

Département fédéral des transports, des communications et de
l'énergie
Office Fédéral des Routes

Mandat de recherche N° 22/86 effectué sur proposition de l'Union des
professionnels suisses de la route, Commission de surveillance VSS 272

PRINCIPES D'AUSCULTATION
DES OUVRAGES ROUTIERS
SOU MIS A DES INSTABILITES DE TERRAIN

Rapport final

et

Annexes

Laboratoire de mécanique des sols
de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Ch. Bonnard, ingénieur dipl. EPFL

Octobre 1996

TABLE DES MATIERES

<i>RESUME</i>	<i>i</i>
<i>ZUSAMMENFASSUNG</i>	<i>iii</i>
<i>SUMMARY</i>	<i>v</i>
<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>vii</i>
0. PREAMBULE	1
1. INTRODUCTION	2
1.1 Contexte de la recherche	2
1.2 Nécessité de l'auscultation.....	3
2. OBJECTIFS	5
3. RAPPEL DES RESULTATS DE L'ETUDE N° 5/82 ET BASES EXISTANTES	6
3.1 Conclusions sur le comportement des ouvrages.....	6
3.2 Ouvrages fournissant des bases de référence.....	7
4. DEROULEMENT DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE	8
4.1 1 ^e étape : choix des ouvrages et stratégie d'auscultation.....	8
4.2 2 ^e étape : Procédures d'auscultation et d'interprétation	10
4.3 3 ^e étape : Evaluation globale du comportement des ouvrages et des travaux d'entretien.....	11
5. CARACTERISTIQUES GENERALES DES PHENOMENES D'INSTABILITE AFFECTANT LES OUVRAGES ROUTIERS ETUDIES	12
5.1 Types d'instabilité considérés.....	12
5.2 Caractéristiques des glissements analysés	13
6. QUESTIONS CONDITIONNANT LE CHOIX D'UNE METHODE D'AUSCULTATION	14
7. SYSTEMES D'AUSCULTATION	22
8. SELECTION DES OUVRAGES ILLUSTRANT LA DEMARCHE PROPOSEE	22
8.2 Observations sur les ouvrages.....	24
8.3 Observations sur les contextes géographiques et politiques	26

8.4 Observations sur les phénomènes d'instabilité	26
8.5 Observations sur les systèmes d'auscultation	28
9. PRINCIPES GENERAUX DE L'AUSCULTATION	30
10. RECOMMANDATIONS SUR LES PROCEDURES.....	36
10.1 Stratégies d'auscultation.....	36
10.2 Procédures d'auscultation.....	39
10.3 Procédures d'exploitation	41
10.4 Procédures d'évaluation.....	43
11. EVALUATION GENERALE DE L'ETAT DES OUVRAGES	44
11.1 Evolution probable des ouvrages routiers et de leurs fondations.....	44
11.2 Stratégie d'entretien et travaux confortatifs.....	45
11.3 Répartition des tâches d'auscultation.....	46
12. CONCLUSIONS.....	47

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
ANNEXE 2	FICHES DESCRIPTIVES
ANNEXE 3	DISPOSITIFS D'AUSCULTATION

RESUME

De nombreux ouvrages routiers des réseaux des routes cantonales et nationales sont fondés en terrains instables, souvent faiblement actifs; toutefois, ils posent des problèmes d'entretien et de sécurité à long terme. Sur la base des résultats d'auscultation de plusieurs cas types d'ouvrages de ce genre, une recherche a été entreprise, visant à définir des procédures techniques de surveillance et de gestion propres à garantir un suivi fiable du comportement de ces ouvrages au cours du temps.

D'autre part, un des objectifs poursuivis a consisté à établir des principes généraux et des recommandations qu'il convient de mettre en oeuvre dans les campagnes d'auscultation; ces principes doivent conduire à maîtriser la connaissance des mécanismes d'instabilité en présence, qui affectent tant le versant que les ouvrages.

17 ouvrages routiers typiques, ponts, viaducs et murs ancrés, dont certains avaient déjà été suivis dans le cadre d'une recherche antérieure de la VSS, ont été choisis pour servir de référence à cette recherche. Leur comportement, satisfaisant dans l'ensemble, était observé depuis de nombreuses années, ce qui a permis de prendre en compte plusieurs mécanismes d'instabilité différents et plusieurs stratégies d'auscultation. De plus, cette analyse a porté sur plus de 20 types de dispositifs de contrôle distincts.

Sur la base de cette expérience riche d'enseignements de toute nature, des procédures générales d'auscultation et d'interprétation des données recueillies ont été formulées. Puis des directives ont été établies sur les stratégies de surveillance et d'évaluation à mettre en oeuvre pour disposer d'une bonne compréhension du comportement des ouvrages. Cette analyse a permis de porter une appréciation générale sur le fonctionnement des ouvrages fondés en terrains instables. Par ailleurs, la façon de répartir les tâches d'auscultation entre le Maître de l'ouvrage et les mandataires concernés a été appréciée de façon globale.

Cette recherche a notamment permis de dresser une liste de 8 questions préalables qu'il convient de se poser lorsqu'il s'agit de formuler un concept d'auscultation. Ces questions générales, visant à établir les présomptions d'instabilité du versant, dans le temps et dans l'espace, et à déterminer les moyens d'y faire face, doivent

être constamment présentes à l'esprit des projeteurs et des Maîtres d'ouvrages, de façon à adapter au mieux la politique de surveillance des ouvrages aux conditions propres du site.

Le résultat principal consiste en la formulation de **sept principes généraux d'auscultation**, donnés ci-dessous, applicables en toutes circonstances, et qui doivent servir de base à la mise en oeuvre d'une campagne de surveillance d'ouvrages.

I	Prévoir l'auscultation dès la phase de conception du projet, avec un système durable, pour permettre des contrôles à long terme
II	Tenir compte, lors de la conception du système d'auscultation, du comportement probable de l'ouvrage et des caractéristiques des phénomènes d'instabilité
III	Prévoir des mesures ponctuelles ou en continu dans le temps, selon l'importance des mouvements de la zone instable et leur impact sur l'ouvrage
IV	Utiliser des moyens d'auscultation faisant appel à diverses techniques ou à divers spécialistes pour recouper les informations obtenues
V	Adopter des systèmes d'observation simples, résistants, fiables et faciles d'accès
VI	Procéder régulièrement à une analyse temporelle et spatiale du comportement des ouvrages et en particulier de leurs fondations
VII	Déterminer des modèles d'évolution, sur la base des données complètes de l'auscultation, pour formuler des prédictions et mettre en oeuvre une politique de gestion

L'analyse de ces principes montre que, malgré leur côté apparemment élémentaire, ils mettent en évidence des actions essentielles dont le non respect peut conduire à des difficultés majeures dans la gestion de l'auscultation.

En définitive, il apparaît indispensable de promouvoir une politique de surveillance plus cohérente, selon la complexité de l'ouvrage et le type d'instabilité étudié, qui s'appuie sur des procédures d'auscultation, d'exploitation des données relevées et d'évaluation des ouvrages, pour lesquelles des recommandations sont formulées. Il est important que toutes ces opérations se déroulent selon des phases coordonnées, de façon à disposer d'une vision claire du comportement des ouvrages fondés en terrains instables, permettant une analyse prospective de leur sécurité.

ZUSAMMENFASSUNG

Zahlreiche Strassenbauwerke des kantonalen und nationalen Straßennetzes sind auf instabilem, wenn auch häufig nur schwach aktivem, Untergrund errichtet; ihr Unterhalt und die langfristige Gewährleistung ihrer Sicherheit stellen ein ernstzunehmendes Problem dar. Auf der Basis von Ergebnissen einer Untersuchungskampagne wurden Untersuchungen angestellt, die zum Ziel hatten, Überwachungs- und Problemmanagementmethoden zu entwickeln, die eine zuverlässige Kontrolle des Verhaltens der betroffenen Objekte gewährleisten.

Ein weiteres Ziel war die Erarbeitung von allgemeinen Grundsätzen und Empfehlungen für die Planung und Durchführung von Untersuchungskampagnen; diese Prinzipien sollen es ermöglichen, die sowohl das Einzugsgebiet als auch das Bauwerk betreffenden Instabilitätsmechanismen zu beherrschen.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden 17 Bauwerke, Brücken, Viadukte und Stützmauern, ausgewählt, die zum Teil schon Gegenstand einer vom VSS durchgeführten Studie waren. Ihr, im allgemeinen zufriedenstellendes, Verhalten wurde über mehrere Jahre hin verfolgt. So war es möglich verschiedene Instabilitätsmechanismen zu erfassen und Beobachtungsstrategien zu testen. Darüber hinaus konnten so über 20 Meßgeräte erprobt werden.

Auf der Basis dieser in vielerlei Hinsicht aufschlußreichen Untersuchungen wurden allgemeine Verfahren zur Erhebung und Auswertung von Meßwerten erarbeitet. Darüber hinaus wurden anzuwendende Überwachungs- und Bewertungsstrategien entwickelt, die ein zutreffendes Verständnis des Gesamtverhaltens des Bauwerks ermöglichen. Die durchgeführte Analyse hat es erlaubt eine allgemeine Bewertung der Funktionstüchtigkeit von auf instabilem Untergrund ausgeführten Bauwerken vorzunehmen. Zusätzlich wurde die Aufgabenteilung zwischen Bauherrn und Auftragnehmern evaluiert.

Das durchgeführte Forschungsprojekt hat es insbesondere ermöglicht, eine Liste von 8 Fragen zu erarbeiten, die im Rahmen einer Untersuchungskampagne zu beantworten sind. Diese Fragen, die darauf abzielen Hypothesen sowohl die räumliche und zeitliche Entwicklung der Instabilität als auch mögliche Gegenmaßnahmen betreffend zu entwickeln, sollten sowohl dem Bauherrn als

auch den Auftragnehmern der Kampagne stets gegenwärtig sein, um eine optimale Anpassung der Überwachungsstrategie an die speziellen Bedingungen des Einzelfalls sicherzustellen.

Das wohl wichtigste Ergebnis stellen die unten angeführten **sieben Prinzipien für die Durchführung von Überwachungskampagnen** dar, die allgemein anwendbar sind und die als Grundlage für die Durchführung jedweder Art von Überwachungs- und Kontrollaktivitäten dienen sollten.

I.	Die Überwachungskampagne ist bereits in der Planungsphase des Projekts mittels dauerhafter Einrichtungen vorzusehen, um eine langfristige Kontrolle zu ermöglichen.
II.	Im Rahmen der Kampagnenplanung ist das zu erwartende Verhalten des Objekts ebenso wie die Charakteristiken des Instabilitätsphänomens zu berücksichtigen.
III.	Je nach Ausdehnung der Instabilität und ihrer Auswirkung auf das Objekt sind momentane oder andauernde Messungen vorzusehen.
IV.	Zur Datenerhebung sind verschiedene Methoden nebeneinander heranzuziehen oder mehrere Experten zur Auswertung zu beauftragen.
V.	Überwachungsanlagen müssen einfach, widerstandsfähig, zuverlässig und leicht zugänglich sein
VI.	In regelmäßigen Abständen sind Analysen des räumlichen und zeitlichen Verhalten des Bauwerks und insbesondere seiner Fundamente vorzunehmen.
VII.	Basierend auf der Gesamtheit der ermittelten Daten ist eine Vorhersage zu erstellen und zu ergreifende Maßnahmen zu entwickeln.

Eine nähere Betrachtung der obigen Prinzipien zeigt, ungeachtet ihres vordergründig elementaren Charakters, daß sie geeignet sind die wesentlichen Verhaltensmaßregeln zu verdeutlichen, deren Nichteinhaltung zu ernsthaften Schwierigkeiten bei der Durchführung der Objektüberwachung führen kann.

Tatsächlich scheint es unerlässlich eine schlüssigere, auf Meßkampagnen, Datenauswertung und Interpretation des Bauwerksverhaltens nach den entwickelten Richtlinien basierende Überwachungsstrategie zu fördern, die sowohl den Typ des betrachteten Objekts als auch die Art der vorliegenden Instabilität berücksichtigt. Dabei ist es wichtig, daß alle Maßnahmen eng aufeinander abgestimmt sind um einen klaren Eindruck des Verhaltens der auf instabilem Untergrund errichteten Bauwerke zu erhalten und eine zukunftsorientierte Sicherheitsanalyse zu erstellen.

SUMMARY

Numerous road works of the cantonal and national road nets are founded on unstable slopes that are often slightly active; however, they induce long-term maintenance and safety problems. On the basis of monitoring results on several typical cases of civil works of that kind, a research has been undertaken, aiming at the definition of technical control and management processes which are able to ensure a reliable observation of the behaviour of such works along with time.

On the other hand, one of the aimed objectives has included the formulation of general principles and recommendations to be followed in monitoring campaigns; these principles should lead to a thorough knowledge of the present instability mechanisms which affect the slope as well as the works.

17 typical road works, i.e. bridges, viaducts and anchored walls, some of which had already been studied within a former VSS research, have been selected to serve as a reference for this research. Their behaviour, globally satisfactory, had been observed for numerous years, so that it has been possible to take several different instability mechanisms into account and to consider various monitoring strategies. Moreover, such an analysis has included more than 20 specific types of monitoring devices.

On the basis of this profitable experience, general monitoring and data interpretation procedures have been formulated. Then guidelines have been established concerning the observation and assessment strategies to be adopted in order to obtain a good understanding of the works behaviour. Such an analysis has allowed a general opinion on the operation of civil works founded on unstable slopes. Moreover, the way of distributing the monitoring tasks between the Owner and the relevant consultants has been globally considered.

This research work has lead to the formulation of a list of 8 preliminary questions which have to be asked when a monitoring plan is prepared. These general questions, aiming at assessing the degree of instability of the slope, according to time and space, and at determining the possible preventive measures, must be constantly reexamined by the consultants and the Owner, so as to adapt as well as possible the monitoring strategy to the own site conditions.

The main obtained result consists in the formulation of **seven general monitoring principles**, which are mentioned in the table below; they are applicable in all circumstances and should serve as a basis when a monitoring campaign on road works is being undertaken.

I	To foresee the monitoring program from the beginning of the design stage of the project, using a sustainable system allowing long term controls
II	To take the probable behaviour of the works into account when designing the monitoring system, as well as the characteristics of the instability phenomena
III	To foresee discrete or continuous measurements with time, according to the importance of the movements of the unstable zone and to their impact on the works
IV	To use monitoring systems which imply different techniques or several specialists, in order to check the obtained informations
V	To adopt simple, solid, reliable and easily accessible monitoring systems
VI	To organize at regular intervals an analysis of the behaviour of the works according to time and space, in particular of their foundations
VII	To determine evaluation models, based on complete monitoring data, so as to formulate predictions and to organize a management policy

The analysis of such principles shows that, despite of their apparently elementary formulation, they put forward essential actions; when they are not respected, it may induce major difficulties in the management of monitoring.

Finally, it appears indispensable to promote a more coherent observation policy, according to the complexity of the works and to the type of studied slope instability. It should back on specific monitoring results, analysis of the gathered data and works assessment procedures, for which several recommendations are formulated. It is important that all these operations are planned and executed according to coordinated phases, so as to obtain a clear understanding of the behaviour of works founded on unstable slopes. Such a step-by-step approach will ensure a reliable analysis of their future safety.

REMERCIEMENTS

Cette recherche visant à établir des principes d'auscultation applicables aux ouvrages routiers fondés en zones instables s'est appuyée largement sur les résultats d'étude et les données de surveillance obtenus par plusieurs administrations cantonales et par leurs mandataires. Nous tenons donc à remercier chaleureusement toutes les personnes concernées qui nous ont fourni des informations précieuses, nous ont donné accès à leurs dossiers et ont formulé des remarques intéressantes sur les problèmes de surveillance. Chacune des huit fiches descriptives des ouvrages choisis comme exemples types, données en annexe 2, a été soumise aux diverses administrations concernées; plusieurs d'entre elles nous ont proposé des adaptations judicieuses ou des commentaires pertinents pour lesquels nous leur sommes reconnaissants.

Nos remerciements vont aussi à tous les collaborateurs et collaboratrices du Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL qui ont contribué de près ou de loin à cette recherche et à la mise en forme des documents produits.

Nous tenons encore à témoigner notre reconnaissance à tous les membres de la commission VSS 272, responsable de la surveillance et de l'approbation de ce travail de recherche, pour le dialogue constructif qui a pu s'établir et pour sa grande patience.

En dernier lieu, nous tenons à dédier ce travail de recherche à feu M. Jean-Marie Despond, chef de section au Laboratoire de mécanique des sols et co-responsable de la proposition soumise à la VSS pour ce mandat de recherche, qui nous a quittés au début de 1997 et qui n'a donc pu voir ce travail entièrement achevé. Nous souhaitons lui rendre hommage pour son engagement au départ de ce travail et pour ses précieuses suggestions.

PRINCIPES D'AUSCULTATION DES OUVRAGES ROUTIERS SOUMIS A DES INSTABILITES DE TERRAIN

0. PREAMBULE

Cette recherche conceptuelle sur l'auscultation des ouvrages routiers soumis à des instabilités de terrain, parmi lesquelles on considère essentiellement les glissements lents, s'inscrit dans un long processus d'étude relatif au comportement des fondations d'ouvrages d'art, qui est une des préoccupations de l'Office fédéral des routes (OFR) et des administrations cantonales des travaux publics. Ainsi, suite aux propositions de l'Union des professionnels suisses de la route (VSS), trois rapports sur le sujet ont déjà été publiés par l'Office fédéral des routes:

- Etude comparative de mesures d'inclinométrie dans des versants instables (application au viaduc de Beckenried); mandat de recherche N° 24/77, publié en décembre 1985, par le Laboratoire de mécanique des roches de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).
- Comportement des fondations d'ouvrages d'art, propositions d'équipements de contrôle supplémentaires; mandat de recherche N° 5/80, publié en juin 1981, par l'Institut des sols, roches et fondations de l'EPFL, le Bureau de construction des autoroutes de Lausanne et le Bureau J.-C. Ott à Thônex.
- Comportement des fondations d'ouvrages d'art, rapport final, étude générale des fondations de 16 ouvrages routiers; mandat de recherche N° 5/82, produit en mars 1991 et publié en juin 1992, par les 3 mandataires précédemment cités, et qui comprend les résultats des mesures d'auscultation proposées dans le rapport précédemment cité.

Au cours de ces études, et suite à de nombreuses recherches engagées dans le domaine des terrains instables à l'EPFL, il est apparu intéressant d'examiner la problématique de l'auscultation des ouvrages routiers dans une perspective plus large, impliquant des aspects techniques et de gestion. Ceci a justifié la présentation de la proposition de recherche N° 22/86, objet de la présente étude, pour laquelle un mandat a été donné en mai 1987 au Laboratoire de mécanique des sols et au Centre interdépartemental d'étude des terrains instables de l'EPFL. Après une longue période d'étude au cours de laquelle se sont produits divers événements, le présent rapport final est publié sous la responsabilité du Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL, dont le professeur L. Vulliet est le directeur depuis janvier 1994.

Cette étude paraît présenter aujourd'hui un intérêt accru dans la perspective des modifications climatiques qui semblent devoir affecter notre pays à long terme et qui peuvent être une des causes de la recrudescence d'activité de certains phénomènes d'instabilité de pente; les premiers résultats ponctuels du projet national de recherche PNR31 "Changements climatiques et catastrophes naturelles" du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique mettent en tout cas en évidence une évolution marquée probable du climat (Bader, 1994 - voir annexe 1). Il est donc justifié que cette préoccupation soit mieux prise en compte dans la planification, la réalisation et le suivi des ouvrages routiers existants et de demain.

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte de la recherche

Dans le titre de cette étude, la juxtaposition immédiate de deux concepts apparemment non conciliables - **ouvrages routiers et instabilités du terrain** - sous-tend pourtant une problématique qui va avoir tendance à s'accroître au cours des années à venir. On observe en effet en Suisse le développement de deux phénomènes concomitants. D'une part, le réseau des routes nationales et cantonales s'étend, et ceci souvent sur des terrains peu favorables, comme des coteaux ou des versants boisés, de façon à préserver un maximum de terres agricoles planes de qualité; par ailleurs, la géométrie des routes existantes tend à être améliorée, par exemple par l'élimination de virages dans des zones à topographie accidentée requérant de grandes excavations ou des remblais sur des terrains en pente et par l'amélioration du profil en long des chaussées, en éliminant les déflexions en des points singuliers. D'autre part, on reconnaît de plus en plus l'existence de nombreuses zones d'instabilité de pente, faiblement actives ou substabilisées, mais dont certaines peuvent présenter des risques de réactivation, que ce soit suite à des modifications climatiques ou à des interventions anthropiques (Bonnard, 1992). Ainsi, il a été établi que plus de 6% du territoire helvétique a été affecté par des phénomènes d'instabilité de grande ampleur (voir figure N° 1); même si ces mouvements remontent à des milliers d'années, les zones concernées peuvent être le siège de réactivations momentanées importantes (Noverraz et Bonnard, 1990).

De la sorte, les impératifs du réseau routier et la répartition dense des instabilités de versant ont conduit, depuis plusieurs dizaines d'années, à projeter de nombreux ouvrages routiers (piles de ponts, murs ancrés, portails de tunnels, etc.) dans des zones de stabilité précaire, dont l'immobilité à long terme n'est pas garantie. Il s'agit donc, dans ces projets, de tenter de limiter les mouvements prévisibles; mais il n'est pas possible, pour des raisons techniques ou économiques, de les empêcher tout à fait avec une garantie de sécurité totale.

En conséquence, afin de s'assurer du bon comportement des ouvrages à long terme et de déterminer avec assez d'anticipation l'accroissement du mouvement de leurs fondations, il est indispensable de mettre en oeuvre et de poursuivre une auscultation adéquate. Cette action peut être subdivisée en deux composantes dont les objectifs sont nettement distincts:

- **L'auscultation** proprement dite, qui consiste à analyser le comportement du terrain de fondation et de l'ouvrage au cours du temps et l'évolution de leurs principales caractéristiques, de façon à comprendre le mécanisme de déformation du système sol-structure et d'évaluer son développement et son impact sur l'ouvrage.
- La **surveillance**, qui consiste à observer de façon systématique, voire automatique, certains paramètres caractéristiques sur la base desquels des décisions pourront être prises quant à la viabilité de l'ouvrage en service et à la nécessité éventuelle d'interventions d'urgence.

Dans la présente étude, compte tenu des objectifs fixés, c'est surtout la première composante, soit l'auscultation proprement dite, qui sera analysée, car c'est d'elle que dépend le pronostic de la sécurité des ouvrages à long terme.

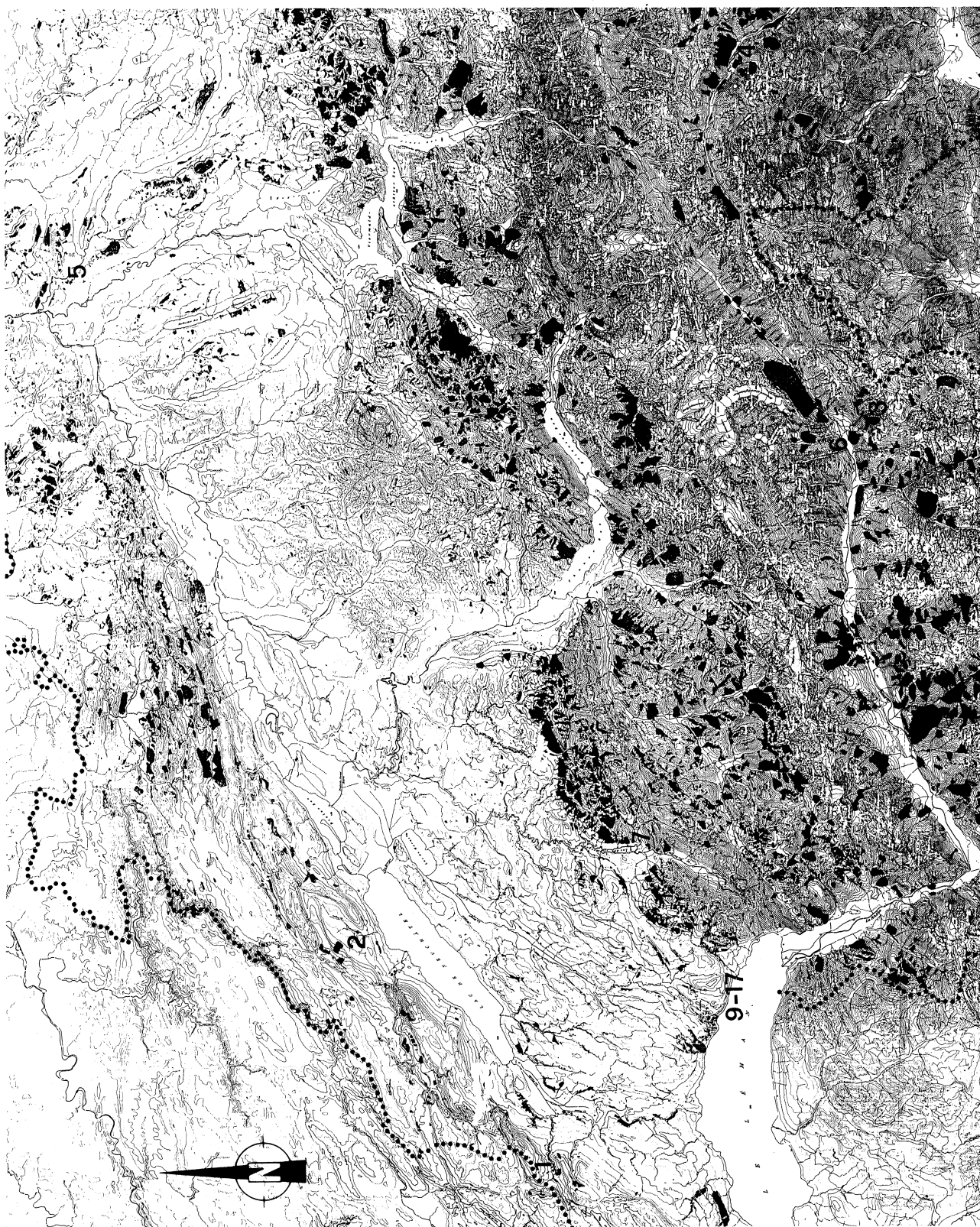


Figure N° 1 : Cartographie des instabilités de terrain dans la partie ouest de la Suisse, établie par interprétation des cartes topographiques au 1 : 25'000. Les zones de glissement et d'écroulement qui apparaissent en noir représentent en moyenne plus du 6% du territoire suisse. Les sites des ouvrages retenus dans cette étude sont marqués sur cette carte avec leur numéro (voir chapitre 4.1) (Noverraz & Bonnard, 1990).

1.2 Nécessité de l'auscultation

Lorsqu'un ouvrage est affecté par des mouvements de terrain et que ceux-ci ne peuvent être bloqués ou suffisamment ralentis par un assainissement du versant, il est nécessaire de concevoir et d'entreprendre des travaux de réfection; dans les cas extrêmes, une reconstruction de l'ouvrage, dont la planification doit être établie assez longtemps à l'avance, est à envisager sur la base des caractéristiques du mécanisme du mouvement au cours du temps. En cas de travaux de stabilisation ou de réfection, **l'auscultation**, visant notamment à vérifier l'efficacité des mesures prises, est ainsi une tâche prioritaire et permanente, bien que souvent l'ouvrage ne soit pas affecté par des mouvements réguliers; mais il peut être soumis tout à coup à des déplacements extrêmes en cas de circonstances exceptionnelles (séismes, précipitations intenses de faible fréquence). Il convient donc de ne pas abandonner l'auscultation lorsqu'un ouvrage ne subit pas de mouvements ou de déformations pendant des années, et de maintenir en fonctionnement les systèmes de mesure, afin de garantir la fiabilité à long terme de l'estimation faite de sa sécurité.

L'auscultation des ouvrages et de leurs terrains de fondation pose de nombreux problèmes, dont les trois principaux sont:

- le choix de l'instrumentation (soit son adaptation au contexte du terrain et de l'aléa);
- l'organisation de l'exécution des mesures;
- la gestion des résultats d'observation et leur interprétation.

Si certains aspects de cette problématique ont déjà été abordés dans le cadre du mandat N° 5/82 de l'OFR, à l'occasion de l'examen du comportement de 16 ouvrages autoroutiers, il n'a pas été entrepris d'approche systématique de la philosophie de l'auscultation et de la gestion à long terme des données obtenues. D'autre part, il existe d'autres types d'ouvrages que ceux retenus dans ce mandat, dont le comportement et les caractéristiques sont susceptibles de fournir des indications précieuses relatives aux systèmes d'auscultation adoptés. Enfin, il peut se produire diverses situations particulières à long terme dont les conséquences n'ont pas été analysées dans un cadre global et face auxquelles il est bon de s'interroger sur la répartition des responsabilités assumées par chaque partie en cause.

Un autre aspect de la problématique de l'auscultation est lié aux sources de son financement. En effet, s'il est prévu d'effectuer certains contrôles initiaux dans le cadre des crédits d'ouvrages, il est souvent observé que les moyens des administrations responsables diminuent pour l'auscultation à long terme; de ce fait, les frais de maintenance courante ont tendance à absorber la quasi-totalité des ressources d'exploitation à disposition, de sorte que seule une auscultation minimale est maintenue en permanence, et parfois même aucune auscultation du tout.

Ainsi, lorsque surgit une situation nouvelle, liée notamment à des déformations excessives, la réactivation du programme d'auscultation intervient souvent trop tard pour déterminer le mécanisme complet d'accélération et ses causes; il est alors difficile de pouvoir valablement exprimer une pronostic sur le développement de la situation de crise.

Enfin, il est bon de rappeler que pour plusieurs types de projets (stabilité de fondations, dimensionnement de revêtement de tunnels, etc.), il peut être mis à profit ce

que les Anglais appellent "The observational method", soit l'ajustement des caractéristiques des éléments structurels d'ouvrages en fonction du comportement du terrain en cours de construction. A ce titre, un suivi régulier des ouvrages par une auscultation adéquate est aussi d'une importance fondamentale, et en particulier l'acquisition et l'exploitation rapide des données.

Il est donc particulièrement justifié d'entreprendre une recherche sur l'auscultation des ouvrages routiers soumis à des instabilités du terrain; ceci s'avère d'autant plus justifié que, ces dernières années, les moyens techniques se sont sensiblement développés, notamment grâce à l'informatique appliquée à l'instrumentation. Mais malgré ces progrès, ce qu'il faut garder présent à l'esprit, c'est surtout la nécessité de développer un niveau de conscience face à la problématique de l'auscultation, de façon que les entités ou les personnes chargées de gérer la sécurité des ouvrages routiers sachent organiser un suivi adéquat dans une optique interdisciplinaire. Le but final de cette auscultation vise à ce qu'elles n'aient pas à affronter, dans l'incertitude, des épisodes de crise dont elles n'auraient pas pronostiqué l'occurrence.

2. OBJECTIFS

La recherche proposée dans le cadre du mandat N° 22/86 vise à **définir les conditions-cadre** de mise en application des recommandations énoncées dans le rapport final du mandat N° 5/82. Celles-ci décrivaient le comportement spécifique des fondations de 16 ouvrages routiers sur une période de quelques années.

Les objectifs poursuivis ici sont donc concrètement :

- **examiner les problèmes techniques liés à l'auscultation pour différents types d'ouvrages d'art** soumis à des instabilités de terrain, tels que ponts; estacades, tunnels, murs ancrés et grands remblais; les phénomènes d'instabilité pris en compte peuvent être soit actifs, soit substabilisés, soit potentiels;
- **définir des principes généraux applicables à tous les modes d'auscultation** et à tous les types d'ouvrages, conduisant à répondre aux questions que se posent les projeteurs d'un ouvrage fondé sur un terrain apparemment instable;
- **rechercher des procédures techniques d'organisation et de gestion** propres à assurer un contrôle suivi de l'ouvrage étudié, face aux mouvements de ses fondations, et ceci depuis sa conception jusqu'à son remplacement, de façon à pouvoir porter une appréciation continue sur sa sécurité et sa fiabilité.
- **établir des recommandations** qui puissent être mises en oeuvre sur le plan fédéral, permettant aux services concernés des divers cantons d'harmoniser l'organisation du contrôle du comportement de leurs constructions et notamment de préciser les diverses tâches des intervenants. Cette harmonisation devrait permettre une appréhension plus globale de l'état de santé des ouvrages du réseau routier.

Il convient de relever que cette étude ne se préoccupe pas d'aborder les problèmes du vieillissement des matériaux de construction; il sera toutefois évalué dans quelle mesure les mouvements des ouvrages et de leurs fondations au-delà d'un certain seuil contribuent à la dégradation des structures.

Le but final de cette étude consiste donc à démontrer qu'il est possible d'organiser rationnellement une campagne d'auscultation des fondations d'un ouvrage affecté par des mouvements de terrain, de façon à maîtriser son évolution en tout temps et à tous les niveaux, sans être confronté soudain à des situations de crise insolubles.

3. RAPPEL DES RESULTATS DE L'ETUDE N° 5/82 ET BASES EXISTANTES

3.1 Conclusions sur le comportement des ouvrages

Afin de situer la présente étude dans la continuité des travaux de recherche entrepris pour l'Office fédéral des routes par le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL, il est rappelé ci-après les principales conclusions de la recherche N° 5/82 relative au comportement des fondations d'ouvrages routiers en terrains instables :

- **les seize ouvrages choisis**, situés aux alentours de Lausanne, **se comportent bien**; néanmoins quelques soucis apparaissent, principalement en relation avec des ponts et des viaducs. Par exemple, le glissement de la Cornallaz, à quelques centaines de mètres à l'amont du pont qui le traverse, n'est pas stabilisé, alors qu'il l'est au droit des piles du pont. On peut donc s'attendre dans le futur à une réactivation possible, ce qui requiert un contrôle régulier
- douze systèmes de contrôle différents ont été utilisés; néanmoins **les techniques de mesure évoluent rapidement** et il est nécessaire de bien adapter les moyens mis en oeuvre aux ouvrages concernés et à l'amplitude de leurs déplacements. Il est important de relever l'inadéquation des contrôles effectués avec un seul système de mesures, qui peut s'avérer défaillant ou inapproprié compte tenu des déformations intrinsèques de l'ouvrage. Il est donc recommandé de **diversifier les types de mesures** lors de la conception d'un système de contrôle, et d'intégrer si possible les dispositifs correspondants lors de la construction, en fonction du comportement possible de l'ouvrage
- **l'interprétation des mesures peut comporter des pièges** : mauvais fonctionnement d'un appareil, déplacement d'un point de référence "fixe". Il convient d'évaluer par la détermination des ellipses d'erreur l'imprécision globale du système de mesure et de ne pas se limiter à prendre en compte la précision instrumentale spécifiée par le fournisseur
- compte tenu du degré de **reproductibilité** des mesures, il convient d'étudier avec soin la question des critères d'alarme. En particulier, il convient de déterminer si des valeurs absolues de déplacements cumulés sont significatives ou s'il faut se référer à des valeurs d'accélération instantanée. Ce point joue aussi un rôle quant au système de contrôle à mettre en oeuvre
- afin d'évaluer dans quelle mesure les ouvrages routiers en Suisse faisaient l'objet de mesures d'auscultation, une **enquête** a été faite auprès des administrations cantonales concernées; 18 réponses ont été reçues pour 26 questionnaires envoyés. Si les cantons estiment dans l'ensemble que les ouvrages doivent être contrôlés (75% jugent cette préoccupation importante), les résultats détaillés de l'enquête montrent qu'il y a encore un long chemin des désirs à la réalité quotidienne. Ainsi, en Suisse, le nombre d'ouvrages contrôlés recensés en 1985 s'est élevé à:

2820	ponts
106	murs ancrés et non ancrés
38	remblais importants
15	tunnels

ce qui traduit manifestement une faible proportion par rapport aux ouvrages existants.

Parmi les douze systèmes d'auscultation utilisés, le nivellement est le plus fréquemment pratiqué (mais il ne donne que des informations indirectes sur les mouvements horizontaux liés aux instabilités de versants).

Au vu des résultats de cette recherche N° 5/82, il apparaît que la maintenance des voies de circulation nécessite la définition d'une **politique de contrôle** des ouvrages. C'est pour répondre à cette dernière préoccupation qu'a été formulée la proposition de recherche N° 22/86 objet du présent rapport.

3.2 Ouvrages fournissant des bases de référence

En plus des études précédemment citées, entreprises dans le cadre de la VSS, il convient tout d'abord de mentionner ici le grand travail de révision de la norme SIA N° 160 (édition 1989) qui a incorporé dans sa philosophie un concept global de sécurité, au travers des notions de plan de sécurité et de plan d'utilisation, auquel il conviendra de se référer. On peut toutefois relever que cette norme est peu détaillée sur les actions du sol de fondation qu'il faut traiter dans le cadre de l'analyse de déformation concernant l'ensemble sol-structure. En ce qui concerne l'aptitude au service des sols de fondations, les actions qui en découlent seront définies avec des valeurs choisies de manière prudente.

Par ailleurs, en ce qui concerne les recherches de base menées au niveau suisse, un cadre d'analyse pour la problématique de surveillance des ouvrages d'art proprement dits a été développé dans la thèse du Dr D. Andrey, publiée par l'EPFL en 1987; ce travail, correspondant au projet de recherche N° 32/82 de l'Office fédéral des routes, a été conduit dans une perspective plus large de suivi structural des ouvrages d'art; il donne quelques éléments de référence très utiles sur les méthodes de contrôle, mais ne traite pas de la surveillance des fondations d'ouvrage (Favre, Andrey et Suter, 1987).

En ce qui concerne les références de base étrangères, il faut relever la publication récente d'un groupe de travail français intitulé ITELOS sur la télésurveillance des ouvrages et des sites, dont les vues se rapprochent à plus d'un titre des conclusions de cette étude (Itelos, 1994). On peut encore citer, comme ouvrages de référence majeurs, le traité de J. Dunnicliff sur l'instrumentation géotechnique pour suivre le comportement des massifs in-situ, qui ouvre des perspectives méthodologiques intéressantes (Dunnicliff, 1988), et l'ouvrage de T.H. Hanna sur l'auscultation in situ en géotechnique qui donne beaucoup de détails sur le fonctionnement des appareils (Hanna, 1985).

