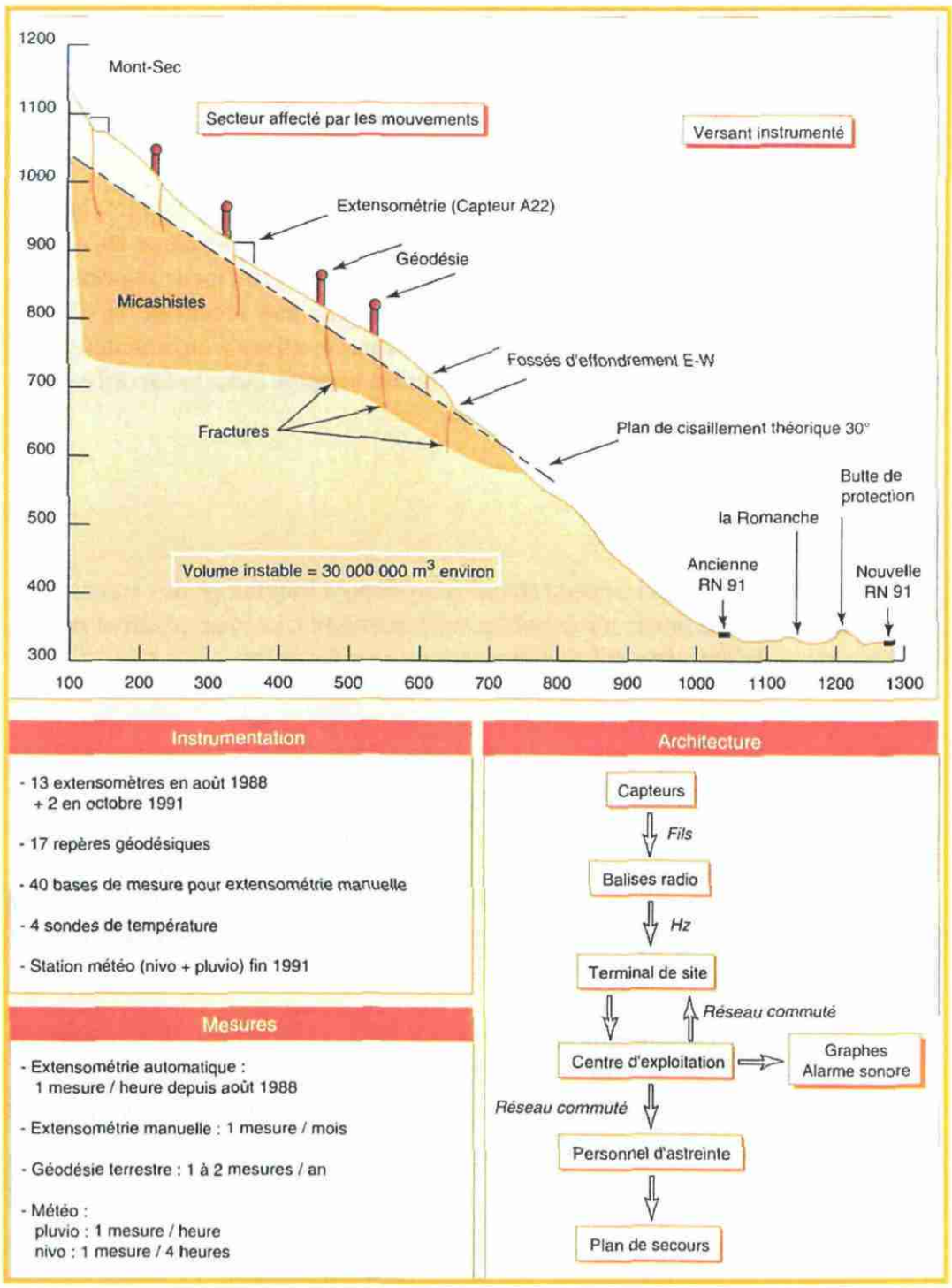
Le dispositif de surveillance

Le dispositif comprend les mesures suivantes :
- ouvertures de fissures par 15 extensomètres automatisés à base longue (de 5 à 25 m), doublés par des bases extensométriques manuelles de contrôle (une mesure par mois), situés aussi bien dans la partie active (rupture des 2 ou 3 millions de mètres cubes) que dans la zone amont a mouvement plus lent ;
- mesures géodésiques classiques sur 17 points (une à deux par an), doublées sur certains points par géodésie spatiale (GPS) depuis 1991 ;
- pluviomètre et nivomètre (automatisés).

Ce sont les mesures extensométriques qui ont permis le zonage du versant en parties plus ou moins actives.
Le terminal sur site (placé à 1 km du glissement) interroge toutes les heures les capteurs. Il peut envoyer des messages d'alertes techniques ou opérationnelles (dépassement de seuil défini sur l'écart entre la mesure et l'estimation par extrapolation des mesures précédentes) au centre d'exploitation. Il transmet les mesures toutes les 4 heures au LRPC de Lyon, excepté en cas de crise où le transfert se fait en temps réel.

Transmissions filaire entre groupes de capteurs et balise radioélectriques (31,5 MHz), entre balises et terminal téléphonique, entre terminal de site et centre d'exploitation.

Exploitation au LRPC de Lyon : édition de graphiques de déplacements, analyse des résultats, réception des messages d'alerte et vérification par le personnel d'astreinte en cas de validation, déclenchement de la « préalarrne » auprès de la Sécurité civile de l'Isère et application du plan de secours.



Site de Séchilienne (doc. CETE Lyon)

Annexe 3 :

SURVEILLANCE D'UNE FALAISE DE NORMANDIE

Projet PROTECT

BGS (coordinateur) –BRGM –INERIS-Université de Brighton-GEUS (Service Géologique Danois

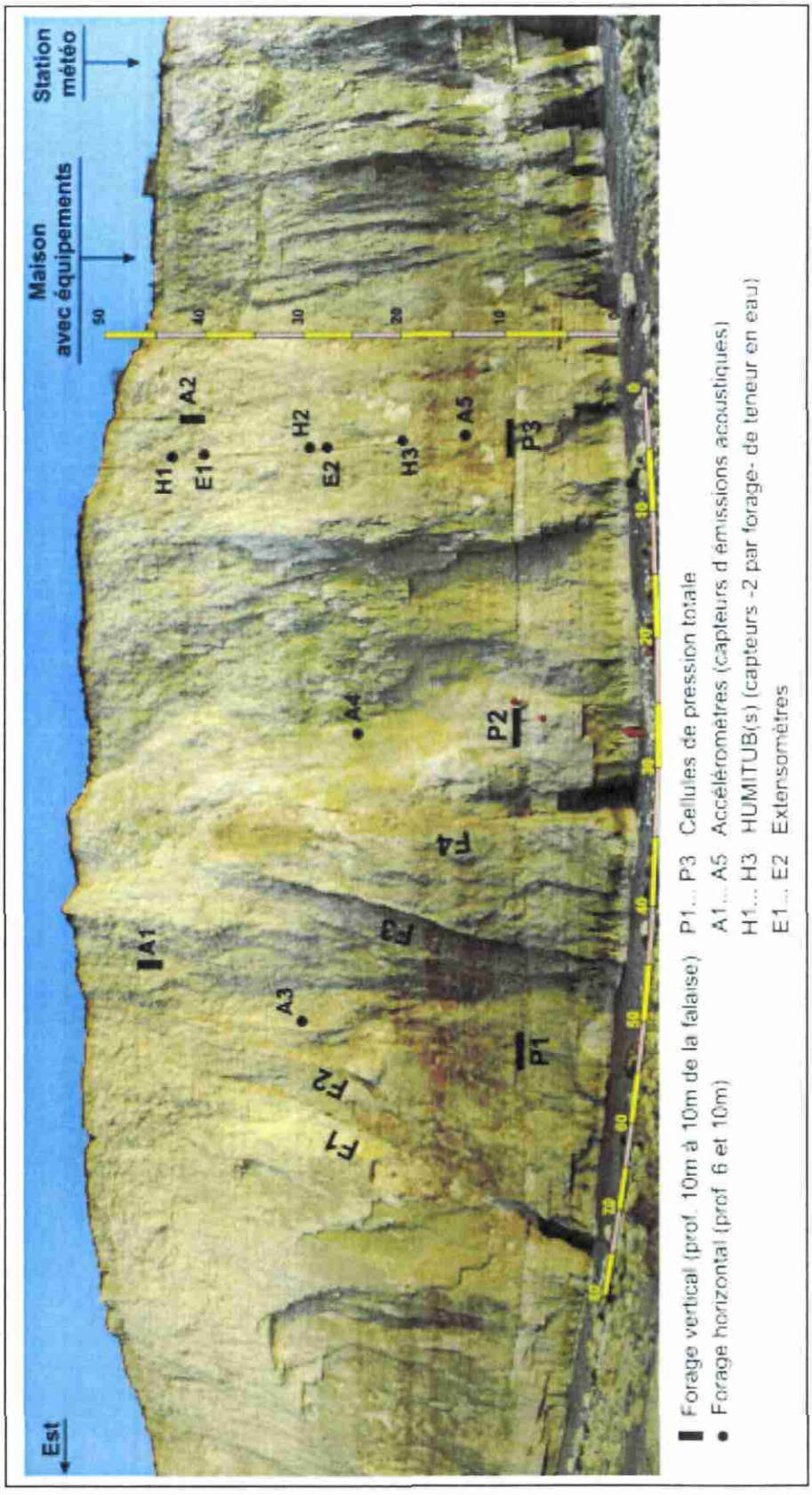
•DDE 76 -Service Maritime de Pologne-Isle of Wight Council-Consorzio Ferrara Ricerche

Travaux réalisés dans le cadre d'un projet de recherche – **PROTECT** (PRediction Of The Erosion of Cliffed Terrains), Projet européen du 5ème PCRD visant à développer de nouvelles techniques de surveillance des effondrements de falaise, et mettant en œuvre, en particulier, de l'écoute micro-sismique dans le but de détecter des signaux précurseurs de rupture.