Il faut enfin mentionner la publication anglaise de l'Institution des Ingénieurs civils, intitulée instrumentation géotechnique en pratique, parue en 1990. Par ailleurs, de nombreux articles ont été recensés dans les revues et les congrès spécialisés, en particulier dans les comptes-rendus des symposiums internationaux

sur les glissements de terrain de 1984, 1988, 1992 et 1996 (voir bibliographie complète en annexe 1). En dernier lieu, les rapports concernant les ouvrages sélectionnés pour illustrer des situations typiques (voir chapitre suivant, paragraphe 4.1) sont cités dans les références bibliographiques à la fin de chaque fiche d'ouvrage, que l'on trouve en annexes 2.1 à 2.8.

4. DEROULEMENT DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE

Selon les grandes lignes du plan adjoint à la demande de crédit, l'étude s'est articulée en **trois étapes de travail**, visant à assurer la constitution d'une base de données à partir de laquelle il serait possible de formuler des procédures d'auscultation et une politique rationnelle d'entretien. Ces étapes comprennent :

1. un choix d'ouvrages types qui sont analysés afin d'en dégager une stratégie d'auscultation;
2. Une analyse des procédures d'auscultation et d'interprétation les plus adéquates;
3. Une évaluation globale du comportement des ouvrages étudiés et des travaux d'entretien requis suite aux problèmes d'instabilité de pente.

4.1 1^e étape : choix des ouvrages et stratégie d'auscultation

Il a été procédé tout d'abord à une phase initiale de recherche bibliographique (voir liste en annexe 1) et d'enquêtes sur tous les ouvrages d'art susceptibles de procurer des données et un cadre de référence intéressant vis-à-vis des objectifs de la présente étude, en Suisse et à l'étranger. Puis un certain nombre d'ouvrages types ont été sélectionnés, d'entente avec les services cantonaux ou avec les bureaux d'étude concernés, en plus des ouvrages routiers du canton de Vaud significatifs étudiés dans le cadre du mandat N° 5/82. Les ouvrages choisis, déjà observés depuis leur construction ou, pour un cas, en projet, sont répartis sur plusieurs cantons suisses et dans un département de la France voisine (Ain); ils présentent tous des situations d'interaction entre structures et terrains plus ou moins instables, même si dans certains cas, une partie des travaux de fondation a justement consisté à stabiliser les massifs d'appui des ouvrages ou les versants directement impliqués.

Selon les cas, les types de phénomènes d'instabilité sont assez différents, mais présentent pour la plupart une profondeur relativement faible; dans une seule situation, nous aurions pu avoir à faire à un phénomène très profond, soit le glissement de terrain de Gotschnahang au-dessus de Klosters, sur le pied duquel il était prévu de faire passer initialement une route d'évitement formée de plusieurs ponts, estacades et tunnels. Mais en définitive, il a été pris la décision de percer un long tunnel d'évitement ne touchant pratiquement pas la zone instable, sauf légèrement à son portail est, de sorte que ce cas n'a finalement pas été retenu (il n'en reste pas moins que cet ouvrage sera intéressant à suivre dans le futur, car la profondeur de la zone instable fait l'objet d'avis divergeants).

Les ouvrages retenus pour constituer une banque de données et un catalogue de situations de référence sont brièvement présentés dans le tableau N° 1 suivant; des fiches en annexe donnent tous les détails requis sur le type d'ouvrage, les

N°	Ouvrage (type, localisation)	Canton	RC/RN	Phénomène d'instabilité	Etat du projet / auscultation
1	Viaduc de la Praz à Ballaigues	VD	N9B	glissement translationnel actif	en service depuis 1984; suivi régulier
2	Viaduc de Valangin	NE	T20	glissement rotationnel localisé actif	en service depuis 1975; suivi régulier; stabilisation de la culée en 1984
3	Pont du Ganter	VS	N9	glissement sur la rive gauche, légèrement actif	en service depuis 1980; suivi régulier jusqu'en 1985, puis partiel
4	Pont de Polmengo, près de Faido	TI	RC2	glissement de versant légèrement actif	en service depuis 1943; suivi partiel et réparation en 1992
5	Murs ancrés de Neuenhof, près de Wettingen	AG	N1	glissement translationnel stabilisé	en service depuis 1972; suivi régulier
6	Paroi ancrée de Gstipf-Brigue	VS	N9	glissement de versant profond stabilisé et voile d'éboulis	en service depuis 1985; suivi partiel
7	Mur de soutènement ancré près du pont sur la Jogne à Broc	FR	RC 1200	versant stabilisé	en service depuis 1972; suivi partiel de la tension des ancrages
8	Murs ancrés et terre armée du secteur Sylans-Neyrolles	Ain (F)	A40	versant stabilisé	en service depuis 1985; suivi régulier
9*	Remblais pour la correction de route Estavayer-le-Lac / Yverdon-les-Bains dans le secteur de Font	FR	RC 152	Glissements superficiels	en projet; ausculté depuis 1987; réalisation prévue en 1997-1998

* Comme ce dernier ouvrage n'a toujours pas été exécuté, nous n'avons pas établi de fiche à son sujet, vu le peu d'informations disponibles.

Tableau N° 1 : Liste des ouvrages retenus comme cas types

instabilités de terrain qui les affecte, l'instrumentation mise en oeuvre, les résultats de l'auscultation et les leçons que l'on peut en tirer (voir localisation sur la figure N° 1).

Il convient de relever que nous n'avons pas trouvé de cas documenté significatif de tunnel creusé dans un versant instable, c'est-à-dire où des mouvements caracté-

ristiques avaient été enregistrés. Soit les glissements n'ont affecté que le portail du tunnel lui-même (portail sud du tunnel de Glion sur la N9, portail ouest du tunnel de Crestas-Bugnei, sur la route de l'Oberalp), soit les mouvements du massif, quoique supposés, sont insignifiants ou trop superficiels, compte tenu des travaux de stabilisation. Le seul cas significatif bien connu est celui de l'autoroute du val de Susa, à l'ouest de Turin, qui a traversé en tunnel un glissement actif au lieu-dit Serre-la-Voûte, ce qui a occasionné certaines difficultés d'excavation; mais des travaux de stabilisation ont résolu le problème et il n'a pas été possible d'obtenir des données d'auscultation satisfaisantes après les travaux.

Pour tous ces ouvrages, la politique d'auscultation générale, développée dans le cadre des travaux entrepris par les services d'entretien ou recommandés par les bureaux d'étude concernés, est commentée. Les programmes d'auscultation spécifiques (décrits dans les fiches en annexe) n'ont pas toujours été poursuivis au cours des années, pour des questions de coûts ou de disponibilité de personnel.

Par ailleurs, les résultats des mesures effectuées qui nous ont été transmises ont été dûment analysés, en considérant attentivement les systèmes utilisés, les conditions d'observation, la précision interne des appareils de mesure, la précision globale des lectures et la confrontation des résultats obtenus par diverses techniques. Des discussions fructueuses ont pu être engagées avec les responsables de plusieurs ouvrages, ainsi qu'avec des spécialistes des mensurations, notamment de l'Institut de Géomatique de L'EPFL, et avec des ingénieurs expérimentés dans l'utilisation de divers dispositifs géotechniques (fournisseurs, utilisateurs), de façon à mettre clairement en évidence les performances que l'on peut raisonnablement attendre d'une campagne d'auscultation intégrant différents systèmes d'observation. Une appréciation globale des résultats de mesure visant à la formulation d'un comportement probable des fondations des ouvrages concernés permet, dans chaque cas étudié, d'apprécier la situation actuelle et de recommander des actions pour le futur.

4.2 2^e étape : Procédures d'auscultation et d'interprétation

Sur la base des données d'auscultation recueillies pour les ouvrages types considérés ci-dessus et des résultats acquis pour divers types d'instruments de mesure utilisés sur des sites particuliers (voir références bibliographiques, en particulier Dunnicliff, 1988 et Hanna, 1985), une analyse a été conduite afin de dégager les procédures générales d'auscultation et d'interprétation les plus rationnelles. Il est en effet nécessaire de ne pas se limiter à acquérir des résultats bruts, mais de proposer des méthodes d'interprétation et des modèles de confrontation de diverses séries de mesures obtenues par des équipements complémentaires; cette approche doit conduire à une fiabilité plus grande dans la perception des résultats d'auscultation et donc à une sécurité accrue par rapport à l'évaluation du comportement des ouvrages. Cette analyse tient compte de facteurs économiques dans la gestion des campagnes d'observation, de la planification adéquate des ressources humaines et techniques impliquées et de l'organisation des mesures de prévention requises, en cas de situation critique.

Une synthèse des stratégies d'observation mises en oeuvre a enfin conduit à la préparation de directives ou de recommandations sur les méthodes d'évaluation du comportement des ouvrages touchant aux domaines ci-après, qui sont commentés au chapitre 10 :

- appareillage et installation
- localisation des dispositifs de contrôle
- méthodes de mesures et d'analyse des résultats
- présentation et synthèse des données acquises
- mise sur pied d'actions complémentaires ou de mesures de prévention

Cette méthodologie flexible et adaptable aux situations particulières des cantons devrait permettre d'harmoniser les moyens mis en oeuvre pour l'auscultation des ouvrages en Suisse, de façon à permettre aux cantons un suivi plus synthétique des contrôles d'ouvrages. Il n'a finalement pas été mis sur pied de groupes d'experts pour discuter préalablement de méthodologie, comme cela avait été envisagé dans le cadre de notre proposition d'étude, mais des discussions informelles fructueuses ont eu lieu sur ce sujet avec plusieurs personnes impliquées dans les travaux d'auscultation. Un tel échange de vues, qui n'aboutit que rarement à un consensus, pourra se poursuivre d'une manière profitable après la publication de ce rapport.

4.3 3^e étape : Evaluation globale du comportement des ouvrages et des travaux d'entretien

Cette dernière partie, qui conduit à une vision plus globale de l'état des ouvrages et de leur comportement, n'a pu se fonder comme prévu sur un traitement statistique d'informations comparables, car malgré le nombre de cas envisagés, ceux-ci étaient trop spécifiques pour former un ensemble homogène significatif. Cette évaluation est donc plutôt de nature qualitative, mais permet quand même de formuler quelques recommandations générales sur les travaux d'entretien prévisibles à moyen et long terme, développées au chapitre 11. A cet égard, une réflexion a été développée sur la répartition des tâches et des responsabilités les plus judicieuses entre les intervenants, de façon à aboutir à des décisions adéquates dans lesquelles chacun assume sa part.

En effet, il est important d'évaluer comment se répartissent les responsabilités de l'évaluation du comportement des ouvrages, entre les administrations cantonales, chargées en tant que Maîtres de l'ouvrage de l'entretien des ouvrages, entre les bureaux d'ingénieurs, auteurs du projet, et entre les bureaux s'occupant d'auscultation. Les auteurs du projet ont un rôle à jouer dans cette optique car ils sont mieux à même d'apprécier le comportement des ouvrages qu'ils ont conçus en fonction de leurs spécificités et de déceler les mouvements critiques et leurs conséquences.

Cette analyse de la répartition optimale des tâches se complique lorsque des sous-traitants sont concernés, comme des bureaux de géomètres ou des prestataires de services géotechniques spéciaux. Mais il est indispensable, dans un processus pluridisciplinaire tel que celui de l'auscultation, de préserver une transparence dans les différentes étapes de travail, de façon à assurer la sécurité des constructions tout au long de leur existence, grâce à une délégation précise des tâches de conception, de surveillance, d'auscultation, de contrôle et d'entretien.

5. CARACTERISTIQUES GENERALES DES PHENOMENES D'INSTABILITE AFFECTANT LES OUVRAGES ROUTIERS ETUDIES

5.1 Types d'instabilité considérés

Dans cette étude, nous nous sommes surtout concentrés sur les phénomènes de **glissement lents**, aux mouvements essentiellement **permanents**, susceptibles d'être franchis ou traversés par des ouvrages routiers. En effet, ce type de mécanisme est fréquemment rencontré, qu'il soit identifié ou non lors du projet initial, et requiert une auscultation à long terme. De même, nous nous sommes intéressés aux **versants en limite d'équilibre**, susceptibles de générer des glissements en cours de travaux.

Nous n'avons sciemment pas abordé tous les types de phénomènes subits et répétitifs, tels qu'éboulements, écroulements, glissements superficiels rapides recouvrant des chaussées, coulées boueuses, laves torrentielles etc., qui introduisent une tout autre problématique; pour ce type de phénomènes, l'auscultation est difficile à cibler et à concevoir, et même si des observations sont faites à intervalles réguliers, il est difficile d'en déduire un mécanisme évolutif et de prendre des mesures de protection adéquates, sauf s'il convient de projeter des galeries de protection. La seule exception a trait à un cas type étudié, les murs ancrés du secteur Sylans-Neyrolles où, en plus de l'instabilité du versant, on se trouve en présence d'un risque d'éboulement provenant des falaises dominantes.

En ce qui concerne les phénomènes lents, nous avons examiné surtout des mouvements gravifiques de pentes impliquant des **terrains meubles**. En effet, nous n'avons pas trouvé d'exemple significatif de fauchage, soit de basculement progressif des couches rocheuses au voisinage de la surface des versants qui affecte directement des ouvrages routiers; même lorsque ces mécanismes se produisent, comme c'est le cas en France sur la route longeant le réservoir de Grand-Maison, au sud-ouest de St-Jean-de-Maurienne, ils évoluent en glissements rocheux avec apparition d'une surface de rupture caractérisée. En fait, cette notion de terrain meuble est moins restrictive qu'il ne paraît, car plusieurs versants rocheux examinés, soumis à des instabilités progressives ou à des mécanismes d'altération, sont constitués de matériaux tellement remaniés qu'ils peuvent être qualifiés de terrains meubles et se comportent comme tels.

Nous n'avons pas envisagé ici de phénomènes de tassements verticaux, comme dans les plaines formées de matériaux compressibles (car quelques cas de ce type ont été traités dans le rapport N° 5/82 précédemment cité), ou de déformations horizontales liées à l'enfoncement de structures géologiques rigides dans leur substratum plastique, ce qui n'est pratiquement jamais rencontré en Suisse (phénomène nommé étalement ou "spread" dans la nomenclature officielle).

Ces restrictions apparemment importantes délimitent néanmoins un cadre bien précis dans lequel des programmes d'auscultation complets peuvent être mis en oeuvre et dont les résultats au cours du temps peuvent être dûment interprétés. On peut relever par ailleurs que malgré cette délimitation du sujet, les cas traités sont très variés et fournissent un large échantillon de situations types.

5.2 Caractéristiques des glissements analysés

Les glissements lents des versants considérés ici peuvent se développer selon plusieurs mécanismes spécifiques, selon leur taille, les matériaux concernés et les structures géologiques impliquées (voir liste au chapitre 4.1 et fiches correspondantes en annexes 2.1 à 2.8, donnant les caractéristiques de détail), soit par exemple :

- **glissements rotationnels** localisés dans des matériaux meubles assez homogènes, comme les sols varvés limono-sableux servant de fondation à la culée sud-est de viaduc de Valangin
- **glissements translationnels** d'assez grande dimension dans des matériaux quaternaires glacio-lacustres recouvrant une structure rocheuse synclinale, comme dans la zone franchie par le viaduc de la Praz à Ballaigues et sur laquelle prennent appui les piles du pont
- **glissement généralisé** de versant avec surfaces de ruptures multiples, dont certaines à grande profondeur, dans des gneiss affectés au départ par un vaste écoulement lié au retrait glaciaire; à la base du versant, ce mécanisme qui a évolué en **glissement profond** de matériaux totalement remaniés affecte directement le pont de Polmengo, dans la Léventine, par une poussée horizontale biaise sur sa culée rive gauche
- pour certains murs ancrés, enfin, on doit faire face à des **voiles d'éboulis instables**, sans surface de rupture bien déterminée, dont le mouvement latent doit être contenu, comme c'est le cas pour la paroi ancrée de Gstipf ou pour les murs du secteur Sylans-Neyrolles.

La principale caractéristique commune de ces mouvements de versants, par ailleurs bien distincts par leurs caractéristiques géométriques, consiste en un **déplacement progressif** vers l'aval de **vitesse très variable** dans le temps, si on les considère sur une grande période. En effet, ces phénomènes d'instabilité, souvent mal perçus, pratiquement jamais totalement stabilisés, mais qui peuvent présenter des mouvements très modestes pendant des années, sont presque toujours affectés de phases d'accélération progressive, puis parfois brutale, suivies de phases de décélération marquée, qui se produisent en relation avec les conditions climatiques ou hydrogéologiques.

6. QUESTIONS CONDITIONNANT LE CHOIX D'UNE METHODE D'AUSCULTATION

Face au comportement typique, décrit ci-dessus, des phénomènes d'instabilité de pente, qui est régi par des échelles de temps et de déplacement différentes selon les glissements, de nombreuses questions cruciales se posent aux concepteurs d'ouvrage et aux autorités chargées d'approuver les projets, puis de surveiller leur état au cours de leur durée de vie. **Les huit questions préalables** énoncées, qu'il convient d'examiner avant de formuler des principes généraux d'auscultation, conditionnent le choix des méthodes à mettre en preuve pour suivre l'évolution d'un ouvrage et orientent même sa conception :

- Le site considéré pour l'ouvrage est-il vraiment stable ?
- S'il y a des présomptions d'instabilité, sur quelle vitesse moyenne de déplacement à long terme et sur quelle variabilité de la vitesse dans le temps faut-il compter ?
- Comment établir l'importance réelle des mouvements passés et présents et leur distribution dans l'espace ?
- Peut-on prédire l'ordre de grandeur des mouvements dans le futur, la probabilité d'occurrence qu'ils atteignent une valeur critique, ainsi que la variation temporelle des vitesses (annuelle, saisonnière) ?
- Peut-on prendre des dispositions fiables et économiquement justifiables pour arrêter définitivement les mouvements ou empêcher qu'ils surviennent ultérieurement ?
- A défaut de stabilisation, peut-on contrôler la vitesse des mouvements pour limiter les phases de comportement critique ?
- Comment observer les mouvements des phénomènes d'instabilité de terrain dans le but d'en comprendre le mécanisme d'évolution ?
- Comment déterminer, puis observer les conditions hydrogéologiques conditionnant l'apparition d'instabilités de terrain, de façon à prévenir à temps l'occurrence d'un mouvement catastrophique ou critique ?

Même si quelques-unes de ces huit questions étroitement reliées débordent du cadre strict de ce projet de recherche, elles sont sans cesse présentes, plus ou moins consciemment, à l'esprit des projeteurs et des Maîtres d'ouvrage. De la sorte, il vaut la peine de s'y arrêter et de donner quelques éléments de réponses, même succincts, qui fourniront un cadre et un point de départ à la réflexion sur l'auscultation proprement dite, dont la thématique intervient dans plus de la moitié des questions.

Question 1

Le site considéré pour l'ouvrage est-il vraiment stable ?

Cette question devrait être abordée sans a priori, mais avec circonspection, chaque fois qu'un ouvrage prend appui sur un versant, même à faible pente, ou le pénètre. En effet, les surfaces affectées par des instabilités de terrain couvrent plus de 6 % du territoire suisse, mais une proportion bien plus importante des versants proprement dits (voir figure N° 1). Même s'il n'y a pas d'évidence nette de mouvements actifs, il convient de procéder à un examen géologique, dans le but

d'identifier un phénomène d'instabilité latent. En cas de résultat positif, il conviendra d'entreprendre des reconnaissances géologiques et géotechniques plus approfondies, afin de déterminer la situation d'instabilité potentielle et ses caractéristiques, et faire appel à des spécialistes pour faciliter cette identification. Il existe fréquemment des pentes substabilisées que l'exécution des travaux de fondation ou de fouilles peut réactiver. Une reconnaissance préalable de ces mécanismes est donc indispensable.

Question 2

S'il y a des présomptions d'instabilité, sur quelle vitesse moyenne de déplacement à long terme et sur quelle variabilité de la vitesse dans le temps faut-il compter ?

Les très nombreuses mesures de mouvement à moyen ou long terme disponibles et intégrées à des travaux cartographiques d'instabilité en Suisse montrent que la plupart des glissements déclarés subissent des déplacements annuels moyens compris entre quelques millimètres et quelques centimètres par année (Bonnard, Noverraz, Dupraz, 1996). Des déplacements de l'ordre du décimètre par an ou davantage sont rares (ils concernent 5 à 10 % des surfaces en glissement) et sont la plupart du temps liés à certaines parties de très grands glissements.

La méthodologie d'établissement des cartes d'instabilités et de dangers développée ces 15 dernières années (Noverraz, 1985) permet de représenter, sur la base de levés de terrain et de mesures d'anciennes bornes, la répartition des terrains instables en zones de divers degrés d'instabilité (voir tableau N° 2).

Type de mouvement	Ordre de grandeur des vitesses [cm/an]	Couleurs couramment utilisées
Zone substabilisée, apparemment stable	0 - 2	jaune
Zone de glissement actif lent	2 - 10	orange
Zone de glissement actif rapide, avec phases de réactivation	> 10	rouge / violet

Tableau N° 2 : Classification courante des vitesses moyennes de déplacement à long terme adoptée pour les cartes d'instabilité

Une identification des mouvements probables à long terme est importante, car des mesures à court terme peuvent très bien indiquer une stabilité totale pendant plusieurs années, ce qui peut induire à prendre des options erronées pour le projet. Notons qu'il est fréquent de considérer, à tort, comme stables des zones substabilisées avec des vitesses moyennes de 0-1 cm/an. Si de tels mouvements sont en général acceptables pour les ouvrages, à condition que ceux-ci ne soient pas trop sensibles, il faut compter avec une amplification des vitesses lors de travaux d'excavation, de sorte que ces zones substabilisées ne doivent jamais être sous-estimées.

A titre d'exemple, les mouvements horizontaux affectant la rive gauche de la Léventine aux environs du pont de Polmengo, près de Faido (voir exemple type N° 4 et fiche 2.4.1 y relative en annexe), ont été compris entre 2 et 3 cm/an sur une période de 40 ans en moyenne, dans la 1ère moitié du siècle, mais ils ont eu

tendance à diminuer au cours des 30 dernières années (1-2 cm/an entre 1958 et 1988); pourtant, après les crues d'août 1987, les vitesses ont à nouveau augmenté à 4-5 cm/an sur trois ans, puis ont connu un accroissement extraordinaire en 1992 (33 cm en 3 mois et demi dans l'inclinomètre S1). La culée du pont de Polmengo, construit il y a quelques 50 ans, a donc subi un déplacement total de plus d'un mètre; c'est grâce à son système constructif en arche de maçonnerie qu'il n'a pas été totalement détruit et qu'il a pu être maintenu en service moyennant des travaux de renforcement du tablier.

Plus significatif encore a été le cas des glissements de la Praz et de la Grande Combe à Ballaigues (voir exemple type N° 1 et fiche 2.1.1 y relative en annexe), que franchit en viaducs l'autoroute N9B : une reconnaissance par inclinométrie des mouvements, effectuée entre 1980 et 1981, a indiqué des mouvements de 3 à 4 mm/an, incitant au choix d'options constructives adaptées à de tels déplacements. Entre 1982 et 1983, toutefois, les déplacements annuels ont crû brusquement d'un facteur 10, en cours de travaux de construction des piles.

Question 3

Comment établir l'importance réelle des mouvements passés et présents et leur distribution dans l'espace ?

Plusieurs méthodes peuvent être mises à profit, que ce soit les mesures inclinométriques dans les forages ou les enregistrements par extensomètres à fils (qui sont les techniques les plus courantes), pour les déplacements actuels, ou les techniques géodésiques, photogrammétriques, et d'utilisation d'anciens plans cadastraux, pour définir les mouvements dans le passé. Deux facteurs importants doivent être soulignés :

- Pour obtenir des mouvements moyens significatifs à long terme, il est nécessaire de **disposer de périodes d'observation suffisantes**, car le régime des déplacements n'est pas toujours régulier et peut même présenter des variations énormes. Par conséquent, il est illusoire de définir une vitesse moyenne de référence d'un glissement sur la base de mesures inclinométriques effectuées sur une période de quelques mois, voire d'une année.
- **En cas de mouvements faibles** (ce qui est pratiquement toujours le cas, lorsqu'on envisage de fonder un ouvrage en terrain instable), **se pose le problème de la précision des mesures** : si les mesures inclinométriques sont en général très précises (le cône d'incertitude sur les déplacements mesurés ne dépasse pas 0.2 à 0.25 mm/m de forage), leur exécution sur une trop courte période limite la signification de leurs résultats et peut induire en erreur. Quant aux mesures géodésiques sur des bornes, dont les coordonnées ont été déterminées il y a plus de 50 ans, la précision des déplacements déduits dépend surtout de la qualité de la mesure initiale, mais aussi de la méthode d'observation actuelle et des procédés de traitement des données; si le réseau utilisé initialement peut être recalculé dans son ensemble avec des techniques de compensation modernes, on peut améliorer sensiblement les résultats (voir tableau N° 3).

Pour les méthodes basées sur l'exploitation comparative des photos aériennes multi-temporaires, il n'est qu'exceptionnellement possible d'atteindre des valeurs significatives au cm/an près, ce qui invalide cette méthode pour les versants substablisés. Enfin, lorsqu'on utilise d'anciens plans cadastraux et qu'on les compare à des plans plus récents ou que l'on redétermine la position

actuelle des points identifiables sur ces anciens plans, il faut en général compter sur des incertitudes maximales de 3 m sur les documents originaux, dont les plus vieux datent de plus de deux siècles (voir tableau N° 3). Il faut toutefois rappeler que ces anciens plans n'existent pas dans toutes les régions de la Suisse (DUTI, 1985).

Technique utilisée	Précision moyenne de la mesure [cm]	Nombre d'années entre l'état initial et l'état final [an]	Seuil des vitesses significatives [cm/an]
Mesures géodésiques par triangulation ou GPS			
- réseau initial recalculé dans un calcul de compensation global	5	40 - 70	0.07 - 0.12
- réseau initial non compensé	10 - 20	40 - 70	0.14 - 0.5
Mesures photogrammétriques			
- Période de 12 ans entre 2 photos	25 - 35	12	2 - 3
- Période de 6 ans entre 2 photos	25 - 35	6	4 - 6
Exploitation des anciens plans cadastraux			
- plans du XVIII ^e siècle	300	200	1.5
- plans de la fin du XIX ^e siècle	100	100	1

Tableau N° 3 : Détermination des vitesses de déplacements minimales significatives à long terme selon les techniques de mensuration utilisées (les valeurs citées sont des ordres de grandeurs moyens basés sur les résultats obtenus sur de nombreux cas étudiés)

Question 4

Peut-on prédire l'ordre de grandeur des mouvements dans le futur, la probabilité d'occurrence qu'ils atteignent une valeur critique, ainsi que la variation temporelle des vitesses (annuelle, saisonnière) ?

D'une façon générale, **il n'est pas possible d'apporter des réponses satisfaisantes au problème de la prédiction des mouvements**, qui soient valables pour tous les sites instables, mais on peut tirer quelques enseignements des nombreuses études faites en Suisse sur le comportement à long terme des grands versants substabilisés. Sur la plupart des sites étudiés, la tendance à long terme des déplacements est relativement régulière, mais elle peut fluctuer sur plusieurs années, en relation avec les conditions climatiques. Plus le glissement est grand, plus les réactions de celui-ci seront atténuées et différées face aux conditions climatiques défavorables (retard d'une à plusieurs années par rapport à une période de précipitations supérieures à la norme), alors que pour les glissements secondaires, des accélérations peuvent être observées sur quelques mois. Lorsque des variations saisonnières des mouvements sont mises en évidence, il est fré-

quent que les plus grands déplacements soient enregistrés au printemps; ce maximum de vitesse peut être décalé jusqu'au début juin si le site se trouve sur des versants influencés par la fonte des neiges en haute montagne.

Un pronostic d'évolution d'un glissement repose sur une très bonne connaissance de son comportement passé sur une très longue période, ce qui est une condition pratiquement jamais remplie; le cas du glissement de La Frasse - voir figure N° 2 - est une des exceptions (Noverraz et Bonnard, 1990). Faute d'une telle connaissance, un pronostic qualitatif peut être tiré d'une analyse soignée du contexte géologique, structural et géomorphologique; cette analyse permettra de dire si tel ou tel glissement est potentiellement sujet ou non à des réactivations momentanées importantes.

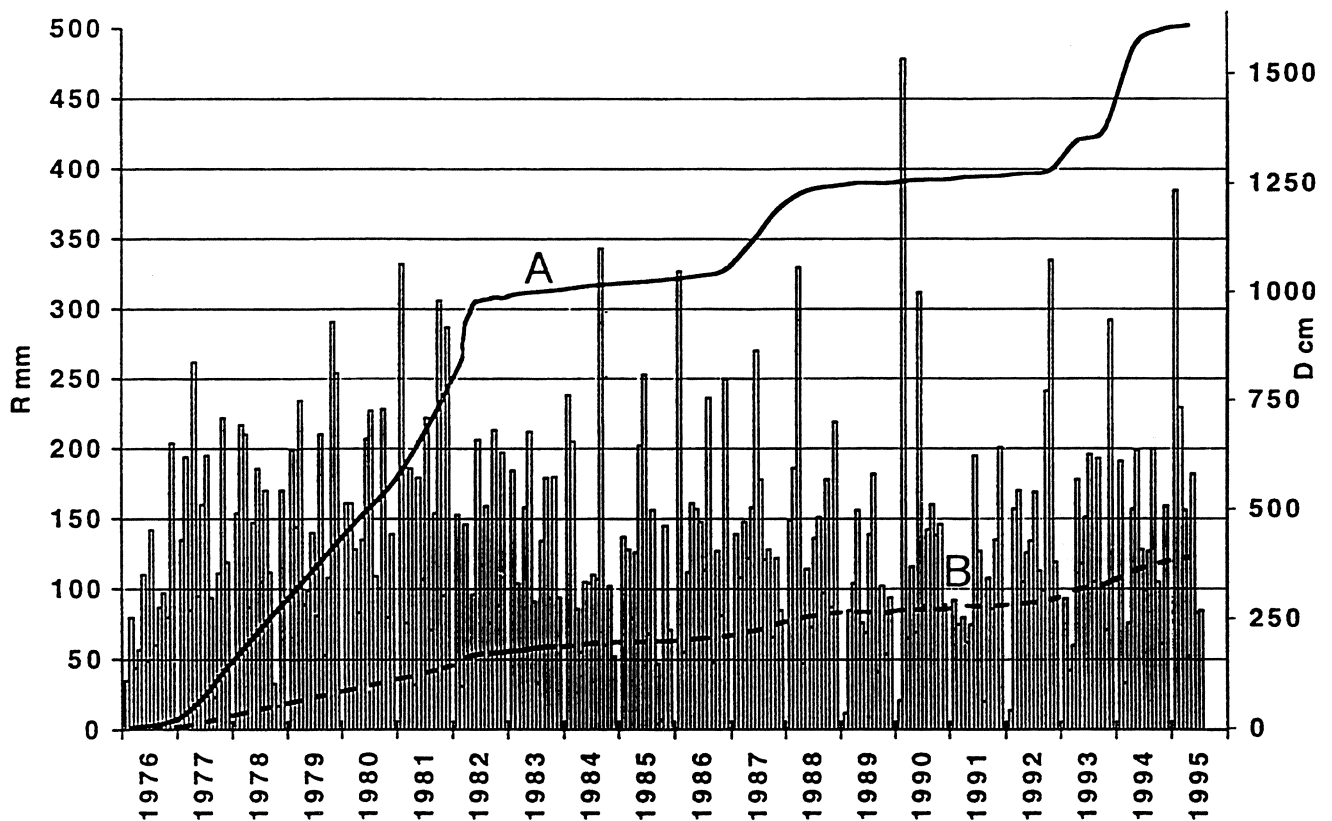


Figure N° 2 : Evolution des mouvements cumulés (D) de deux points au pied du glissement de La Frasse, qui croise la route du Col des Mosses, sur une période de 20 ans, comparée à la pluviométrie mensuelle (R) (Bonnard et al., 1995)

A fortiori, il est impossible de déterminer sérieusement la probabilité d'occurrence qu'une valeur critique donnée de vitesse soit obtenue, car les accélérations des mouvements dépendent de plusieurs facteurs mal connus et liés, en tête desquels figure le contexte hydrogéologique du glissement et du massif; or on sait que ce facteur hydrogéologique reste toujours, dans le meilleur des cas, une demi-inconnue.

Dans deux cas particuliers, une réponse indicative a pu être donnée : au glissement de la Frasse (VD), les épisodes d'accélération dans la partie basse se reproduisent en moyenne une fois tous les 20 ans (5 au cours de ce siècle), avec des vitesses momentanées de l'ordre de 10 fois la vitesse moyenne interannuelle sur une période

de quelques mois et de 100 fois cette valeur sur une période de quelques jours (voir figure N° 2). Au glissement de Falli-Hölili (FR) (voir figure N° 3), l'épisode catastrophique enregistré en 1994 (200 m et plus en 5 mois) peut être qualifié d'événement de période de retour millénaire, au vu des éléments de bois datés dans les sondages (5 éléments à divers niveaux présentant des dates étalées sur 5'000 ans environ).

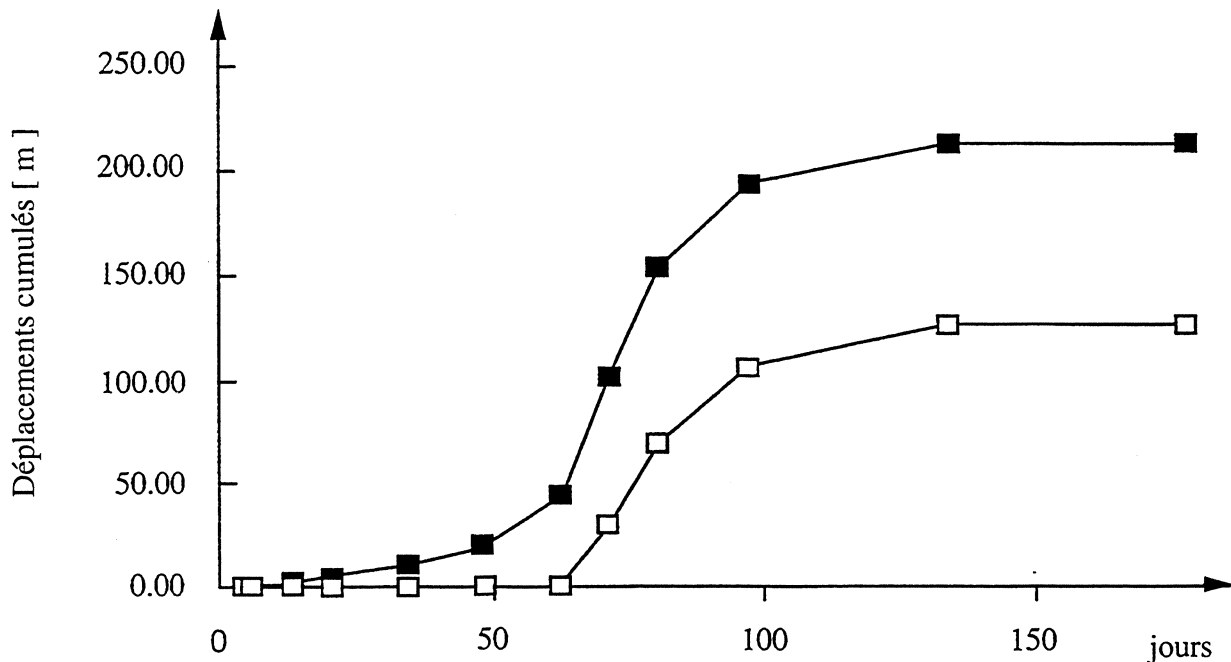


Figure N° 3 : Evolution au cours du temps des déplacements cumulés (en mètres) de 2 points au voisinage du village de Falli Hölili, sur le glissement du même nom, depuis le 25 mai 1994 (Bonnard et al., 1995)

Question 5

Peut-on prendre des dispositions fiables et économiquement justifiables pour arrêter définitivement les mouvements ou empêcher qu'ils ne surviennent ultérieurement ?

La réponse à cette question dépend de la taille du phénomène d'instabilité, des conditions générales d'équilibre et de sa vitesse moyenne. En effet, plus un glissement est important en volume et/ou en surface, plus les solutions techniques à mettre en oeuvre pour le stabiliser sont coûteuses et difficiles; par ailleurs, les paramètres influençant son comportement sont d'autant plus nombreux que sa taille est plus grande, de sorte que le choix et le dimensionnement des ouvrages, voire la combinaison de plusieurs solutions de stabilisation appropriées, en est rendue plus difficile à déterminer.

Le paramètre influençant grandement les possibilités de stabilisation est la vitesse moyenne du mouvement. En effet, toutes les solutions de stabilisation intervenant directement sur la masse instable sont difficiles à mettre en oeuvre en présence d'un mouvement important de la masse, et sont sujettes à caution si elles n'arrivent pas à stabiliser rapidement le mouvement. De ce fait, pour les mouvements importants, à partir de quelques cm/an, le nombre de solutions techniques fiable est très réduit.

En dernier lieu, la pérennité de la stabilisation des versants instables est parfois difficile à assurer, car les conditions extérieures affectant l'équilibre de la masse

instable peuvent être amenées à évoluer (conditions hydrogéologiques, érosion au pied du versant, etc.). Par ailleurs, il est indispensable d'assurer un contrôle et un entretien suivi des ouvrages de stabilisation, notamment des drainages; un suivi régulier des mouvements permet de veiller au bon comportement de ces ouvrages et, le cas échéant, conduit à procéder à leur réfection ou à leur renforcement (décolmatage des drains, remplacement, réfection des drains sectionnés, densification du réseau drainant – voir cas type N° 1 dans la fiche 2.1.1 en annexe –, remise en tension ou substitution d'ancrages - voir cas type N° 5).

Question 6

A défaut de stabilisation, peut-on contrôler la vitesse des mouvements pour limiter les phases de comportement critique ?

Lorsqu'il n'est pas possible de s'opposer mécaniquement aux mouvements d'un glissement, il est dans certains cas possible de limiter ceux-ci, au moyen de **systèmes de drainage**, superficiels, souterrains ou combinés, par exemple. Au vu des expériences effectuées, l'efficacité à attendre de ces mesures est très limitée lorsqu'elles se résument à des drainages de surface, alors qu'elle est maximale lorsque des mesures de drainages profonds parviennent à réduire des sous-pressions en massif rocheux. Lorsque la masse glissée et le substratum stables sont constitués de matériaux très peu perméables, l'effet à attendre de drainages même profonds est limité. Pour les glissements sujets à des accélérations temporaires importantes, une limitation de ces épisodes de crise peut constituer l'effet principal des travaux de drainage.

De même, dans le cas **d'ouvrages ancrés**, il peut être observé de légers mouvements résiduels liés au fluage du scellement notamment, mais un redémarrage brutal de l'instabilité de pente est improbable, à condition que la tension des ancres ne se rapproche pas de la limite de rupture.

Dans le cas de **remblais stabilisants** au pied des pentes, on peut faire de semblables observations dans les premières années suivant leur mise en place, mais après un certain temps, le nouvel équilibre des contraintes dans le massif garantit la stabilité complète, à condition que les conditions extérieures ne se modifient pas substantiellement. Ce temps nécessaire à atteindre une stabilisation relative doit être pris en compte dans les programmes d'auscultation comme dans la marge de mesure des dispositifs de contrôle mis en oeuvre.

Question 7

Comment observer les mouvements des phénomènes d'instabilité de terrain dans le but d'en comprendre le mécanisme d'évolution ?

Lors de l'élaboration d'un projet d'ouvrage sur un versant instable, on part du principe que l'ampleur passée des mouvements et la profondeur de la zone instable sont déterminées au cours des études d'avant-projet; toutefois, le mécanisme d'évolution du versant peut se modifier pendant la vie de l'ouvrage. Pour pouvoir comprendre l'évolution de ces mouvements au cours du temps, il convient d'observer les effets de l'instabilité à **trois niveaux** :

1. - **Au niveau de l'ouvrage et de sa fondation**, par des **observations simples et fréquentes** de quelques points, effectuées dans le cadre des contrôles d'exploitation, même si ces mesures donnent des déplacements ou des mouvements relatifs; ceux-ci peuvent fournir des informations indicatives

sur une évolution anormale. C'est par exemple le cas du nivellement du tablier d'un pont, d'une culée à l'autre, l'alignement de quelques points des fondations, la rotation du sommet d'un mur ancré.

2. - Si des mouvements anormaux apparaissent au premier niveau d'auscultation, des **mesures de surface plus complètes**, fournissant des déplacements horizontaux et verticaux absolus avec une bonne précision, c'est-à-dire impliquant une certitude sur la fixité des points de référence, soit sur leur stabilité géologique, doivent être effectuées; ces mesures doivent inclure **non seulement l'ouvrage, mais l'ensemble de la zone où il est implanté**. Le deuxième niveau d'observation permet d'avoir une vision synthétique sur les déplacements de surface à plus long terme, si l'on corrèle ces mesures à celles faites avant la construction de l'ouvrage.
3. - Si les déplacements absolus de surface, obtenus au niveau ci-dessus, montrent des résultats non homogènes ou incohérents avec les observations du niveau 1 ou avec celles faites au cours de la phase d'étude d'avant-projet, il faudra procéder à de **nouvelles mesures en profondeur**, par exemple inclinométriques, soit dans des tubes encore en fonctionnement, soit si nécessaire dans de nouveaux forages, afin de déterminer si une surface de glissement secondaire s'est activée. Ce troisième niveau d'auscultation est indispensable si l'on veut projeter correctement un renforcement des ouvrages de stabilisation.

Question 8

Comment déterminer, puis observer les conditions hydrogéologiques conditionnant l'apparition d'instabilités de terrain, de façon à prévenir à temps l'occurrence d'un mouvement catastrophique ou critique ?

Les conditions hydrogéologiques dans ou sous la masse instable constituent le paramètre variable essentiel pour **l'activation d'un mouvement de terrain**. Il convient donc de se donner les moyens de les observer, puis d'assurer un suivi régulier, à un rythme dépendant des fluctuations annuelles ou saisonnières. Si les conditions réagissent fortement à un épisode climatique, une mesure plus serrée sera nécessaire; celle-ci peut être acquise grâce à un **enregistrement en continu** d'un niveau d'eau libre dans un tube piézométrique ou d'une pression interstitielle, grâce à un capteur placé à un niveau approprié. Le choix d'un tel équipement dépend du degré de perméabilité du massif ou de la zone où se produit le glissement, qui conditionne un temps de réponse variable.

Un autre paramètre lié aux conditions hydrogéologiques est le débit recueilli dans un réseau de drainage; il peut être utile de le surveiller s'il reflète les conditions hydrogéologiques existantes, selon une relation que le suivi des débits et des niveaux piézométriques permettra d'établir par corrélation. De la sorte, une modification de cette relation, suite par exemple à une diminution du débit, peut attirer l'attention sur un problème de colmatage des drains. **La variation de ces paramètres hydrogéologiques précède en général la variation des vitesses des mouvements**; pour cette raison, le suivi des conditions hydrogéologiques peut assurer une information sensible pour prévenir l'occurrence d'un mouvement critique.

7. SYSTEMES D'AUSCULTATION

Les questions présentées ci-dessus, conditionnant le choix d'une méthode d'auscultation, qui inclut évidemment les appareils et les systèmes de surveillance, démontrent la nécessité de présenter ici sommairement les moyens techniques de base à disposition et de préciser quelques-unes de leurs caractéristiques, avant de formuler des principes d'auscultation d'ouvrages. Certes, il existe de nombreux ouvrages ou publications (Dunnicliff, 1988; Hanna, 1985, notamment) qui donnent de nombreux détails sur la conception des appareils de mesure et leur utilisation. Mais il est utile de rappeler sous forme de tableaux, donnés en annexe 3, les **dispositifs les plus couramment utilisés actuellement**, classés en trois catégories en fonction des paramètres observés, servant à :

- la mesure des déplacements
- la mesure piézométrique
- la mesure de force et de pression.

La plupart des dispositifs utilisés dans les cas types retenus (voir chapitres 4 et 8) se trouvent dans des tableaux (à l'exception des mesures de débit); mais leur intégration dans un système de surveillance particulier, avec des contraintes locales, et dans le contexte de l'époque de l'auscultation considérée, implique des appareillages parfois moins performants que ce que mentionne la rubrique relative à la prévision. Il faut aussi relever que **la précision d'un système ne dépend pas seulement de l'appareil**, mais de l'ensemble des opérations effectuées dans le cadre d'un réseau.

Plusieurs de ces dispositifs récents, faisant notamment appel à l'usage de satellites (méthodes géodésiques GPS) ou de la transmission automatique des mesures (théodolite motorisé, piézomètre électrique) permettent de mettre en oeuvre des campagnes de mesure plus performantes; leur intégration dans les programmes d'auscultation relatifs aux cas types considérés a conduit à modifier parfois sensiblement les observations qui étaient faites précédemment. Mais il est important de ne pas se polariser sur les progrès technologiques ponctuels et d'examiner plutôt les **concepts d'auscultation** qui transparaissent au travers de l'étude des ouvrages retenus comme cas types, dont la variété permet d'illustrer un grand nombre de situations significatives.

8. SELECTION DES OUVRAGES ILLUSTRANT LA DEMARCHE PROPOSEE

8.1 Critères de sélection

Afin d'illustrer par des exemples concrets les problèmes évoqués au chapitre 6 et de présenter la mise en application possible des systèmes d'auscultation énumérés au chapitre 7, une série d'ouvrages a été retenue (voir tableau N° 1 au chapitre 4). Les **critères de sélection**, multiples, de ces ouvrages sont brièvement rappelés ici :

- Types d'ouvrages différents

En plus des 9 ouvrages autoroutiers vaudois, significatifs par rapport aux problèmes d'instabilités de pente et qui avaient été sélectionnés dans le cadre du mandat OFR N° 5/82, diverses structures ont été choisies; elles font partie du réseau des routes cantonales et des autoroutes et sont fondées en terrains

instables. Elles comprennent 2 viaducs, 2 ponts et 4 murs ancrés ou ouvrages de soutènement. Ceci donne en définitive une base d'analyse de 17 ouvrages (voir tableau N° 4).

Source	N°	Ouvrage (type, localisation)	Canton	Période d'auscultation considérée
Mandat N° 22/86	1	Viaduc de la Praz à Ballaigues	VD	1979 - 1994
	2	Viaduc sur la Sorge à Valangin	NE	1981 - 1996
	3	Pont du Ganter	VS	1976 - 1991
	4	Pont de Polmengo, près de Faido	TI	1988 - 1995
	5	Murs ancrés de Neuenhof	AG	1971 - 1988
	6	Paroi ancrée de Gstipf-Brigue	VS	1980 - 1986
	7	Mur de soutènement ancré, pont sur la Jogne	FR	1972 - 1983
	8	Murs ancrés du tronçon Sylans-Neyrolles	Ain (F)	1978 - 1986
Mandat N° 05/82	9	Ponts sur la Paudèze	VD	1973 - 1987
	10	Ponts sur la Lutrive	VD	1972 - 1987
	11	Ponts sur la Veveyse	VD	1968 - 1987
	12	Viaducs de Chillon	VD	1967 - 1987
	13	Ponts sur la Veveyse de Fégire	VD/FR	1982 - 1987
	14	Ponts de La Cornallaz	VD	1981 - 1987
	15	Murs ancrés de la Criblette	VD	1982 - 1987
	16	Murs ancrés du Lanciau	VD	1972 - 1984
	17	Tranchée de Converney	VD	1971 - 1984

Tableau N° 4 : Liste des 17 ouvrages retenus en définitive dans le cadre de cette recherche

- Contextes géographiques différents

Pour disposer d'une large palette de procédures d'auscultation, les ouvrages types sélectionnés ont été choisis dans 6 cantons suisses, plus un groupe d'ouvrages ancrés dans le département français de l'Ain, dont la surveillance est assurée par la Société d'exploitation Scétauroute.

- Types de phénomènes d'instabilité variés

Il a aussi été tenu compte des divers mécanismes d'instabilité sur lesquels sont fondés les ouvrages étudiés, qui sont essentiellement des glissements, mais dont le type varie (rotationnel, translationnel, superficiel), dont le mouvement varie (actif, légèrement actif, stabilisé, potentiel) et dont l'emprise par rapport à l'ouvrage varie (concerne tout ou partie de l'ouvrage). Dans trois cas, le mécanisme est différent, avec la présence d'éboulis stabilisés ou de roche en voie d'altération (voir dessins accompagnant les fiches en annexe).

- Systèmes d'auscultation différents

Selon l'importance des ouvrages et suivant les autorités ou bureaux d'étude chargés de leur contrôle, les systèmes d'auscultation mis en oeuvre ou programmés sont aussi assez variés, de même que la politique de gestion des résultats d'observation.

Sur la base de ce large choix de situations, il est possible de dégager des principes dans la pratique de l'auscultation et de formuler des lignes directrices sur le suivi et la gestion des ouvrages.

Nous tenons à remercier ici toutes les autorités cantonales et les bureaux d'étude qui ont contribué à cette recherche en nous fournissant des données et en nous informant sur leur pratique. Pour chaque ouvrage, un dossier interne a été établi, dont il a été extrait les éléments essentiels visant à illustrer notre propos. Les résultats principaux d'auscultation et les systèmes mis en oeuvre sont détaillés d'une part dans les fiches relatives à chaque ouvrage sélectionné dans le cadre de cette recherche (voir annexes 2.1 à 2.8), et d'autre part dans le rapport final de la recherche N° 5/82 de l'Office fédéral des routes.

Il convient de relever trois points remarquables pour apprécier la représentativité de ces exemples dans le contexte analysé :

- Aucun ouvrage étudié n'a connu un **comportement critique** ou catastrophique, même si, à certains moments, l'observation des mouvements a causé de sérieuses inquiétudes. Il n'est donc pas possible à cet égard de porter pour l'instant un jugement étayé par l'expérience face à une véritable situation de crise. A cet égard, le pont de Pardoreia, à Polmengo près de Faïdo, pourrait illustrer une telle situation dans un futur proche.
- La plupart des ouvrages sont **suivis de façon approfondie depuis plus d'une dizaine d'années**, mais quelques-uns ont fait l'objet de mesures **sur environ 20 ans**, et même 50 ans dans un cas. C'est dire que le **recul face à l'observation d'ouvrages** qui sont sensés durer en général 100 ans est **encore limité**.
- Enfin, la plupart des ouvrages considérés ont fait l'objet **d'études sérieuses et approfondies**, dans le cadre desquelles les phénomènes d'instabilité ont pratiquement toujours été détectés ou envisagés assez tôt, de sorte qu'il ne s'est produit que dans deux cas la situation critique où l'ouvrage était construit sans tenir compte de l'instabilité latente ou réelle du versant. Ce dernier point est capital si l'on veut éviter de grosses difficultés en cours de réalisation ou la construction d'ouvrages de confortation coûteux qui ne s'adaptent pas toujours bien aux ouvrages déjà achevés.

8.2 Observations sur les ouvrages

D'une façon générale, lorsqu'un tracé routier rencontre une zone d'instabilité de terrain, potentielle ou déclarée, la **première option** du projeteur consiste à éviter la zone ou à franchir cet obstacle en limitant au minimum le nombre de points de contact. De ce fait, dans la plupart des cas, c'est une **solution de pont ou de viaduc** qui est adoptée. C'est la raison pour laquelle, sur les 17 ouvrages servant de référence, dix d'entre eux sont de ce type, soit sept ponts et trois viaducs. Nous n'avons évidemment pas pris d'exemple où la largeur limitée de la zone d'instabilité permet de la franchir d'une seule portée sans aucune interaction, car ce cas n'offre pas d'intérêt face aux problèmes d'auscultation.

En examinant de plus près la conception des ouvrages analysés, on peut les classer en diverses catégories. Tout d'abord, il faut séparer les cas (8 sur l'échantillon considéré) où, dès l'étude du projet, le **phénomène d'instabilité à franchir était connu**, ou du moins détecté, de ceux où l'activité du glissement s'est mani-

festé après coup, plusieurs années après la construction, ce qui a nécessité des actions de réparation ou de stabilisation; cette dernière situation a été rencontrée au viaduc de Valangin, où des pieux et des ancrages ont été mis en oeuvre, pour bloquer l'évolution des mouvements qui affectaient la culée aval et les piles 1 et 2, et au pont de Polmengo, où tout le versant instable en rive gauche de la Léventine a nécessité une confortation de ce pont de maçonnerie (voir fiches 2.2 et 2.4 en annexe).

Sur les huit cas où le mécanisme d'instabilité de pente avait été préalablement identifié, les projeteurs et les administrations responsables ont adopté deux partis différents :

- soit **résister au mouvement**, en concevant des fondations de piles sur pieux, éventuellement avec ancrages, qui reprennent les poussées induites par la masse instable; c'est le cas des ponts de la Paudèze, de la Lutrive, de la Veveyse de Fégire, ainsi que deux des piles du viaduc de Chillon (Nos 3 et 14);
- soit **s'adapter à la présence d'un mouvement**, en tentant de limiter son importance par des drainages, en cherchant à isoler l'ouvrage de la masse instable par des puits qui entourent les fondations et empêchent le glissement de pousser sur les piles fondées en rocher sous la masse en mouvement, ou encore en prévoyant des dispositions pour adapter l'ouvrage au cas où ses fondations viendraient à se déplacer exagérément. De telles circonstances sont rencontrées aux ponts de la Cornallaz et du Ganter et au viaduc de la Praz, à Ballaigues.

La **seconde grande option**, face à un phénomène d'instabilité, consiste à l'entailler pour faire place à la route tout en bloquant son mouvement. Cette catégorie regroupe les **murs ancrés**, en général constitués de pieux ou piliers et de plusieurs niveaux d'ancrage, qui sont recouverts d'un parement et complétés par un écran drainant. Dans cette catégorie entrent les 4 murs étagés de la Criblette, les murs du Lanciau, les murs ancrés de Neuenhof (qui sont encore complétés par des puits drainants) et les pieux ancrés de Gstipf-Brigue (qui ont partiellement servi d'appui à une galerie couverte construite en seconde phase).

Deux autres systèmes similaires sont encore considérés, soit des **murs de soutènement ancrés et remblayés**, au mur près du pont sur la Jogne à Broc, et enfin des murs ancrés réalisés par étapes descendantes et complétés par des ouvrages de soutènement selon le système de la terre armée, dans le secteur Sylans-Neyrolles de l'autoroute A40 en France. Ce dernier concept combine la réalisation d'une entaille dans le versant et la mise en oeuvre d'une plateforme en remblai pour une voie d'autoroute.

En dernier lieu, un exemple a été examiné où les travaux principaux consistent en des **mouvements de terre, par déblais**, avec mise en oeuvre **d'un réseau de drainage** souterrain (tranchée de Converney). Il n'a pas été trouvé de cas significatif de remblai sur une zone instable, sans travaux d'ancrages, pour remplacer le cas type préalablement retenu de la correction de la route Estavayer-le-Lac/Yverdon-les-Bains dans le secteur de Font.

Pour mémoire, on peut encore citer, en dehors des exemples traités, le franchissement du glissement de la Frasse par la route du Col des Mosses, qui suit tant bien que mal les mouvements naturels du versant, sur une longueur de 850 m. Les seules interventions tentées pour améliorer la situation ont été la mise en oeuvre d'une structure localisée de pieux ancrés de faible profondeur, dont le but est

d'homogénéiser les mouvements de la zone instable la plus superficielle avec la zone en glissement immédiatement en dessous, ainsi que la réalisation de travaux de drainage superficiels et en profondeur; toutefois ces travaux ne peuvent prétendre stabiliser les mouvements d'ensemble du glissement, dont le volume atteint 60 mio de m³ (Noverraz et Bonnard, 1990). Dans un tel cas, la chaussée doit être régulièrement entretenue pour s'adapter aux mouvements différentiels observés aux bords du glissement et au franchissement de chaque zone de vitesse différenciée.

8.3 Observations sur les contextes géographiques et politiques

La première étude sur le comportement des fondations d'ouvrage d'art avait impliqué exclusivement des ouvrages autoroutiers du canton de Vaud, pour lesquels le traitement des cas présentait nécessairement certaines similitudes. Il a donc été jugé intéressant **d'ouvrir l'échantillon à d'autres ouvrages routiers** (routes cantonales de moindre importance ou intercantionales), ainsi qu'à d'autres cantons, voire pays, dont l'expérience et les concepts de projet peuvent varier. Ainsi, des ouvrages dans six cantons et un département voisin de France sont considérés. Toutefois, ce choix n'est pas seulement politique, mais il inclut aussi des aspects de phénomènes d'instabilité différents que l'on ne rencontre pas partout en Suisse (cas du pont de Polmengo en particulier).

Cette diversité de contextes politiques et administratifs s'est aussi avérée intéressante au niveau de la **gestion de l'auscultation** des ouvrages, certains cantons ayant des principes de surveillance assez différents (voir notamment chapitre 10.4).

8.4 Observations sur les phénomènes d'instabilité

Pour donner une vision d'ensemble des huit phénomènes d'instabilité étudiés, franchis par les ouvrages types retenus, pour ce qui concerne leurs caractéristiques géologiques et géotechniques, le tableau N° 5 ci-après précise pour chacun d'eux le type de mécanisme observé ou potentiel, le degré d'activité des mouvements, la nature de la masse instable et la formation géologique des versants concernés.

Sur les 17 cas étudiés, en tenant compte des neuf glissements ou phénomènes d'instabilité considérés dans le cadre du mandat OFR N° 5/82, la majeure partie des phénomènes d'instabilité, soit 11, étaient des glissements faiblement actifs, avec une dominante des mécanismes translationnels (8) sur les mécanismes rotationnels (3). Dans un seul cas, on peut penser que le glissement qui s'est manifesté n'était pas ou très peu actif avant la construction de l'ouvrage. Par ailleurs, dans cinq cas, les ouvrages prenaient appui sur des massifs d'éboulis (3) ou servaient de soutènement pour des massifs rocheux fortement fracturés et/ou à pendage défavorable (2) dont l'activité était potentielle compte tenu des travaux à effectuer.

N°	Cas type considéré	Type de mécanisme observé ou <i>potentiel</i>	Degré d'activité des mouvements du glissement	Nature de la masse instable	Formation géologique du versant (substratum)
1	Glissement de la Praz, à Ballaigues, en rive gauche de l'Orbe	Glissement translationnel	Actif avec phase d'accélération forte momentanée	Matériaux morainiques sur dépôts glacio-lacustres	Calcaires du Valanginien et du Portlandien, marnes du Purbeckien
2	Glissement localisé du versant sous la culée du viaduc de Valangin	Glissement rotationnel	Pratiquement stabilisé après une phase d'accélération	Dépôts varvés glacio-lacustres et moraine	Moraine de fond compacte
3	Glissement du versant rive gauche du Ganterbach	Glissement translationnel profond	Partiellement stabilisé grâce au drainage	Matériaux glissés comprenant surtout des éboulis de pente et de la moraine	Schistes lustrés liasiques
4	Glissement du versant rive gauche du Ticino à Polmengo	Glissement complexe avec surface circulaire profonde à la base	Actif avec phase d'accélération forte	Massif de gneiss totalement remanié et alluvions au pied	Gneiss granitiques
5	Glissement du versant rive gauche de la Limmat à Neuenhof	Glissement translationnel	Faiblement actif avant stabilisation	Masse glissée formée de moraine et de matériaux molassiques dans une matrice limono-argileuse	Molasse marneuse, gréseuse, silteuse
6	Versant avec voile d'éboulis de Gstipf en rive gauche de la Vallée du Rhône	<i>Glissement circulaire</i> sur glissement profond stabilisé	Légèrement actif pendant les travaux	Eboulis hétérogènes de schistes lustrés	Schistes lustrés liasiques
7	Versant instable en rive droite de la Jogne, près de Broc	<i>Glissement circulaire</i> dans la zone altérée du versant	Stabilisé par les travaux d'ancrages	Flysch marno-calcaire altéré et limon argileux	Massifs marno-calcaires schisteux de Flysch
8	Versant avec voile d'éboulis comprenant des paquets marneux en rive droite du lac de Sylans et de la Doie	<i>Glissement translationnel</i>	Stabilisé par les travaux d'ancrages effectués en sous-œuvre	Eboulis calcaires et marneux, peu argileux	Calcaires roux et calcaires marneux

Tableau N° 5 : Caractéristiques géologiques et activités des phénomènes d'instabilité étudiés

Pour ce qui est des **mouvements mesurés sur une longue période avant la construction des ouvrages**, il n'existe pratiquement pas de données; dans deux des cas étudiés seulement, on peut retrouver des valeurs de déplacement :

- Au pont de la Cornallaz, les mouvements anciens à long terme du glissement ont été reconstitués grâce à l'exploitation du cadastre viticole, de sorte qu'on peut admettre que, dans la zone à l'aval de l'ouvrage (glissement dit des Luges), on avait au début du siècle une vitesse moyenne de 10 à 20 cm/an (Bersier et al., 1975). En 1950, le glissement de la Cornallaz proprement dit a subi une accélération catastrophique conduisant à des déplacements horizontaux d'une quarantaine de mètres en 15 jours; suite à cet épisode, les drainages déjà réalisés à l'époque de la construction de la ligne de chemin de fer Lausanne-Berne et poursuivis en 1920 et 1940 ont été renforcés; le mouvement résiduel du glissement de la Cornallaz avant la construction du pont de l'autoroute N9 devait ainsi être minime, soit de l'ordre du cm/an.
- Dans le versant dominant le pont de Polmengo, près de Faido, les déplacements à long terme ont pu être établis a posteriori dès 1919. En 1958, soit sur près de 40 ans, les vecteurs de déplacement atteignaient 2 m dans la partie haute et 50 cm dans la partie basse, à 500 m du pont.

Dans les autres cas étudiés, la morphologie du versant permet de penser que les mouvements à long terme devaient être inférieurs à 1 cm/an, sauf dans le cas du pont sur la Paudèze où une partie des versants était affectée d'un mouvement actif sévère.

8.5 Observations sur les systèmes d'auscultation

Dans le cadre du mandat N° 5/82, 12 systèmes d'observation avaient été utilisés, dont deux concernaient essentiellement les remblais sur sols mous. L'examen des huit nouveaux cas de référence a permis de porter la liste des dispositifs utilisés d'auscultation à un total de 21, en incluant dans chaque classe de dispositif spécifique un principe typique d'observation, même si les appareillages proprement dits ou les méthodes d'utilisation peuvent varier d'un cas à l'autre, dans une classe donnée.

Ces systèmes d'auscultation peuvent être regroupés en quatre grandes catégories :

- dispositifs de mesure des mouvements ou des déformations
- dispositifs de mesure des niveaux, pressions ou débits d'eau
- dispositifs de mesure des forces ou des contraintes
- dispositifs de mesures de paramètres environnementaux.

Le tableau N° 6 ci-après résume par catégories de systèmes les dispositifs les plus employés.

La liste complète des dispositifs utilisés sur les sites étudiés dans le cadre de ce mandat, avec leurs caractéristiques, se trouve dans les fiches en annexe 2.1 à 2.8. On peut relever, sur la base des données du tableau N° 6 qu'un seul site bénéficie de mesures de pression interstitielle, ce qui est symptomatique d'une lacune notable face à un facteur déclenchant de réactivation des mouvements de terrain.

<i>Catégories de systèmes d'auscultation</i>	<i>Types de dispositifs</i>	<i>Nombre de cas où ils sont utilisés (sur 17 sites au total)</i>
Mesure des mouvements ou des déformations	Nivellement	13
	Polygonales, alignement, triangulation	15
	Inclinométrie	15
	Clinométrie	7
Mesures de niveaux, pressions ou débits d'eau	Piézomètres ouverts	
	- mesures ponctuelles dans le temps	6
	- mesures en continu	2
	Capteur de pression interstitielle	1
Mesures des forces ou des contraintes	Débit de drainage	5
	Cales dynamométriques	4
	Jauges de contrainte à corde vibrante	3
	Essais de contrôle de tirants	2
Mesures des paramètres environnementaux	Poussée sur une fondation	1
	Stations météorologiques	4
	Essais de pompage	1
	Corrosion d'armature	1

Tableau N° 6 : Types de dispositifs employés pour l'auscultation des 17 ouvrages étudiés

9. PRINCIPES GENERAUX DE L'AUSCULTATION

L'analyse de nombreux programmes d'auscultation, tant des glissements de terrain examinés dans le cadre des cas types retenus (voir chapitre 8 et fiches 2.1 à 2.8 en annexe) que d'autres phénomènes d'instabilité et d'ouvrages de diverses natures (ponts, tunnels, barrages, etc.), a conduit à définir **sept principes généraux**, donnés dans le tableau N° 7, applicables en toutes circonstances, et qui doivent toujours servir de base à la mise en oeuvre d'une campagne d'auscultation. Certains de ces principes paraîtront élémentaires, à la première lecture. Toutefois, il s'est avéré, dans plusieurs cas concrets où des problèmes difficiles de gestion et d'assainissement sont apparus suite à des comportements imprévus, que ces principes n'avaient pas été respectés. Ces derniers serviront aussi de fil conducteur dans le développement des chapitres suivants.

I	Prévoir l'auscultation dès la phase de conception du projet, avec un système durable, pour permettre des contrôles à long terme
II	Tenir compte, lors de la conception du système d'auscultation, du comportement probable de l'ouvrage et des caractéristiques des phénomènes d'instabilité
III	Prévoir des mesures ponctuelles ou en continu dans le temps, selon l'importance des mouvements de la zone instable et leur impact sur l'ouvrage
IV	Utiliser des moyens d'auscultation faisant appel à diverses techniques ou à divers spécialistes pour recouper les informations obtenues
V	Adopter des systèmes d'observation simples, résistants, fiables et faciles d'accès
VI	Procéder régulièrement à une analyse temporelle et spatiale du comportement des ouvrages et en particulier de leurs fondations
VII	Déterminer des modèles d'évolution, sur la base des données complètes de l'auscultation, pour formuler des prédictions et mettre en oeuvre une politique de gestion

Tableau N° 7 : Principes généraux d'auscultation

I Prévoir l'auscultation dès la phase de conception du projet, avec un système durable, pour permettre des contrôles à long terme

Le paramètre **temps** est en effet la clé de l'auscultation, terme qui est défini comme l'observation au cours du temps. Par conséquent, lorsque l'on conçoit un projet d'ouvrage en terrains instables, il faut d'abord essayer de retrouver des données quantitatives qualifiant le comportement du site dans le passé, comme par exemple les altitudes et coordonnées anciennes des bornes géodésiques ou cadastrales, ou même d'anciennes photographies aériennes qui peuvent être numérisées. Les données climatiques sont aussi des références indirectes sur les conditions environnementales du passé.

En fonction des critères de conception du projet et de l'analyse préliminaire de la zone instable, il pourra être établi quelles sont les **parties sensibles des ouvrages**, où les mouvements du sol et du sous-sol, ainsi que les conditions hydrogéologi-

ques, doivent être déterminés, et quel peut être l'effet des diverses phases d'exécution, notamment des excavations, sur le comportement de la zone instable. Une **coordination** entre l'auscultation des fondations et celle de la superstructure de l'ouvrage devra être poursuivie. D'autre part, les mouvements estimés a priori et la durée de vie prévisible de l'ouvrage détermineront l'ampleur totale des mouvements qu'il faudra pouvoir enregistrer, et conditionneront le système d'auscultation, sa durabilité et sa fiabilité.

Il convient de prévoir dès le début du projet un **système en plusieurs étapes**, d'ampleur variable, dont les résultats partiels puissent être coordonnés sans perte de précision. Il convient enfin de tenir compte dès le début du projet de **l'interaction entre auscultation et travaux**, qui souvent ne font pas bon ménage. En effet, la réalisation des travaux de terrassement conduit souvent à la destruction des points de références, d'inclinomètres ou à la perte de signification de résultats piézométriques. Il faut donc prévoir au départ le dédoublement de certaines données d'observation de façon à assurer une continuité des données tout au long de la phase de réalisation de l'ouvrage, notamment dans des points stratégiques pour la sécurité des fondations.

II Tenir compte, lors de la conception du système d'auscultation, du comportement probable de l'ouvrage et des caractéristiques des phénomènes d'instabilité

Le **comportement de l'ouvrage**, tout au long de sa durée de vie **dépend** en premier lieu des caractéristiques du **phénomène d'instabilité de terrain** qui affecte tout ou partie de ses fondations. Il convient donc de procéder à une observation des paramètres principaux conditionnant le mécanisme d'instabilité ou décrivant son comportement, dans le cadre du programme d'auscultation de l'ouvrage. Cela implique d'une part **l'étude des mouvements** de surface et en profondeur du glissement, non seulement au droit des fondations de l'ouvrage, mais aussi dans le versant, à l'amont et à l'aval, de façon à comprendre comment évolue le phénomène dans son ensemble. Cette observation doit se faire même si les mouvements au droit de l'ouvrage sont fortement ralentis, voire arrêtés, par des ouvrages de stabilisation ponctuels.

D'autre part, il convient de suivre les **conditions hydrogéologiques** tout au long du versant instable, de façon à apprécier le cas échéant l'efficacité spatiale d'un système de drainage localisé et les variations des niveaux phréatiques dans les zones où ils ne sont pas affectés par les drainages.

Par ailleurs, la réalisation de fondations d'ouvrages dont la stabilisation est assurée par des ouvrages d'assainissement ponctuels peut entraîner une **grande diminution des mouvements initiaux** mesurés dans le versant, diminution qui peut être plus marquée encore par la rigidité de l'ouvrage lui-même. Il faut alors prévoir une auscultation beaucoup plus précise des mouvements des fondations et des structures; des dispositifs complémentaires de mesure doivent permettre de clairement séparer, dans l'interprétation des données, les mouvements de l'ouvrage qui sont liés aux conditions thermiques et au fluage de ceux entraînés par les mouvements du sous-sol. Toutefois, il faut garder en fonction un système de mesure polyvalent permettant le suivi de l'ouvrage au cas où les mouvements des fondations dépasseraient soudain la plage de mesure initialement prévue qui tenait compte de l'effet de stabilisation.

Enfin, dans le cas des ancrages dont la tension est mesurée derrière la tête par une cale dynamométrique, il faut considérer le sens des forces de frottement des câbles contre la gaine qui peuvent s'inverser, selon que le scellement a tendance à fluer ou que la tête a tendance à se déplacer vers l'aval. Il est donc essentiel de comprendre le comportement possible des ouvrages et des dispositifs de stabilisation pour apprécier la représentativité des résultats des divers appareils d'auscultation.

III Prévoir des mesures ponctuelles ou en continu dans le temps, selon l'importance des mouvements de la zone instable et leur impact sur l'ouvrage

Cette décision de principe conduisant à un **choix entre deux conceptions** de l'acquisition des données, dont le coût est très différent, dépend autant de l'importance de l'ouvrage et de sa sensibilité que de l'importance des mouvements. Il faut tout d'abord prendre conscience de la différence qui existe entre la mesure des déplacements absolus liés à l'instabilité des versants et celle des paramètres cycliques comme la vitesse des mouvements et les conditions hydrogéologiques :

- Le **déplacement absolu** d'un point situé sur un versant instable **se produit toujours selon la pente**, donc plus ou moins dans la même direction, de sorte que la mesure du déplacement total entre deux instants donnés intègre linéairement tous les mouvements partiels au cours de cette période. De la sorte, des mesures ponctuelles répétées à intervalles réguliers peuvent toujours être reliées les unes aux autres dans une courbe des déplacements cumulés; les résultats acquis donnent une image correcte de l'évolution du mouvement. Par contre, l'évolution de la vitesse des mouvements, qui est discontinue et cyclique, n'apparaît que de manière atténuée par la dérivée des déplacements partiels; les vitesses moyennes momentanées ne sont donc pas indicatives.
- La **variation d'un niveau piézométrique** se caractérise aussi par des fluctuations parfois brèves et très pointues, de sorte que des mesures ponctuelles à intervalles réguliers trop espacés peuvent donner une image très lissée de l'évolution réelle du niveau phréatique en gommant notamment les niveaux maxima qui sont la cause directe du déclenchement de phases d'accélération. Ces mesures ponctuelles ne sont donc pas significatives.

En conséquence, si l'on veut pouvoir comprendre correctement le comportement d'un glissement sur lequel est fondé un ouvrage sensible, il est indispensable de **prévoir certaines mesures en continu** au moyen de dispositifs d'enregistrement automatiques. En fait, dans la plupart des cas et notamment lorsque l'on utilise des modules d'acquisition de données pilotés par informatique, la mesure n'est pas réellement continue, mais la fréquence choisie de lecture (une par heure, voire une par quart d'heure) permet d'assurer une base de données suffisamment représentative de la fluctuation des paramètres. La mesure est réellement continue lorsque l'on utilise par exemple un tambour à mouvement continu pour reporter un niveau d'eau enregistré par l'intermédiaire d'un flotteur (principe du limnigraphe).

Du point de vue financier, l'équipement permettant la lecture en continu est plus coûteux, mais ce surcoût peut être en partie amorti si la mesure in situ exige des déplacements longs et une mise en oeuvre difficile d'équipements de lecture sur

le site de l'ouvrage. Il faut aussi apprécier, selon les situations et les risques impliqués, si les mesures sont immédiatement nécessaires, ce qui exige une transmission par radio ou modem, ou si les mesures peuvent être stockées dans l'appareil pendant un certain temps, puis exploitées par la suite.

En définitive, dans plusieurs sites de glissements instrumentés, il s'est avéré que le système le plus judicieux était celui consistant à combiner certaines mesures ponctuelles (par exemple des lectures inclinométriques de déplacements en profondeur), effectuées à des fréquences variables selon les mouvements et la signification du paramètre enregistré, et certaines mesures continues (par exemple des niveaux piézométriques ou des pressions interstitielles), enregistrées sur place et dépouillées une fois par mois.

IV Utiliser des moyens d'auscultation faisant appel à diverses techniques ou à divers spécialistes pour recouper les informations obtenues

Ce principe n'est souvent pas respecté, notamment dans la mesure où les responsables de l'auscultation des ouvrages s'intéressent plus à observer les conséquences que les causes du comportement d'une structure. Ainsi en est-il du suivi des mouvements relatifs verticaux d'un pont routier : les résultats enregistrés, qui permettent d'évaluer la qualité de la bande de roulement par l'évolution de son profil en long, sont une conséquence de la modification au cours du temps de plusieurs facteurs concernant tant l'ouvrage et ses matériaux que ses fondations et le sous-sol d'appui. **Le mouvement superficiel seul ne permet pas de comprendre le comportement du système**; tout au plus peut-il servir d'indicateur d'une modification des conditions environnantes; et encore, ces informations peuvent-elles être mal comprises si les culées où sont placés les points de référence du nivellement bougent avec le pont !

Pour comprendre le comportement d'un ouvrage, il faut s'intéresser aux mouvements relatifs et absolus de ses diverses parties, en surface et en profondeur, mais aussi aux variations d'efforts ou de contraintes auxquels il est soumis, aux conditions climatiques et hydrogéologiques, ainsi qu'aux modifications de ses conditions de service. Cela implique plusieurs regards, **plusieurs approches** qui doivent être le fait de **spécialistes d'origines différentes travaillant dans un cadre coordonné**. Par exemple, il peut se produire une dérive accidentelle ou progressive dans un appareil de mesure qui, s'il est seul à être utilisé, pourra laisser penser à tort à une évolution des mouvements. Ou bien le mouvement enregistré d'une tête d'ancrage pourra être dû soit à la détente du tirant par fluage du scellement, soit à son allongement par surcharge, ou encore au fait qu'une zone d'instabilité plus profonde que la zone de scellement s'est réactivée, ou enfin à une erreur de dérive dans l'enregistrement continu du mouvement de la tête.

Il convient donc, pour chaque élément à mesurer, de **prévoir deux systèmes alternatifs** qui permettent de recouper l'information recueillie, d'assurer sa fiabilité ou de tester sa qualité. Il n'est pas nécessaire de mettre en oeuvre tous ces systèmes au même moment, à chaque campagne de lecture. Une alternance et une hiérarchisation éventuelle des procédés utilisés doit être établie lors de la conception du programme d'auscultation.