Méthodes de surveillance développées

Ecoute micro-sismique
•BRGM
•INERIS
Variation de l'anisotropie de résistivité•BGS
Suivi topographique des déformations du massif•GEUS

Le site instrumenté en Normandie

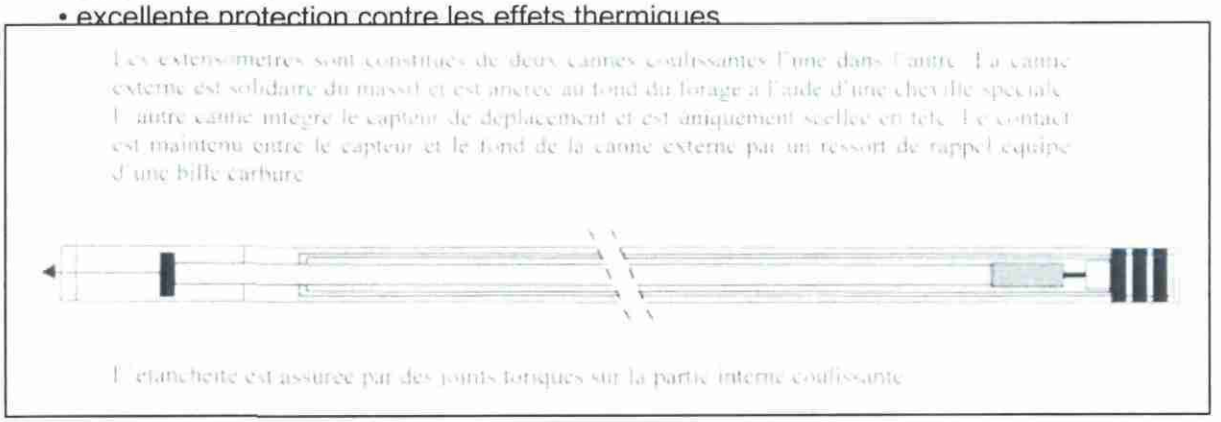


Dispositif d'auscultation

☞ **Mesure des déplacements** par 2 extensomètres (MINAUS) de 3 et 4 m de longueur équipés de capteurs type LVDT montés en fond de forages horizontaux

Avantages principaux :

- mesure sans contacts physiques (induction)
- très longue durée de vie
- résolution infinie (précision uniquement dépendante de l'électronique de traitement)
- excellente répétitivité des mesures
- sortie 4-20 mA
- excellente protection contre les effets thermiques



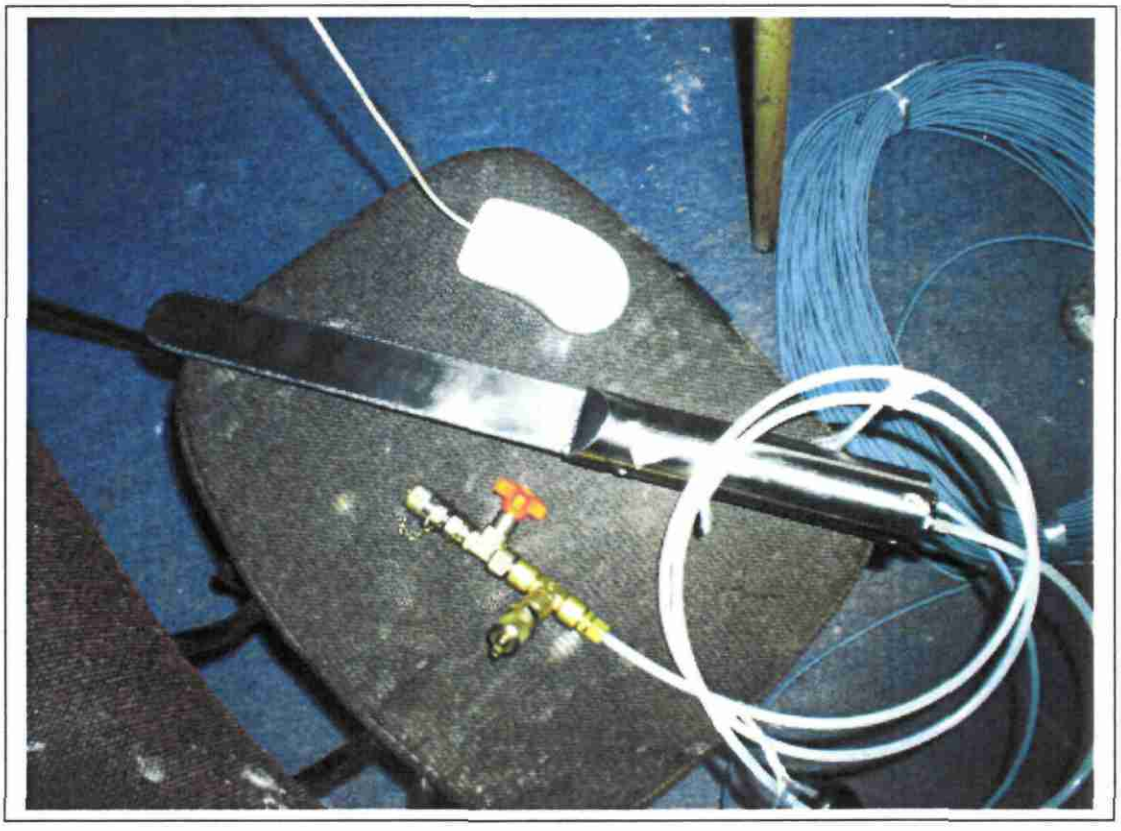
☞ **Mesure de la teneur en eau** par 2 HUMITUB (MINAUS/brgm) placés dans des forages horizontaux. Chaque HUMITUB comporte 2 capteurs placés à 3 et 6 m de profondeur.

Avantages principaux :

- matériel éprouvé (électronique identique à celle de l'HUMILOG)
- capteur de température associé à chaque point de mesure
- faible diamètre (42 mm)
- câblage pr

☞ **Mesure de la pression totale** par 3 cellules carrées (200 mm x 200 mm) placées en front de falaise, superficiellement.

L'une d'elles, détruite par un éboulement, a été remplacée par une cellule rectangulaire (cf. photo suivante) de 40 mm x 400 mm équipée d'un dispositif de contrôle manuel de la pression.

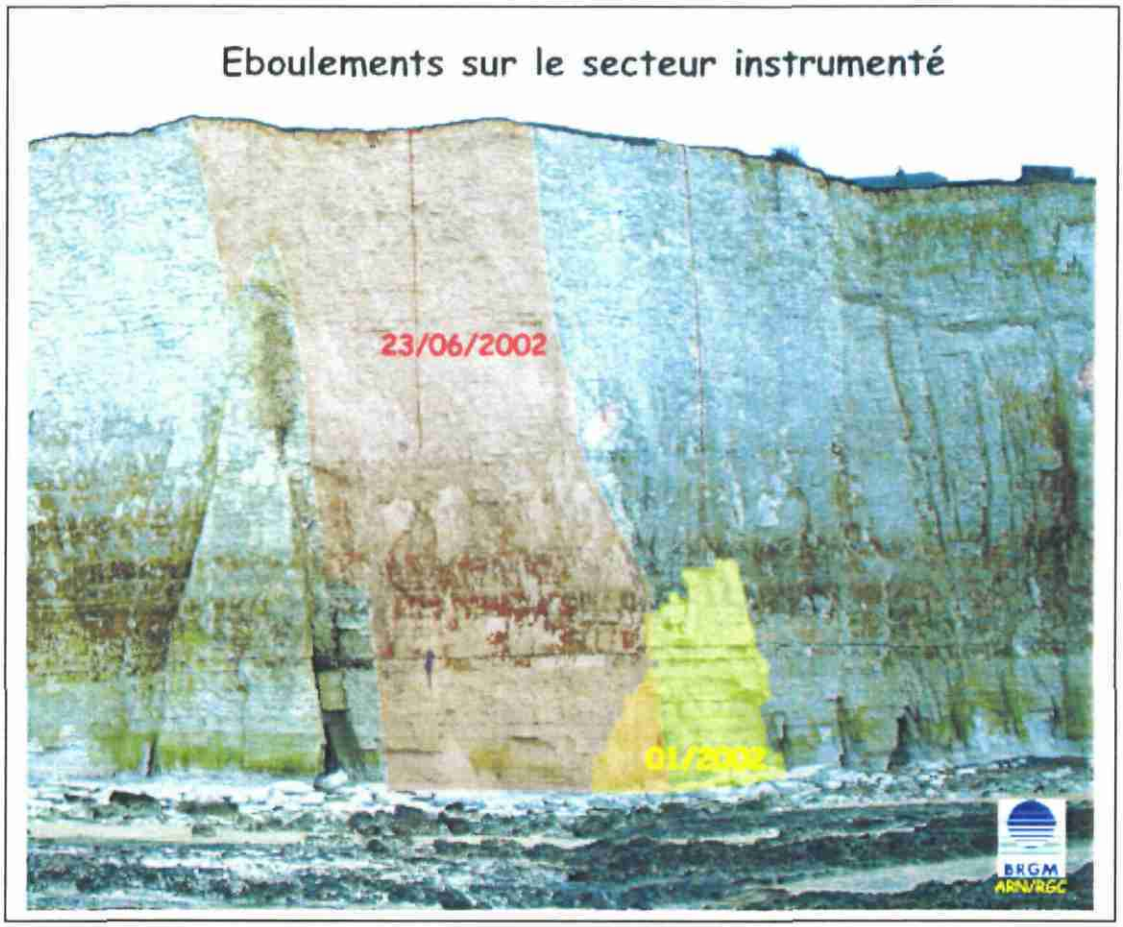


☞ **Station météorologique** (MINAUS) placée 20 m en arrière de la crête de falaise, comportant :

- 1 pluviomètre
- 1 thermomètre
- 1 anémomètre
- 1 girouette
- **1 baromètre**

☞ **Centrale d'acquisition OSIRIS (IRIS Inst[t])** • 1 modem
- 2 cartes de multiplexage (16 voies + 8 voies)
- 1 parafoudre sur chaque fil des capteurs (Minaus)
- 1 parafoudre RTC
- 1 parafoudre secteur
- 1 batterie tampon plomb-gel
- 1 chargeur / régulateur de charge