V Adopter des systèmes d'observation simples, résistants, fiables et faciles d'accès

Au delà de ce principe apparemment simple, il faut distinguer tout d'abord entre la **simplicité d'un appareillage** et la **simplicité d'un concept d'observation** : la première notion n'a d'intérêt que si elle influe sur la fiabilité, le coût et la commodité d'utilisation d'un dispositif; la seconde notion suppose une bonne adéquation de la mesure au but poursuivi; elle est souvent le gage d'un résultat valable.

Si l'on classifie par exemple les moyens d'auscultation (voir chapitre 7) dans cinq grandes catégories liées aux principaux domaines physiques concernés, soit :

- dispositifs mécaniques
- dispositifs hydrauliques
- dispositifs optiques
- dispositifs magnétiques
- dispositifs électriques

on peut s'apercevoir que la simplicité n'est pas forcément l'apanage des appareils entrant dans la première catégorie. **Cet aspect de simplicité** doit être considéré vis-à-vis du capteur, du système de transmission et du dispositif de lecture ou de stockage de l'information. Un système de lecture peut être très simple, comme par exemple un pied à coulisse mesurant l'espacement entre deux chevilles de part et d'autre d'une fissure; mais l'information elle-même, de nature relative, n'est pas toujours représentative de l'évolution d'un phénomène majeur affectant l'ouvrage concerné. Par ailleurs, il est très difficile de déterminer les mouvements absolus d'un grand versant de façon simple : une mesure de distance électronique à partir du versant opposé est en principe une opération simple, mais elle ne donne pas l'orientation du mouvement, ni la composante verticale. La simplicité de l'appareillage et du concept d'observation est souvent un critère à analyser de près afin d'assurer la qualité et la fiabilité des résultats.

La **résistance** des dispositifs d'auscultation est un critère très important par rapport à la durée d'exploitation du système. En effet, il est toujours préférable de pouvoir utiliser un même système sur une période aussi longue que possible afin d'assurer une continuité dans les données; en conséquence, les équipements, tant au niveau des points de référence qu'à celui des appareils, doivent être robustes, résistants aux conditions climatiques, peu sensibles aux chocs mécaniques ou thermiques et parfois aussi capables de résister au vandalisme. Cette capacité doit aussi s'appliquer aux moyens de transmission, comme des fils, et aux moyens de stockage des informations, comme des cassettes ou des cartouches enfichables.

La **fiabilité** est un des aspects fondamentaux de l'auscultation; elle doit être analysée et garantie dans tous les processus de suivi du comportement des ouvrages au cours du temps. Elle concerne tant les équipements (capteurs, transmission, stockage) que le personnel d'exploitation et d'analyse. Ce terme peut être pris ici dans son sens large et inclure plusieurs notions spécifiques : **précision, reproductibilité, garantie de fonctionnement, sécurité d'opération**.

En bref, on peut formuler cette exigence de la façon suivante : lorsque l'on mesure une grandeur (distance, dénivellation, pression, contrainte), **on veut que la mesure soit aussi proche que possible de la réalité**, quelle que soit l'évolution

du phénomène observé, que **deux lectures** immédiatement **successives soient les plus voisines** possibles, que la mesure puisse être **accomplie sans faute** par l'appareil ou la personne impliquée, puis **conservée** dans n'importe quelles conditions environnementales, et que l'ensemble des mesures récupérées au bout de la chaîne d'auscultation puissent être dûment analysées et interprétées. Cette exigence demande beaucoup d'efforts, au niveau de l'organisation, du choix du matériel, de la conception du système, de son exploitation et de l'analyse des résultats. Tous ces aspects forment une chaîne dont la rupture d'un seul maillon enlève toute validité au résultat.

Enfin, il faut que les systèmes d'observation mis en place soient **faciles d'accès**, de façon à ce qu'ils puissent être contrôlés, exploités, entretenus ou réparés, le cas échéant en toutes saisons. S'il faut mettre en oeuvre un vol d'hélicoptère ou une équipe de guides de montagne pour aller faire une lecture mensuelle en un endroit inaccessible ou escarpé, ne permettant pas un confort minimum de travail lors de l'exécution de la mesure, il vaut mieux modifier radicalement la conception du système d'auscultation, car après quelques lectures, les responsables, tranquilisés par les premières valeurs acquises, auront tendance à renoncer à un tel effort.

VI Procéder régulièrement à une analyse temporelle et spatiale du comportement des ouvrages et en particulier de leurs fondations, tant en ce qui concerne les mouvements que les paramètres environnementaux

Les deux derniers principes concernent plus particulièrement l'exploitation des données d'auscultation et leur usage dans l'appréciation de la sécurité des ouvrages fondés en terrains instables.

Pour comprendre le comportement réel d'un ouvrage et vérifier l'adéquation de son évolution avec les hypothèses du projet, il faut procéder à deux types d'analyse :

- **L'analyse temporelle** comprend la détermination de la variation des mouvements ou autres paramètres au cours du temps, ce qui permet de dégager d'abord une tendance moyenne. Ensuite elle inclut l'étude plus détaillée des phases d'accélération et de ralentissement, ainsi que la distribution de ces valeurs extrêmes; cette étape doit notamment inclure l'évolution des données piézométriques, notamment lors des fortes fluctuations. Enfin, elle nécessite la mise en corrélation de ces phases particulières avec les données météorologiques, hydrologiques et hydrogéologiques. Il faut aussi examiner sous cet angle, en fonction de leur mise en oeuvre, l'effet d'éventuels travaux d'assainissement ou de facteurs destabilisants comme des érosions régressives dans le cours d'eau au pied du versant instable.
- **L'analyse spatiale** comprend l'étude de la répartition dans une zone déterminée des diverses données de mouvements, de niveaux piézométriques ou d'efforts enregistrés en divers points du glissement ou au droit des ouvrages de stabilisation. Cette analyse comprend aussi l'examen comparatif des mouvements des diverses parties des fondations et de l'ouvrage, de façon à mettre en évidence leurs relations.

Ces deux types d'analyse doivent conduire à une synthèse illustrant le mécanisme global d'évolution et de propagation des mouvements dans le versant et dans l'ouvrage fondé en terrain instable.

VII Déterminer des modèles d'évolution, sur la base des données complètes de l'auscultation, pour formuler des prédictions et mettre en oeuvre une politique de gestion

Ce dernier principe sort en partie du cadre strict de l'auscultation, mais il en constitue en fait la finalité, dans la mesure où toutes les observations faites au cours du temps ont pour but de savoir jusqu'à quand l'ouvrage envisagé pourra être en service. Il s'agit donc d'établir, sur la base des analyses temporelle et spatiale précédemment citées, un ou des **scénarios prévisionnels de comportement**. Un premier scénario, qualifié de réaliste, devra servir à planifier à long terme la gestion de l'ouvrage, ses réparations éventuelles et/ou la mise en oeuvre, le moment venu, de travaux confortatifs complémentaires. Un second scénario, qualifié de pessimiste, devra guider la réflexion sur les actions à entreprendre en cas d'évolution exceptionnelle : interventions d'urgence, ouvrages de remplacement, solutions alternatives, mise en oeuvre de secours, etc.

Cette étape, qui s'inscrit plutôt dans ce que la protection civile appelle une action de préparation ("preparedness"), concerne en fait aussi les gestionnaires de l'ouvrage et fait partie intégrante de la politique d'auscultation, dans le sens où les systèmes de suivi du comportement de l'ouvrage doivent pouvoir l'accompagner durant toute sa durée de vie.

10. RECOMMANDATIONS SUR LES PROCEDURES

Afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles des travaux d'auscultation, il convient non seulement de faire des mesures correctes et soignées, mais aussi de partir d'un concept d'observation constitué de phases et d'actions spécifiques au cours du temps; cette démarche permet d'aboutir à des méthodes d'exploitation et d'évaluation des résultats qui donnent, à partir des mesures brutes, une image dynamique globale du comportement des ouvrages et permettent ainsi d'en juger l'état de service.

10.1 Stratégies d'auscultation

Paradoxalement, la mise en oeuvre de l'auscultation d'un ouvrage fondé sur des terrains instables commence **avant même la conception du projet** proprement dit. En effet, dans cette première phase, dès que la présence d'une zone de glissement de terrain a été identifiée sur le tracé d'une voie de communication, dont le franchissement pourra nécessiter un ouvrage, il faut commencer par déterminer les **limites des secteurs instables principaux et secondaires**, affectées de mouvements différenciés, et évaluer la profondeur des masses en jeu. La représentation de ces données fait l'objet d'une **carte d'instabilité**, dont les principes ont été établis dans le cadre du projet d'Ecole DUTI sur la Détection et l'Utilisation des Terrains Instables (DUTI, 1985). Il est important de cartographier une zone suffisamment large autour du tracé pour bien relever l'ensemble des mécanismes d'instabilité affectant tout le versant. Des sondages équipés de tubes inclinométriques permettront ultérieurement de confirmer l'ampleur actuelle des mouvements et la profondeur de la tranche active. Ces sondages permettront aussi d'obtenir des informations sur les conditions hydrogéologiques du sous-sol. Il est essentiel dans la planification de cette stratégie de **se donner suffisamment de temps avant l'élaboration proprement dite du projet** pour cette phase de

reconnaissance, car les paramètres de vitesse et de niveau phréatique enregistrés fluctuent dans le temps, principalement en fonction des conditions climatiques. Si cette fluctuation est importante, une mesure en continu de certaines données s'imposera de façon à déceler les moments des changements significatifs et à trouver les causes de ces modifications; cette analyse préalable des causes apporte des éléments de connaissance précieux en ce qui concerne la prédiction du comportement du versant.

Une fois connues les conditions générales du versant et les mécanismes d'instabilité qui s'y développent, il est nécessaire de préciser par des reconnaissances additionnelles les caractéristiques ponctuelles du terrain en relation avec les parties d'ouvrages qui pourront être concernées (fondations des piles de ponts, portails d'entrée du tunnel, zones de scellement de murs ancrés, etc.). Cette deuxième phase, qui s'inscrit **au cours de l'étude détaillée du projet d'ouvrage**, implique d'analyser la relation réciproque entre la zone instable et l'infrastructure projetée. Cette étude comprend d'une part l'effet de l'ouvrage sur la masse instable (charge additionnelle, libération de contrainte, modification des écoulements souterrains, risque de génération de phénomènes d'instabilité secondaires), d'autre part l'effet du glissement sur l'infrastructure (poussées exceptionnelles, déformations imposées, surtensions des ancrages).

Il sera alors mis en évidence les **points sensibles de l'ouvrage** face aux diverses sollicitations et déformations qu'il subit; cette analyse orientera le projeteur sur les parties de l'ouvrage qui devront faire l'objet d'une auscultation de détail. Par ailleurs, dès que l'avant-projet de l'ouvrage sera établi, il faudra concevoir **un système d'auscultation général** coordonné des fondations, des éléments de base et des superstructures, qui permette deux types de suivi de son comportement :

- une **auscultation à court terme**, c'est-à-dire pendant la construction même et jusqu'à la réception de l'ouvrage, de façon à fournir au projeteur des informations sur la conformité entre les comportements modélisé et réel de la structure ("observational method"). Selon cette méthode de projet, l'observation de dysfonctionnements en cours de construction doit permettre une adaptation rapide des structures, dont les dispositions sont prévues d'avance dans le cadre d'une analyse de scénarios; pour ces modifications du projet, il faut aussi prévoir à l'avance les dispositifs d'auscultation complémentaires qui seront nécessaires. Cette adaptation peut aussi inclure des travaux d'assainissement ou de stabilisation des terrains instables de fondation
- une **auscultation à long terme**, qui s'étende sur toute la vie de l'ouvrage et permette de suivre son évolution au cours du temps, d'évaluer la sécurité qu'il offre et de déterminer le moment où des travaux de renforcement ou de réparation vont s'avérer nécessaires. Le système correspondant à cette fonction doit bénéficier d'une fiabilité suffisante; il doit rester accessible même pendant l'opération de l'ouvrage; il doit s'adapter aux mouvements prévisibles des structures et doit pouvoir être modifié selon les besoins de l'exploitation ou en cas de dysfonctionnement.

Il convient de souligner qu'au moment d'établir le devis estimatif de l'ouvrage, les dispositifs d'auscultation peuvent souvent paraître trop chers et d'importance secondaire. Toutefois, au moment où des problèmes surgissent dans le comportement de l'ouvrage et qu'il faut mettre en oeuvre une auscultation complémentaire dans des conditions difficiles, les systèmes incorporés dès le début dans l'ouvrage seront toujours largement meilleur marché.

La troisième phase d'auscultation, **pendant la construction de l'ouvrage**, remplit de multiples fonctions utiles pour garantir au Maître de l'oeuvre un contrôle sur le bon déroulement des opérations. Tout d'abord, elle permet de contrôler l'effet des phases de construction sur la zone instable, en particulier dans le cas où les ouvrages représentent une charge ou une action non négligeable sur le glissement de terrain (remblai, mise en oeuvre d'ancrages). Ces effets doivent être vérifiés tant au droit même de l'application des charges (au droit d'une pile de pont par exemple) que dans les alentours. Les paramètres à contrôler sont en priorité les déplacements relatifs, mais aussi les mouvements absolus, si l'on traverse un grand versant substabilisé, et la modification des pressions interstitielles, en particulier sous les remblais.

Ensuite, l'auscultation en cours de construction assure la mise à disposition **d'informations pour l'adaptation** du projet, comme décrit précédemment. En particulier elle permet de contrôler l'effet immédiat des systèmes de stabilisation, comme les ancrages ou les drainages, ainsi que la mobilisation progressive des effets stabilisants d'un remblai de pied. Lorsque des systèmes constructifs sont mis en oeuvre par étapes, des mesures régulières fournissent des données intéressantes sur l'efficacité des étapes de travaux, dans le temps et dans l'espace.

Enfin, **l'auscultation détaillée et complète de l'ouvrage à la fin de sa construction** permet d'établir son **état de référence à la mise en service** et sert de base quantitative pour la réception définitive des travaux ou la vérification commune. C'est souvent à cette occasion, pour des points importants, que sont pratiqués des essais de charge, au cours desquels la déformation des superstructures est contrôlée pour vérifier sa compatibilité avec les hypothèses du projet. Il est indispensable à cette occasion de vérifier aussi l'effet des charges sur les fondations, de façon à savoir quelle est l'action éventuelle d'une charge extérieure sur les terrains instables où se situent les fondations. L'ensemble des informations recueillies lors de la mise en service, ainsi que les points critiques repérés lors de la construction, serviront de base à l'élaboration d'un programme d'auscultation complet constitué de plusieurs séquences de périodicité variable permettant un suivi minimal, courant et périodique durant la vie de l'ouvrage.

La quatrième et dernière phase à considérer est évidemment la plus longue, puisqu'elle porte sur la **durée de vie de l'ouvrage**. Elle doit par conséquent être organisée de façon stricte, de façon à permettre au Maître de l'oeuvre responsable de l'ouvrage ou à ses mandataires pour cette phase, qui sont souvent différents des projeteurs, d'assurer une surveillance adéquate. Les principes de cette surveillance, pour ce qui concerne les ouvrages de génie civil, sont définis très clairement dans la recommandation SIA N° 160, entrée en vigueur en 1987; toutefois, ce texte ne fait nullement mention de l'instabilité possible des terrains de fondations, si ce n'est par référence à la "qualité du terrain" (art. 4.37).

Il convient donc, dans le cadre traité ici, de poursuivre, parallèlement aux programmes de surveillance continue ou périodique de l'ouvrage proprement dit, l'auscultation des zones instables concernées, pas seulement au droit de l'ouvrage ou sous ses fondations, mais dans tout le versant instable impliqué. En effet, il est fréquent que les dispositions constructives ou de stabilisation adéquates réussissent à arrêter provisoirement le mouvement de glissement dans la zone des fondations de l'ouvrage, mais que les mouvements se poursuivent soit à l'amont, soit à l'aval. De la sorte on peut craindre à long terme des effets sur l'ouvrage par une poussée des masses qui s'accumulent à l'amont ou par une régression d'une niche

d'arrachement secondaire à l'aval (voir exemple du Viaduc de la Praz, fiche 2.1 en annexe).

Les phases de surveillance de l'ouvrage au cours de sa vie ne doivent pas seulement impliquer un chef d'exploitation du Maître d'oeuvre, un géomètre chargé de mesures périodiques ou un géotechnicien spécialiste de relevés des déformations du sous-sol. Il est nécessaires de mettre en place une **cellule multidisciplinaire** pour l'interprétation approfondie des résultats dans laquelle soient inclus un représentant du Maître de l'oeuvre, un représentant du projeteur, un géologue et/ou un géotechnicien et le responsable de l'exécution des mesures topographiques. Ce groupe de personnes doit disposer d'une présentation claire et complète des résultats, y compris la mise en évidence des incertitudes, de façon à pouvoir vérifier le mécanisme de déformation de l'ouvrage et contrôler si les résultats enregistrés témoignent d'un comportement normal ou non des structures et du versant.

En fonction de ces résultats, il pourra être décidé s'il convient de maintenir le rythme de la surveillance continue et de procéder aux examens périodiques quinquennaux ou décennaux ou s'il est nécessaire de modifier le rythme des auscultations, voire de procéder à une **inspection spéciale complète** en cas de situation critique. Cette cellule devra aussi se prononcer sur les travaux d'entretien spécialisé à mettre éventuellement en oeuvre, comme le renforcement des ancrages, car ces actions peuvent avoir un impact sur les dispositifs d'auscultation fixes ou peuvent nécessiter de nouveaux systèmes de contrôle qui tirent parti du développement récent de ces techniques.

En dernier lieu, il convient de disposer, pour les grands ouvrages ou pour ceux situés sur des zones instables critiques ou sensibles, sur le site même ou à proximité, d'**informations météorologiques continues** et complètes auxquelles on puisse confronter les résultats de la surveillance, de façon à mettre en évidence la nature du lien entre climat et mouvements, car cette information est essentielle pour tenter de formuler des prédictions quant au comportement futur de l'ouvrage et à l'adaptation à temps des systèmes d'auscultation, dont la marge de fonctionnement est limitée.

10.2 Procédures d'auscultation

Il ne convient pas dans un rapport traitant de principes d'auscultation de rentrer dans le détail de la mise en oeuvre et de la lecture des appareils de mesure, mais plutôt de relever quelques dispositions particulières dans l'exécution des mesures qui permettent une bonne qualité des résultats.

Tout d'abord, une attention particulière doit être portée sur le **choix des dispositifs** et des instruments de mesure, en fonction d'une part des données que l'on veut observer, d'autre part de l'accessibilité des points de mesure pendant la construction et l'exploitation de l'ouvrage et enfin en fonction de la durée prévue de ces observations. Il est en effet vital de concevoir toutes les opérations d'auscultation dans une **large perspective de temps**, c'est-à-dire de s'assurer que les mesures prévues sur des points déterminés pourront être effectuées aussi bien à la fin de la construction que dans cinquante ans. Cela implique notamment :

- une qualité très soignée dans la constitution des points de mesure,
- une possibilité de remplacer les pièces d'accouplage qui s'usent,

- une accessibilité garantie en tout temps aux lieux où se fait la mesure,
- des mesures de protection par rapport aux infiltrations d'eau ou aux encroûtements calcaires sur les points de mesure. Si certaines de ces exigences ne peuvent être satisfaites, il faut soit prévoir des dispositifs de mesure permanents avec télétransmission des données, soit des systèmes complémentaires plus facilement mis en oeuvre pour la surveillance continue, dont les données puissent momentanément remplacer les mesures principales concernées.

Cette perspective amène à traiter de la **redondance dans les mesures**, c'est-à-dire de la nécessité d'avoir des observations différentes sur deux dispositifs dont les résultats puissent se confirmer les uns par rapport aux autres. Cette exigence implique d'une part des mesures parallèles de deux distances, mais avec des dispositifs de nature différente pour éviter les erreurs intrinsèques aux appareils de mesure, d'autre part des mesures complémentaires de deux paramètres distincts (distance et force par exemple), de façon à éviter une erreur conceptuelle dans la mise en oeuvre d'un système d'auscultation. Enfin, l'ensemble des mesures doit fournir une vision globale du comportement de l'ouvrage depuis le début de sa vie et ne pas privilégier l'importance des lectures différentielles, qui peuvent soudain paraître alarmantes, mais qui sont finalement influencées par des facteurs cycliques comme les conditions de température.

Si des appareils sophistiqués sont installés, permettant par exemple une mesure continue, il est essentiel de pouvoir recouper de temps en temps leurs résultats par un système simple et fiable, de façon à évaluer la dérive, par exemple électronique, des systèmes de base. Ce problème conduit à aborder d'une façon générale la nécessité de la **calibration des instruments** ou des systèmes de mesure. Pour certains appareils, la calibration se fait de façon régulière, soit dans le cadre de la mise en oeuvre, soit comme première étape du mode opératoire. Dans d'autres systèmes, la répétition régulière de lectures de référence d'une distance fixe ou d'un angle qui ne doit en principe pas varier peut servir de calibration indirecte, mais ne remplit pas toutes les exigences de constance des paramètres environnementaux, comme une véritable calibration en laboratoire. Dans certains équipements comme les théodolites, des lectures directes et inverses permettent de compenser des erreurs internes systématiques. Enfin dans certains systèmes complexes, comme les réseaux de triangulation, la mesure de points fixes et la surdétermination des réseaux permettent de corriger des erreurs ou plutôt de les compenser d'une façon globale la plus adéquate possible.

Il est clair qu'une **valeur mesurée n'est que l'approximation de la valeur réelle**, toujours inconnue sensu stricto, mais estimée par une ou plusieurs mesures. La répétition d'une mesure de distance à un instant donné met en évidence l'incertitude sur la mesure réelle de cette distance; une distance calculée dans le cadre de l'exploitation d'un système d'observation implique une **incertitude** liée non seulement à l'appareil de mesure et à l'observateur, mais aussi à la performance et à l'adéquation du système; enfin, la comparaison entre une distance calculée à un moment donné, puis à un autre, met en jeu la modification des conditions environnementales, qui affectent non seulement la valeur réelle que l'on cherche, mais l'instrumentation et peut être l'observateur. Bref, il convient dans tout programme d'auscultation de gérer au mieux l'ensemble des incertitudes, non seulement en évaluant leur valeur moyenne et en la minimisant par des procédures de contrôle, mais encore en tenant compte de leur variation spatiale (par une ellipse d'erreur par exemple) et de leur distribution statistique (écart-type, fonction de distribution, asymétrie).

La prise en compte de ces incertitudes doit être particulièrement détaillée lorsque l'on compare la valeur moyenne mesurée, après compensation, à une valeur de référence qui sert de seuil pour la mise en route d'une alarme ou d'un plan d'alerte. Il est indispensable, face aux risques d'erreur dont les conséquences sont considérables pour les usagers, de vérifier par des moyens complémentaires de nature différente une mesure qui conduirait à un seuil critique. En effet, une alarme inappropriée est presque aussi grave qu'une alerte non-déclenchée en cas de situation dangereuse, car elle incite les usagers à ne plus croire en des systèmes de sécurité. D'autre part, il est présomptueux de vouloir annoncer une situation dangereuse sur la base d'une seule valeur critique : c'est la tendance d'évolution d'un ensemble de paramètres qui doit être le facteur déterminant, une fois que l'on a pris en compte de façon détaillée les incertitudes affectant toutes les mesures.

On peut citer un dernier point à inclure dans les procédures d'auscultation, bien qu'il intervienne en fait après les mesures proprement dites. Il s'agit de **l'entretien des appareils de mesure** dans les périodes comprises entre les campagnes d'observation. Il faut veiller à ce que les appareils ne se détériorent en aucune façon, suite aux conditions atmosphériques du local de conservation, à des chocs éventuels, à des usages intempestifs par des personnes différentes de celles qui font d'habitude les mesures. Il est bien évidemment nécessaire de procéder à une calibration lors du retour au laboratoire ou au bureau et lors du prochain départ pour faire des mesures, mais ces calibrations ne garantissent pas totalement le parfait état de conservation de l'appareil.

Il faut surtout essayer de **confier un appareil à un utilisateur unique** qui saura s'en servir de façon identique. Lorsqu'un appareil semble ne plus donner entière satisfaction, et si possible avant le moment de la panne irrémédiable, il faudra prévoir son remplacement et garantir une période de contrôle croisé avec l'ancien et le nouvel appareil de façon à assurer une transition dans des conditions optimales lorsqu'il s'avérera indispensable de remplacer l'ancien système de mesure.

Souvent, dans les manuels d'instruction des appareils, quelques conseils du genre de ceux formulés ici sont donnés, mais il concernent plus spécifiquement les points sensibles de l'appareil lui-même, alors qu'il convient d'adopter la même rigueur dans le suivi, l'exploitation et l'entretien du système entier d'auscultation. L'essentiel est de **ne jamais croire à une seule mesure**, de ne jamais mépriser aucune valeur apparemment erronée et d'adapter assez rapidement la fréquence d'observation lorsque l'on note des comportements sortant de l'ordinaire. Il est toujours préférable de revenir à un rythme d'auscultation normal après une fausse alerte que de manquer le développement d'un épisode paroxysmique, suite à la non prise en compte d'une tendance apparemment anormale.

10.3 Procédures d'exploitation

Il ne suffit pas d'accumuler des données d'observation chiffrées dans des classeurs pour faire de l'auscultation, encore faut-il procéder à leur exploitation rationnelle et intelligente pour en tirer les éléments d'information nécessaires à l'évaluation correcte des ouvrages concernés. Cette exploitation tient principalement en trois règles, qui se résument par trois verbes : **vérifier, représenter, analyser**.

Dans un premier temps, chaque donnée quantitative recueillie doit être **validée** avant d'être introduite dans un fichier définitif. Cette validation, à l'ère de l'informatique, de la transmission automatique et du traitement instantané des données, paraît superflue dans la mesure où la lecture faite par un appareil sur le terrain peut être transmise sans erreur de copie dans un fichier. Il existe en fait toujours des possibilités, certes faibles, d'erreurs de lecture, de saisie, de transfert; à partir de la première lecture brute d'une donnée, l'opérateur doit être attentif à sa fiabilité. Les procédures de saisie (lecture directe et inverse, répétition des lectures, soin dans les opérations de mesure, sélection de modes de lecture et d'enregistrement les plus fiables, contrôles de dispersion, recherche d'omission, vérification du nombre total de mesures par passage d'une sonde, etc.) permettent de traquer une grande partie des erreurs occasionnelles et systématiques.

Néanmoins, il faut s'astreindre à un **contrôle rigoureux des chiffres introduits** dans un fichier de données, soit en vérifiant la compatibilité apparente des données d'une série avec la série précédente, soit en comparant certaines mesures avec les mesures de points voisins ou dont le comportement est généralement similaire. Ce contrôle ne veut pas dire que l'on va corriger automatiquement toute valeur un peu suspecte, car c'est justement la recherche de valeurs surprenantes qui est la finalité première de l'auscultation ! Cela signifie que si une valeur est manifestement erronée ou manque, elle sera identifiée comme telle, remplacée immédiatement par une nouvelle lecture si cela est possible ou laissée en attente d'une nouvelle série de mesures. Cet examen de validation a donc essentiellement pour but de spécifier la qualité des données introduites dans un fichier et de faire tout ce qui est possible pour que les résultats qui en seront tirés ultérieurement soient les plus fiables.

Dans un deuxième temps, les données quantitatives sous forme de chiffres, peu digérables par celui qui doit évaluer les données d'auscultation, seront **représentées** dans les graphiques clairs, aisément interprétables. D'une manière générale, dans les données graphiques apparaîtra le temps en abscisse et la ou les caractéristiques considérées en ordonnée. Il est préférable d'adopter une échelle arithmétique pour le temps, de façon à voir, sur le graphique, des pentes de courbes en vraie grandeur qui, dans le cas des déplacements, représentent les vitesses; une échelle logarithmique, dont l'avantage est de figurer l'évolution d'un paramètre sur une plus grande période, n'est pas favorable pour l'interprétation des mesures, sauf en cas de crise après une longue période de calme. Dans la mesure du possible, on mettra des dates en abscisse, plutôt qu'un nombre de jours dont la signification au-delà de 400 jours est peu aisée à saisir.

Il est opportun de représenter sur un même graphique l'évolution de deux ou trois paramètres corrélés, de façon à mettre immédiatement en évidence cette corrélation. D'un autre côté, le fait de représenter trop de caractéristiques voisines sur un même dessin n'est pas favorable, car si les graphes s'enchevêtrent, leur lecture devient impossible.

Il faut éviter en dernier lieu d'abuser des diagrammes sous forme de barres donnant en perspective des valeurs moyennes temporelles, sauf s'il s'agit de valeurs quantitatives sommées, car la lecture de tels diagrammes est moins aisée que les graphiques à deux dimensions. Ce type de représentation a un but illustratif, mais ne remplace pas un diagramme linéaire si l'on veut relever des valeurs intermédiaires.

En dernier lieu, les données d'auscultation brutes représentées dans des diagrammes en fonction du temps feront l'objet d'une **analyse** préalable, afin de détecter si leur évolution est normale, par exemple en relation avec les cycles saisonniers, ou s'il se manifeste une tendance inattendue. Le cas échéant, les mesures doivent être rapidement répétées, voire doublées, pour ne pas risquer de perdre l'enregistrement d'un phénomène évolutif exceptionnel.

En parallèle, on peut représenter les fonctions de double cumul de deux paramètres qui sont normalement corrélés, afin de diagnostiquer s'il s'agit d'une modification générale de tendance ou d'une légère dispersion momentanée des valeurs autour d'une tendance centrale bien dessinée. Pour faciliter ce type de prétraitement des données, il est bien sûr préférable que les lectures correspondantes soient faites en même temps et non avec plusieurs jours ou semaines de décalage, car cela ne permet plus de voir se dessiner un seuil d'évolution à une date précise, dont il est possible de reconstituer après coup les circonstances. Tous ces travaux de traitement préalable des données, dans le cadre de leur exploitation, conduisent enfin à la dernière phase d'évaluation du comportement du phénomène d'instabilité, en relation avec celui de l'ouvrage qui est influencé par l'évolution de ce mécanisme.

10.4 Procédures d'évaluation

Dans le but de disposer d'un outil permettant d'apprécier correctement le comportement d'un ouvrage au cours du temps, en fonction de l'évolution des conditions de fondation qui sont affectées par l'instabilité du sol, il convient de concevoir un **modèle dynamique** de l'ouvrage et du terrain sur lequel il est fondé. De nombreux types de modélisations peuvent être envisagés : soit ils mettent en évidence une corrélation simple ou multiple entre la variation d'une caractéristique de l'ouvrage et un ou plusieurs paramètres déterminant le comportement du glissement. Soit ils intègrent, dans une analyse sophistiquée, la relation dynamique entre le sol et la structure, en tenant compte de lois de comportement de matériaux évoluées, de phénomènes de déformation différée ou de fluage, et en incorporant au modèle de nombreux paramètres d'auscultation.

Dans la plupart des cas, le modèle est simple, soit à défaut de moyens mis en oeuvre pour cette analyse, soit parce que l'insuffisance dans les données d'auscultation est telle qu'elle ne peut permettre de modéliser correctement un phénomène d'interaction toujours assez complexe. Cette simplicité, a priori non critiquable si le mécanisme est bien compris et si les données prises en compte sont significatives et univoques, peut toutefois conduire à des erreurs graves d'interprétation, dans la mesure où un modèle simple ne garantit pas toujours les recoupements et les contrôles nécessaires. Un exemple typique est celui du suivi d'un tablier de pont par nivellement; si le responsable de l'auscultation ne se rend pas compte qu'une culée, qu'il croyait stable, est en fait en mouvement, il va interpréter les tassements de façon erronée ou corriger des valeurs variables au cours du temps dans un processus de compensation qui ne tiendra pas compte d'un phénomène d'instabilité non perçu.

Il convient donc d'introduire dans le modèle les principaux paramètres dont l'évolution est significative, en particulier les données de mouvement du glissement, plutôt en profondeur qu'en surface, car les phénomènes de reptation superficielle ou de solifluxion peuvent induire en erreur. D'autre part, il est essentiel d'inclure des données significatives de niveaux piézométriques, dont l'évolution peut

conduire à des modifications de comportement importantes. Enfin, dans le modèle lui-même ou en parallèle, il convient de prendre en compte les conditions climatiques, dans la mesure où elles peuvent manifester leurs effets avec un certain déphasage qui pourra être mis à profit dans une politique de prévention active.

On arrive à ce point de l'étude à boucler la boucle, c'est-à-dire que les possibilités du modèle d'évaluation et le fonctionnement de sa gestion vont parfois déterminer certaines grandeurs qu'il conviendra d'ausculter dans le cadre de la construction et du suivi de l'ouvrage, de façon à disposer de paramètres significatifs dans l'optique de son évolution. Par exemple, si l'on simule le comportement global d'un mur de soutènement, il faudra non seulement obtenir des données de déplacement de son couronnement et de rotation de son parement, mais observer aussi son glissement sur sa base, de façon à pouvoir déterminer le déplacement partiel propre à chaque mécanisme. Ce n'est qu'avec ces données qu'il sera possible d'évaluer la sécurité réelle du mur, au delà des facteurs de sécurité partiels.

11. EVALUATION GENERALE DE L'ETAT DES OUVRAGES

11.1 Evolution probable des ouvrages routiers et de leurs fondations

Comme cela a été exprimé en réponse à la question 4 traitée dans le chapitre 6 ci-avant, il n'apparaît pas ou pratiquement pas possible d'émettre des pronostics fiables sur le comportement à long terme d'un ouvrage routier particulier fondé en terrain instable, à moins que le glissement concerné ait été stabilisé par des travaux offrant une garantie suffisante de pérennité. En effet, il se manifeste souvent des phases d'accélération occasionnelles dans les zones instables, qu'il est difficile de maîtriser si des travaux de stabilisation bien conçus n'ont pas été réalisés à temps. Le cas du glissement de Falli Hölli, qui s'est réactivé en 1994, est typique, même si l'ampleur de son mouvement a été exceptionnelle : quelques vingt ans auparavant, bien que l'instabilité du versant ait été identifiée, son activité avait paru négligeable, de sorte que des investissements pour une valeur de plus de 10 mio de Fr. avaient été réalisés, y compris une route traversant la zone active.

Toutefois, si l'on passe d'un regard particulier à une vision générale du comportement des ouvrages routiers dans leur ensemble, plutôt de ceux fondés en terrains instables, en se basant notamment sur le petit échantillon pris en compte dans le présent rapport, il s'avère que **la plupart d'entre eux assurent leur fonction** de franchissement ou de soutènement **dans de bonnes conditions**. Il est extrêmement rare qu'un ouvrage ne garantisse plus des conditions de service acceptables et dans les quelques rares cas dont on a pu avoir connaissance, la cause était soit accidentelle, sous l'effet d'un événement de force majeure (par exemple pont de l'autoroute N2 sur la rampe nord du Gotthard dont la fondation d'une pile a été affouillée par la crue d'août 1987), soit liée à des phénomènes de corrosion des armatures, suite au salage de la chaussée. Le seul cas que l'on peut juger comme critique est le pont de Polmengo (voir fiche 2.4 en annexe) dont la culée est de plus en plus poussée par le glissement du versant, avec des phases de recrudescence importante des mouvements; malgré les travaux de réparation de 1992, il n'est pas certain que l'ouvrage résiste encore pendant des années.

En ce qui concerne les ouvrages routiers fondés sur des glissements actifs, les dispositifs de contrôle des mouvements, les systèmes de stabilisation et les travaux d'entretien et d'adaptation des structures et des fondations permettent de

formuler un pronostic général assez encourageant. Ce pronostic tient évidemment compte tant des spécificités des mouvements de versant et des conditions climatiques plutôt favorables (par rapport à d'autres pays où les ruines d'ouvrages sont fréquentes), que de la qualité des projets et de l'auscultation soignée des cas sensibles.

Afin de garantir à l'avenir des ouvrages routiers durables et fonctionnels en dépit de la présence de zones d'instabilité au droit de leurs fondations, il conviendra de suivre les recommandations formulées ici et de respecter notamment les principes généraux d'auscultation énumérés au chapitre 9; ceci concerne tout particulièrement le premier principe visant à identifier assez tôt les caractéristiques des terrains instables traversés.

11.2 Stratégie d'entretien et travaux confortatifs

La recommandation SIA N° 169 fixe les principes et l'organisation de la maintenance des ouvrages, qui comprend la surveillance, l'entretien (courant et spécialisé) et le renouvellement, par renforcement ou remplacement. Même si ce texte n'approfondit pas le traitement des situations liées à la présence de terrains instables, il détaille les éléments d'ouvrages et les équipements qui doivent être contrôlés systématiquement; il précise aussi la façon de réagir en cas de constatation de dégradations importantes des structures.

En fait, l'important dans la planification à long terme des travaux d'entretien et confortatifs est de ne pas se faire surprendre par une situation non prévue, non analysée et pour laquelle un principe de solution ne peut être développé, faute de données précises (notamment en ce qui concerne les mouvements du sous-sol et leur évolution). La seule voie qu'il convient de suivre est d'assurer un bon entretien courant des ouvrages, à intervalles réguliers, et un suivi attentif des résultats de l'auscultation, de façon à détecter assez à l'avance l'occurrence de mouvements sortant de l'ordinaire.

Pour la mise en oeuvre des travaux confortatifs, il convient de distinguer deux cas :

- soit il s'agit du renforcement de travaux déjà réalisés auparavant;
- soit il faut réaliser une confortation nouvelle, en général une fois que des mouvements se sont déjà manifestés, au-delà d'un seuil critique ou au contraire de façon totalement inattendue.

Dans le cas d'un renforcement d'ouvrages de stabilisation existants (ancrages ou drainages), le mécanisme du glissement et ses caractéristiques sont déjà assez bien connus, grâce à des reconnaissances préalables et à des données recueillies lors de la première phase de travaux, de sorte que la solution de confortation peut être définie de façon assez rapide. Il faut prévoir dès le départ les espaces nécessaires et les dispositions constructives adéquates pour permettre la mise en oeuvre de tirants ou de drains supplémentaires. Plus ces travaux peuvent être mis en oeuvre à temps, plus il est possible d'adapter le projet aux nécessités et au comportement des ouvrages (« observational method »).

Dans le second cas, où une confortation doit être conçue dans des délais très brefs et dans un contexte mal défini (puisque l'ampleur des mouvements ou le mécanisme qui s'est développé n'avaient pas été envisagés), il faut adopter d'emblée une solution flexible, au sens propre comme au sens figuré, permettant des adapta-

tions du projet en cours de réalisation (comme l'espacement des drains). La réalisation des travaux doit pouvoir se faire par étapes indépendantes, de façon à ne pas retarder l'exécution des différents secteurs de la confortation et à pouvoir évaluer l'efficacité d'une première tranche de travaux. Il convient de combiner divers systèmes (drainages, ancrages, pieux, remblais) pour rendre la solution la plus performante possible en dépit des mouvements actifs qui peuvent se présenter pendant les travaux.

En définitive, on ne pourra s'assurer que la confortation est effectivement utile que lorsque l'on prouvera, au moyen de dispositifs d'auscultation simples, mais à exploiter fréquemment, que les mouvements se sont ralentis suite aux travaux effectués (et non pour des raisons climatiques). Dans ce sens, il n'est pas suffisant de ne mesurer que des déplacements de surface pour prouver la stabilisation; il faut mettre en oeuvre des moyens complémentaires (pour enregistrer les mouvements en profondeur, la piézométrie, les conditions climatiques). Enfin, une fois les travaux de confortation ou d'assainissement achevés, il est nécessaire de poursuivre assez longtemps une auscultation complète pour confirmer la stabilité retrouvée du versant ou déterminer l'ordre de grandeur des mouvements résiduels et les conditions hydrogéologiques. Ces données fourniront les bases nécessaires à une modélisation révisée du comportement du glissement et de la structure qui y prend appui.

11.3 Répartition des tâches d'auscultation

Si les tâches du concepteur d'un projet sont parfaitement définies dans la norme SIA N° 103, à tous les stades de son exécution, les tâches d'auscultation, telles qu'elles ont été décrites au chapitre 10.1, ne bénéficient pas de directives claires, fixant les responsabilités des différents intervenants. Or, de la conception de l'ouvrage à l'achèvement de sa durée de vie, les intervenants sont nombreux et ils assument tous une partie des travaux d'auscultation, d'une façon pas toujours coordonnée.

Ainsi, le projeteur de l'ouvrage, soit en général le bureau d'ingénieurs, établit le concept général de la structure, puis en dresse l'avant-projet détaillé et les plans d'exécution. A cet égard, il doit se préoccuper d'auscultation, d'abord pour connaître le comportement du versant où sera fondé l'ouvrage, puis pour incorporer à son projet les dispositifs de surveillance et d'auscultation qui permettront de surveiller son bon fonctionnement et de veiller à ce qu'il réponde aux conditions posées.

Pour établir les bases géologiques et géotechniques du projet, le géologue et/ou le géotechnicien procèdent à l'auscultation du versant avant, puis pendant l'exécution des ouvrages. Les informations qu'ils recueillent doivent être transmises au Maître de l'ouvrage et au projeteur. Mais parfois les données d'auscultation préliminaire ne sont pas suffisamment prises en compte au stade du projet ou les mesures ne sont pas poursuivies lorsque l'exécution des ouvrages l'empêche.

Au moment de la mise en service de l'ouvrage, des observations sont faites par le projeteur et par le Maître de l'ouvrage, dans le cadre de la vérification commune (voir norme SIA N° 118). Si l'ouvrage a un comportement satisfaisant, le projeteur est alors déchargé de sa responsabilité d'auscultation, sauf éventuellement lors des inspections dans le cadre de la surveillance périodique.

En ce qui concerne les mesures courantes en vue de la surveillance continue, le Maître de l'ouvrage les effectue lui-même, par l'intermédiaire des employés du Service des Ponts et Chaussées, par exemple; ou bien il charge un géomètre et/ou un bureau de géotechnique de l'exécution des mesures requises, ainsi que de leur analyse (mesures topographiques, inclinométriques, piézométriques). De telles observations doivent être faites en particulier lors des travaux de surveillance périodique.

Enfin, le Maître de l'ouvrage, soit en général l'administration concernée, doit conserver tous les résultats de mesures effectuées dans le cadre de l'auscultation, de façon à pouvoir contrôler le bon comportement de l'ouvrage à long terme. Or cette tâche d'interprétation des résultats de mesures est à la fois délicate et essentielle; la structure la plus adéquate pour la mener à chef est une cellule multidisciplinaire, comprenant le Maître de l'ouvrage, l'ingénieur projeteur, le géomètre chargé des mesures de surface, le géotechnicien chargé des mesures en profondeur, un responsable du service d'entretien des routes et, le cas échéant, surtout si des problèmes surgissent, un expert neutre, qui puisse jeter sur le comportement de l'ouvrage un regard neuf et objectif. C'est ce genre de travail en commun et de partage de responsabilités qui s'effectue dans le canton de Neuchâtel, en ce qui concerne les ouvrages délicats, et qui semble donner toute satisfaction.

Il faut en tout cas clairement définir la responsabilité des sous-traitants qui font certaines mesures et établir une démarche transparente en vue de l'interprétation des résultats, de façon que le Maître de l'ouvrage sache précisément quelle est la marge de sécurité des structures et des fondations et à quel moment il doit prendre l'initiative d'inspections spéciales ou de travaux d'entretien.

En définitive, c'est **au Maître de l'ouvrage** de veiller à la mise en oeuvre régulière et coordonnée de **la surveillance continue** des ouvrages fondés en terrains instables; c'est aussi sous sa direction que la cellule multidisciplinaire d'évaluation des résultats de l'auscultation devra être réunie, de façon à interpréter les données de mesure de façon approfondie et à formuler les recommandations pour d'éventuels travaux de stabilisation ou de réfection.

12. CONCLUSIONS

L'examen des résultats de campagnes d'auscultation sur 17 ouvrages routiers fondés en terrains instables en Suisse et en France, a démontré que la grande majorité d'entre eux se comportent bien à long terme. Dans trois cas seulement, des travaux de stabilisation, par ancrage et drainage, ou de confortation, ont dû être effectués; dans un seul de ces cas, les perspectives de conservation à long terme paraissent critiques, au vu de l'évolution récente des mouvements. Par ailleurs, la détection précoce des phénomènes d'instabilité ou la prise en compte attentive des risques de glissements potentiels a conduit à projeter des structures bien adaptées aux conditions naturelles.

Sur la base des expériences tirées de l'auscultation de ces ouvrages, ainsi que d'autres sites, des principes généraux d'auscultation adaptés à des structures en terrains instables ont été formulés. D'autre part, des recommandations sont proposées dans le but d'améliorer les procédures d'auscultation, d'exploitation et d'évaluation des données de mesure actuellement mises en oeuvre, afin de développer une stratégie globale de surveillance des ouvrages. Plusieurs exemples où une

telle stratégie n'a pas été mise en oeuvre révèlent des lacunes dans le suivi du comportement des ouvrages, ainsi que le besoin d'une plus grande collaboration interdisciplinaire, afin d'arriver à une interprétation régulière des résultats de mesure par les spécialistes concernés.

Certes, des progrès notables ont été observés ces dernières années dans le développement des équipements d'auscultation, mais les programmes d'auscultation ont tendance à s'amoinrir au cours des années, peut-être en relation avec le bon comportement apparent des ouvrages analysés.

Il apparaît en conséquence comme une nécessité, en vue d'assurer une maintenance adéquate des ouvrages routiers fondés en terrains instables, et de garantir leur sécurité, de poursuivre régulièrement les campagnes d'auscultation dans une perspective spatio-temporelle assez large. Seule une bonne compréhension du comportement à long terme de ces ouvrages, garantie par une rigueur dans l'exécution des mesures et par un travail d'analyse pluridisciplinaire des données d'auscultation, permettra de déterminer le mécanisme des phénomènes d'instabilité qui les affectent; il sera alors possible d'élaborer, suffisamment à l'avance, des projets de confortation rationnels, si cela s'avère nécessaire.

ANNEXES

ANNEXE 1 - REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Andrey, D., 1987. Maintenance des ouvrages d'art : stratégie de surveillance et d'entretien. Route et trafic 3/87, 137-144

Bader, S., 1994. Klimaszenarien in NFP 31. Bulletin d'information No 6 du PNR 31, Fonds Nat. Suisse de la Recherche Scientifique

Bersier, A., Blanc, P., Weidmann, M., 1975. Le glissement de la Cornalle-les-Luges (Epesses, Vaud, Suisse). Bull. Soc. vaud. Sc. nat., 72, 165-191

Bonnard, Ch., 1992. Phénomènes d'instabilité de terrain en Suisse. PNR 31, Changements climatiques et catastrophes naturelles, Fonds Nat. Suisse de la Recherche Scientifique

Bonnard, Ch., Despond, J.-M., 1988. Principes d'auscultation des ouvrages routiers soumis à des instabilités de terrain. Publ. Soc. suisse de méc. des sols et des roches, 118, 23-32

Bonnard, Ch., Noverraz, F., 1990. Technical note on the visit of La Frasse Landslide. Proc. Vth. Int. Symp. on Landslides, Lausanne, Vol. 3, 1549-1554, Balkema Publ.

Bonnard, Ch., Noverraz, F., Lateltin, O., Raetzo, H., 1995. Large landslides and possibilities of sudden reactivation. Felsbau 6/95, 401-407

Dunnicliff, J., 1988. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. Wiley, New York

DUTI, 1985. Rapport final du projet d'Ecole Détection et utilisation des terrains instables. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Favre, R., Andrey, D., Suter, R., 1987. Maintenance des ouvrages d'art, méthodologie de surveillance. Publ. IBAP No 122, (thèse EPFL No 679), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Hanna, T.H., 1985. Field instrumentation in geotechnical engineering. Publ. Trans. Tech. Publications, series on rock and soil mechanics

Hussain, M., 1983. Gestion de l'entretien des routes cantonales neuchâteloises et de la route nationale 5. Route et trafic 9/83, 280-292

Institution of Civil Engineers, 1990. Geotechnical instrumentations in practice. Thomas Telford, London

ITELOS, 1994. Télésurveillance des ouvrages d'art et des sites. Projet National ITELOS, sous la présidence de F. Parfait, Ed. Kirk, Maisons-Alfort, 442 p.

Norme SIA N° 103, 1984. Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils. Soc. suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich

Norme SIA N° 118, 1991. Conditions générales pour l'exécution des travaux de construction. Soc. suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich

Norme SIA N° 160, édition juin 1989. Actions sur les structures porteuses. Soc. suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich

Norme SIA N° 169 (recommandation), édition 1987. Maintenance des ouvrages de génie civil. Soc. suisse des Ingénieurs et Architectes, Zürich

Noverraz, F., Bonnard, Ch., 1990. Mapping methodology of landslides and rockfalls in Switzerland. VIth Int. Conf. and Field Workshop on Landslides, Milan, 43-53

Rey, E., 1979. Le comportement en service des ponts dans les Alpes suisses. Route et trafic 9/79, 338-343

Rieder, U., Ischi, H., 1988. Untersuchungen und Sanierung instabiler Hänge. Route et trafic 7/88, 436-440

Voir aussi références à la fin des fiches 2.1 à 2.8 et rapports OFR précédant cette étude (citées en page 1 du rapport).

ANNEXE 2 - FICHES DESCRIPTIVES

ANNEXES 2.1.1 - 2.1.3	VIADUC DE LA PRAZ
ANNEXES 2.2.1 - 2.2.3	VIADUC SUR LA SORGE A VALANGIN
ANNEXES 2.3.1 - 2.3.3	PONT DU GANTER
ANNEXES 2.4.1 - 2.4.8	PONT DE PARDOREIA A POLMENGO
ANNEXES 2.5.1 - 2.5.3	PAROIS DE PIEUX ANCRÉS DE NEUENHOF
ANNEXES 2.6.1 - 2.6.5	PAROI ANCREE DE GSTIPF
ANNEXES 2.7.1 - 2.7.2	MUR DE SOUTÈNEMENT ANCRE DE BROU
ANNEXES 2.8.1 - 2.8.4	MURS ANCRÉS DU SECTEUR SYLANS-NEYROLLES

I IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

Nom		Viaduc de La Praz
Lieu	endroit	au-dessous de Ballaigues, près de Vallorbe
	canton	VD
	n° RC/RN	N9B, section 963
	Coord. féd.	521.950/175.550
	km	2.676 - 3.054
Maître de l'ouvrage		Département des Travaux Publics, de l'Aménagement et des Transports du Canton de Vaud, Service des routes et autoroutes
Intervenants	Projet général	Realini + Bader & Associés, Epalinges; Carroz & Küng, Lausanne
	Géotechnique	CSD, Le Mont-sur-Lausanne
	Géologie	Bureau J. Norbert, Lausanne
	Auscultation	CSD, Le Mont-sur-Lausanne et Service des routes et autoroutes
Chronologie	Période d'études	1979 - 1981
	Période de construction	1981 - 1984
	Période d'auscultation	1979 - 1994

II DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Type	Tablier	Caisson unique en béton précontraint présentant une légère courbure en plan
	Piles	8 piles de section rectangulaire évidée en béton armé, supportant des dispositifs d'appui déformables permettant un mouvement relatif horizontal et vertical entre les piles et le tablier. Un système de levage permet des ajustements occasionnels de ces appuis.
	Culées	Structures en béton armé en L fondées sur le rocher, de part et d'autre de la Combe de La Praz
	Fondations	5 piles sont fondées sur radiers en rocher ou en terrain meuble stable, alors que les trois piles centrales sont fondées sur des radiers à faible profondeur posés directement sur une masse en glissement lent; ce sont surtout les piles 4 et 5 qui se déplacent avec le glissement.
	Drainage	Un rideau de forages drainants évacuant l'eau dans le rocher sous-jacent a été réalisé à l'amont immédiat du pont, avec un espacement minimum entre drains de 2 m.

Géométrie	Longueur totale du pont	378 m
	Nombre de portées	9
	Longueur des portées	37 m - 40 m - 28 m - 68 m - 48 m - 48 m - 40 m - 40 m - 29 m
	Hauteur maximale des piles	25 m
	Mode de construction du viaduc	poussage
	Ajustement des appuis	Depuis la construction, un relevage des appuis a déjà eu lieu pour adapter leur position aux mouvements enregistrés

III INSTABILITES

Conditions géologiques/géotechniques	La combe franchie par le pont est partiellement comblée de matériaux meubles d'origine glaciaire (moraines et dépôts glacio-lacustres) en glissement lent. Le substratum rocheux est formé de calcaires et de marnes du Valanginien, Purbeckien et Portlandien. Cette dernière formation, perméable, absorbe l'eau des drains verticaux. Le glissement se produit au toit de la couche des matériaux glacio-lacustres où l'on trouve des niveaux d'eau en charge dans les intercalations sableuses.	
Type d'instabilité	Glissement translationnel peu actif dans sa partie supérieure, plus actif dans sa partie basse, où la masse glissée converge dans l'entonnoir créé par la combe. Au droit du pont, la masse glissée atteint 20 m de profondeur.	
Parties de l'ouvrage concernées	Piles 4 et 5 en mouvement (la pile 3, fondée sur une masse en glissement stabilisée, ne bouge pratiquement pas). Sous l'effet du mouvement, les deux piles principales se déplacent alors que le tablier reste fixe.	
Dommmages observés	non	L'ouvrage se comporte très bien, malgré l'accélération des mouvements observés entre 1981 et 1983, car l'adaptation des piles et des appuis aux mouvements s'opère bien. Le réseau de drainage très dense effectué en 1984 permet de réduire les niveaux phréatiques au droit des fondations du pont.

IV DISPOSITIF DE CONTROLE ET PROGRAMME DES MESURES

Mesures effectuées	Topographie	La section topographique du Service des routes et autoroutes effectuée sur les trois piles mobiles des mesures de nivellement, de déplacement horizontal (flèche par rapport à l'axe reliant les culées) et d'inclinaison transversale et longitudinale des piles (pour cette dernière valeur, la mesure est faite sur les cinq piles centrales). Ces relevés sont faits 1 à 2 fois par an.
	Inclinométrie	Des mesures trimestrielles sont exécutées dans le tube inclinométrique au centre du glissement (BA 54, à l'aval de la pile 4) et des mesures annuelles au bord du glissement (BA 56, à l'aval de la pile 3). De plus, deux inclinomètres situés plus à l'aval du pont, SC1 et SC3, ont donné quelques informations sur le mouvement réel du glissement dans sa partie inférieure.
	Piézométrie	Les niveaux piézométriques sont relevés mensuellement dans 9 piézomètres autour du pont, tant à l'amont, dans la ligne des forages drainants, qu'à l'aval.
	Gestion des mesures	Les mesures, effectuées de façon fréquente lors de la construction, ont été espacées lorsque les mouvements ont retrouvé un ordre de grandeur semblable à ce qui était prévu. Les données sont synthétisées et évaluées par le bureau de géotechnique et font l'objet d'un rapport annuel.

V PRINCIPAUX RESULTATS DES MESURES

Topographie et inclinométrie	Dans la phase précédant la construction et au début des travaux, les mouvements d'ensemble du glissement dans la partie concernant les piles du pont étaient modestes (3.7 mm/an en tête du tube inclinométrique BA 54). De mai 1982 à mars 1984, ils ont connu une forte recrudescence, atteignant même 30 mm/an au cours de l'année 1983 avec des pointes de 5 mm/mois, la totalité des mouvements se manifestant à près de 20 m de profondeur. Cette accélération, probablement consécutive à une période de précipitations importante depuis 1977 et à des travaux d'excavation pour la fondation des piles, s'est réduite après l'exécution du rideau de drainage et se maintient assez régulièrement autour d'une valeur moyenne de 5 mm/an. La corrélation avec les précipitations n'est pas évidente. Les mouvements tant horizontaux que verticaux obtenus par mesures topographiques correspondent assez bien aux valeurs inclinométriques (20 mm en 5 ans); les tassements, qui sont un peu plus grands que ce qui correspond à la composante selon la pente des mouvements
------------------------------	--

Piézométrie

horizontaux s'expliquent par l'inclinaison locale du plan de glissement. Seule la pile 4 s'incline très légèrement vers l'aval, alors que l'ensemble des piles ont des inclinaisons cycliques dans le sens longitudinal, consécutives aux effets thermiques sur le tablier.

Le déplacement total enregistré dans l'inclinomètre BA 54 au niveau du plan de glissement depuis juillet 1979 atteint 105 mm en août 1992; il est donc probable que ce tube va être cisailé prochainement, ceci d'autant plus que des mouvements de surface plus rapides ont été mesurés en 1993 tant à l'amont qu'à l'aval du pont (point 7).

Certains relevés piézométriques sont très stables alors que d'autres fluctuent sur près de 10 m au cours d'une année. Ces niveaux sont en général plus élevés à l'aval des drains qu'à l'amont ou dans la ligne des drains. Toutefois, de fortes variations rapides peuvent survenir suite à des précipitations, que des relevés occasionnels n'arrivent pas à enregistrer.

VI COMMENTAIRES SUR LES PRINCIPES D'AUSCULTATION

Evolution des mouvements du terrain	La phase d'accélération pendant la construction a été remarquablement suivie; après la stabilisation des mouvements, les observations se sont espacées, mais on constate que des recrudescences de vitesses peuvent se manifester; il faut donc envisager un système de suivi en continu, au moins sur un point, afin de ne pas avoir à affronter des surprises. Les mouvements naturels sont toujours supérieurs à ceux qui avaient été pris en compte dans le projet du pont, de sorte que la marge de positionnement du tablier par rapport aux piles sera épuisée avant 100 ans.
Adéquation du système d'auscultation au problème posé	Il est possible que des mesures à plus long terme sur le glissement, par un suivi inclinométrique de plusieurs années avant les travaux, aurait révélé des vitesses supérieures à celles prises en compte lors du projet. Le système de suivi des déplacements est tout à fait satisfaisant, mais les lectures piézométriques ponctuelles ne peuvent donner une réelle idée des fluctuations de la nappe phréatique. Il convient de prévoir une auscultation en continu.
Programme des mesures futures	Il est prévu de poursuivre des mesures mensuelles des piézomètres, trimestrielles des inclinométriques et annuelles ou bi-annuelles des observations topographiques.
Organisation des mesures et du suivi	Les mesures sont planifiées en accord entre le Service des Routes et Autoroutes et le Bureau de géotechnique chargé de l'auscultation et de son interprétation. Il n'est pas certain que les rapports de synthèse parviennent assez tôt au Maître de l'ouvrage pour prendre des décisions rapides (par exemple, le rapport des mesures 1991, jusqu'à fin avril 1992 pour les piézomètres, a été envoyé à fin août 1992).
Conclusions et recommandations	Le suivi de cet ouvrage délicat a été bien organisé et la crise vécue en cours de travaux a été parfaitement suivie. Il convient maintenant d'automatiser certains contrôles et de prévoir une observation en continu de certaines valeurs, afin de disposer

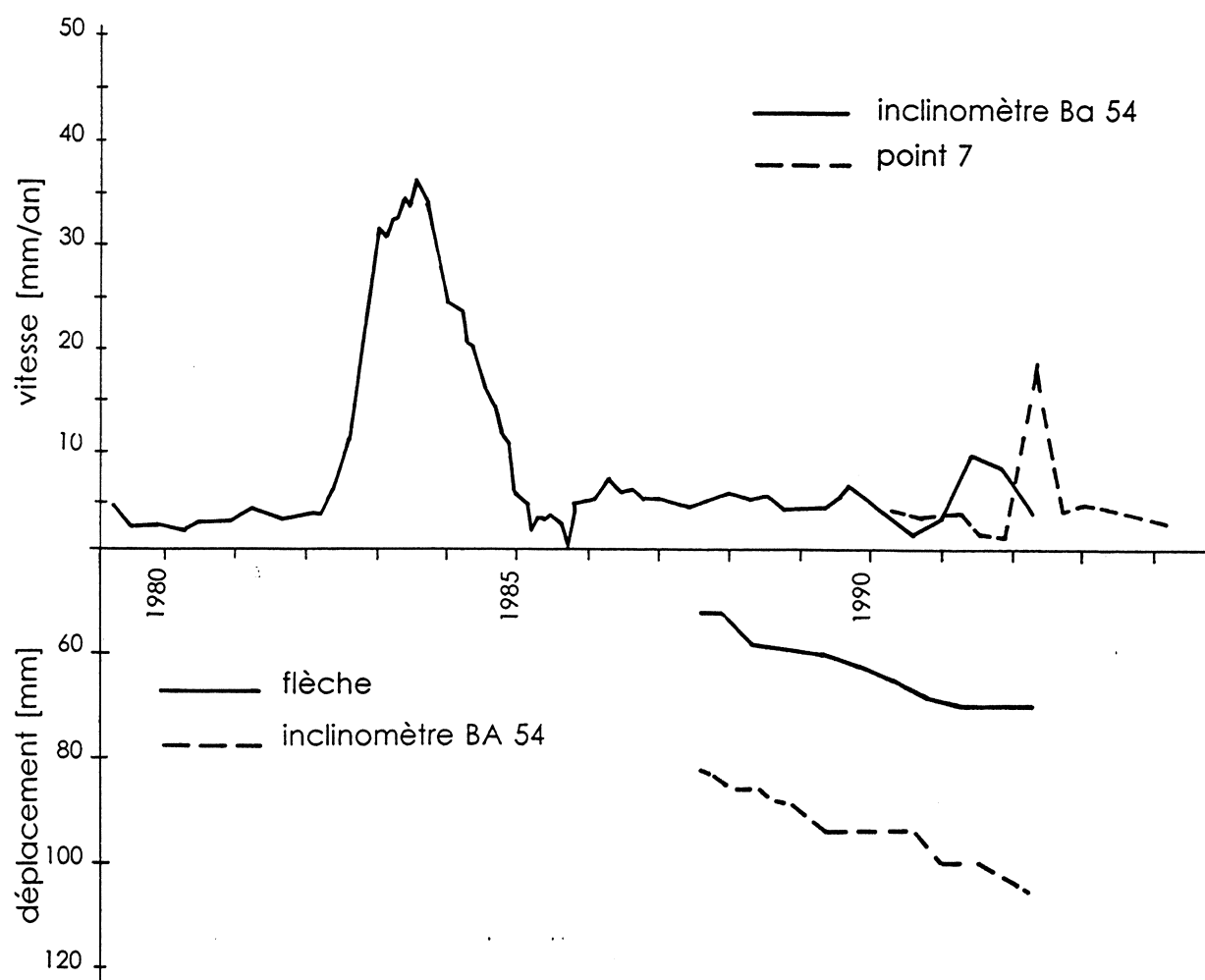
rapidement de données en cas d'alerte et de pouvoir alors densifier l'auscultation.

**Références
bibliographiques**

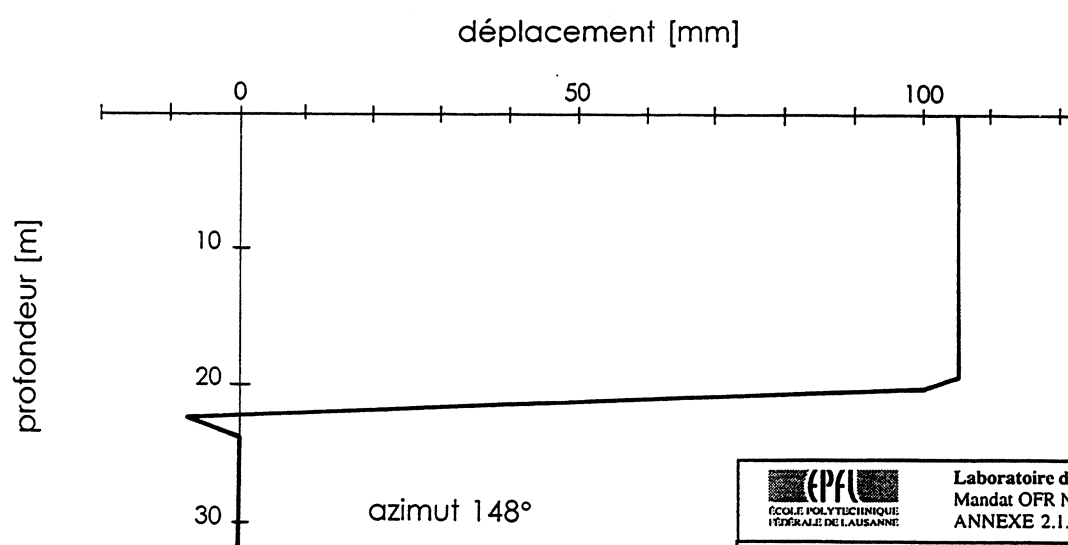
Rapports techniques de surveillance des ponts de la Praz et de la Grande Combe de septembre 1991 et août 1992, préparés par CSD Ingénieurs et géologues SA.

Rapport des mesures du glissement de la Praz de mars 1994 pour la Commune de Ballaigues, préparé par CSD Ingénieurs et géologues SA.

Evolution des vitesses et des déplacements



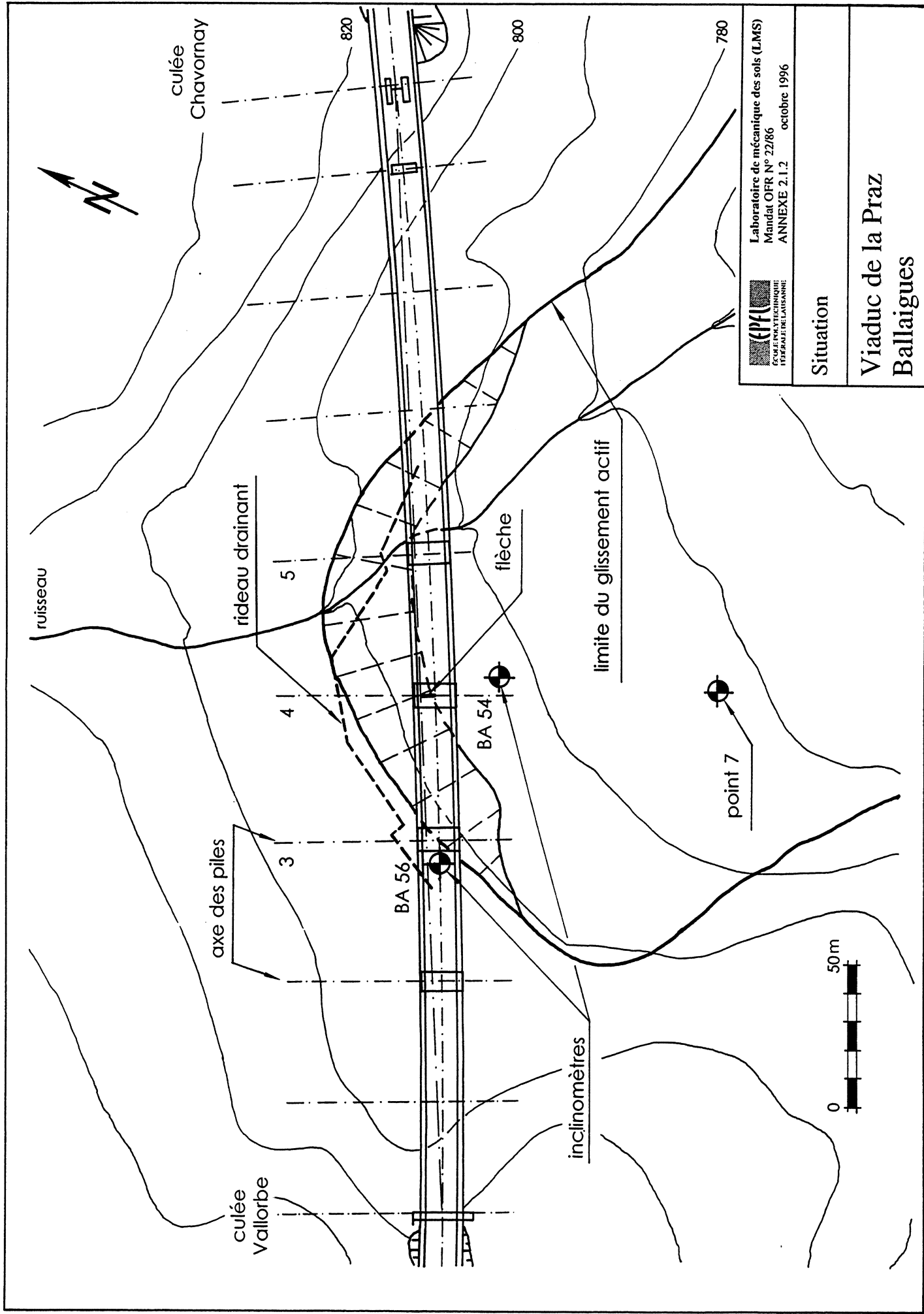
Mesure inclinométrique BA 54 au 11.08.92



Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
 Mandat OFR N° 22/86
 ANNEXE 2.1.3 octobre 1996

Evolutions des vitesses et déplacements
 Courbe inclinométrique

Viaduc de la Praz
 Ballaigues



I IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

Nom		Viaduc sur la Sorge à Valangin - Culée Sud
Lieu		Evitement de Valangin
	canton	NE
	n° RC/RN	J 20
	Coord. féd.	559.100/207.650
	km	1.130 - 1.220
Maître de l'ouvrage		Service des Ponts et Chaussées NE
Intervenants	Projet général	Prof. Dr. Ch. Menn - Luthi, Zürich / ACMV, Vevey
	Géotechnique	SACR SA
	Géologie	Jean Meia, géologue cantonal
	Auscultation géo-technique et projet de renforcement des fondations	De Cérenville Géotechnique SA
	Contrôles géométriques	Ribordy & Luyet SA
Chronologie	période d'études	Auvernier
	période de construction	1970 - 1973
	Période de renforcement des fondations	1972 - 1975
	période d'auscultation	1984
		(1974) 1981 - 1996

II DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Type	Tablier	Pont mixte unique avec dalle précontrainte en béton liée à 2 poutres métalliques en I
	Piles	Formées de 2 colonnes rectangulaires reliées par une entretoise qui repose sur un massif de fondation coiffant les pieux
	Culée	Structure en béton armé en L reposant sur un radier fondé sur des pieux courts en bois
Géométrie	Fondations	Pieux forés en béton (pour les piles)
	Longueur totale du viaduc	340 m
	Nombre de portées	10
	Longueur des portées	23.0 m / 30 m / 43.50 m / 36.50 m / 37.50 m
	Mode de construction du viaduc	poussage

III INSTABILITES

Conditions géologiques/ géotechniques			Sols varvés limono-sableux ou limono-argileux reposant horizontalement entre une moraine de compacité moyenne et une moraine de fond compacte
Type d'instabilité			Glissement rotationnel dans les sols varvés accompagné de phénomène de fluage et de reptation en surface
Parties de l'ouvrage concernées			Culée sud et les deux premières piles (les deux suivantes ne montrent pratiquement pas de mouvement)
Dommmages observés	oui	type de dommages	Fissures dans la chaussée, déformation du talus de la culée, tassement des bordures
		moyens confortatifs	Mise en oeuvre de 23 pieux ancrés de $\varnothing$ 1 m à 1.3 m, de 10 à 20 m de long, avec des ancrages de 700 à 900 kN

IV DISPOSITIF DE CONTROLE ET PROGRAMME DES MESURES

Mesures effectuées	Topographie	Mesures de nivellement de 5 poteaux de glissière sur le remblai de la culée, de 3 barres repères dans le talus du remblai et de 5 paires de clous sur la chaussée aval (avant le renforcement des fondations). Mesures de triangulation et de nivellement de 2 points de la culée et de nivellement de 4 autres points à partir d'un point de repère extérieur Mesures de triangulation et de nivellement de 2 points sur chacune des piles I, II, III et IV Les premières mesures remontent à 1974
	Inclinométrie	Premières mesures inclinométriques dans 3 sondages proches de la culée Mesures inclinométriques dans six pieux du système de confortation
	Mesures d'ouverture de fissures	5 points de contrôle dans la chaussée aval (abandonnés après renforcement)
Gestion des mesures		Les mesures faites par le bureau de géomètres Ribordy et Luyet SA, par les Ponts et Chaussées et par le Bureau de Cérenville Géotechnique ont été d'abord centralisées et exploitées par ce dernier, qui a interprété les résultats et établi des rapports d'auscultation. Puis le travail a été repris par les Ponts et Chaussées.

V PRINCIPAUX RESULTATS DES MESURES

Topographie	Les mesures faites ont montré d'abord une évolution très lente des mouvements, puis une accélération qui s'est surtout marquée en hiver 1983-84. Dès que les ouvrages de confortation ont été mis en oeuvre, les mouvements ont fortement ralenti, voire se sont inversés. Il est alors apparu certains résultats illogiques, qui ont conduit à observer que les points de référence n'étaient pas vraiment stables. Seules les mesures faites après la détermination exacte des mouvements des points de référence sont à considérer comme exactes.
Inclinométrie	Les premières mesures n'ont pu être poursuivies suite à l'augmentation des mouvements dans les tubes où le cisaillement était le plus marqué. Les mesures dans les pieux n'ont commencé qu'après que l'essentiel de la crise de l'hiver 1983-84 a eu lieu. Lors de la mise en tension des câbles en tête des pieux, les pieux ont été repoussés vers l'amont, puis les mouvements semblent s'être plus ou moins stabilisés.
Mesures d'ouverture des fissures	Après avoir montré des mouvements relativement faibles pendant 9 mois (< 1 cm en 9 mois, tant verticalement qu'horizontalement), les fissures du revêtement de la route se sont fortement accrues dès février 1984 et ne se sont stabilisées qu'après la mise en tension des ancrages : les déplacements maximaux observés sont de 45 mm d'ouverture et de 65 mm de décalage vertical.

VI COMMENTAIRES SUR LES PRINCIPES D'AUSCULTATION

Evolution des mouvements du terrain	Les mouvements de la zone de la culée, non prévus initialement, ont été bien observés dans leur phase préparatoire, grâce à la mise en oeuvre de techniques d'auscultation dès l'apparition des premières fissures. L'accélération des mouvements a toutefois été assez brutale et grâce à la préparation à temps d'une solution de confortation, il a été possible d'intervenir au cours de la crise et de la maîtriser en moins de trois mois. Des mouvements résiduels ultérieurs ont permis de mettre en évidence dans les mesures des erreurs dues au déplacement des stations de référence. La situation actuelle est pratiquement stable.
Adéquation du système d'auscultation au problème posé	Au départ, le système d'auscultation n'était pas adéquat, car la zone potentiellement instable n'avait pas encore été détectée et l'on n'avait pas imaginé un glissement d'une si grande ampleur, tel que les contrôles ultérieurs ont permis de l'établir. Dès l'apparition des mouvements de fissures, le système complémentaire d'auscultation a été apparemment bien conçu, quoique la crise de l'hiver 1984 et les travaux de confortation aient conduit à perdre certains résultats. Toutefois, il s'est avéré que les points dits fixes ne l'étaient pas, de sorte que les observations topographiques ne permettaient pas de connaître l'ampleur et la direction réelles des mouvements.