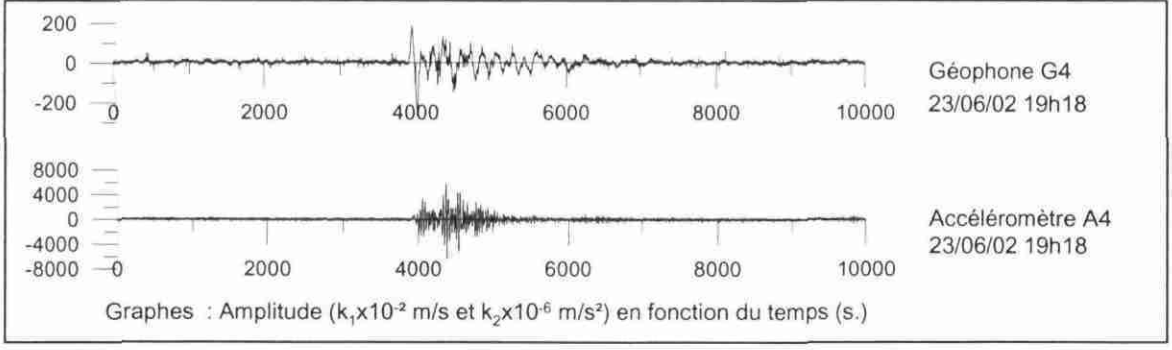
Evénements enregistrés



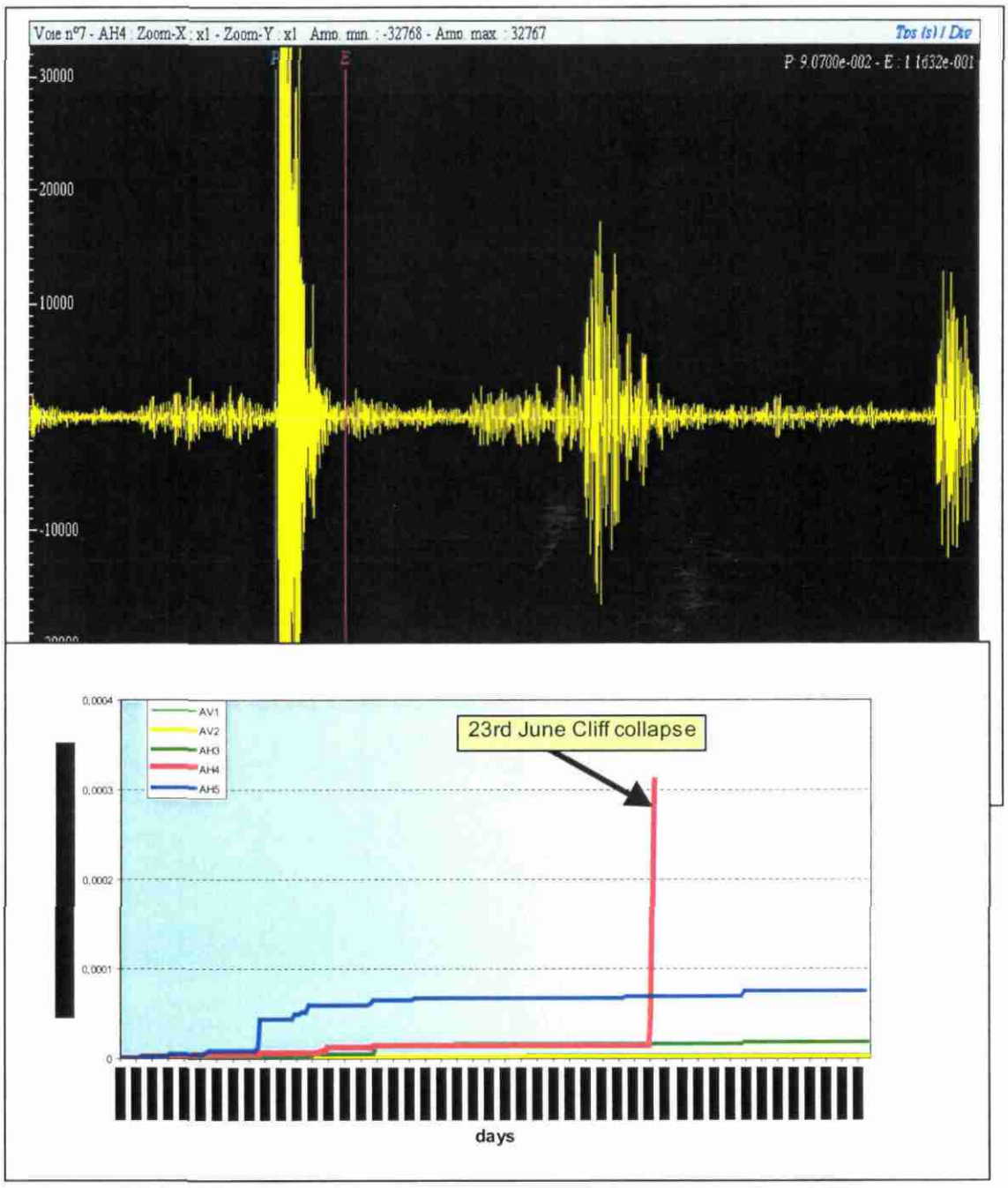
Evènements micro-sismiques

- déclenchements très nombreux (--> 15/j en dehors des heures de marée haute)
- fenêtre aveugle de 3h pendant la marée haute
- signaux de type très varié (amplitude, spectre) --> Fréq. max. : 5 kHz
- rarement plusieurs capteurs simultanément

Exemples :

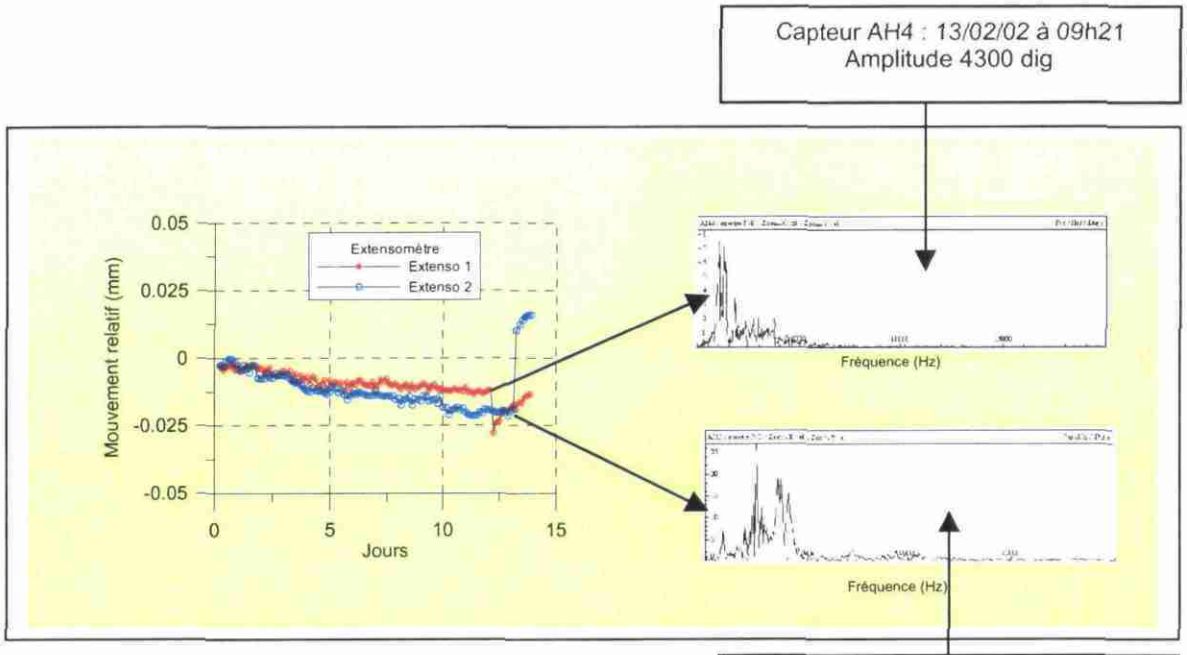


Evènement micro-sismique du 23/06/2002



- Début de l'exponentielle ~ 17h avant la rupture
- Accélération nette ~ 2h avant la rupture

Déplacements



- Début de l'exponentielle ~ 17h avant la rupture
- Accélération nette ~ 2h avant la rupture

Annexe 4

Le site de La Clapière (Alpes Maritimes)

Instrumentation et surveillance réalisée par le CETE et le LCPC

Le site et le mouvement de terrain

Volume de 50 millions de m^3 de matériaux rocheux en mouvement
Mouvement ancien avec un glissement 5 de millions de m^3 au début du 20 ^{ème} siècle
Surface 100 ha sur 1000 m de largeur
Surveillance depuis 20 ans
Glissement de terrain avec déplacement de 125 m en 15 ans

Le dispositif de surveillance

Extensomètrie
Mesures automatisée à distance
Dispositif d'écoute sismo-acoustique

Site ayant fait l'objet de nombreuses expérimentations

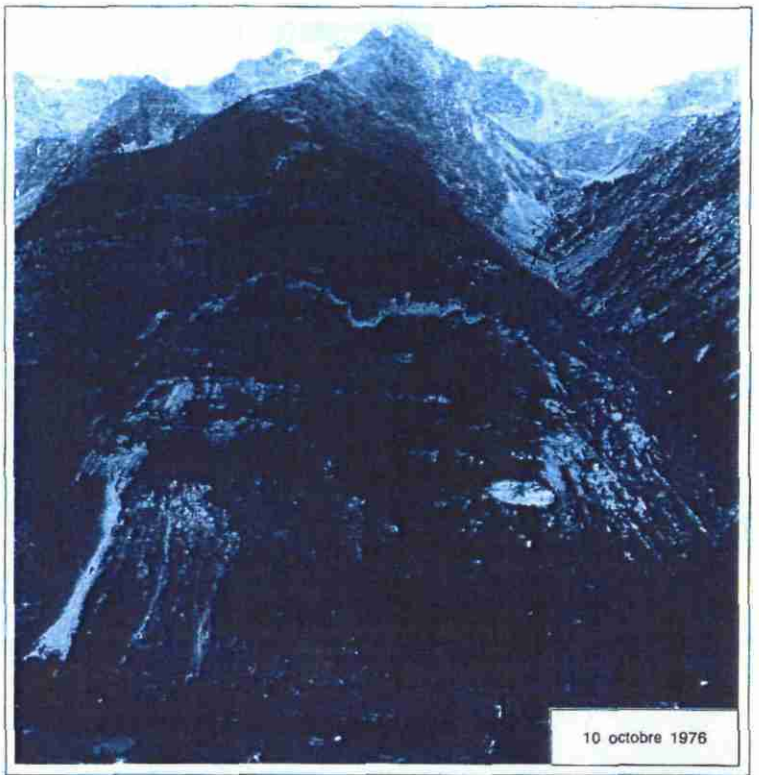
Balise DORIS par l'IGN & CNES
Mesures GPS
Interférométrie radar par le CNES, le BRGM e l'IPG,

Ci-après, extraits de l'article paru dans le Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 220, de mars-avril 1999.

Fig. 1 -
Évolution du versant.

Outre l'échelle du glissement sur un versant de 2 000 m de dénivelée, la vue générale de 1976 montre les désordres superficiels en aval des deux lobes de l'escarpement sommital. Elle permet aussi de discerner certains des principaux traits structuraux et, en particulier, à mi-pente, l'armature de gneiss plus massifs ainsi que la trace, oblique, d'accidents verticaux subméridiens.
Sur le cliché de 1997, apparaissent l'affaissement général et le développement des éboulements superficiels mais, surtout :

- *dans la partie gauche, le talus provoqué par le différentiel de mouvement provoqué par le ralentissement de la partie supérieure du lobe Nord ouest,*
- *dans la partie droite, le glissement supérieur en deux parties déclenché par régression en amont du talus sommital du lobe Nord est,*
- *à la base, le déplacement de la Tinée repoussée par la progression du pied du glissement.*



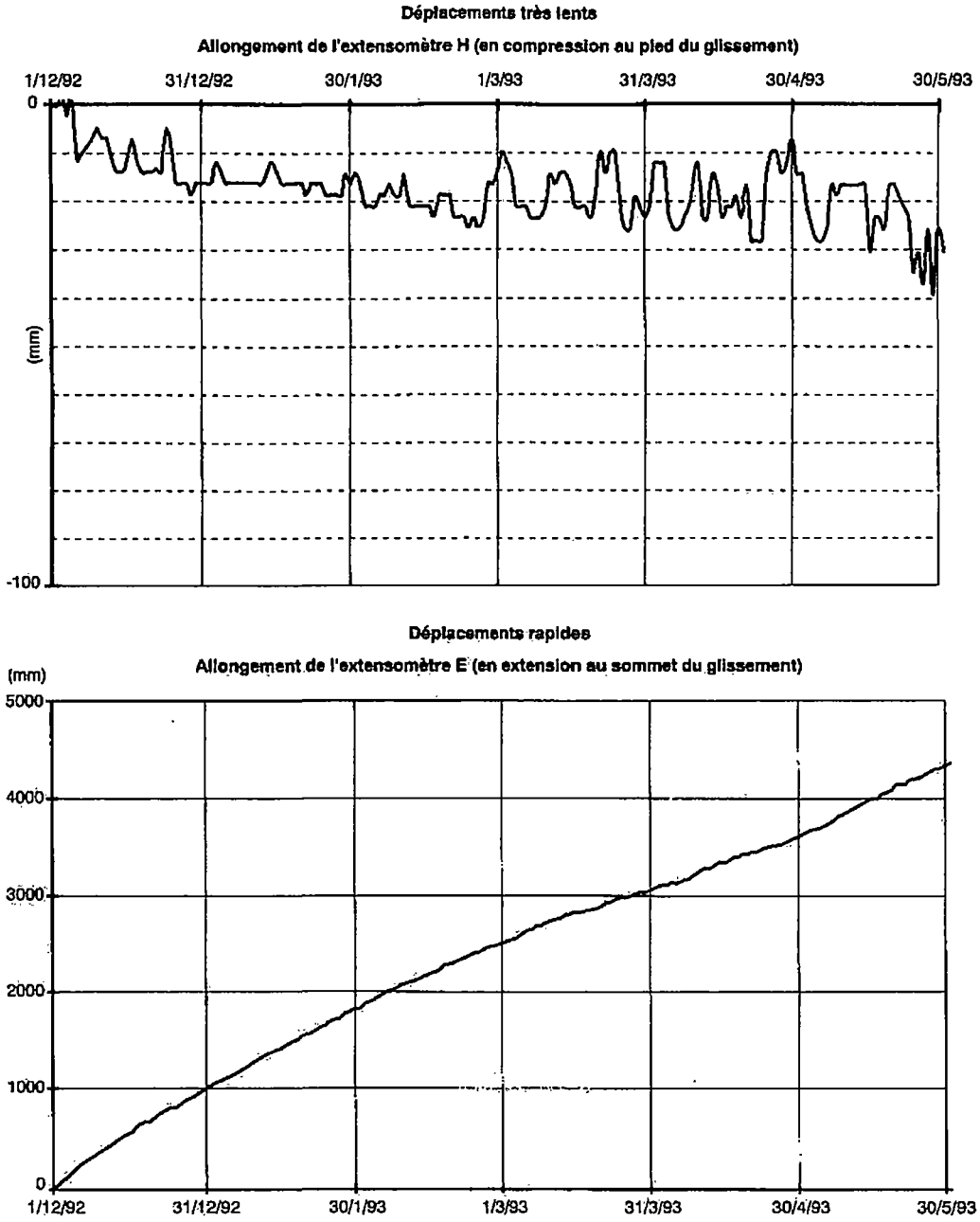


Fig. 3 - Mesures extensométriques.