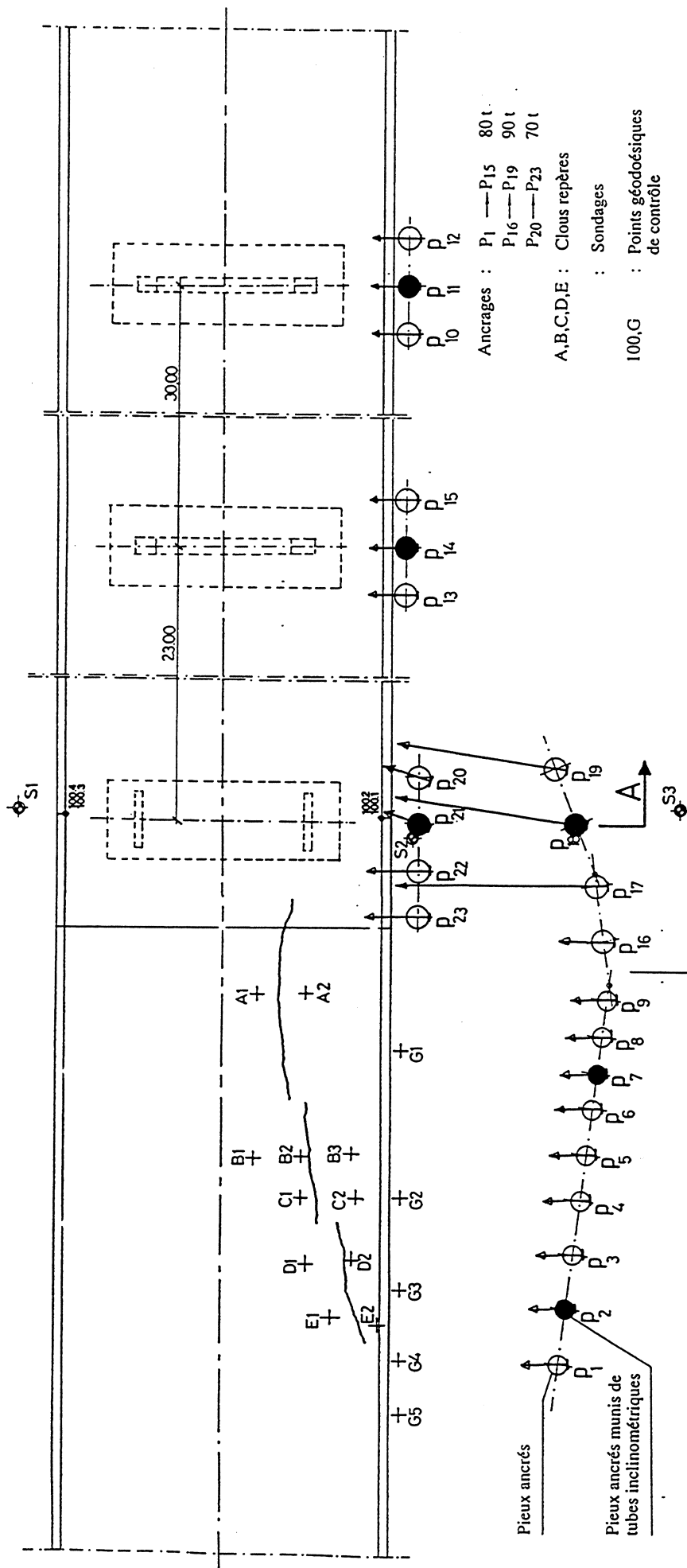
Programme des mesures futures	Il est mis en place un contrôle périodique des mouvements des points de repère à l'aide d'un réseau amélioré et étendu
Organisation des mesures et du suivi	Les mesures ont été coordonnées par le Service des Ponts et Chaussées et leur dépouillement et interprétation ont été à la charge du bureau de géotechnique, qui est le mieux à même de comprendre le mécanisme des mouvements. De plus, le Maître de l'Oeuvre s'est entouré d'experts pour juger du projet de confortation et évaluer l'impact des mouvements sur l'ouvrage dans son ensemble.
Conclusions et recommandations	L'auscultation a été bien organisée, une fois que les mouvements de la culée se sont manifestés, mais elle n'a pas permis de déterminer des mouvements absolus à partir de la mise en service, durant toute la période de la crise et après stabilisation. Il convient de ne pas relâcher la surveillance, car les mouvements du sol de fondation sont empêchés par des ancrages dont la tension peut évoluer, et le versant est sensible aux conditions climatiques défavorables; il se pourrait donc que de nouvelles déformations se manifestent. Dans le programme d'auscultation, il faut considérer cet ouvrage de confortation comme sensible.
Références bibliographiques	Rapport d'étude des mesures de déformation du viaduc sur la Sorge à Valangin, état à fin mai 1985, préparé par le bureau De Cérenville Géotechnique SA, à Lausanne Fiche d'ouvrage préparée par le Service des Ponts et Chaussées Derniers résultats de mesures inclinométriques et géodésiques établis par le bureau De Cérenville Géotechnique SA et le bureau Ribordy et Luyet SA (lettres rapports) <i>Cette fiche a été révisée par le Service des Ponts et Chaussées, qui a aimablement formulé quelques remarques pertinentes</i>



Culée Neuchâtel

Pile I

Pile II



Pieu ancrés Ø 1.00 m — Pieu ancrés Ø 1.30 m

Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 2286
ANNEXE 2.2.2 octobre 1996

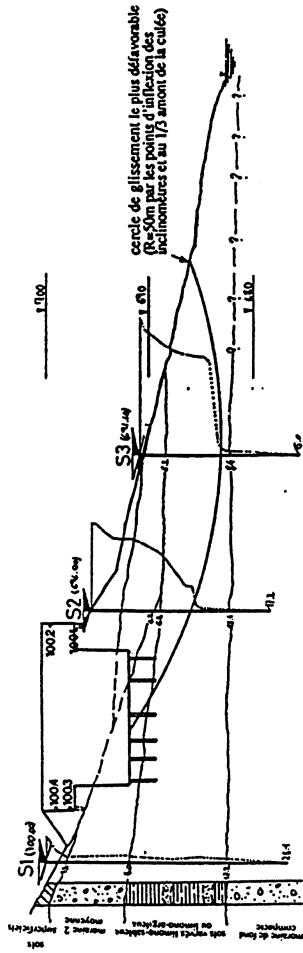
Moyens confortatifs & dispositif de contrôle
Vue en plan 1:200

Viaduc de la Sorge
Valangin

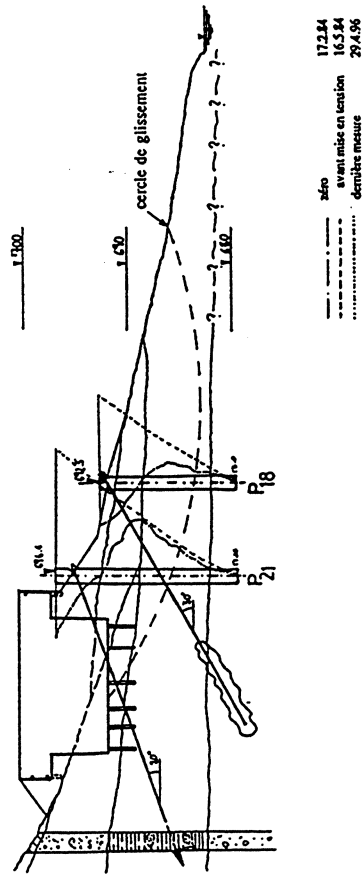
COUPES A-A

Echelle des déplacements : 1 cm = 6 mm

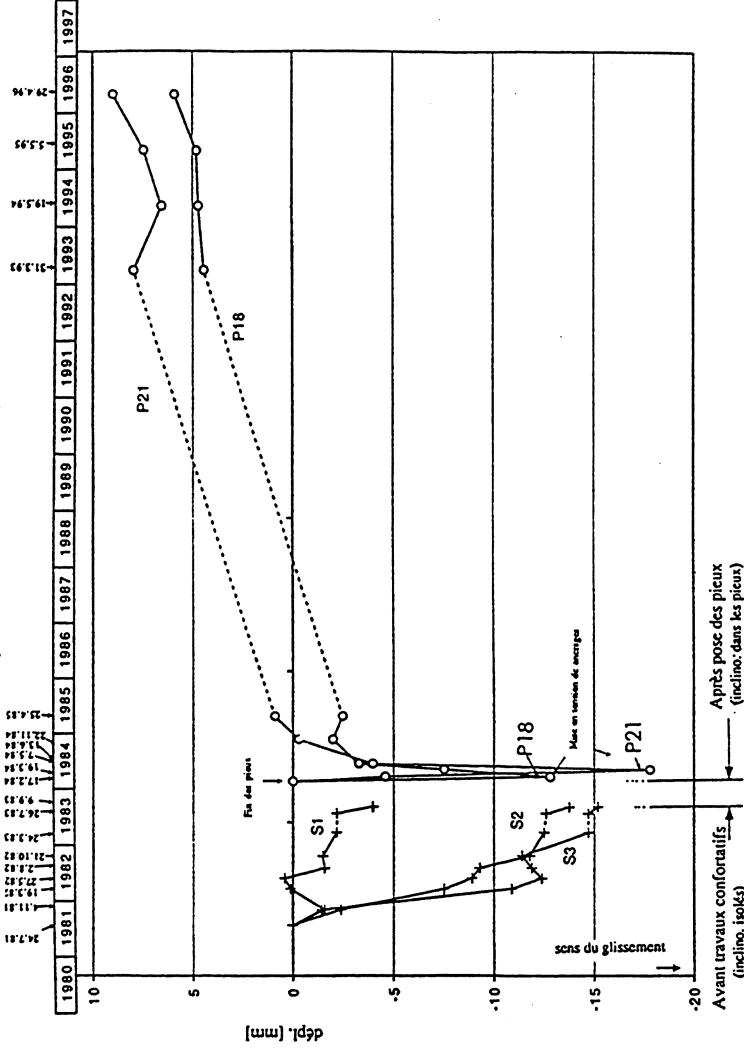
Profil des résultats de sondages 1:400



Profil du dispositif confortatif & de mesure 1:400



EVOLUTION DES MESURES INCLINOMETRIQUES (mouvements en tête)



I IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

Nom		Pont du Ganter
Lieu	endroit	Franchissement du Ganterbach, près de Brigue
	canton	VS
	n° RC/RN	N9 (col du Simplon)
	Coord. féd.	647.200 / 127.400
	km	9.810 - 10.488 (depuis Brigue)
Maître de l'ouvrage		Département des Travaux Publics du Canton du Valais, Service des routes nationales
Intervenants	Projet général	Prof. Dr C. Menn, Zurich
	Projet d'exécution	Schneller, Schmidhalter & Ritz, Brigue
		Blötzer et Pfammeter, Viège
		H. Rigendinger, Coire
	Géologie et Géotechnique	Inst. de technique des fondations et mécanique des sols, EPFZ; Institut des sols, roches et fondations, EPFL
	Auscultation	K. Zurbriggen, géomètre, Brigue
		Service des routes nationales, Brigue
		Institut des sols, roches et fondations, EPFL
Chronologie	Période d'études	1966 - 1976
	Période de construction	1976 - 1980
	Période d'auscultation	(1970) 1976 - 1991

II DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Type	Tablier	Pont en béton précontraint avec tablier unique en caisson de hauteur variable (max. 5 m) soutenu au droit des grandes portées par des tympans ajourés en béton précontraint liés aux deux piles centrales
	Piles	Les deux piles centrales, en béton armé, sont de section rectangulaire variable, évidée; la plus haute, à côté du torrent, atteint 157 m, des fondations au niveau du tablier. Les cinq autres piles ont une section rectangulaire pleine, de 3 m d'épaisseur pour les trois plus hautes.
	Culées	Structure en béton armé reposant sur un radier à environ 10 m de profondeur.
	Fondations	Les piles 1, 2 et 7 sont fondées sur radier ou directement sur le rocher. La pile 3 est fondée sur un caisson ancré en tête dans le versant. Les piles 4, 5 et 6 sont fondées sur

Géométrie		des puits circulaires atteignant 31 m de profondeur et 15 m de diamètre au maximum; des appuis réglables soutenant les piles sont disposés sur la dalle couvrant les puits et leur partie supérieure est protégée des mouvements superficiels du terrain par une enceinte en béton armé.
	Longueur totale du pont	678 m
	Nombre de portées	8
	Longueur des portées	2 x 35 m, 2 x 50 m, 1 x 80 m, 2 x 127 m, 1 x 174 m
	Pente naturelle du terrain	rive droite : 45° rive gauche : 30°
	Mode de construction du pont	par encorbellement, sauf dans les portées extrêmes

III INSTABILITES

Conditions géologiques/géotechniques		En rive droite, versant rocheux formé de gneiss et de schistes à 2 micas, de bonne qualité en profondeur. En rive gauche, éboulis de pente et moraine en glissement actif et fluage sur des schistes lustrés du Lias; écoulements de pente importants.
Type d'instabilité		Glissement translationnel d'une épaisseur incertaine, en mouvement lent et fluage (6 mm/an en moyenne à long terme)
Parties de l'ouvrage concernées		Fondations des piles 4, 5, 6 essentiellement
Domages observés	non	Aucune déformation n'a été relevée au niveau de la route, grâce aux moyens confortatifs mis en oeuvre.
	moyens confortatifs	tirants d'ancrage en rive droite; en rive gauche, réseau de drainage formé de 13 puits filtrants verticaux à l'amont des fondations des piles 4, 5 et 6, connectés par des forages subhorizontaux à la base des fondations des piles; des drains ont été forés en éventail à partir du fond des puits de fondation et enfin 3 galeries servant d'exutoire évacuent par gravité l'eau recueillie dans les puits de fondation vers le torrent (de 58 m, 39 m et 38 m de longueur respectivement).

IV DISPOSITIF DE CONTROLE ET PROGRAMME DES MESURES

Mesures effectuées	Topographie	En plus des mesures de contrôle lors de la construction, une mesure complète du réseau rénové en 1976 est effectuée (en été sur les points d'observation et de repère, triangulation et nivellement). De plus, au printemps et en automne, il est procédé à une mesure réduite sur les seuls points de repère. Après les travaux, une mesure complète a été programmée une fois tous les trois ans (faite en 1987 et 1991) et une mesure réduite dans les années intermédiaires. De plus, le tablier fait l'objet d'un nivellement.
	Inclinométrie	En 1977, 4 tubes inclinométriques sont installés (1 en rive droite et 3 en rive gauche). Les lectures sont faites mensuellement jusqu'à fin 1978, puis la fréquence se réduit à trois lectures en 1979, 2 en 1980, et enfin 1 au cours des années suivantes jusqu'en 1985. De plus, en 1976, un tube de 40 m a été installé à partir du fond de chacun des puits 4, 5 et 6 et des lectures ont été faites 2 à 3 fois par an (ne donnent plus de résultats significatifs).
	Défectomètres et extensomètres	Les prospections initiales des versants, faites dès 1930 au moyen de ces instruments, 2 fois par année, ont été abandonnées à la fin des travaux; mais elles ont révélé des mouvements jusqu'à plus de 45 m de profondeur en rive gauche.
	Pendules	Un fil à plomb dont le poids baigne dans l'huile a été fixé à la dalle supérieure de chacun des puits de fondation 4, 5 et 6, et a fait l'objet de contrôles hebdomadaires pendant les travaux.
	Piézomètres et drains	17 piézomètres de 2" de diamètre, de 22 à 45 m de profondeur, ont été mis en place en 1976 à l'amont des puits No 4, 5 et 6 et mesurés une fois par semaine, sauf en hiver. Les débits recueillis dans tout le réseau de drainage ont été jaugés 2 à 5 fois par mois selon les saisons. Après les travaux, il a été programmé deux relevés piézométriques par an.
	Contrôles particuliers du puits 4	Des mesures de tassement par nivellement de précision ont déterminé le processus de consolidation de la fondation. Des mesures de pression du terrain contre le fût du puits et sous le radier ont été faites par 25 cellules Glötlz à l'huile; elles ont notamment permis de déterminer les pressions horizontales, normales et tangentiels contre le revêtement du puits, ainsi que les pressions verticales à trois niveaux. Des mesures de déformation du béton dans les

renforcements du fût du puits ont été obtenues grâce à 18 cales Télémac F1 à corde vibrante et ont permis de contrôler la bonne corrélation entre les charges et les déformations pendant la construction de la pile en 1979.

V PRINCIPAUX RESULTATS DES MESURES

Mesure des mouvements	Les déplacements horizontaux (3 à 6 mm/an) sont limités et en régression; ils ne dépassent pas les prévisions, ce qui confirme la validité du système de drainage mis en place.
Piézomètres et drains	Les mesures effectuées ont montré une diminution progressive, puis une stabilisation des niveaux d'eau, alors que les débits de drainage ont peu varié en cours de construction. Ainsi, à la fin des travaux, le versant rive gauche a été drainé jusqu'au dessous des puits 4, 5 et 6.

VI COMMENTAIRES SUR LES PRINCIPES D'AUSCULTATION

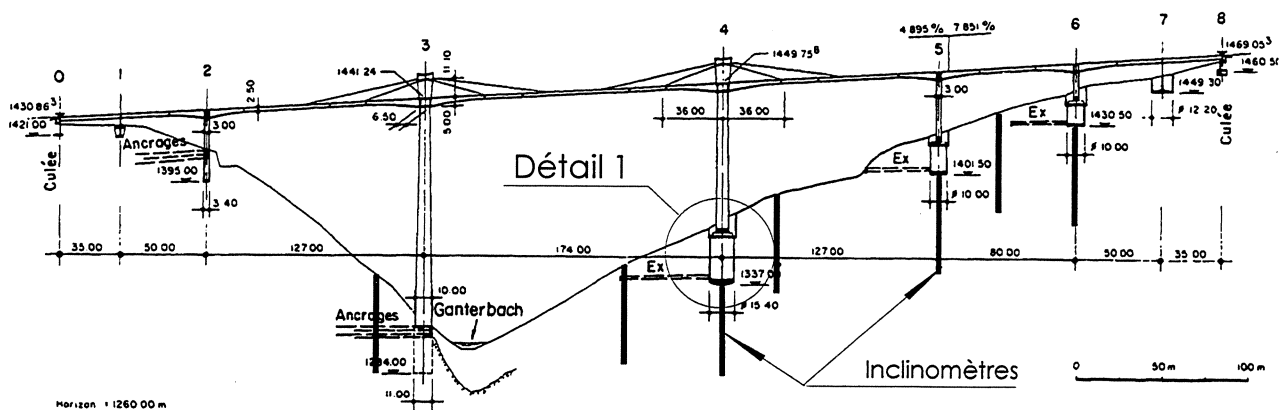
Evolution des mouvements du terrain	Les mouvements pendant la construction sont restés limités. Après cela ils se sont réduits peu à peu et étaient variables en profondeur, de sorte que les mesures inclinométriques ont été interrompues.
Adéquation du système d'auscultation au problème posé	L'auscultation a débuté bien avant les travaux, ce qui a permis de définir les caractéristiques du mouvement. Le suivi a été très complet en cours de construction et a permis d'enregistrer tous les paramètres essentiels. Les lectures des pressions sur le puits de la pile 4 sont particulièrement intéressantes, car rarement enregistrées. Enfin, comme la stabilisation du versant dépend surtout de l'efficacité du drainage, de nombreuses mesures piézométriques et de débit ont été faites et ont permis de suivre précisément le rabattement de la nappe phréatique.
Programme des mesures futures	Il n'est pas prévu de correction de la position des appuis des piles, puisque les mouvements sont plus faibles que les effets du retrait du béton.
Organisation des mesures et du suivi	Pendant la construction du pont, la direction des travaux a coordonné l'organisation des mesures et en a assuré l'interprétation. Une fois le pont achevé et après le départ à la retraite de plusieurs personnes responsables de cette auscultation, et au vu du bon comportement du pont, le suivi n'a plus été aussi systématique.
Conclusions et recommandations	Le système d'auscultation a été bien conçu et bien exploité jusqu'à la fin des travaux, mais depuis quelques années, la fréquence et l'ampleur des contrôles ont diminué, au vu du bon comportement de l'ouvrage. Il conviendrait de maintenir une

surveillance régulière des principaux paramètres (mouvements des fondations, niveaux piézométriques), afin de pouvoir déterminer assez à l'avance une éventuelle évolution critique et de programmer à temps un réglage des appuis à la base des piles.

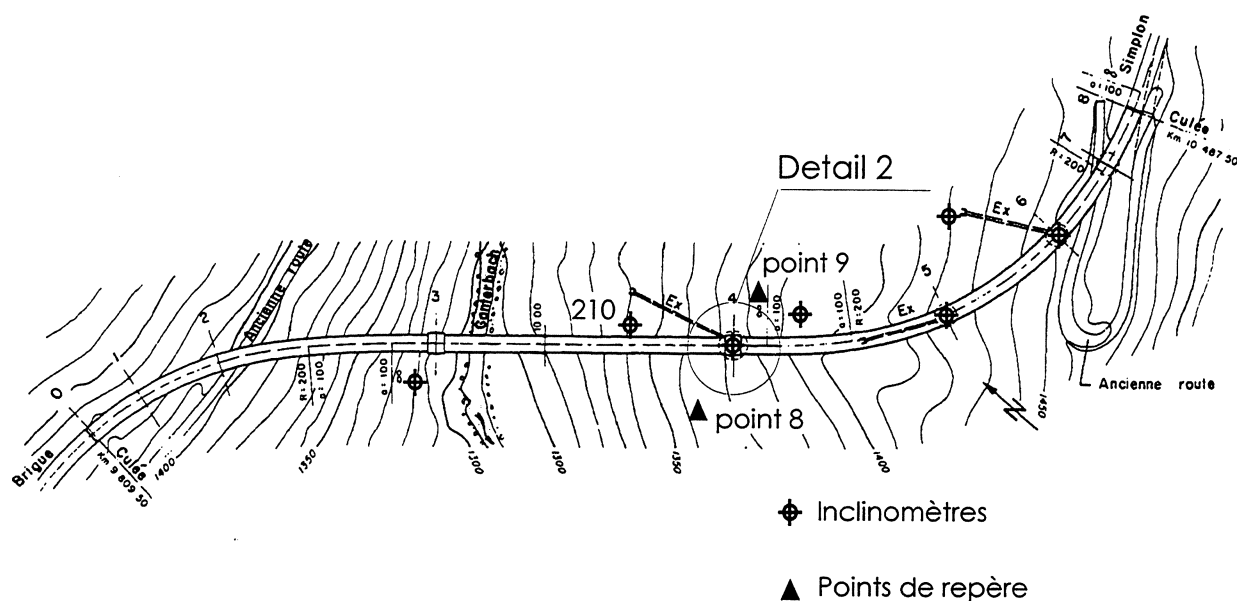
Références
bibliographiques

A. Schmidt, 1981. Quelques aspects particuliers des fondations du pont du Ganter , Chantiers 7 / 81, pp. 10-17
P. Ritz, 1992. Ueberwachung der Ganterbrücke. Strasse und Verkehr Nr 5 / 92, pp. 345-349

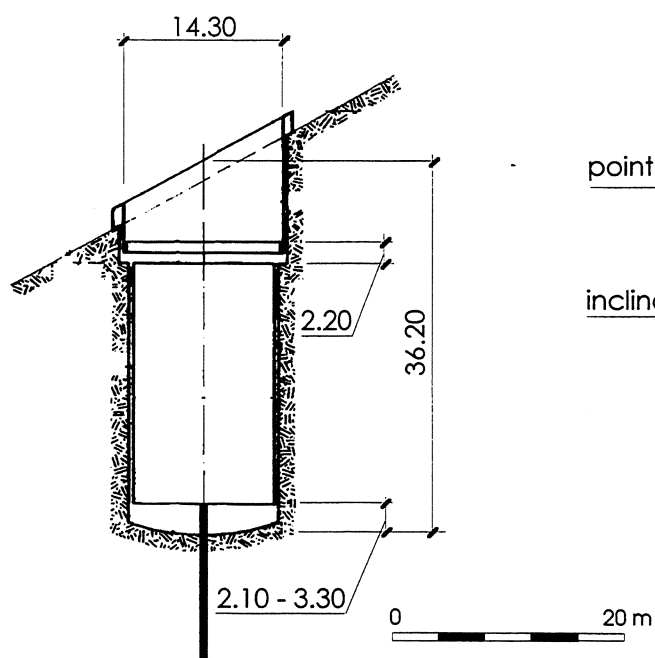
Elevation et situation



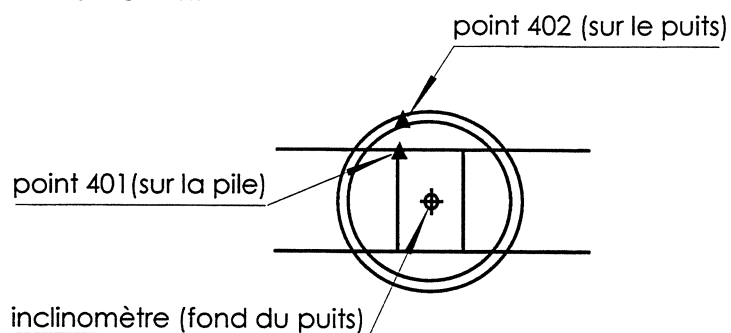
Ex = Exutoire



Détail 1



Détail 2



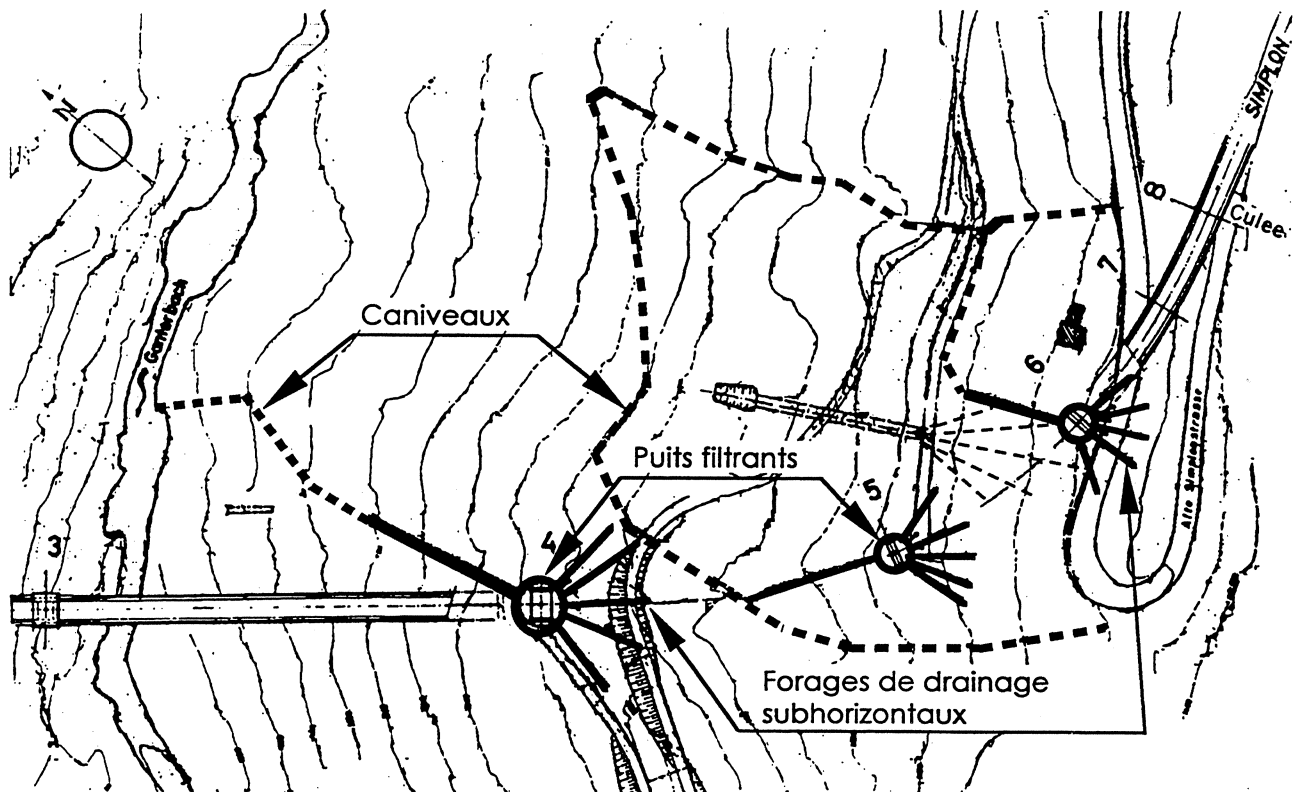
EPFL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86
ANNEXE 2.3.2 octobre 1996

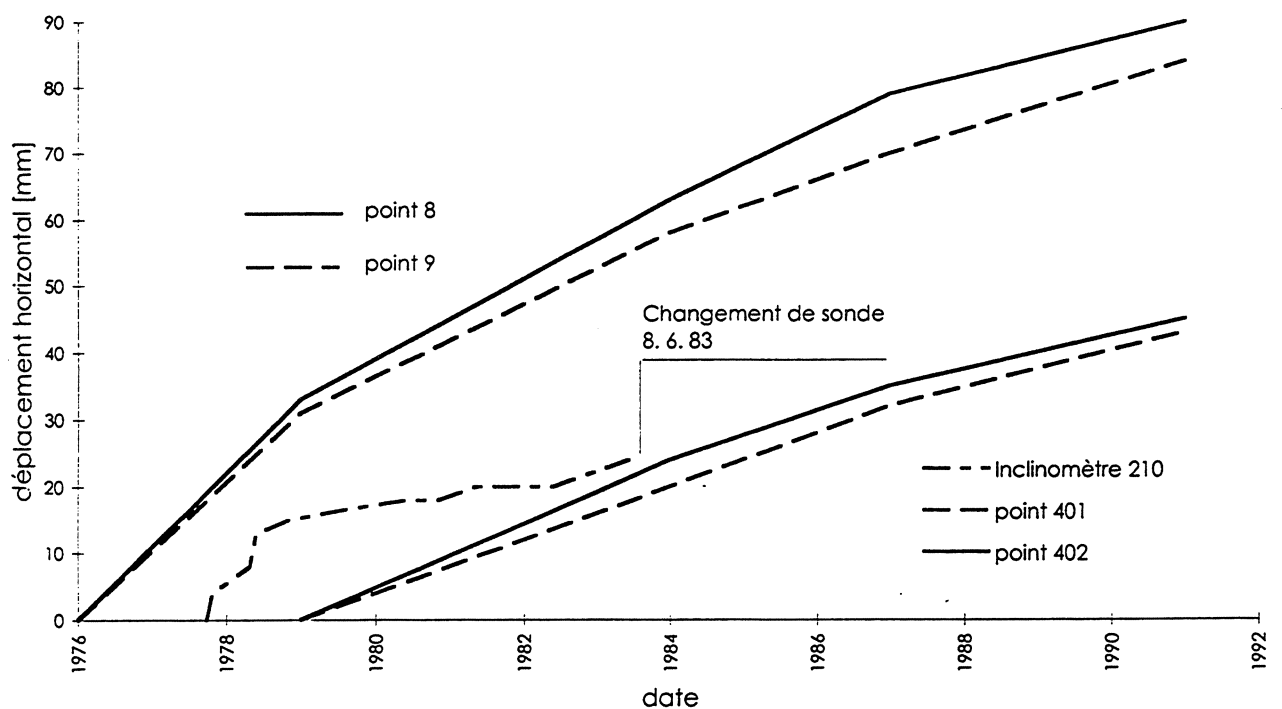
Elévation et situation
Détails

Pont du Ganter

Système de drainage



Evolution des déplacements en surface



I IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

Nom		Pont de Pardoreia
Lieu	endroit	Polmengo, près de Faido (Léventine)
	canton	TI
	n° RC/RN	2
	Coord. féd.	702.350/149.580
Maître de l'ouvrage		Service des routes du canton du Tessin
Intervenants	Projet général	(construction du pont en 1943)
	Confortation	Müller-Ceresa, Airolo
	Géologie/ géotechnique	Prof. E. Recordon et CETI, EPFL
	Auscultation	Urs Meier, Minusio
		Office géologique cantonal, Bellinzona
Chronologie	période d'études de la confortation	1988 - 1990
	période des travaux renforcement	1991 - 1992
	période d'auscultation	1988 - 1995

II DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Type		Pont-arc encastré en maçonnerie de blocs de granit avec deux tympans en maçonnerie de granit et un remplissage de déchets rocheux
Géométrie	Longueur totale de l'arc	initiale : 41.00 m
	Largeur totale	après déformation : 40.74 - 40.79 m (1988)
	Hauteur théorique de la voûte	6.60 m
	Culées en maçonnerie massives	8.20 m (a augmenté de 30 cm en 43 ans)
		La culée ouest (Airolo-Rodi) est apparemment fondée sur le rocher; la culée est (Faido) est fondée sur des matériaux glissés

III INSTABILITES

Conditions géologiques/ géotechniques	Gneiss granitiques massifs en rive droite (partie basse du versant - non affleurants au droit de la culée du pont), vaste écoulement rocheux de gneiss granitiques en rive gauche, s'étendant sur près de 7 km², conduisant à la présence en bas du versant d'une masse glissée active de plus de 30 m d'épaisseur au droit de la culée du pont, qui repose sur des alluvions, alors que la roche en place est à plus de 50 m de profondeur.
--	--

Type d'instabilité			Masse glissée à faible compacité, formée d'une matrice limono-sableuse dans laquelle on trouve des blocs et de pans de roche entiers, à cohésion faible à nulle. Dans la zone en pied de versant rive gauche, glissement à surface de rupture pseudo-circulaire, dont le point bas est à plus de 20 m sous le fond actuel de la vallée (après l'affouillement de l'ordre de 6 m survenu en 1987 au droit du pont). Les vitesses de mouvement récentes (dès 1992), ont conduit au cisaillement du tube inclinométrique en quelques mois (constaté à fin 1993). L'orientation des mouvements est légèrement oblique par rapport à l'axe de la vallée.
Parties de l'ouvrage concernées			Tout le pont est affecté par les mouvements du sous-sol sous la culée rive gauche, entraînant un écrasement de l'arc avec soulèvement de la clé, des fissures dans les tympans, des torsions dans le corps du pont, des déformations de la chaussée et des dégâts aux parapets.
Dommmages observés	oui	type de dommages	Fissures longitudinales, déformations multiples de la structure (voir ci-dessus)
		moyens confortatifs	Comme le glissement ne peut pas être stabilisé, le pont a été réparé provisoirement par la réalisation d'une dalle en béton sous la chaussée, la réparation des fissures et le remplacement des barrières. Les travaux sont complétés par un programme d'auscultation. (2e période de mesure de 1992 à 1995).

IV DISPOSITIF DE CONTROLE ET PROGRAMME DES MESURES

Mesures effectuées	Topographie	Réseau de triangulation permettant le suivi de points de l'Office fédéral de topographie, dont certains ont été mesurés depuis 1895. Un nouveau réseau réduit de 6 points a été mis en place en 1990 pour mieux suivre des points du bas du versant. Réseau de triangulation local pour suivre 20 points de mesure implantés sur le pont et dans ses alentours (2 périodes de mesure).
	Inclinométrie	Un tube inclinométrique a été placé à proximité de la culée rive gauche du pont (sondage S1).

Gestion des
mesures

Les mesures topographiques sont faites par le bureau Urs Meier et les mesures inclinométriques par l'Office géologique cantonal. Le Service des routes centralise les résultats et consulte le Prof. E. Recordon pour l'interprétation des résultats, qui sollicite l'appui du CETI de l'EPFL. Il n'y a pas de coordination suivie avec les auteurs du projet de réfection de pont.

V PRINCIPAUX RESULTATS DES MESURES

Topographie

Les mesures sur le versant mettent en évidence une accélération des mouvements, après une période plus calme de 30 ans qui s'est achevée par les crues catastrophiques du Tessin en 1987, accompagnées de fortes érosions en pied du versant. Les vitesses actuelles sont de l'ordre de 3 à 7 cm/an.

Les mesures sur l'ouvrage et aux alentours ont mis en évidence des déplacements obliques par rapport à l'axe du pont, conduisant à un raccourcissement de la portée du pont de 25 cm environ et à un soulèvement de la clé. La structure du pont, quoique rigide, permet de tels mouvements sans réduire sa capacité portante. Depuis les réparations, les mouvements se sont poursuivis, mais plus lentement et sans dommage pour l'ouvrage.

Inclinométrie

Les mesures ont montré un plan de cisaillement net à plus de 31 m de profondeur dans le sondage S1, soit à la base de la masse glissée. Ce tube a été cisailé à fin 1992.

VI COMMENTAIRES SUR LES PRINCIPES D'AUSCULTATION

Evolution des mou-
vements du terrain

Les déplacements du glissement général du versant subissent de légères fluctuations à long terme, mais ne vont pas se stabiliser, puisque les vitesses à l'amont sont plus grandes qu'à l'aval. Les mouvements du pied du versant vont donc se poursuivre, voire s'accélérer, sans qu'il soit matériellement possible de les arrêter, de sorte que le pont de Pardoreia ne pourra rester en service de nombreuses années, même après réparation.

Adéquation du
système
d'auscultation au
problème posé

Si l'observation de nombreux repères sur le pont et aux alentours par des travaux topographiques réguliers donne une image correcte de l'évolution à l'ouvrage, la connaissance du mécanisme causant les mouvements, soit le glissement du versant, est à notre avis insuffisante : un seul sondage près de la culée rive gauche, équipé d'un tube inclinométrique qui s'est rompu après trois ans environ, pas de piézomètre, pas assez de mesures inclinométriques fiables (la mesure

initiale est intervenue six mois après l'exécution du forage; une nouvelle mesure initiale a été faite en juin 92; il apparaît une grave divergence entre les mouvements de surface et les résultats inclinométriques en 1992). Le programme de mesures n'a pas été discuté en détail après la rupture du tube inclinométrique et il ne semble pas exister de critères d'alarme ni de planification des mesures ou des travaux futurs, à court ou à moyen terme (*selon lettre du Département du territoire du 20.12.1996*).

Définition des
mesures
complémentaires

Les mesures d'auscultation à effectuer, dont dépend la sécurité de l'ouvrage et de ses usagers, concernent d'une part le suivi régulier des déformations de l'ouvrage réparé, d'autre part le suivi des mouvements superficiels (horizontalement et verticalement) et en profondeur (par un nouvel inclinomètre) du versant près de la culée.
Il convient de déterminer la forme exacte de la zone instable au pied du versant, les conditions hydrogéologiques et les caractéristiques mécaniques des matériaux concernés, pour déterminer si des travaux d'assainissement peuvent ralentir éventuellement le mouvement, et dans quel délai et à quel endroit il faudra reconstruire le pont, le cas échéant.

Organisation des
mesures et du suivi

Les personnes exécutant les mesures sont compétentes, mais la coordination de l'auscultation et l'interprétation des résultats ne sont pas effectuées dans un cadre assez clair, mais plutôt par interventions ponctuelles d'experts. Si une accélération subite intervient, une cellule de crise (dont la nécessité est contestée par le Département du territoire - voir lettre du 20.12.96) n'est pas constituée pour affronter les défis que cela implique.

Conclusions et
recommandations

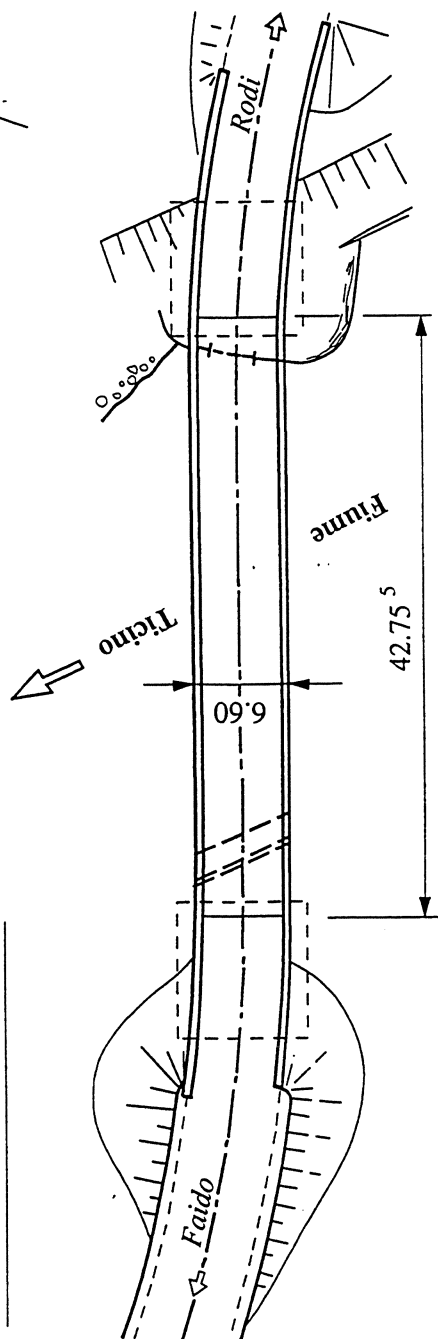
Le fait d'avoir prolongé la vie du pont par des travaux de renforcement ne doit pas retarder la mise en oeuvre d'une solution de remplacement ni la planification d'un programme d'auscultation précis permettant de maîtriser les risques en jeu. Il convient donc de renforcer le système de contrôle et la fréquence des mesures, et surtout d'examiner les résultats de façon coordonnée entre le maître de l'ouvrage, les ingénieurs, les experts en géotechnique et les bureaux effectuant les mesures géodésiques.

Références
bibliographiques

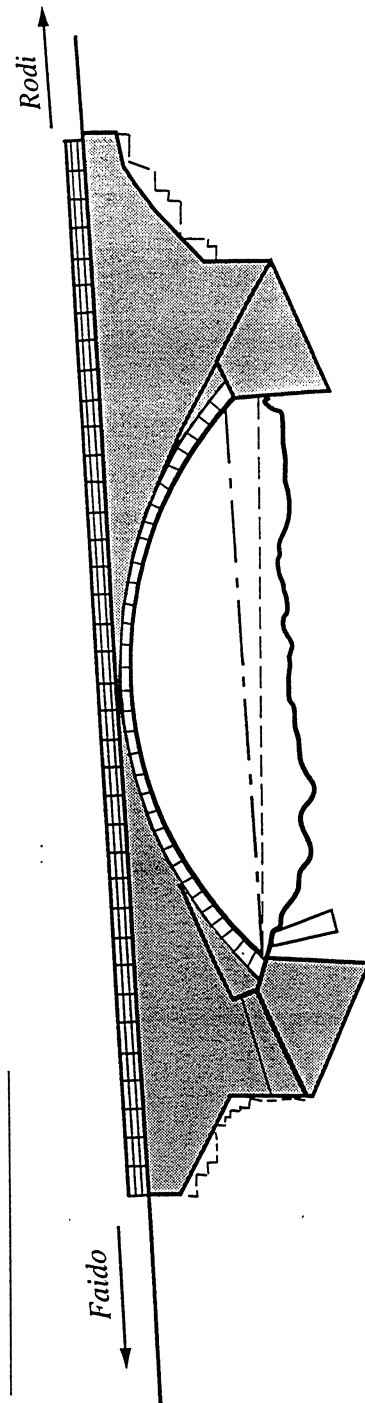
Etude des mouvements du glissement de terrain de Faido affectant la culée du pont de Pardoreia dans la Léventine, janvier 1990. Centre interdépartemental d'étude des terrains instables de l'EPFL.
Mesures géodésiques de contrôle du pont de Polmengo, par le Bureau Urs Meier à Minusio, et données inclinométriques par Office géologique cantonal (données communiquées par la Section des routes cantonales).
Cette fiche a été révisée par le Département du Territoire, qui a aimablement formulé quelques remarques pertinentes ou restrictives par rapport à notre appréciation de la situation.



VUE EN PLAN



ELEVATION



Pont de Pardoreia/Polmengo FAIDO



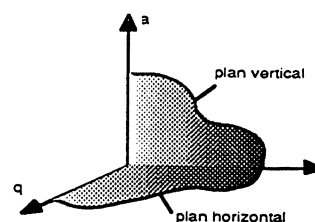
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86
ANNEXE 2.4.2
octobre 1996

**VUE EN PLAN &
ELEVATION**

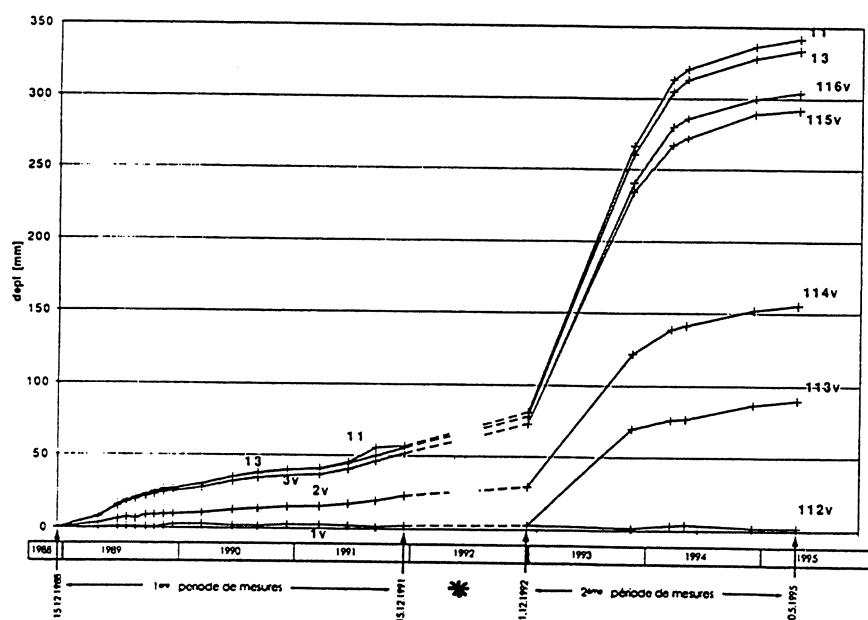
Echelle
1:500

Evolution des déplacements dans le temps de certains points choisis sur le pont et dans le versant

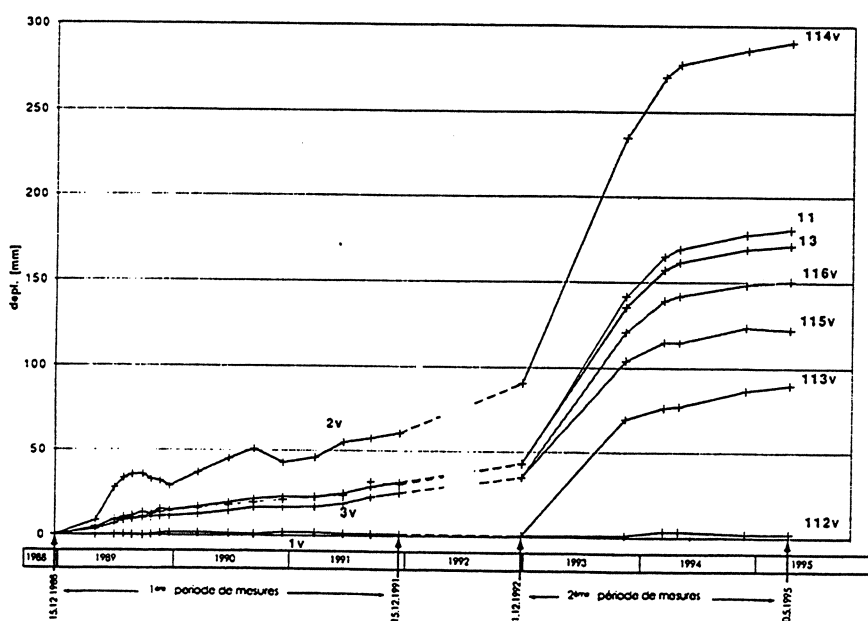
* Note : La 2ème période de mesures a débuté par une nouvelle lecture initiale; les mesures des deux périodes ne sont donc pas liées et il n'est pas tenu compte des mouvements réels survenus en 1992.



déplacements dans le plan horizontal

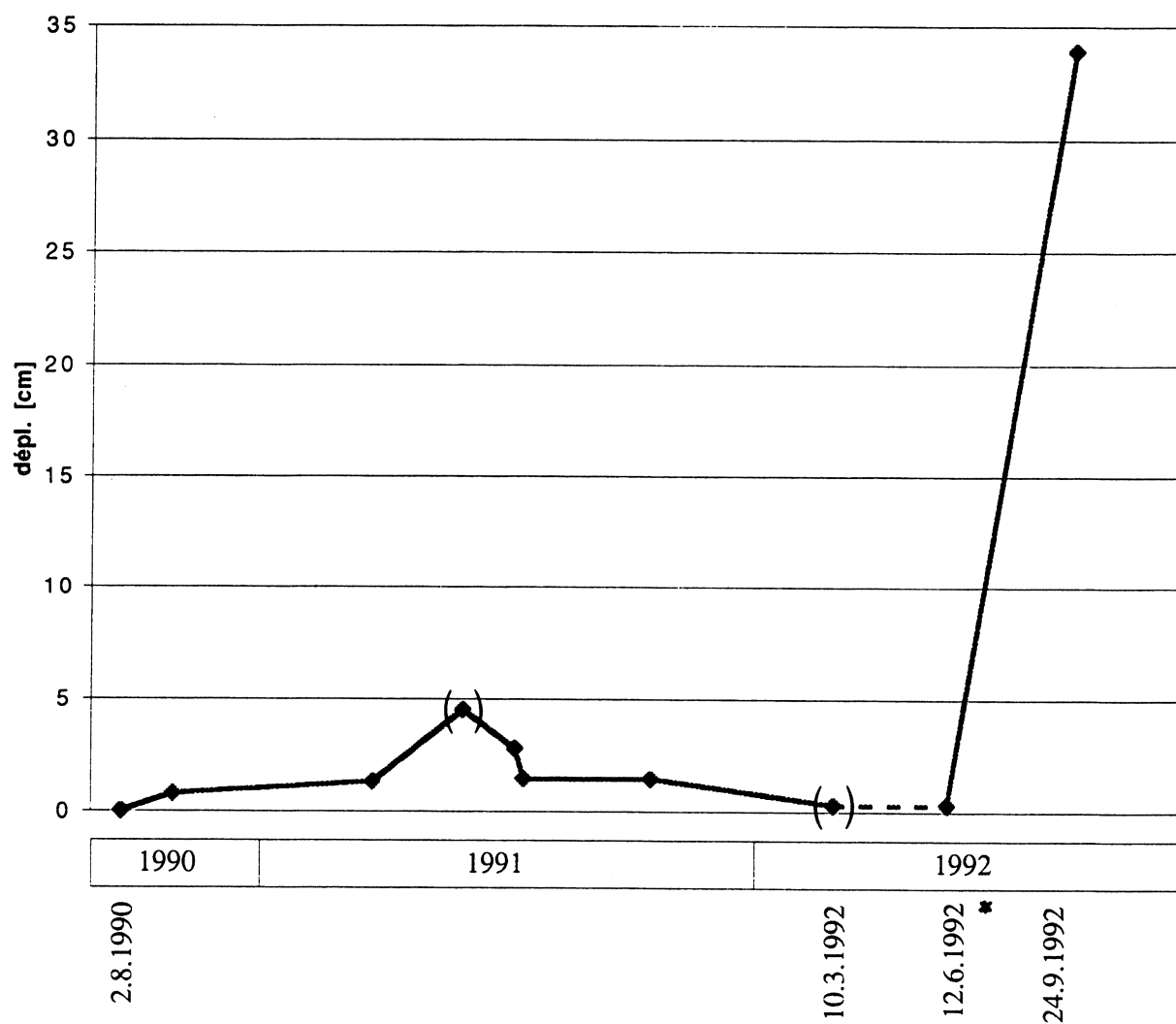


déplacements dans le plan vertical



Relevés géodésiques: Période d'étude du 15.12.1988 au 15.12.1991
(Urs Meier, Minusio) & du 21.12.1992 au 10.5.1995

Evolution dans le temps des mouvements de la tête de l'inclinomètre S1 période d'étude du 2.8.1990 au 24.9.1992



(Office géologique Cantonal, Bellinzona)

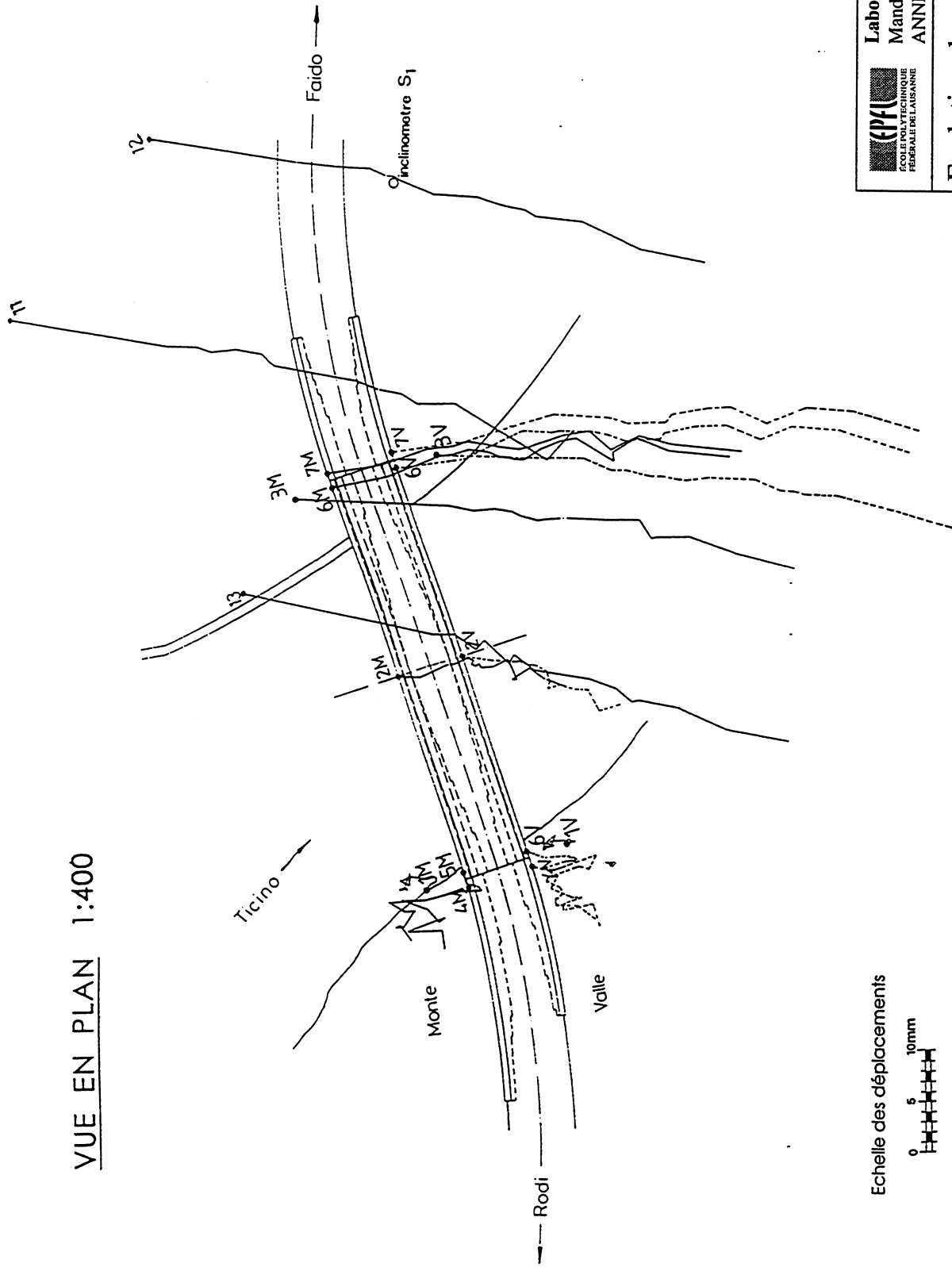
* : Nouvelle mesure initiale, non reliée à la précédente



Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86
ANNEXE 2.4.4
octobre 1996

Pont de Pardoreia/Polmengo
FAIDO

VUE EN PLAN 1:400



Echelle des déplacements



EPFL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86

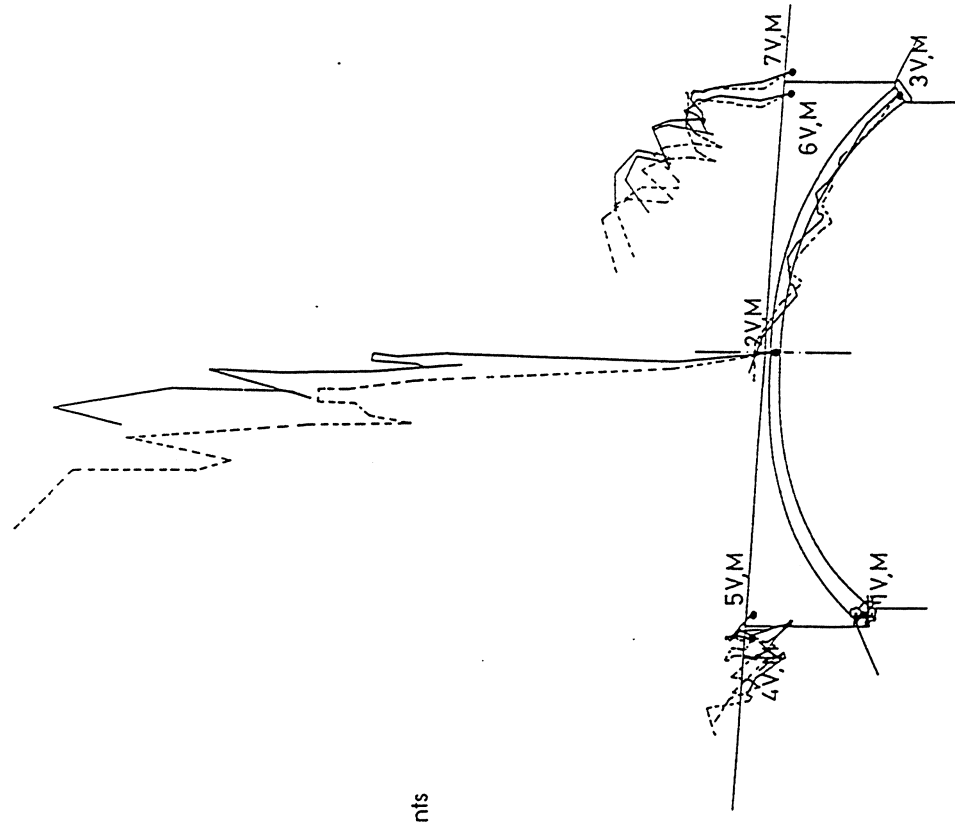
ANNEXE 2.4.5 octobre 1996

Evolution des déplacements

Période du 15.12.1988 au 15.12.1991

Pont de Pardoreia/Polmengo
Faido

ELEVATION 1:400



Echelle des déplacements



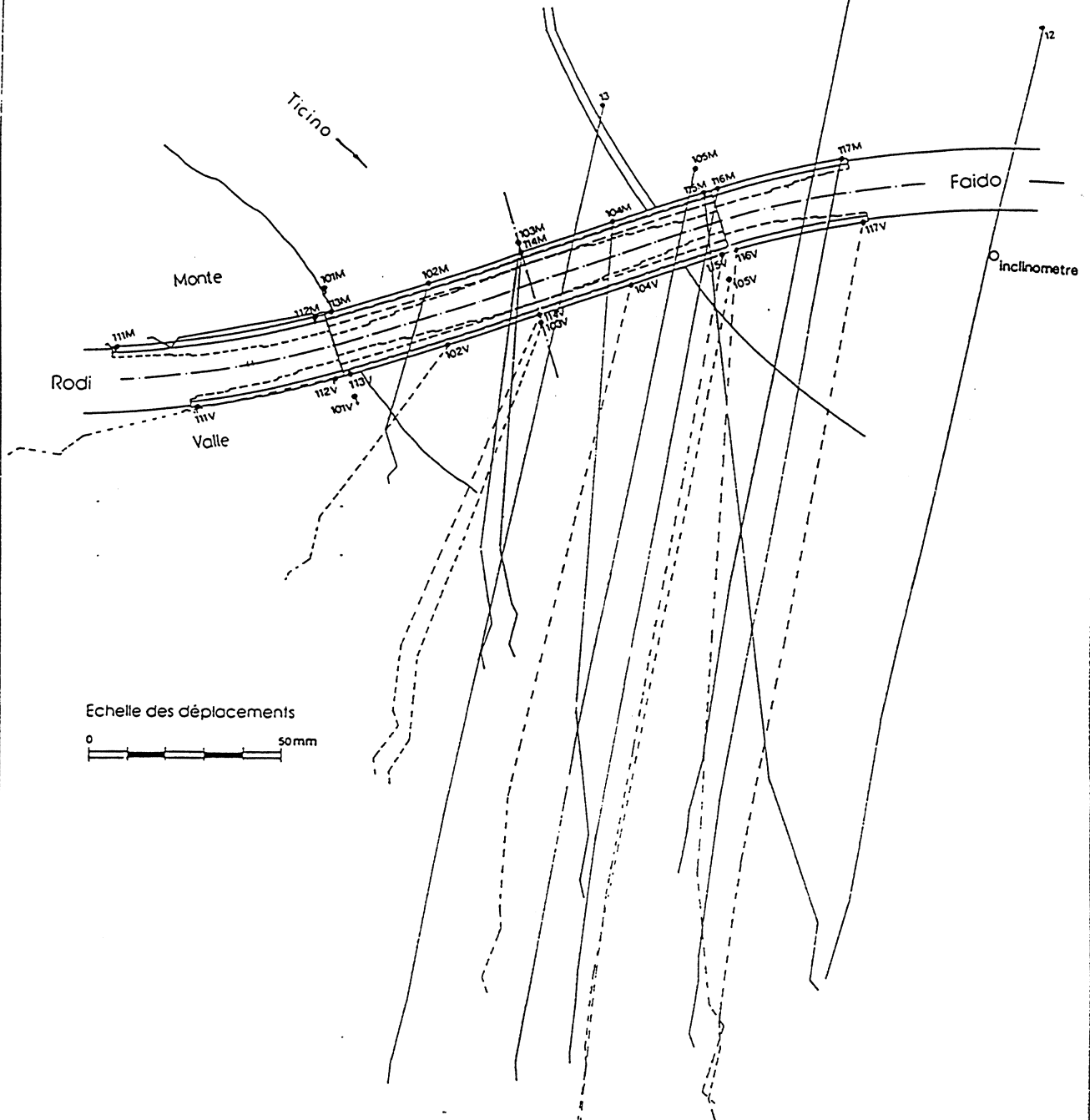
Dates des mesures :

- 15.12.1988 (zéro)
- 17.08.1989
- 17.09.1989
- 16.10.1989
- 14.11.1989
- 13.12.1989
- 14.03.1990
- 19.06.1990
- 03.09.1990
- 03.12.1990
- 13.03.1991
- 11.06.1991
- 05.09.1991 (2V non visible)
- 15.12.1991 (1M, 5V non visibles ; 4M, 5M, 4V détruits)

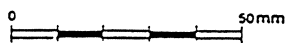
M : ——— M : Monte
V : - - - - V : Valle

 ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE	Laboratoire de mécanique des sols (LMS) Mandat OFR N° 22/86	
	ANNEXE	2.4.6 octobre 1996
Evolution des déplacements Période du 15.12.1988 au 15.12.1991		
Pont de Pardoreia/Polmengo Faïdo		

VUE EN PLAN 1:400



Echelle des déplacements



Laboratoire de mécanique des sols (LMS)

Mandat OFR N° 22/86

ANNEXE

2.4.7

octobre 1996

Evolution des déplacements

Période du 21.12.1992 au 10.05.1995

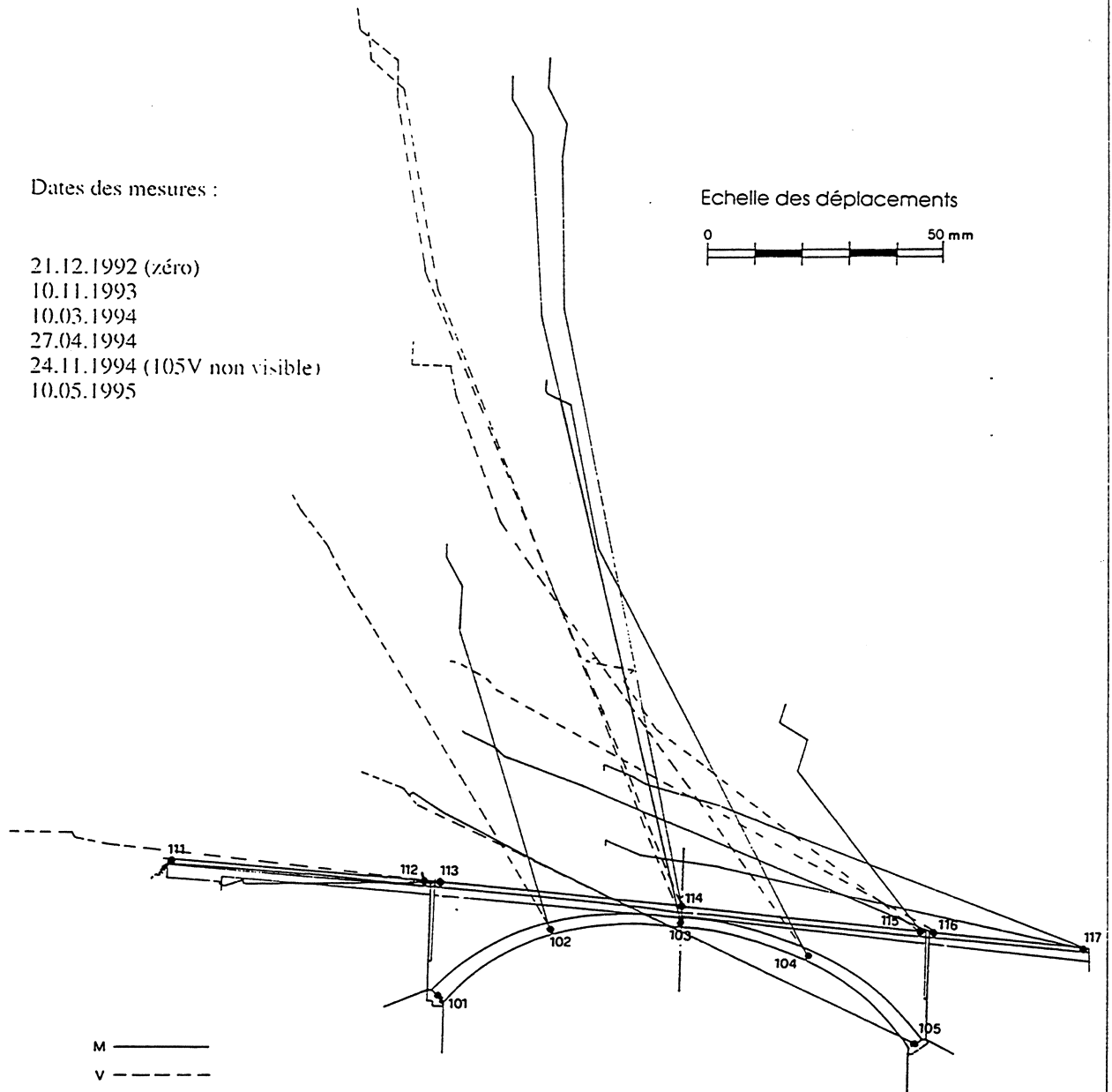
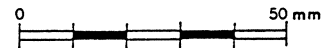
Pont de Pardoreia/Polmengo
Faido

ELEVATION 1:400

Dates des mesures :

21.12.1992 (zéro)
10.11.1993
10.03.1994
27.04.1994
24.11.1994 (105V non visible)
10.05.1995

Echelle des déplacements



M ———
V - - - -

M : Monte
V : Valle



Laboratoire de mécanique des sols (LMS)

Mandat OFR N° 22/86

ANNEXE

2.4.8

octobre 1996

Evolution des déplacements
Période du 21.12.1992 au 10.05.1995

Pont de Pardoreia/Polmengo
Faïdo

I IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

Nom		Parois de pieux ancrés de Neuenhof
Lieu	endroit	Tronçon Baregg-Neuenhof, le long de la Limmat, au lieu-dit Chlosterrüti
	canton	AG
	n° RC/RN	N1
	Coord. féd.	666.000/256.300
Maître de l'ouvrage		Département des Travaux Publics, AG
Intervenants	Projet général	Emch + Berger Ing. conseils SA, Soleure;
	Géotechnique	Bureau d'ing. Himmel-Münter-Kuhn SA, Baden
	Géologie	Bureau de géotechnique Dr von Moos SA, Zurich
	Auscultation	Prof. Dr K. Schindler, Zurich
		Bureau de géotechnique Dr von Moos SA
		Bureau d'ing. Himmel-Münter-Kuhn
		C. Racine, Ing.-Conseil
Chronologie	Période d'études	1964 - 1967
	Période de construction	1967 - 1972
	Période d'auscultation	1971 - 1988 (1995)

II DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Type		Structure multiple de confortation comprenant 4 parois de pieux ancrés, parfois à plusieurs niveaux, 4 puits de drainage de 15 m de profondeur, des forages drainants et des drains superficiels, conçue de façon à stabiliser une zone de glissement sur laquelle est réalisée un échangeur; l'autoroute elle-même franchit la zone instable par un pont de 220 m de long
Géométrie de la section principale	Longueur totale	paroi supérieure : 140 m
(zone de glissement 3)	Longueur des pieux	paroi inférieure : 130 m
	Diamètre des pieux	16 m en moyenne
		paroi supérieure : 0.88 m (158 pieux)
		paroi inférieure : 1.5 m
Ancrages de la section principale	Charge de service maximum	parois supérieure et inférieure : 1900 kN
	Nombre de niveaux	paroi supérieure : 1 à 3; paroi inférieure : 1
	Inclinaison	parois : supérieure : 25-32°; inférieure : 36°
	Longueur libre	12 - 20 m
	Long. de scellement	10 - 25 m
	Pente moyenne du terrain	15°

III INSTABILITES

Conditions géologiques/ géotechniques		Massif de transition molassique formé de couches marneuses, silteuses et gréseuses, en général tendres et peu résistantes, altérées en profondeur et découpées par des zones de cisaillement aquifères (avec des pressions artésiennes). Sur ce massif s'est développée en plusieurs phases une zone instable formée de moraine, de matériaux sablo-graveleux, de fragments rocheux dans une matrice limono-argileuse, dont l'équilibre avant les travaux était précaire.
Type d'instabilité		Glissement rotationnel lent, actif lors de périodes de fortes précipitations (septembre 1968), dont l'épaisseur maximum atteint 14 m. Il n'a pas été réactivé par les travaux grâce aux mesures de confortation. Toutefois, des variations de tension ont été observées dans les ancrages.
Dommages observés	non	Aucune déformation observée au niveau du revêtement de l'autoroute.

IV DISPOSITIF DE CONTROLE ET PROGRAMME DES MESURES

Mesures effectuées	Topographie	En plus des mesures effectuées dans la phase de construction, un plan d'auscultation général pour tous les ouvrages de confortation a été mis sur pied en 1971, comprenant le contrôle des déplacements horizontaux de 41 repères par triangulation et le nivellement de 20 repères, ceci deux fois par an. De plus, 24 mesures clinométriques ont été effectués 2 fois par an. A partir de 1987, le plan d'auscultation a été révisé dans le sens d'une concentration des relevés sur des points significatifs et d'une densification des mesures, pour certains paramètres très variables. Les mesures inclinométriques sont effectuées une fois par an dans 12 tubes depuis 1983; les mesures géodésiques effectuées tous les 5 ans incluent le relevé des têtes des 12 tubes inclinométriques.
	Piézométrie	Les relevés bi-mensuels, puis mensuels, des 47 tubes piézométriques ont été complétés dès 1977 par trois enregistreurs en continu. Dans le nouveau plan d'auscultation de 1987, seuls 5 enregistrements en continu de la piézométrie ont été maintenus dans des sites caractéristiques. Ces mesures sont complétées par des contrôles des débits de drainage à 38 sites d'observation, qui étaient faits initialement 2 fois par mois et qui sont actuellement exécutés 2 fois par an.

Contrôle des tirants	Dans le plan d'auscultation initial, les parois ancrées dans 2 premières zones instables ont été équipées de 11 tirants de contrôle à cellule hydraulique contrôlée 2 fois par an (soit 5 % de tous les tirants); dans la zone de stabilisation principale (zone de glissement 3), 25 tirants de contrôle ont été installés sur les parois ancrées supérieure et inférieure (soit 8 % de tous les tirants) sur lesquels ont été effectués des essais de remise en tension à la même fréquence. En 1987, les dispositifs de contrôle ont été remplacés par des capteurs électriques consultables à distance, soit 10 sur les 2 premières parois et 25 sur les parois supérieure et inférieure de la zone de glissement 3. Le nouveau système de mesure a permis d'augmenter la fréquence des contrôles à 4 par année.
----------------------	--

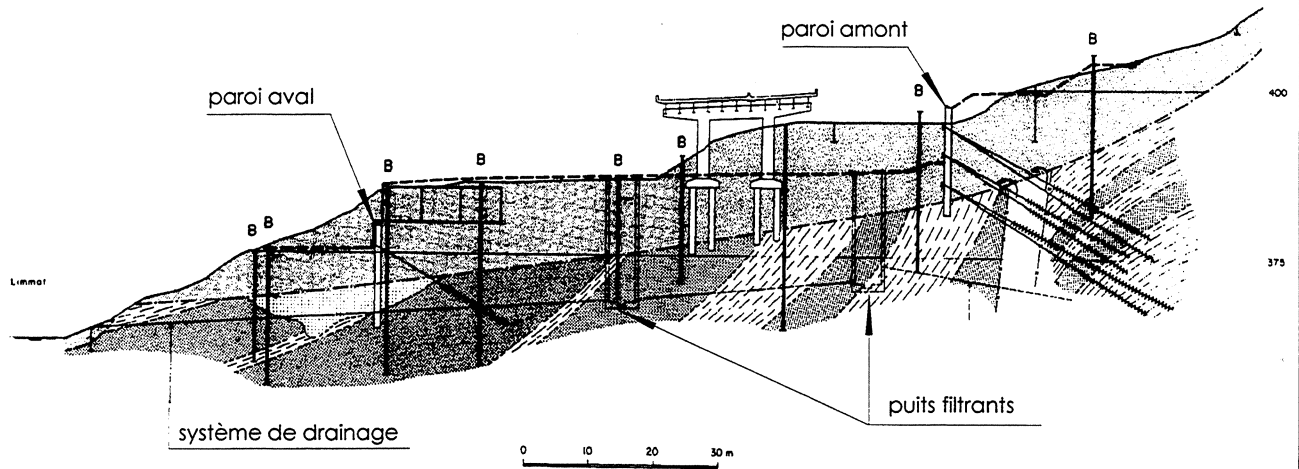
V PRINCIPAUX RESULTATS DES MESURES

Topographie	Les ouvrages sont dans l'ensemble stables, car les mesures géodésiques ont indiqué des déplacements maximaux à long terme de 5 mm horizontalement et de 9 mm verticalement.
Inclinométrie	Aucune déformation au-delà du cône d'imprécision des mesures n'a été décelée jusqu'à maintenant.
Piézométrie	Les mesures initiales dont l'interprétation a été effectuée en 1976 ont fait ressortir une faible variation d'ensemble des niveaux phréatiques, sans corrélation claire avec les conditions météorologiques enregistrées journalièrement sur le site. Ceci était dû à l'intervalle de temps trop grand entre les mesures. Les dispositifs de mesure continue ont par contre révélé de fortes variations rapides conduisant à des remontées du niveau phréatique de près de 2 m.
Contrôle des tirants	Les contrôles effectués entre 1971 et 1984 ont montré en général des pertes de tension progressive de 5 à 10 %, atteignant dans certains cas 15 %, et même 30 % localement, dans la partie est de la paroi supérieure (au niveau d'ancrage intermédiaire); ce phénomène peut s'expliquer par le fluage de la zone de scellement située dans une formation géologiquement perturbée. Ces ancrages ont été retendus en 1984 à 1000 kN au niveau supérieur (soit la tension initiale) et à 1350 kN au niveau intermédiaire (soit 90 % de la tension initiale). Dès lors, les tensions n'ont plus varié sensiblement.