L'extensomètre H soumis en pied de glissement à un faible raccourcissement (environ 3 centimètres en 6 mois) permet de calibrer la dispersion de cette mesure (avec fil kevlar) qui s'établit dans une plage centimétrique.
Cette dispersion permet de contrôler des mouvements d'un ordre de grandeur à peine supérieur et, à fortiori, les mouvements rapides tels que ceux qu'enregistrait l'extensomètre E en tête du glissement.

Mesures de distance

Automatisées, les mesures de distances sont restées la base de la surveillance. Elles reproduisaient le schéma du suivi de 1982, en conservant l'avantage principal qui est l'extériorité des capteurs par rapport au site.

Les deux automates, fournis par Wild (devenu Leica), sont basés sur un programme (APS 0) implanté dans un micro-ordinateur portable qui permet d'orienter, par l'intermédiaire d'un théodolite motorisé, un distancemètre en direction des cibles et de les retrouver à proximité de leur position précédente. Ils ont été installés dans deux stations implantées 160 m plus haut que la RD 39 pour être moins exposées à l'éventuel effet de souffle d'un éboulement en masse.

Cette situation a nécessité des alimentations électriques solaires autonomes et des transmissions hertziennes par lignes spécialisées relayées au niveau du terminal de mesures ; elle a aussi imposé des accès pédestres, pénibles et difficiles dans la neige, ou héliportés qui ont grevé la maintenance. En effet, les alimentations solaires ne posent pas de problèmes, mais les liaisons hertziennes spécialisées se sont révélées moins robustes ; elle sont sujettes à des dysfonctionnements souvent très fugitifs, qui, lorsqu'ils interviennent en cours de transmission, provoquent des blocages. Certains de ces blocages qui ne peuvent être arrêtés par la programmation sont impossibles à diagnostiquer et à résoudre à distance et imposent le déplacement.

Le nombre des cibles a été porté à une cinquantaine (fig. 4). La fréquence des différentes mesures est paramétrable. On a adopté en temps normal 6 mesures et, au moins, une exploitation par jour. La résolution temporelle accrue par cette fréquence a permis de mettre en évidence des phénomènes transitoires déterminants qui avaient échappé jusqu'alors aux mesures plus discrètes (fig. 5).

L'eau faisant écran à la propagation des rayons infrarouges, les distancemètres sont inopérants pendant les précipitations intenses et quand le brouillard est dense. L'absence d'informations dans ces conditions était palliée par les données extensométriques qui continuaient de nous parvenir.

L'écart-type des distances mesurées sur une cible fixe à 1 300 m est de 2 mm environ (fig. 6).

Fig. 4 - Emplacement des cibles.

Les 24 cibles du dispositif initial de 1982 ont été progressivement complétées (ou remplacées après destruction) pour aboutir à 47 cibles en 1998. (NB : Deux des cibles de référence extérieures au glissement n'apparaissent pas sur la photographie).
Elles sont réparties dans les parties fortement mobiles du glissement pour en contrôler les mouvements, mais implantées aussi sur ses marges, afin d'en vérifier la stabilité et de pouvoir déceler les éventuelles extensions des désordres.

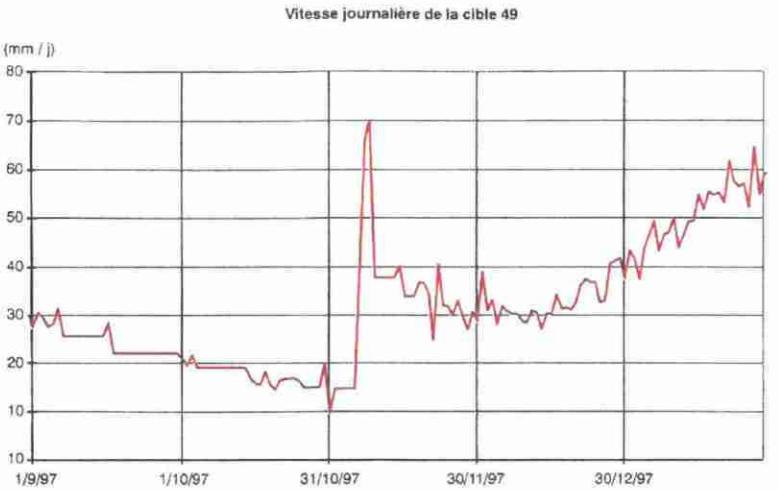


Fig. 5 - Pics fugitifs. *Les mesures fréquentes confirment que les réactions aux sollicitations hydrauliques intenses peuvent parfois être très rapides et elles révèlent aussi des pics aigus de fortes accélérations transitoires.*
Ces dernières traduisent vraisemblablement des saturations brutales et temporaires des réseaux de drainage les plus perméables. Elles peuvent conduire à des schémas de circulation variable des eaux souterraines dans les massifs fracturés, différenciée par les diverses perméabilités de l'aquifère et selon les débits d'infiltration.
Conformément aux conceptions paroxysmiques de l'érosion, ces épisodes peuvent être déterminants dans le déclenchement des mouvements majeurs et sont à prendre en compte dans les prescriptions assignées à la surveillance et l'ensemble de la stratégie de prévention.

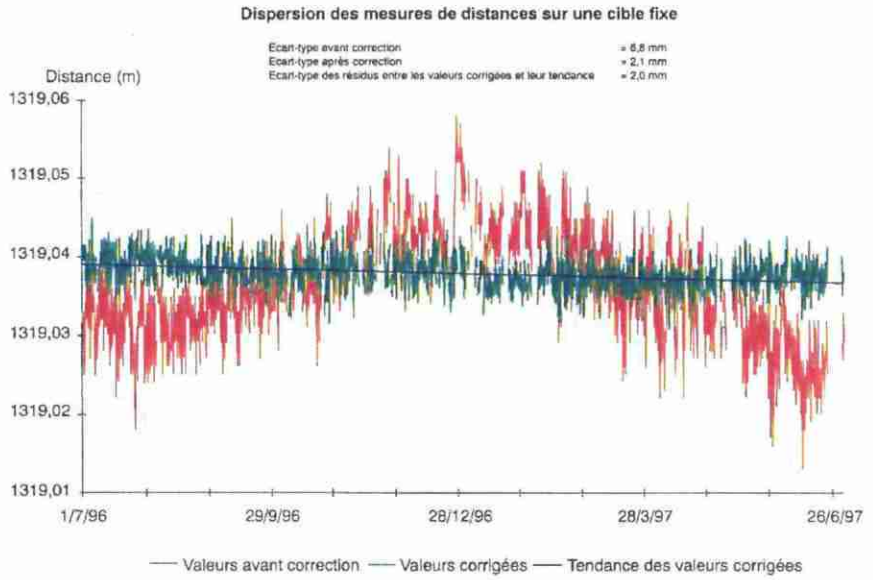


Fig. 6 - Dispersion des mesures de distances. *La propagation des rayons infrarouges dépendant de l'état, variable, de l'atmosphère qu'ils traversent, les mesures de distance ne sont pas fidèles.*
Pour réduire la dispersion due aux variations atmosphériques, on recourt classiquement à des corrections fondées sur des mesures de température et pression.
Au cas particulier, ces mesures nécessairement ponctuelles au voisinage du capteur n'auraient pas été convenablement représentatives des conditions régnant dans le volume traversé à des altitudes variables par les différentes cordes station-cible. On a préféré recourir à des mesures systématiques sur des cibles réputées fixes, rapporter les résultats à des valeurs de référence et corriger par le rapport les mesures sur les cibles étudiées.
La méthode compense pratiquement intégralement les variations saisonnières et diurnes affectant les mesures brutes. On constate sur le graphe qui présente les 1 903 valeurs de distances mesurées sur une cible fixe, brutes, corrigées ainsi que la tendance de ces dernières, qu'elle réduit la dispersion des deux tiers pour aboutir à un écart-type millimétrique parfaitement compatible avec le suivi de déplacements au moins centimétriques.
On remarque aussi une dérive des mesures (2 mm par an) attribuable au vieillissement de la lampe du capteur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] FOLLACCI J.-P. (1987), Les mouvements du versants de La Clapière à Saint-Etienne- de-Tinée (Alpes-Maritimes), *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées*, **150/151**, pp. 39-54.

[2] FOLLACCI J.-P., GUARDIA P., IVALDI J.-P. (1988), *Le Glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes, France) dans son cadre géodynamique*, Comptes rendus du 5e symposium international sur les glissements de terrain, pp. 1323-1327.

[3] REGIONE PIEMONTE et UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER (1996), *Risques générés par les grands mouvements de terrain*, Programme INTERREG 1 France-Italie.

[4] BLANC A., DURVILLE J.-L., FOLLACCI J.-P., GAUDIN B., PINCENT B. (1987), Méthodes de surveillance d'un glissement de terrain de très grande ampleur : La Clapière, Alpes-Maritimes, France, *Bulletin AIGI*, **35**, pp. 37-46.

[5] AZZONI A., CHIESA S., FRASONI A., GOVI M. (1992), The Val Pola landslide, *Engineering geology*, **33**, pp. 59-70.

[6] LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES (1994), Surveillance des pentes instables, *Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées*.

[7] GERVREAU E. (1991), *Étude de l'évolution des versants naturels en mouvement : prévoir, alerter*, Thèse École centrale des arts et manufactures.

[8] COMPAGNON F., GUGLIELMI Y., MUDRY J., FOLLACCI J.-P., IVALDI J.-P. (1997), *Approche chimique et isotopique de l'origine des eaux en transit dans un grand mouvement de terrain : exemple du glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes)*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, t. 325, série IIa, 8 : pp. 565-570, 2 fig.

ABSTRACT

Sixteen years of monitoring landslides at the La Clapière site (Alpes-Maritimes)

J.-P. FOLLACCI

Since 1982 the instrumented La Clapière site has been providing continuous series of accurate data on surface movements of the slope. This data has been backed up by rainfall data.

Such monitoring is essential in order to prevent the landscape hazards caused by landslides and thus contributes to public safety, but it also provides large amounts of data which contribute to our understanding of instabilities in large rocky slopes.

The sixteen year history of this monitoring site illustrates many problems (for example of a technical, economic or administrative nature) which are encountered during remote monitoring, particularly of a natural site.

A description of the hazard in question and its possible consequences is followed by a brief account of the system and the changes it has gone through. Finally, an account is given of some fresh insights into remote monitoring gained from our experience.

ANNEXE 5 :

Fiches de matériels utilisés dans l'auscultation des versants instables

GÉODÉSIE TERRESTRE

Principe de la mesure - Domaine d'application

Déterminer avec grande précision les coordonnées X, Y et Z d'un point se rattachant à un système planimétrique (représentation plane LAMRERT ou système Local).
Méthodologie d'utilisation :

- détermination du canevas de référence ;
- détermination des repères du site suivi ;
- choix du matériel mis en œuvre ;
- définition des modes opératoires pour les mesures angulaires et celles de distance.

Description de l'appareillage

Les appareils mis en oeuvre doivent permettre de mesurer les distances et les angles avec grande précision. Il existe trois grands types d'appareils (théodolites, distance-mètres et niveaux), et de nombreux modèles qui diffèrent par la précision, l'automatisation, etc.
Les repères mesurés doivent être convenablement ancrés dans le terrain. Il faut choisir avec soin le type de repère à viser.

Caractéristiques d'utilisation

Valeurs indicatives de la précision, pour une distance de visée kilométrique :

- en planimétrie : 1 mm à 10 cm ;
- en altimétrie : 0,2 mm à 10cm.

Vulnérabilité : celle des repères laissés sur le terrain.

Contraintes

Le point mesuré en planimétrie doit être visé si possible d'au moins deux points du canevas de référence. Tous les points n'ont pas besoin d'être accessibles à chaque mesure. Le canevas de base doit être défini avec grand soin.
Les mesures ne peuvent en général être faites ni de nuit ni par temps pluvieux et brumeux. Elles ne peuvent être réalisées à une cadence très rapide.
Il est nécessaire de faire des corrections en fonction de la température, de La pression atmosphérique et du taux d'hygrométrie pour les mesures de distance.

Appréciation en matière de surveillance

La géodésie terrestre est bien adaptée au suivi discontinu des mouvements de terrain de grande ampleur dans une phase de vitesse faible, ou dans des phases d'évolution avancée, quand les mouvements sont importants et que les accès au site deviennent dangereux. Son utilisation à des fréquences annuelles ou bisannuelles peut servir de contrôle à un autre type de mesure, plus rapide mais moins complète, réalisée plus fréquemment.
Coût assez élevé.

GÉODÉSIE SPATIALE G.P.S.

Principe de la mesure - Domaine d'application

Système de radio-navigation utilisant un réseau de satellites américains (Global Positioning System) :

- un service de positionnement absolu précis (σ < 10 m), réservé aux militaires ;
- un service de positionnement absolu standard (σ < 100 m), ouvert à tous ;
- un service de positionnement relatif de grande précision, ouvert à tous.

Les satellites en orbite autour de la terre constituent des cibles de positions connues. L'utilisation normale du système est basée sur la détermination de pseudo-distances satellites-récepteur (différence temps de réception-temps d'émission), le récepteur étant placé au point de mesure il faut utiliser au moins quatre satellites pour pouvoir déterminer la position du récepteur. Les mesures différentielles précises nécessitent la mesure de phase du signal.
Glissements, éboulements, etc.

Description du matériel

Le système est composé de trois segments :

- segment spatial : vingt-et-un satellites disposant dune horloge ultra-stable, et émettant des signaux ;
- segment de contrôle : cinq stations au sol vérifiant le bon fonctionnement des horloges et mesurant les orbites ;
- segment utilisateur : récepteurs destinés aux travaux géodésiques ; logiciels de traitement.

Caractéristiques d'utilisation

Précision (pour quelques minutes de station) :

- positionnement tridimensionnel absolu avec une précision de 20 à 100 m environ ;
- distances relatives entre deux points avec une précision de l'ordre de quelques mm pour des distances kilométriques. Des essais réalisés sur le site de Séchilienne ont donné : ± 3 mm en planimétrie, ± 6 mm en altimétrie.

Contraintes

Les mesures peuvent être faites par tous temps, en permanence, de jour et de nuit.
Aucune nécessité que les points mesurés soient intervisables, mais il ne faut pas qu' il y ait d'obstacles masquant le ciel dans un rayon d'une vingtaine de mètres autour des récepteurs (arbres, bâtiments,. etc).
Le traitement des mesures nécessite de faire appel à un logiciel spécifique et à un personnel très qualifié.

Appréciation en matière de surveillance

La visibilité entre points au sol n'est pas nécessaire, d'où un gros avantage en site montagneux par rapport à la géodésie classique, pour autant qu'un versant à forte pente ne masque pas une partie du ciel. Les sites sont choisis indépendamment les

uns des autres.

Méthode applicable dans des points difficiles d'accès pour vérifier leur stabilité dans le temps. Elle peut être utilisée également en suivi discontinu sur de grandes zones instables.
Coût : il est possible de déterminer un grand nombre de repères en un temps très bref, d'où un prix du point sensiblement inférieur à celui fourni par la géodésie classique.

PHOTOGRAMMÉTRIE TERRESTRE ET AÉRIENNE

Principe de la mesure - Domaine d'application

La photogrammétrie utilise Le principe de la vision stéréoscopique, qui permet de restituer l'image tridimensionnelle de l'objet observé. Deux photographies (ou plus) de l'objet sont prises de deux points de vue différents afin d'obtenir l'effet stéréoscopique. Des appareils de restitution photogrammétrique permettent, à partir des deux clichés, de reconstruire L'image 3-D.

Utilisation soit en absolu (positionnement de points à l'aide de quelques points de calage repérés par géodésie classique), soit en relatif (déplacement de points entre deux dates de prises de vue).

Instabilités telles que glissements, fluages, etc.

Description de l'appareil

Appareil photographique à chambre métrique ou caméra CCD, mis en oeuvre au sol, en hélicoptère ou en avion.
La mise en place de cibles, adaptées à l'échelle des photos, sur les points à déterminer, améliore la précision.

Caractéristiques d'utilisation

La précision peut être meilleure que 10^{-5} D, D étant l'extension maximale de la zone surveillée (D est en général compris entre 50 et 1 000 m). La liberté du choix de l'échelle permet de faire varier à volonté la précision (et le coût) de la mesure.

Contraintes

Mesures de jour uniquement.
Nécessité de visibilité de tous les points mesurés depuis les points de prise de vue.
Délai de développement photographique et de dépouillement (restitution), sauf pour les méthodes utilisant des caméras numériques CCD qui permettent un traitement en temps réel.

Appréciation on matière de surveillance

Permet la détermination simultanée de plusieurs dizaines, voire dune centaine. de cibles sur des versants instables de grande superficie, sur des grands ouvrages construits sur versants instables.

Adapté aux mouvements très lents.

Système d'archivage utilisable pendant la période de latence d'un phénomène, qui peut n'être exploité (restitution) que lorsque les mouvements deviennent inquiétants. L'IGN possède ainsi un fond important de photographies aériennes métriques anciennes (depuis 1920 environ) qui permettent souvent un calage antérieur à toute surveillance.

Coût très compétitif par point mesuré (pour un grand nombre de points).

DISTANCEMETRE ÉLECTRO-OPTIQUE

Principe de la mesure - Domaine d'application

Le distancemètre électro-optique permet de calculer la distance séparant la station ou est installé l'appareil, d'un point doté dune mire réflectrice, à partir du temps de propagation d'une onde optique. Utilisation pour les mouvements de moyenne à grande ampleur.

Description de l'appareil

L'appareil émet un signal optique modulé à très haute fréquence, qui est réfléchi par la mire composée d'un prisme possédant la propriété de renvoyer le rayon lumineux parallèlement à lui-même, quelle que soit l'orientation de la mire. Le signal réfléchi est comparé au signal émis : la différence de phase indique le temps du parcours et, connaissant la vitesse de propagation des rayons lumineux, la distance parcourue. Un calculateur intégré fournit immédiatement la distance sous forme numérique.

Caractéristiques d'utilisation

Précision :

- appareils de classe courante ± 5 mm pour quelques centaines de mètres ;
- appareils de haute précision 0,3 (mm) ± 10^{-6} D (m), D étant la distance entre la mire et l'appareil.

Vulnérabilité des réflecteurs laissés sur le terrain.

Contraintes

Les mesures sont possible de jour et de nuit. Par contre, le brouillard, ou la pluie, rend les mesures difficiles, voire impossibles.
La propagation de la lumière est perturbée par La variation d'indice de réfraction de l'air, d'où la nécessité de mesurer la température et la pression de la couche d'air traversée pour apporter les corrections utiles, ou bien d'effectuer des visées de calage sur des cibles réputées fixes.
La station de mesure doit être installée dans une position telle que le mouvement des cibles se fasse à peu près dans la direction de la station.

Appréciation en matière de surveillance

La mesure de distances par distancemètre électro-optique pourra être utilement intégrée à un dispositif de surveillance si les conditions suivantes sont respectées : quantité de repères suffisante pour obtenir une vue d'ensemble et qualité du dispositif au sol (bases et repères).
On peut compléter les mesures de distance par des mesures géodésiques classiques

pour contrôler périodiquement (une fois par an, par exemple) la position des mires et préciser l'orientation des déplacements.
La surveillance par distance mètre électro-optique sera *a priori* discontinue. Des possibilités d'automatisation existent cependant qui permettent, dans le cadre d'opérations importantes (coût élevé), de se rapprocher d'une surveillance en continu.

Coût de l'ordre de 15 k€ pour l'appareil, 75 k€ pour une station de mesure automatique.

DISTANCEMÈTRE À FIL INVAR

Description de la mesure - Domaine d'application

La mesure consiste à placer, entre deux repères implantés de part et d'autre de la fissure à surveiller, une chaîne de mesure constituée par le capteur de déplacement, un fil de mesure et une ou plusieurs rallonges suivant les cas pour centrer l'appareil dans sa plage de mesure.

Utilisation en mécanique des roches, pour la mesure de l'ouverture de grandes fissures.
Le distancemètre orientable à fil invar permet d'effectuer à partir d'un même repère des mesures dans toutes les directions (systèmes de trilatération à deux ou trois dimensions).

Description de l'appareil

L'appareil (type Laboratoire des Ponts et Chaussées de Lyon) comprend un système d'amarrage venant se visser sur un repère. Cet embout comporte une articulation permettant une rotation à 360° (sur cette articulation est gravé un repère permettant de positionner l'appareillage d'une façon toujours identique). L'articulation supporte le corps de mesure, constitué d'un tube sur lequel sont gravées des graduations au millimètre. Un vernier au $1/10^{e}$ de mm vient coulisser à l'intérieur de ce tube.
Une molette montée sur une tige filetée permet de régler la tension du fil. Celle-ci est contrôlée par le dynamomètre, sur lequel sont gravés trois repères qui permettent de contrôler précisément par coïncidence la bonne mise en place du dispositif.
Une chape, sur laquelle on accroche les fils ou rallonges, vient compléter l'extrémité du distancemètre.

Caractéristiques d'utilisation

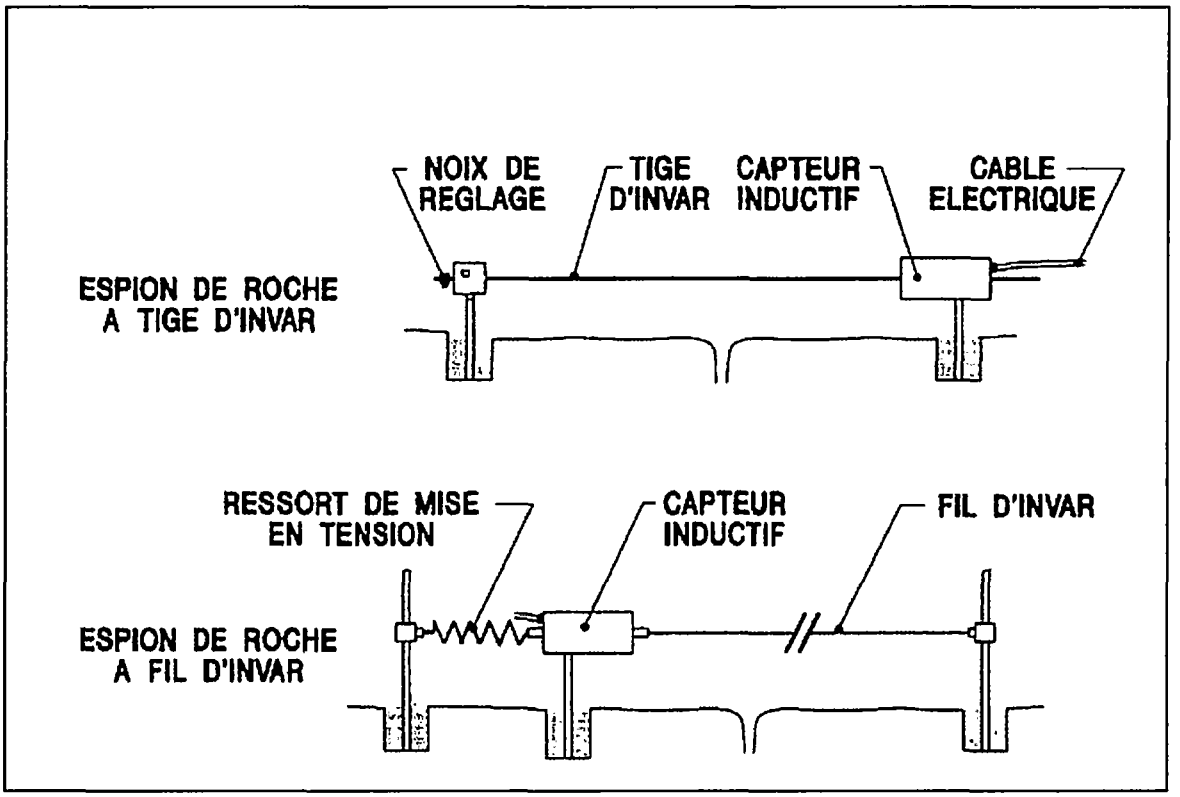
Domaine de mesure 0,60 m < base mesurée <40 m ;
- précision : $1/10^{e}$ de millimètre ;
- fiabilité : bonne.

Contraintes

Mise en place : réalisation de forages et de scellement pour matérialiser les extrémités des bases mesurées.
Fonctionnement : le maniement de l'appareil et des fils de mesure (surtout en terrain accidenté) demande une certaine habitude. Il faut en outre procéder à un réétalonnage régulier des fils de mesure.
Mesure manuelle.
Exploitation : en trilatération, le dépouillement des mesures peut être assuré par un programme de calcul spécifique.

Appréciation en matière de surveillance

Appareil robuste, d'un poids très faible (400 g) et de dimensions réduites (250 x 50 mm), particulièrement adapté à la prise de mesures précises dans des conditions sévères.
Convient au suivi sommaire de sites ou au contrôle de bases extensométriques automatiques.



Types de montages à fil et tige d'invar

EXTENSOMETRE À BASE COURTE

Principe de la mesure - Domaine d'application

L'utilisation d'un capteur de déplacement linéaire permet la mesure de l'ouverture de fissures dans des plages de variation réduites, même si la fissure elle-même est très ouverte : le capteur est fixé d'un côté de la fissure, à l'intérieur du capteur coulisse une tige métallique solidaire de l'autre lèvre de la fissure, et le déplacement relatif est enregistré.

Description de l'appareil

L'appareil est constitué d'un tube d'acier qui protège le capteur de déplacement linéaire. Il délivre un signal en intensité (4-20 mA) ou en tension, qu'un étalonnage permet de convertir en unités de déplacement.

Caractéristiques d'utilisation

Plage de mesure : de 25 à 450 mm ;
- précision : 0,1 mm ;
- fiabilité très bonne ;
- vulnérabilité : chutes de pierres (prévoir des capots de protection).

Contraintes

Mise en place : nécessité de procéder à des forations et à des scellements.

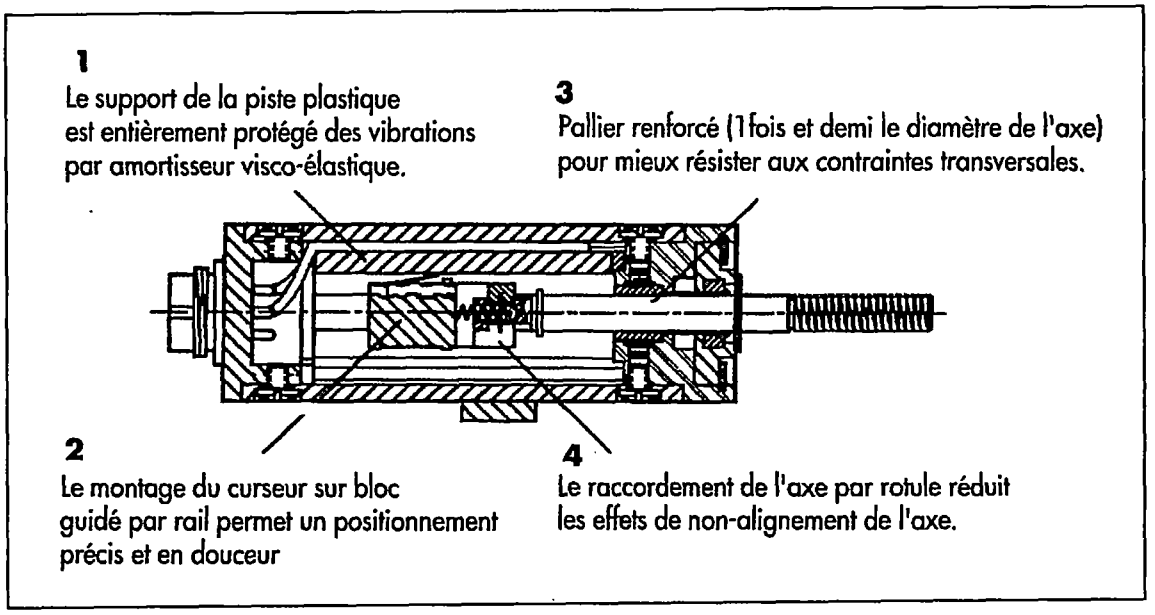
Fonctionnement : alimentation électrique indispensable pour mesure de résistance. Mesure automatisable (avec système d'acquisition). Nécessité de recaler le dispositif quand on arrive en bout de course du potentiomètre.

Exploitation : fonction du système d'acquisition.

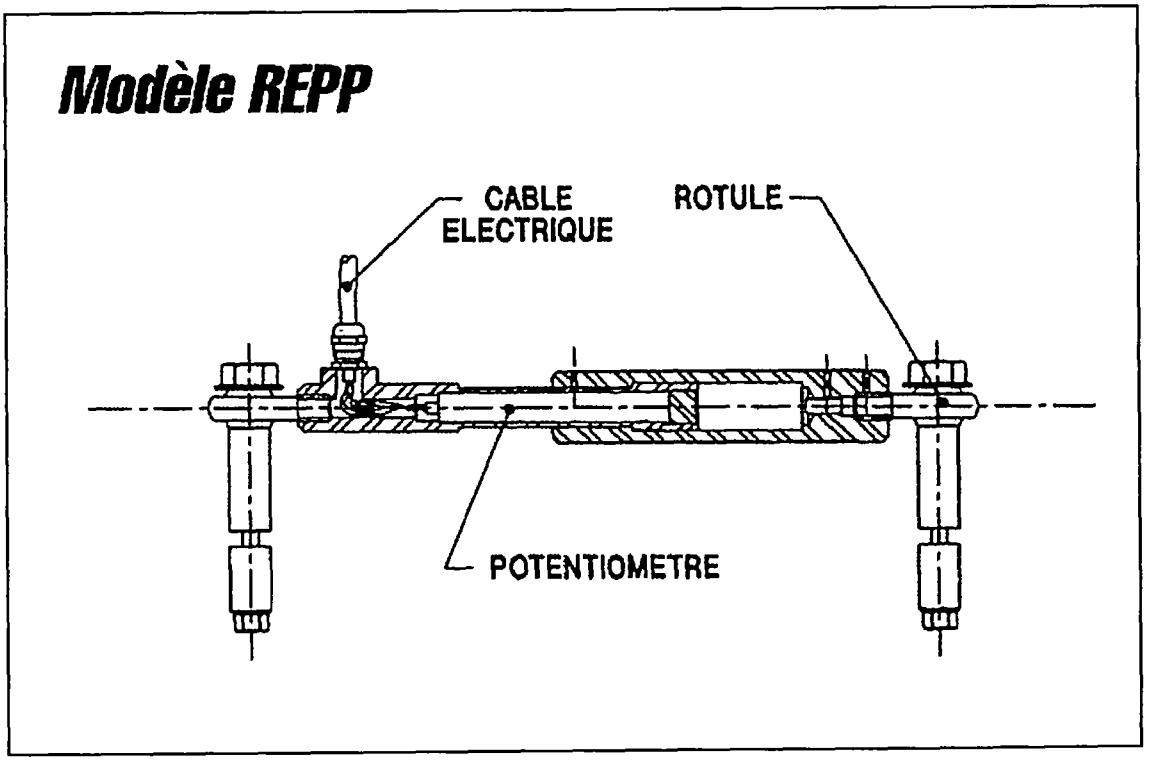
Appréciation en matière de surveillance

Capteur compact, précis, solide, adapté à des conditions de fonctionnement difficiles.

Coût de l'ordre de 0,8 k€.



Conception d'un extensomètre potentiométrique



Montage « à 2 rotules »

EXTENSOMETRE À FIBRE OPTIQUE

Principe de la mesure - Domaine d'application

L'utilisation d'un capteur de déplacement linéaire à fibre optique permet la mesure de l'ouverture de fissures dans des plages de variation réduites, même si la fissure elle-même est très ouverte.

Description de l'appareil

Sa conception est basée sur l'utilisation d'un interféromètre Fizeau en couche mince monté sur une tige mobile.
Il est conditionné comme un capteur LVDT classique, selon deux configurations :

- fixé à un bloc d'ancrage. Le palpeur à ressort vient s'appuyer sur une surface de référence fixée à une équerre également ancrée ;
- les deux extrémités du capteur sont fixées à des supports à rotules. Cela permet au capteur de tolérer de faibles déplacements dans des directions différentes de la direction de mesure.

Caractéristiques d'utilisation

Plage de mesure : 20 mm ;

- précision : ± 0,1 % de la plage de mesure ;
- résolution : 0,002 mm ;
- fiabilité très bonne ;
- vulnérabilité : chutes de pierres (prévoir des capots de protection).

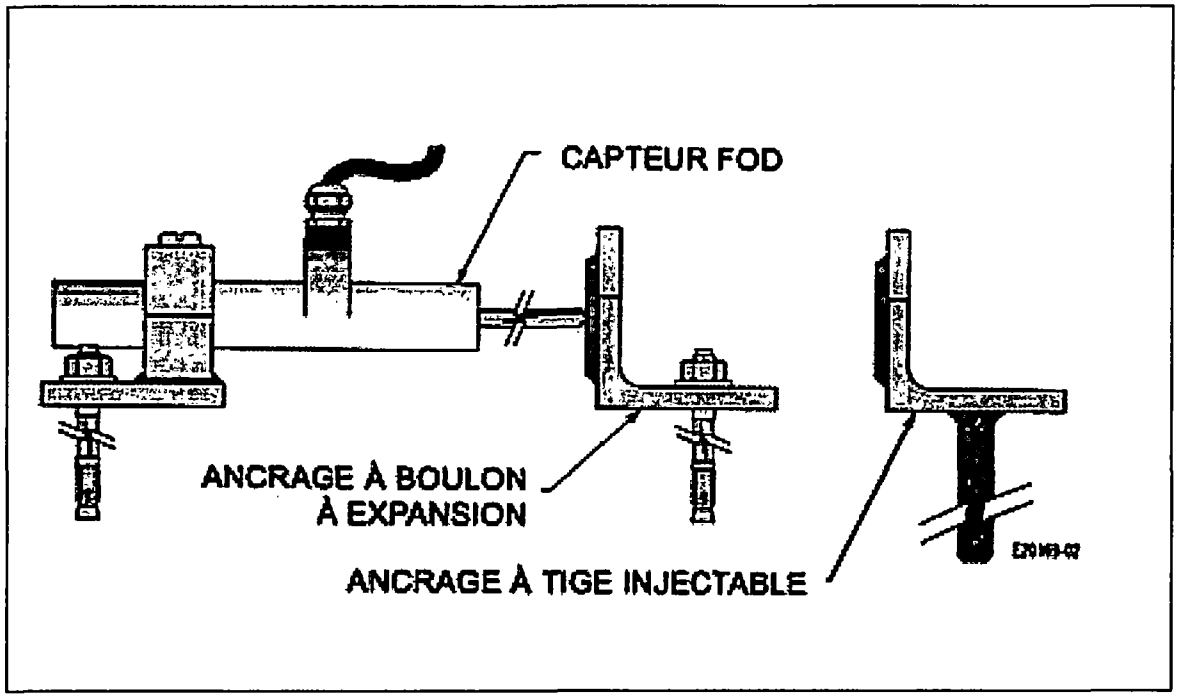
Contraintes

Mise en place : nécessité de procéder à des forations et à des scellements.

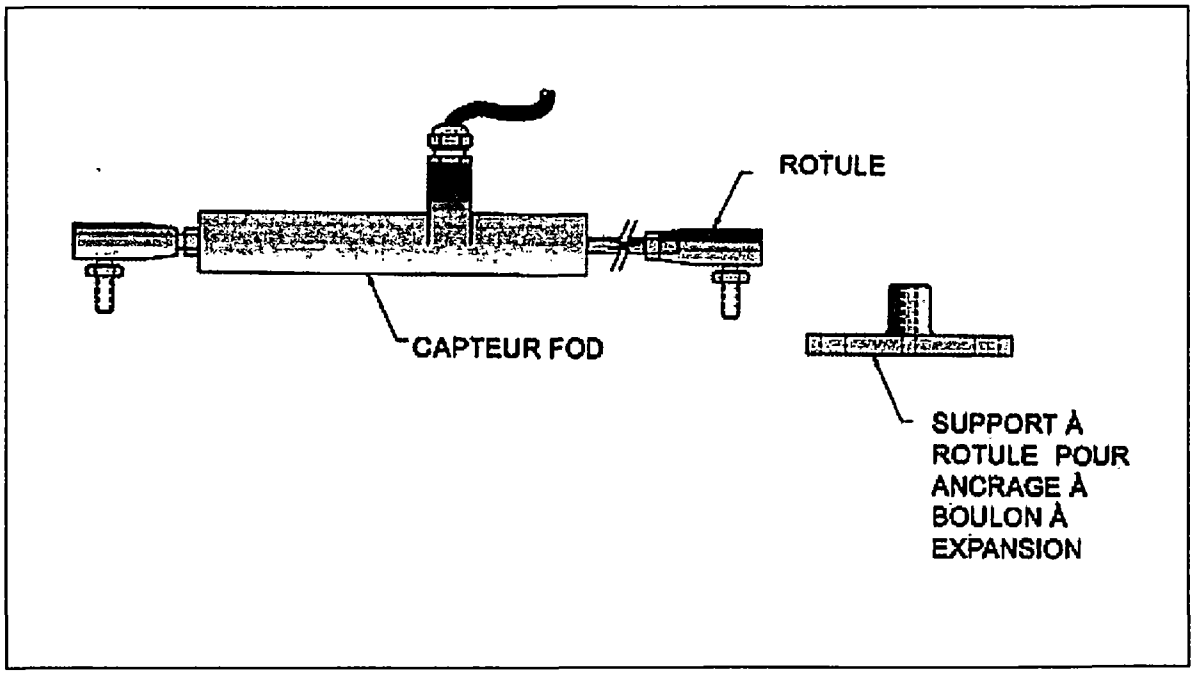
Fonctionnement : unité de lecture à fibre optique pécifique.

Appréciation en matière de surveillance

Capteur compact, précis, solide, adapté à des conditions de fonctionnement difficiles car immunisé aux interférences électromagnétiques et aux radiofréquences. Peut être installé jusqu'à 2 km du poste de mesure.



Configuration « palpeur »



Configuration « rotule à chaque extrémité »

EXTENSOMÈTRE À BASE LONGUE

Principe de la mesure - Domaine d'application

Un fil en acier invariable (insensible aux variations de température) est tendu au-dessus de la fissure/crevasse à surveiller. Il est amarré sur l'une des lèvres de la fissure/crevasse. Il passe sur une poulie solidaire de l'autre lèvre et est muni à son extrémité libre d'un contrepoids assurant son application correcte au fond de la gorge de poulie.

Une ouverture ou une fermeture de la fissure/crevasse provoque, par l'intermédiaire du fil, une rotation de la poulie. L'axe de cette dernière est équipé d'un potentiomètre rotatif, dont on mesure les variations de résistance. L' étalonnage permet de remonter de la variation de résistance à l'ouverture de la fissure.

Mécanique des roches et des sols : mesure de l'ouverture de larges fissures, de l'évolution de l'escarpement d'un glissement.

Description de l'appareil

Dispositif de fixation + dispositif de tension à poulie et contrepoids + capteur potentiométrique sous capot étanche + fil de mesure en acier invariable de diamètre 1,65 mm + câble blindé trois conducteurs.

Caractéristiques d'utilisation

Domaine de mesure : jusqu'à 100 m ;
- précision : ± 0,5 mm ;
- fiabilité: bonne ;
- vulnérabilité : chute de pierres, foudre (les fils d'acier jouent le rôle de paratonnerres).

Contraintes

Mise en place : nécessité de procéder à des forations et à des scellements (éventuellement en paroi).

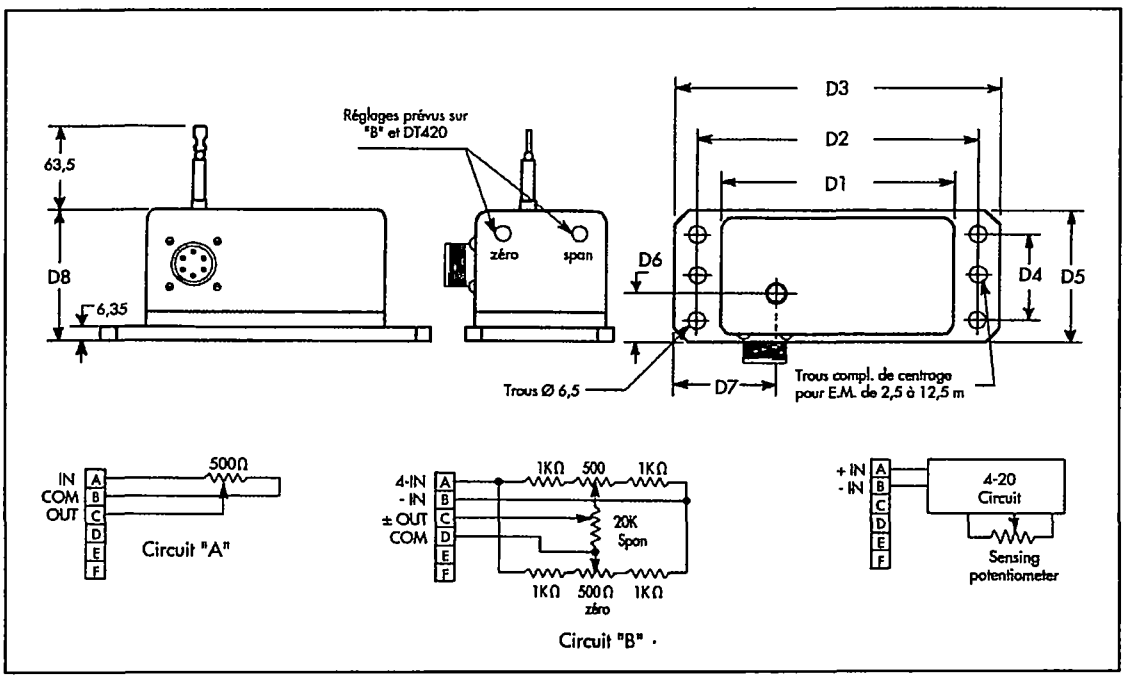
Fonctionnement : alimentation électrique indispensable pour mesure de résistance. Mesure automatisable (avec système d'acquisition). Nécessité de recaler le dispositif quand on arrive en bout de course du potentiomètre.

Exploitation : fonction du système d'acquisition.

Rustique et peu coûteux.

Appréciation en matière de surveillance

Bien adapté au suivi à fréquence de plus d'une mesure par jour (à condition d'automatiser l'acquisition).



Extensomètre à base longue modèle LVDT

MIRE À VERNIER

Description de la mesure - Domaine d'application

La mire à vernier est un extensomètre mécanique à lecture directe qui peut être effectuée à distance (paire de jumelles ou lunette grossissante). Cet appareil est lisible jusqu'à une distance de 200 mètres.
La mire à vernier permet de mesurer les variations de distance des deux points entre lesquels elle est placée. La lecture est analogue à celle d'un pied à coulisse.

Mesure de l'ouverture de petites fissures.

Description de l'appareil - Schéma

L'appareil comporte une échelle graduée de 7 à 24 cm, devant laquelle coulisse un vernier au 1/10^{e}. La partie fixe de la mire à vernier est fixée sur l'une des lèvres de la fissure à surveille,r par scellement à la résine ou au ciment soit directement (orientation de la mire parallèlement à la paroi), soit par l'intermédiaire d'une potence (orientation de la mire normalement à la paroi).
Les mires à vernier peuvent être associées pour mesurer les mouvements dans plusieurs directions, chaque appareil mesurant la composante du mouvement dans une direction.

Caractéristiques d 'utilisation

Plage de mesure <200 mm ;
- précision : ± 0.5 mm ;
- fiabilité bonne ;
- vulnérabilité : chutes de pierres.

Contraintes

Mise en place : nécessité d'effectuer des forations et des scellements. Une profondeur de scellement de 10 a 15cm suffit en rocher sain. Elle doit être augmentée en cas de rocher de qualité douteuse.

Fonctionnement : lecture peu aisée, non automatisée, à faire de jour et par temps clair.

Appréciation en matière de surveillance

Appareil rustique, adapté à l'auscultation et au suivi sommaire.

Coût : quelques dizaines d'euros.

PENDULE INVERSE

Description de la mesure - Domaine d'application

Le pendule inverse consiste en un fil d'acier tendu verticalement dans un forage entre un point bas solidaire du substratum (sous le niveau de la surface de rupture) et un point haut solidaire d'un flotteur en surface reposant dans une cuve et libre de se déplacer horizontalement. La cuve, ancrée au sol, suit les mouvements du terrain. Le déplacement de la cuve par rapport au point fixe correspond au déplacement du terrain.
L'utilisation du pendule inverse suppose la connaissance préalable de la profondeur de la surface de glissement.

Description de l'appareil

L'appareil est constitué par :
- une cuve annulaire en PVC de 1,2 m de diamètre et de 1 m de hauteur ;
- un flotteur annulaire au centre duquel est fixé le haut du câble du pendule ;
- une dalle en béton armé ancrée d'un mètre dans le sol qui supporte la cuve ;
- un fil d'acier (câble du pendule) ;
- un système de mesure du déplacement par capteurs angulaires (potentiomètres) ou par vernier.

Caractéristiques d 'utilisation

Plage de mesure : 15 à 50 cm ;
- précision : 0,1 mm ;
- fiabilité : bonne ;
- vulnérabilité : protection du pendule en surface (abri).

Contraintes

Mise en place : réalisation d'un forage vertical (diamètre 30 à 100 cm) jusqu'à une profondeur supérieure de 3 m à la profondeur de glissement, tubé en PVC (ou puits de 80 cm de diamètre équipé de buses de béton armé). Pour des raisons pratiques, la profondeur du forage est de 20 à 25 m au maximum. Réalisation d'une dalle de béton armé d'épaisseur 40 cm environ, ancrée d'au moins 1 m dans le sol.

Fonctionnement : mesure automatisable par utilisation de capteurs potentiométriques (+ centrale d'acquisition).

Appréciation en matière de surveillance

Permet une mesure ponctuelle ou continue du déplacement.
Très bon appareillage pour le suivi automatique des instabilités de versant.
Coût de l'appareil : approximativement 10 k€.

INCLINOMÉTRIE EN FORAGE

Principe de la mesure - Domaine d'application

L'inclinométrie en forage consiste à mesurer la déformation angulaire du sol à différentes profondeurs. Le principe de la mesure est le suivant : un tube vertical est scellé dans un forage suffisamment profond pour que les derniers mètres soient ancrés dans le substratum fixe ; la sonde inclinométrique est descendue dans le tube et mesure, en remontant et selon deux plans perpendiculaires, l'angle d'inclinaison du tube à différentes profondeurs, ce qui permet d'obtenir par intégration la géométrie précise du tube. La mesure à des dates différentes permet d'évaluer la déformation du terrain en fonction du temps.

Les servo-accèléromètres peuvent également être installés hors trou pour mesurer les déplacements angulaires de tout support.

Description de l'appareil

L'appareillage se compose :

- d'un tube inclinométrique constitué d'éléments de 3 à 6 m de longueur que l'on raccorde entre eux, placé dans un forage ;
- de la sonde inclinométrique équipée de 2 servo-accèléromètres disposés à angle droit et de roulettes de guidage ;
- d'une valise électronique de mesure (affichage de la mesure en général en 10^{-4} ou 10^{-5} radians).

Caractéristiques d'utilisation

Plage de mesure : ± 5 degrés ;

- précision ± 2.10-4 à 2.10-5 radian (typiquement ± 0.1 mm de déplacement en tête) ;
- profondeur du tube : en général entre 10 et 50 m, voire plus ;
- vulnérabilité : nécessité de protéger la tête du tube en surface.

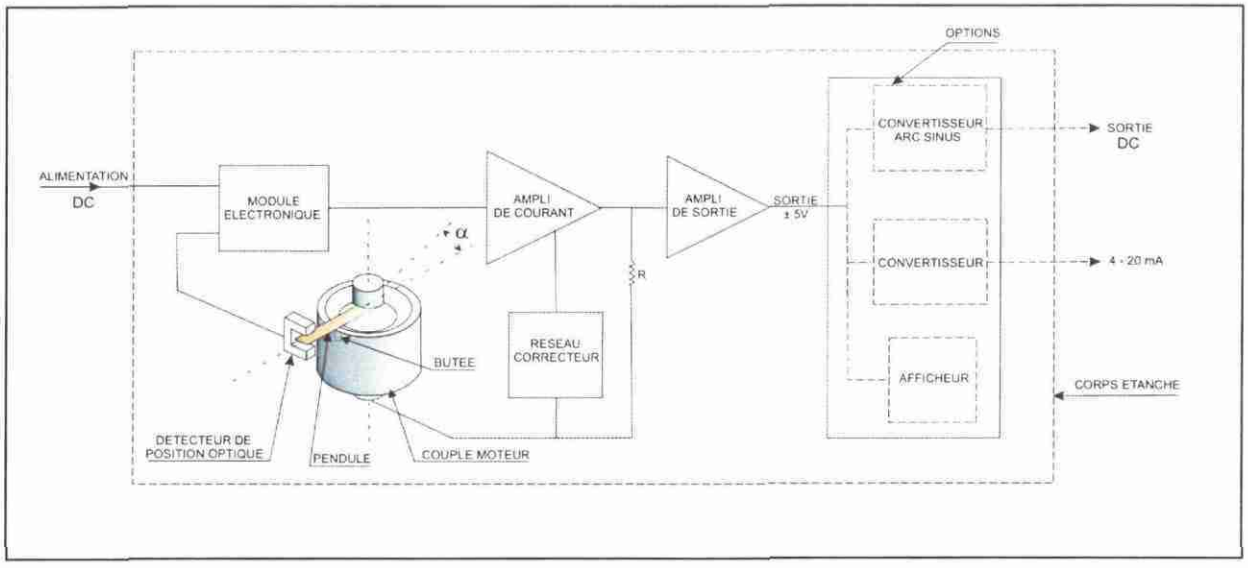
Contraintes

Forage de diamètre de l'ordre de 100 mm, à descendre 3 m au minimum sous la surface de glissement présumée. Scellement du tube à la paroi du forage à l'aide d'un coulis spécifique. Eviter les zones en tassement (flambement du tube).
Maintenance : nettoyage périodique des tubes.
Limitation du déplacement cumulé : 5 à 10 cm maximum sur la surface de rupture.

Appréciation en matière de surveillance

Appareil de base pour déceler et situer la surface de rupture d'un glissement, et pour le

suivi de déplacements lents à très lents.
Coût de l'ordre de 3 k€ pour la pose d'un tube de 20 m et deux séries de mesures.
Coût de l'ordre de 500 € pour un servo-accéléromètre 2 axes.



Principe de fonctionnement du servo-accéléromètre

INCLINOMETRE - ACCELEROMETRE DEUX AXES MODELE SX 41400

CARACTERISTIQUES

- 6 gammes : ± 3,00 ° (0,05 G) - 0,5 ms $^{-2}$
  ± 5,75 ° (0,10 G) - 1,0 ms $^{-2}$
  ± 14,50 ° (0,25 G) - 2,5 ms $^{-2}$
  ± 30,00 ° (0,50 G) - 5,0 ms $^{-2}$
  ± 45,00 ° (0,70 G) - 7,0 ms $^{-2}$
  ± 90,00 ° (1,00 G) - 10 ms $^{-2}$
- Hautes performances
- Excellente stabilité en température
- Très bonne tenue aux chocs et vibrations
- Boîtier robuste, étanche
- Amplificateur d'asservissement réalisé en technologie hybride
- Conforme aux Normes Européennes sur la compatibilité électromagnétique

Servo-accéléromètre 2 axes à poser « hors trou »

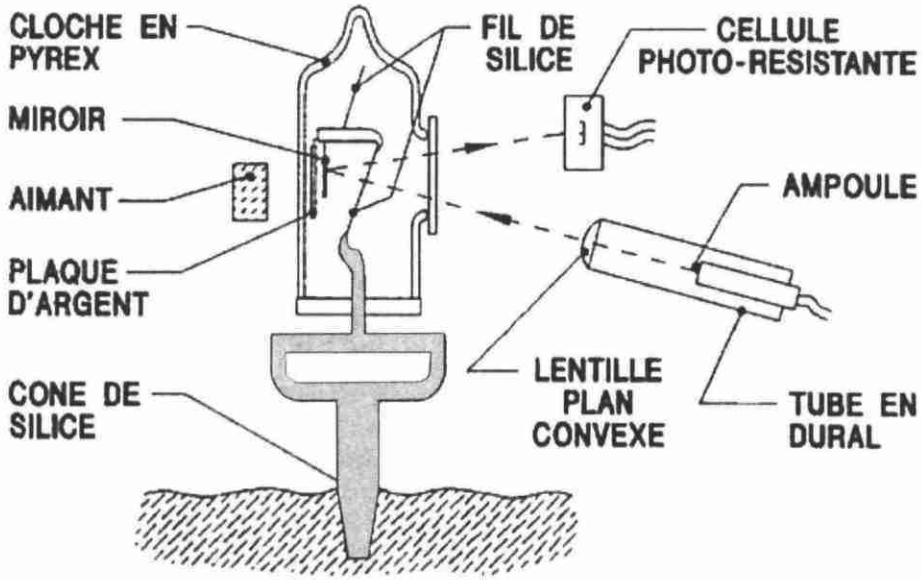
INCLINOMETRE - ACCELEROMETRE CYLINDRIQUE MODELE SX 41300

CARACTERISTIQUES

- 6 gammes : ± 3,00 ° (0,05 G) - 0,5 ms^{-2}
  ± 5,75 ° (0,10 G) - 1,0 ms^{-2}
  ± 14,50 ° (0,25 G) - 2,5 ms^{-2}
  ± 30,00 ° (0,50 G) - 5,0 ms^{-2}
  ± 45,00 ° (0,70 G) - 7,0 ms^{-2}
  ± 90,00 ° (1,00 G) - 10 ms^{-2}
- Hautes performances
- Excellente stabilité en température
- Très bonne tenue aux chocs et vibrations (homologation GAM T 13)
- Boîtier robuste, étanche
- Sorties par broches ou connecteur
- Composant

Servo-accéléromètre de forage

Modèle CLINO-COMPACT et THR



Clinomètre de très haute résolution et précision (I.P.G.)

STATION D'ÉCOUTE SISMIQUE

Description de la mesure - Domaine d'application

L'écoute sismique permet d'acquérir des données sur les vibrations se propageant dans un massif rocheux en cours de mouvemen.t Parmi ces vibrations, certaines sont émises par les ruptures qui se développent soit sur la surface, soit au sein de la masse (les fréquences sont de l'ordre de quelques dizaines de hertz). Le système échantillonne les signaux avant transmission par voie FM.
Une sortie graphique sur tambour permet de visualiser le signal en continu. Un enregistrement sur bande magnétique après déclenchement permet de réaliser sur les événements significatifs un traitement du signal.

Description de l'appareillage

L'appareilage comprend :
- les géophones installés sur le site (enregistrement de la vitesse de vibration) ;
- le système d'échantillonnage et de transmission, également sur site ;
- un système de traitement du signal déporté.

Caractéristiques d'utilisation

Fréquences utiles : 1 à 100 Hz ;
- précision 0,05 µm/s (amplitude fonction de la dynamique du système, 120 dB souhaitable) ;
- fiabilité : très bonne ;
- vulnérabilité : foudre, vandalisme.

Contraintes

Enregistrement déporté, nécessitant une télé-transmission.
L'alimentation du dispositif sur le site implique en général une alimentation électrique par panneaux solaires.
Autorisation dune fenêtre de fréquence radio pour transmissions.
Bruits de fond, parasites, qui peuvent être gênants sur certains sites.

Appréciation en matière de surveillance

Actuellement au stade expérimental.
Coût minimum 50 k€ (installation)>, 80 k€ pour deux géophones haut de gamme, 30 k€ par an pour l'exploitation.

Géosciences pour une Terre durable
brgm