VI COMMENTAIRES SUR LES PRINCIPES D'AUSCULTATION

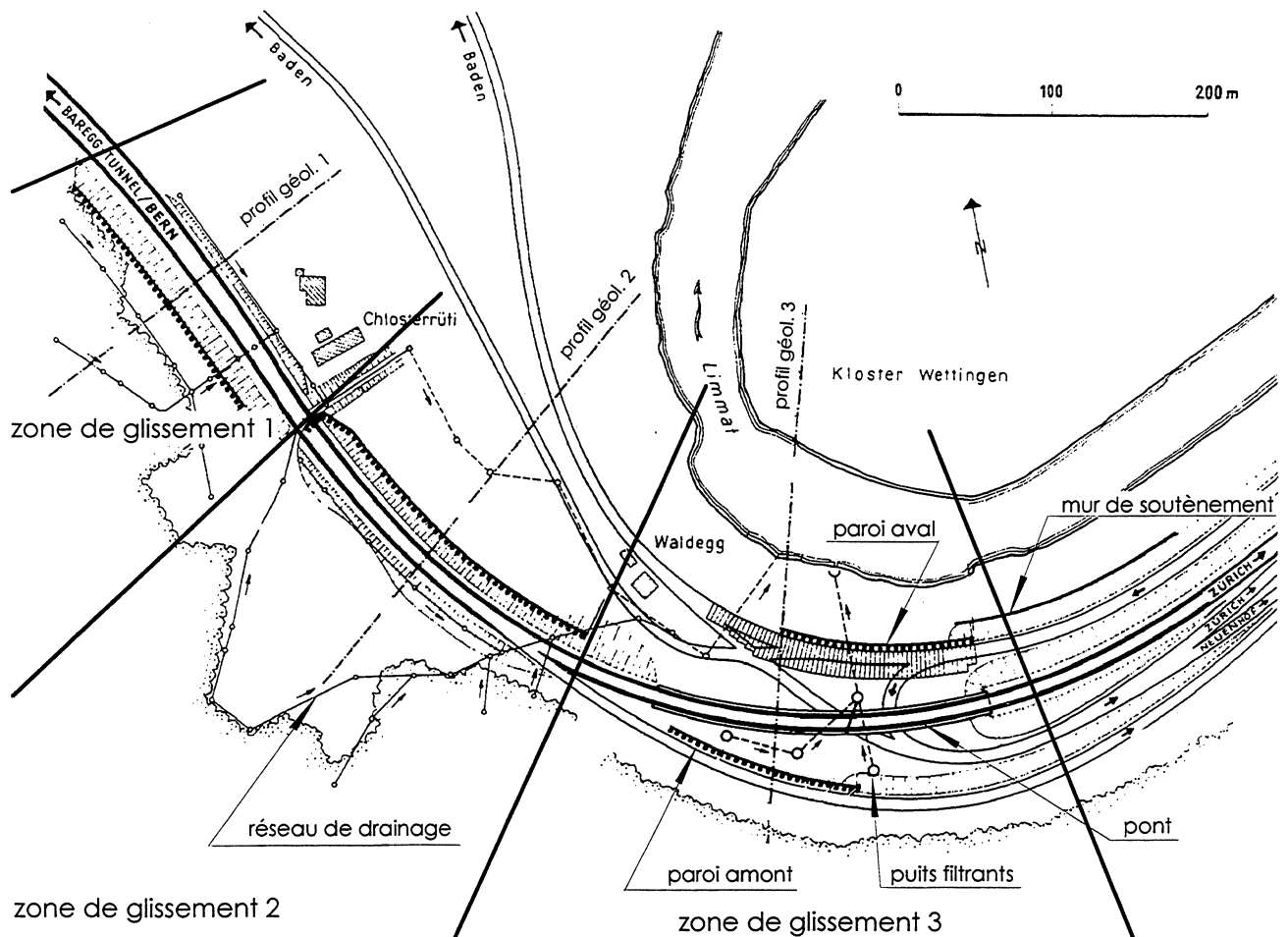
Evolution des mouvements du terrain	Les mouvements enregistrés restent très modestes près de 25 ans après les travaux et le comportement des ouvrages est tout à fait satisfaisant.
Adéquation du système d'auscultation au problème posé	Le système d'auscultation initial, très complet, conduisant à de nombreuses valeurs périodiques parfois difficiles à interpréter, s'est révélé à l'usage trop dense. Dans le plan d'auscultation révisé de 1987, certains points de mesures significatifs ont été retenus, certains paramètres ont fait l'objet de mesures continues et quelques capteurs ont pu être relevés à distance, ce qui a notablement renforcé l'efficacité du système. Il faut bien se rendre compte que si l'enregistrement des mesures est une première tâche, l'interprétation et la valorisation des résultats est sur une deuxième tâche d'une toute autre ampleur, qui est nécessaire pour déterminer la sécurité des ouvrages et programmer les travaux d'entretien.
Programme des mesures futures	Le programme adapté en 1987 se poursuit; de plus, des inclinomètres fixes ont été installés pour pouvoir suivre à distance l'évolution des mouvements en profondeur. La plupart des instruments de contrôle peuvent donc être interrogés à distance, à la fréquence souhaitée (mesures de déformation, de piézométrie et des forces d'ancrage).
Organisation des mesures et du suivi	Grâce à l'excellente organisation mise en oeuvre par le maître de l'ouvrage et à l'examen des résultats par une équipe constituée d'un expert neutre, du bureau de géotechnique, du bureau d'ingénieurs et de l'ingénieur cantonal, l'auscultation et l'interprétation des données se déroulent de façon efficace et coordonnée. Les programmes de mesure ont pu être adaptés selon les nécessités et ont conduit à définir des travaux d'entretien de façon rationnelle. Le suivi en continu et à distance des principaux systèmes de mesure garantit une efficacité excellente de l'auscultation en cas de crise.
Conclusions et recommandations	Grâce à l'excellente auscultation mise en oeuvre, il est possible de garantir à long terme la sécurité de cet ouvrage particulièrement délicat, et en particulier de mettre en évidence la fiabilité des structures ancrées permanentes, si elles sont bien suivies et entretenues.
Références bibliographiques	Racine, C., 1988. Überwachung und Underhalt der Hangsicherung im Abschnitt Baregg-Neuenhof der Nationalstrasse 1. Publ. Soc. Suisse de Méc. des Sols et des Roches No 118, 57-61 Gautschi, M.A., Schindler, C., 1970. Die Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen. Route et Trafic No 9, 482-489

Profil géologique 3



B : micropuits

Situation



●●●●●●●● paroi de pieux ancrés

○—○ système de drainage



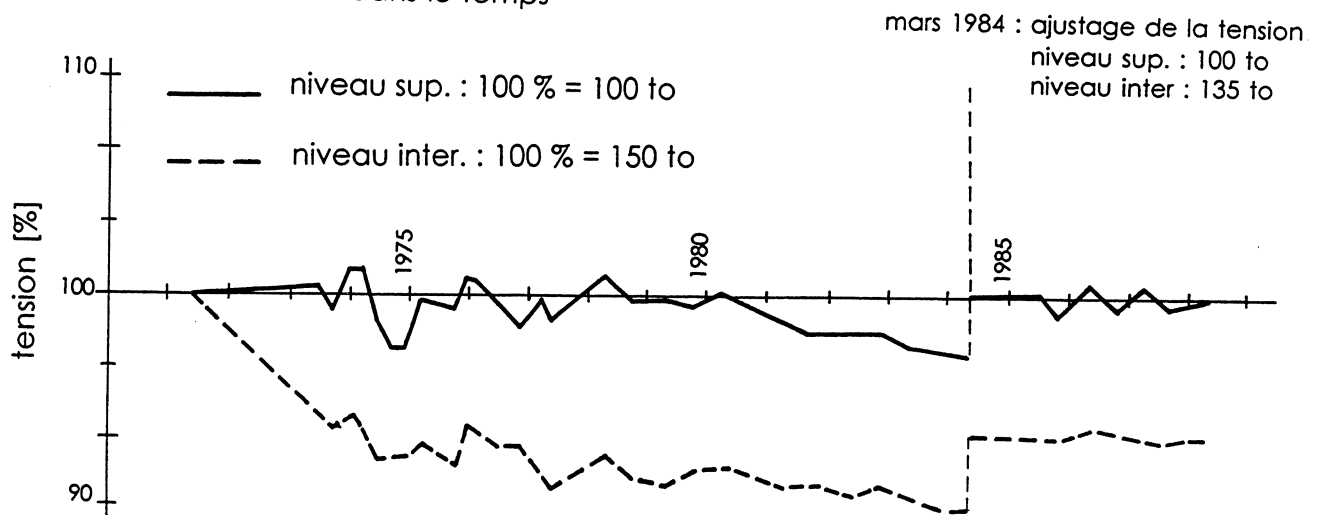
Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86
ANNEXE 2.5.2 octobre 1996

Situation et profil géologique

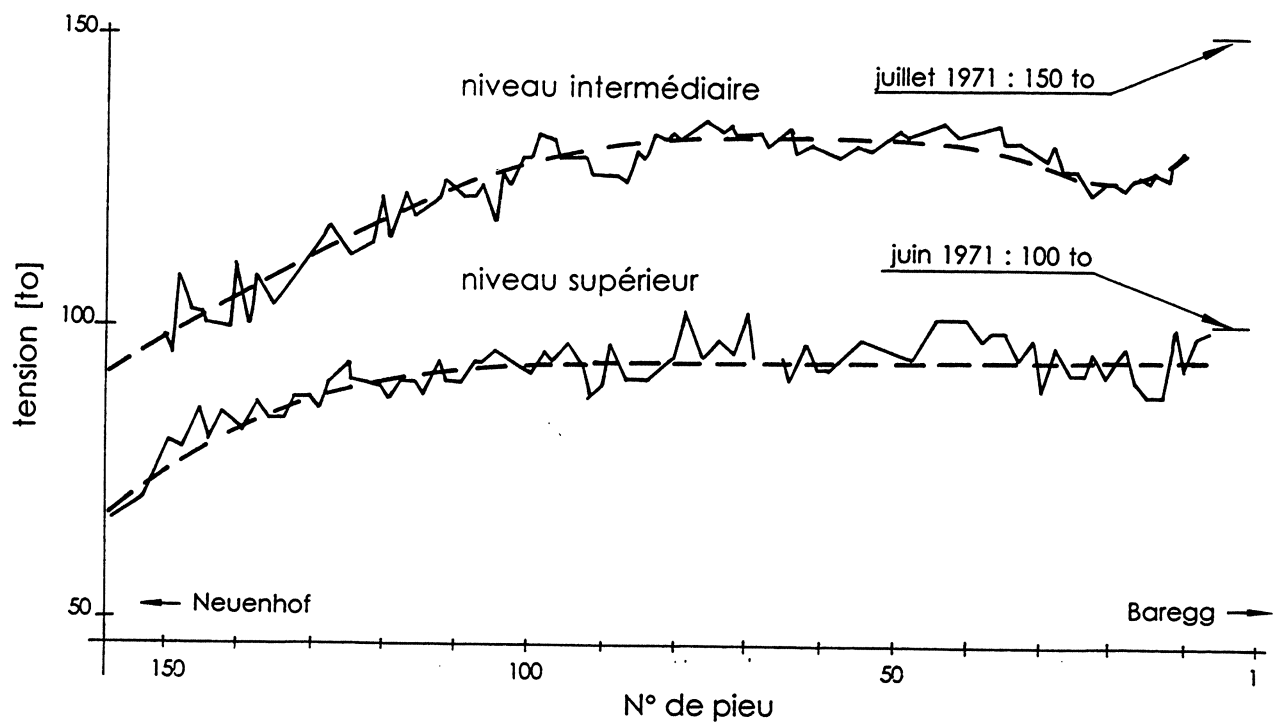
Neuenhof
Parois de pieux ancrés

Paroi de pieux amont, zone de glissement 3

Evolutions des tensions dans le temps



Evolution des tensions le long du mur : mars 1984



Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86
ANNEXE 2.5.3 octobre 1996

Evolution des tensions d'ancrages
paroi amont, zone de glissement 3

Neuenhof
Paroi de pieux ancrés

I IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

Nom		Paroi ancrée de Gstipf
Lieu	endroit	Evitement de Brig-Glis
	canton	VS
	n° RC/RN	N9 (col du Simplon)
	km	150.060 - 150.410
	Coord. féd.	575.030 / 161.680
Maître de l'ouvrage		Département des travaux publics du Canton du Valais, Service des routes nationales
Intervenants	Projet général	Bureau d'ingénieurs Schneller-Schmidhalter-Ritz, Brigue
	Géotechnique	Prof. E. Recordon, ISRF, EPFL, Lausanne
	Géologie	M. E. Fardel, Service des routes nationales, Sion
	Auscultation	Laboratoire de mécanique des sols, EPFL, Lausanne
Chronologie	période d'études	Bureau de géomètre K. Zurbriggen, Brigue-Glis
	période de construction	1980 - 1982
	période d'auscultation	1982 - 1985
		1980 - 1986 (1995)

II DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Type	Murs en béton armé	avec contreforts, espacés de 3 à 4 m, bétonnés en sous-oeuvre par étapes de 1.5 m et ancrés par des tirants
Géométrie	Longueur totale	430 m (dont 350 m de murs ancrés)
	Hauteur maximale	20 m (2 parois ancrées superposées)
	Epaisseur/largeur des contreforts	0.6 m/1.1 m
	Epaisseur entre le contreforts	0.3 m
	Fruit du mur	10:1
	Pente moyenne initiale du terrain	32°
	Pente maximale	35°
Contrôle de la nappe		pendant les travaux, par pompage après les travaux, par drainages inclinés (long. max 36 m, incl. 10°) et par nattes contre le parement amont
Tirants	Charge utile	700 kN
	Longueur libre	de 14 à 33 m
	Long. de scellement	8 m
	Inclinaison	22° à 27°
	Nombre maximal de niveaux d'ancrage	12

III INSTABILITES

Conditions géologiques/ géotechniques		Pente d'éboulement post-glaciaire formée de schistes lustrés de granulométrie très étendue, à perméabilité élevée Angles de frottement interne effectifs mesurés 30° à 35° Angle de frottement interne effectif assumé 33° Cohésions effectives mesurées $0-100 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ Cohésion effective assumée $10 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ Poids volumique apparent humide $22 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ Coefficient de perméabilité $10^{-4}-10^{-6} \text{ m/s}$
Type d'instabilité		Pas de mouvement de glissement avant les travaux, mais un coefficient de sécurité peu élevé ($F_s = 1.27$ pour les surfaces polygonales les plus défavorables) Pas de déclenchement de glissement caractérisé pendant les travaux, mais déformations importantes de certaines parties du mur
Parties de l'ouvrage concernées		Surtout la partie centrale, mais aussi les extrémités moins hautes du mur, dans une moindre mesure
Domages observés	non	Grâce au contrôle des niveaux phréatiques, à la technique de construction permettant des ajustements progressifs de la structure et au revêtement secondaire pré-fabriquée du mur, aucun dommage n'a été observé.

IV DISPOSITIF DE CONTROLE ET PROGRAMME DES MESURES

Mesures effectuées	Topographie	réseau de 12 piliers de mesure à l'amont de l'ouvrage plus 2 points de polygonale, et de points de calage dont 3 sur le versant opposé, plus 30 points de détail au sommet des murs ancrés. De plus, nivellements de précision. Précision en plan et élévation ± 0.5 à 1 cm Programme de mesure : 4 degrés de fréquence; les plus fréquentes sont faites une fois par semaine (pour le système d'alarme), dans la zone où le mur est le plus haut; des mesures bi-mensuelles sont faites sur une plus grande longueur du mur, surtout en phase d'excavation: des mesures réduites sont faites tous les deux mois pour définir les déplacements horizontaux et verticaux de tous les points au couronnement et à mi-hauteur du mur, ainsi qu'en tête des inclinomètres; enfin des mesures complètes, une fois par année, se basant non plus sur des piliers de référence de la zone du chantier, mais sur des points de l'autre côté de la
--------------------	-------------	--

Inclinométrie	vallée, permettent de procéder à des corrections et à des compensations des valeurs déterminées Mesures tous les deux mois en moyenne des trois tubes inclinométriques situés en amont du mur, permettant de définir les mouvements horizontaux jusqu'à une profondeur de 40 m Mesure initiale : 18.12.1980 1ère mesure avant travaux : 23.03.1983
Piézométrie	Mesure des niveaux phréatiques dans 11 tubes piézométriques, ainsi que dans les puits filtrants, et mesure de débit des eaux pompées, 1 fois par semaine durant les travaux d'excavation, puis 1 fois tous les 15 jours
Tirants de contrôle	55 tirants équipés comme tirants de contrôle (10 % des tirants permanents). Quelques contrôles déjà pendant les travaux, qu'il est possible de faire ultérieurement pendant l'exploitation de la route, grâce à des évidements dans le parement du mur
Gestion des mesures	Centralisation des données à la Direction des Travaux pendant la construction, où celles-ci sont représentées sous forme graphique, permettent de juger immédiatement de l'évolution de l'ouvrage Six mois après les travaux, les mesures complètes sont terminées et seules des campagnes topographiques tous les cinq ans sont poursuivies, étant donné que les mouvements ont pratiquement cessé dès l'achèvement du mur ancré. Ces mesures sont faites sous la direction du Service des routes nationales.

V PRINCIPAUX RESULTATS DES MESURES

Topographie	Evolution progressive des mouvements, mais surtout au cours de la première année de construction du mur. Une fois les 12 lignes d'ancrages mises en tension, les mouvements se sont pratiquement stabilisés. Les mouvements horizontaux maximum atteignent 6 cm, mais sans qu'il se manifeste de surface de discontinuité dans la distribution des mouvements selon la verticale. Les mouvements verticaux sont très importants et atteignent 20 cm; ceci est dû à l'effet combiné des tassements liés au rabattement de la nappe et à la compression des murs causée par la composante verticale des efforts dans les tirants.
Inclinométrie	Très peu de mouvements jusqu'en août 1983, lorsque 3 lignes d'ancrages sont déjà posées (environ 8 m d'excavation). Les déformations, quoique progressives, augmentent à fin octobre (environ 13 m d'excavation), mais le tube No 1 n'est plus mesurable à mi-décembre; à ce moment, le tube No 2 indique une déflexion totale de

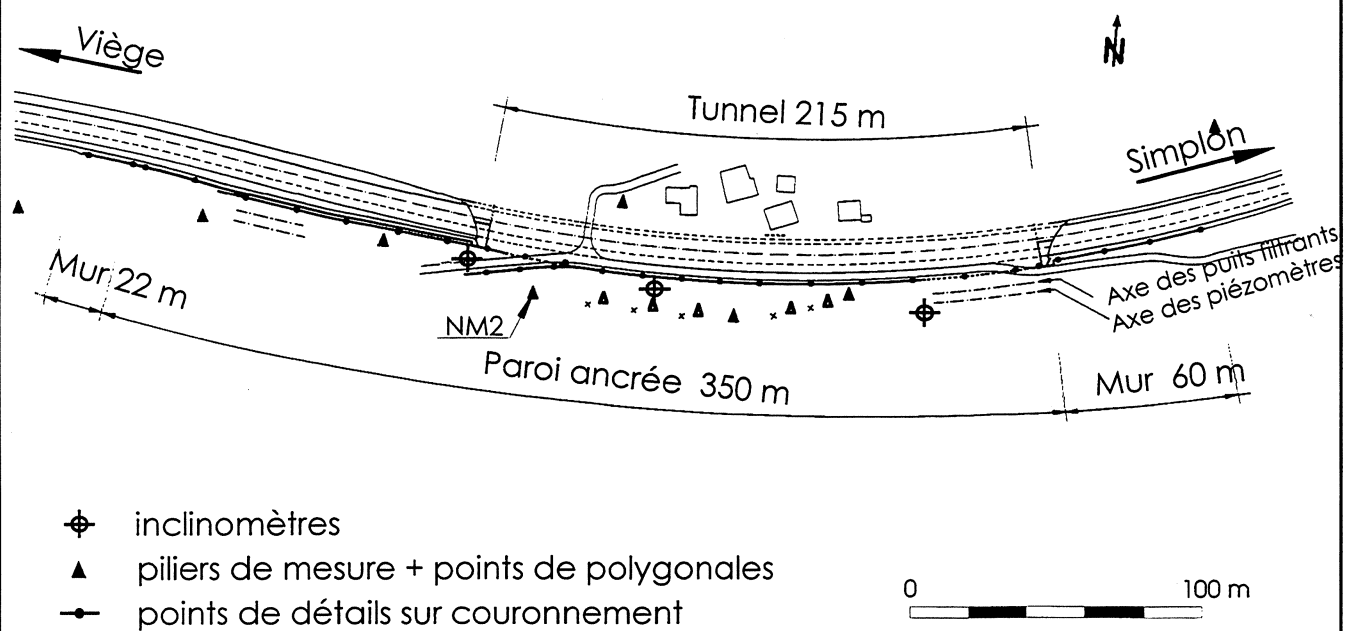
	40 mm lorsque 8 lignes d'ancrages sont posées (16 m d'excavation); elle varie peu au cours de l'hiver. Après l'achèvement des travaux (fin juin 1984), la déflexion totale maximale de 70 mm ne varie pratiquement plus (dernière lecture le 26.05.1986).
Piézométrie	Après l'achèvement des travaux, et grâce à l'effet des drains forés, des nattes de drainage verticales et du drain longitudinal au pied du mur, le niveau de la nappe s'est stabilisé pratiquement au niveau de la route après l'arrêt des pompes. Le mur n'est donc pas soumis à une pression d'eau.

VI COMMENTAIRES SUR LES PRINCIPES D'AUSCULTATION

Evolution des mouvements du terrain	Le comportement de l'ouvrage s'est avéré parfaitement conforme aux prévisions et s'est stabilisé depuis son achèvement. Les mouvements enregistrés par divers techniques sont bien corrélés, une fois que l'on a tenu compte des déplacements de certains points de référence proches du site. Au cours des dernières années, l'ouvrage a confirmé sa stabilité.
Adéquation du système d'auscultation au problème posé	Le système a fourni les données de contrôle nécessaire. Les seuls points à relever sont la nécessité de changer de sonde inclinométrique, ce qui n'a pas permis d'assurer la continuité des observations depuis la mesure initiale, et l'absence de contrôle des tirants après l'achèvement des travaux qui toutefois s'expliquent par l'absence de mouvements, ne justifiant pas un tel investissement.
Programme des mesures futures	
Organisation des mesures et du suivi	Les diverses mesures ont été centralisées au Service des routes nationales qui les a régulièrement exploitées. L'absence de problèmes n'a pas occasionné de réunions de discussion sur les résultats.
Conclusions et recommandations	Auscultation bien organisée, commencée à temps et programmée par campagnes d'ampleur variable; bon suivi de la construction, jusqu'à deux ans après l'achèvement des travaux. Il est souhaitable de contrôler dix ans après les travaux les déformations, les niveaux piézométriques et la tension des tirants.

Références bibliographiques	K. Alpiger, E. Plaschy, E. Recordon, P. Ritz, A. Schmidt, 1985 « Tunnel Gstipf », SIA No 42, pp. 1044-1050
-----------------------------	--

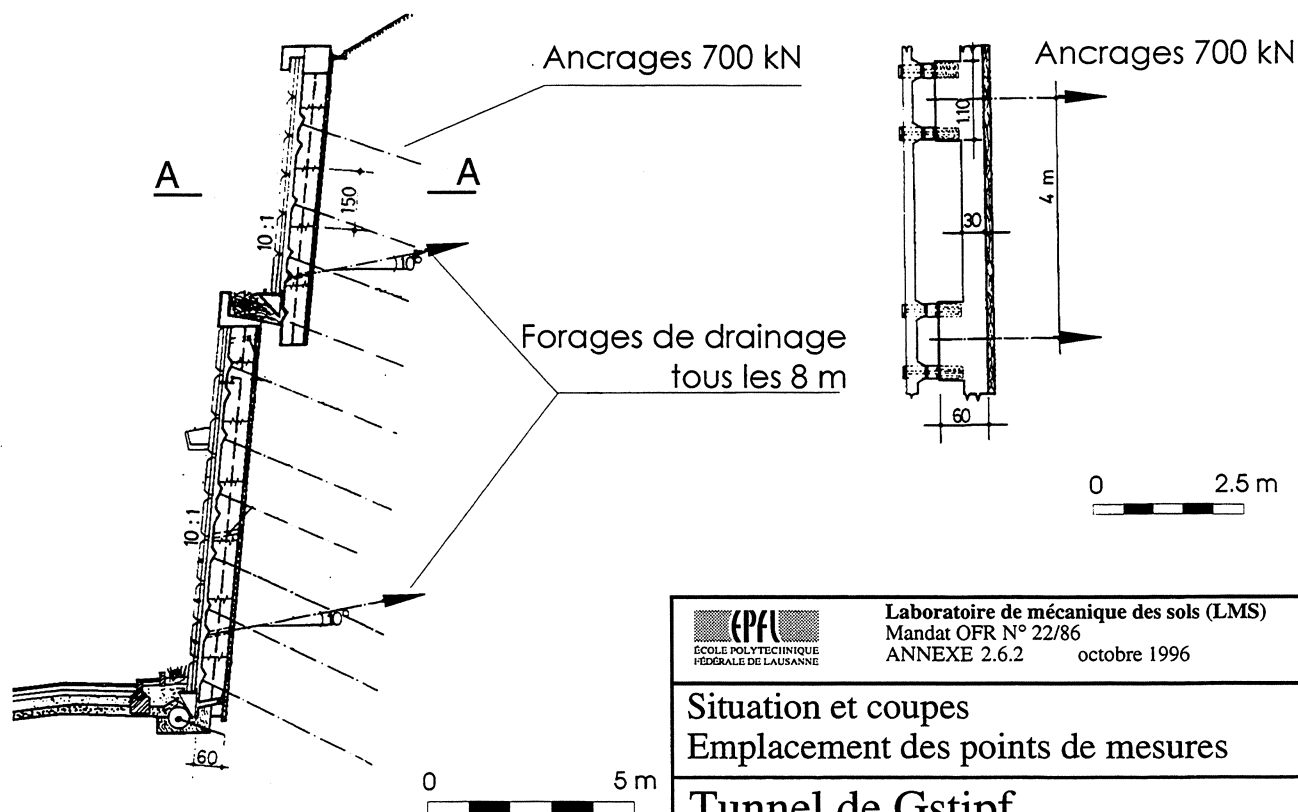
SITUATION



COUPES

Coupe type

Coupe A - A

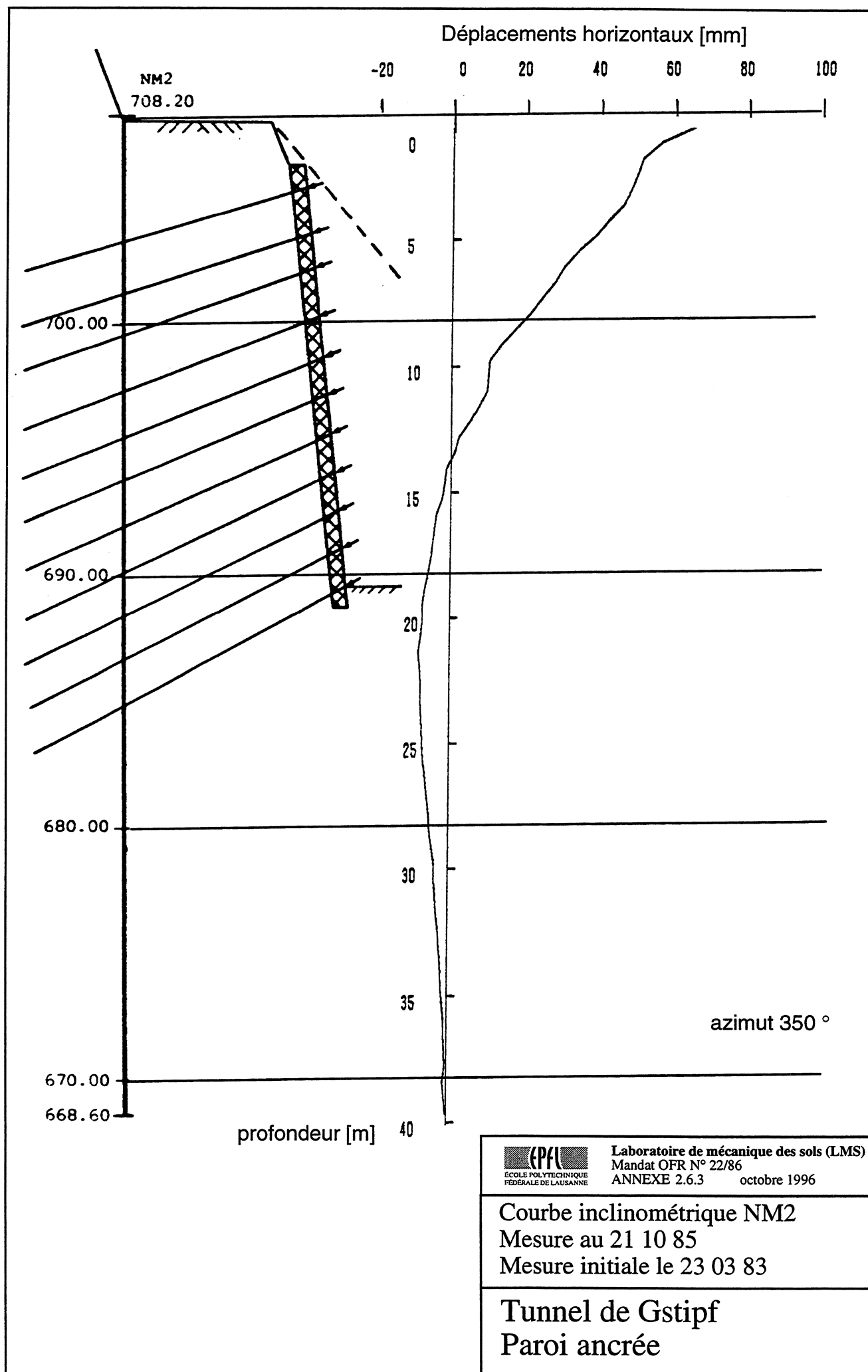


EPFL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86
ANNEXE 2.6.2 octobre 1996

Situation et coupes
Emplacement des points de mesures

Tunnel de Gstipf
Paroi ancrée

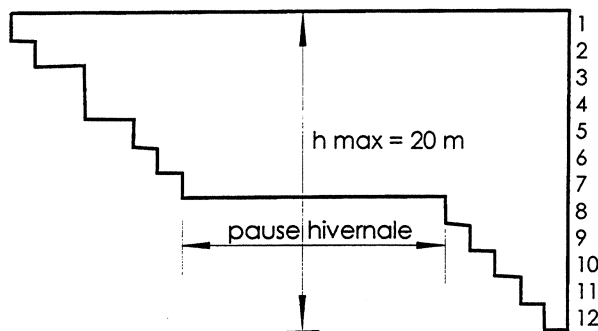


Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86
ANNEXE 2.6.3 octobre 1996

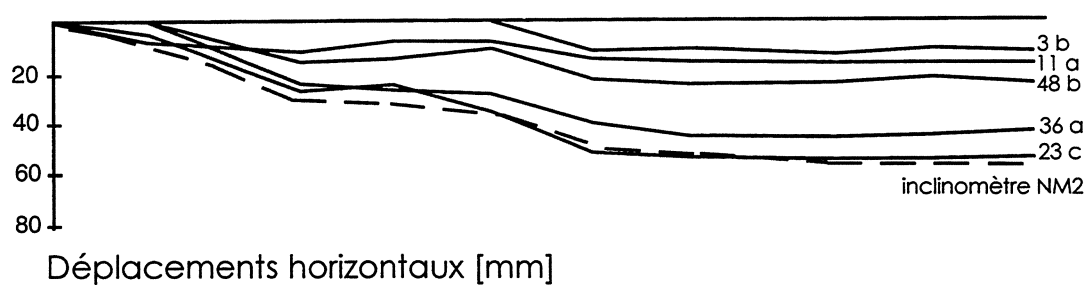
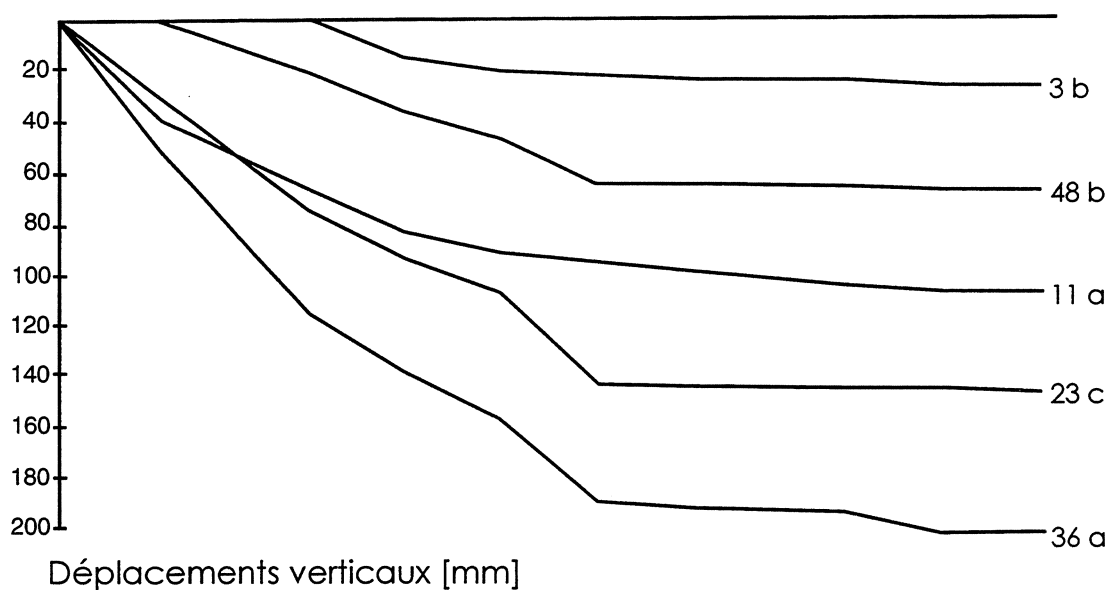
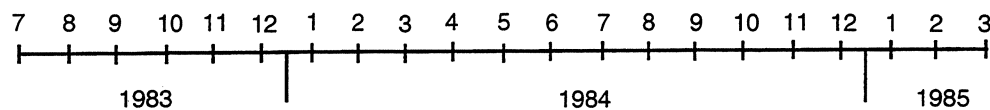
Courbe inclinométrique NM2
Mesure au 21 10 85
Mesure initiale le 23 03 83

Tunnel de Gstipf
Paroi ancrée

Déplacement du couronnement du mur



Nombre de niveaux d'ancrages

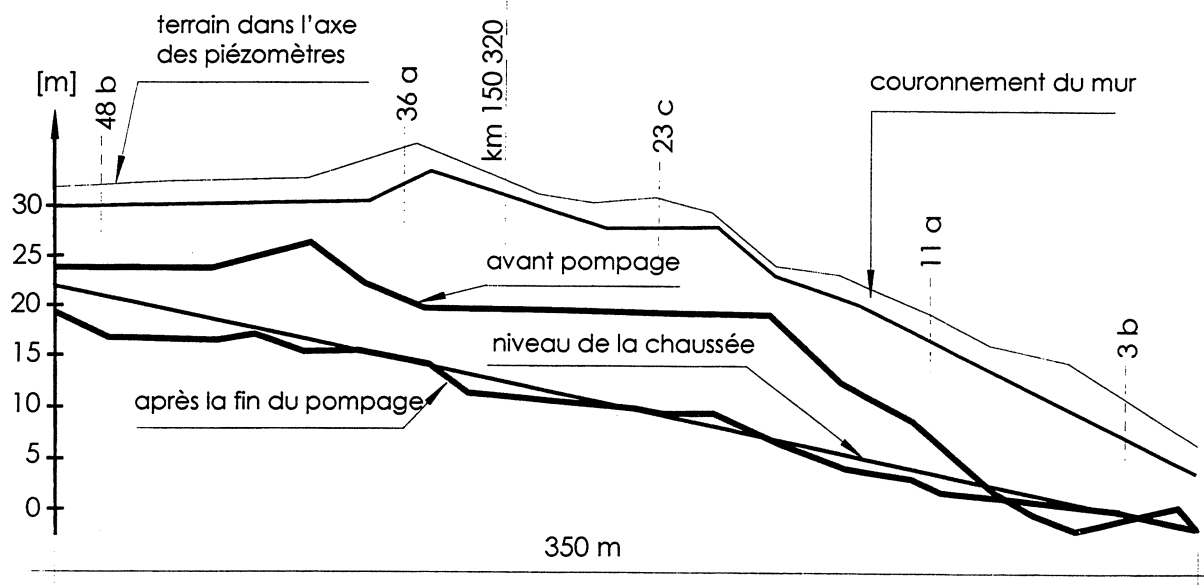


Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86
ANNEXE 2.6.4 octobre 1996

Déplacements du couronnement du mur
en fonction de l'avancement des travaux

Tunnel de Gstipf
Paroi ancrée

Niveau de la nappe dans l'axe des piézomètres



Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86
ANNEXE 2.6.5 octobre 1996

Profil en long de la paroi ancrée
Niveau de la nappe dans l'axe des piézomètres

Tunnel de Gstipf
Paroi ancrée

I IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

Nom		Mur de soutènement ancré adjacent au pont sur la Jogne
Lieu	endroit canton n° RC/RN Coord. féd.	Entrée nord-est de Broc, au lieu-dit Bataille FR 1200 575.030 / 161.680
Maître de l'ouvrage		Département des Ponts et Chaussées, FR
Intervenants	Projet général Géotechnique Géologie	Bureau d'ingénieurs Jacques Gicot, Fribourg
Chronologie	Auscultation Période d'études Période de construction Période d'auscultation	Département des Ponts et Chaussées, FR 1970 - 1972 1971 - 1972 1972, 1974, 1976, 1979, 1983

II DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Type		Mur de soutènement sur le bord aval de la route, ancré à sa base et à mi-hauteur par des tirants obliques scellés dans le rocher en place, et fondé sur pieux
Géométrie du mur	Longueur totale Hauteur maximale Largeur maximale Largeur minimale Fruits amont et aval du mur Hauteur de la semelle Hauteur de la bordure supérieure	83.4 m 9.12 m (du côté de la culée du pont) 1.01 m (sur la semelle) 0.30 m 25.7:1 1.0 m 0.39 m
Ancrages	Nombre de joints (y.c. contre la culée) Ligne inférieure Charge de service maximum Inclinaison Longueur libre Long. de scellement Ligne supérieure Charge de service maximum Inclinaison	10 80 tirants type Stump-Duplex 740 kN 20° à 35° 10 à 13 m 5 à 7 m 41 tirants type Stump-Duplex 740 kN 20° à 37.5°

Longueur libre	12 à 16 m
Long. du scellement	5 à 7 m
Pieux de fondation	Pieux forés ø 110 cm, espacement 1.6 m, longueur variable
Pente moyenne du terrain	36°

III INSTABILITES

Conditions géologiques/ géotechniques Type d'instabilité		Massif marno-calcaire schisteux de Flysch de résistance très médiocre recouvert de limon argileux Pas de mouvement de glissement avant les travaux, mais pente proche de l'équilibre limite. Pas de déclenchement de glissement caractérisé pendant les travaux, mais perte de tension constatée des ancrages sur presque toute la longueur du mur
Dommages observés	non	Aucune déformation observée au niveau du revêtement de la route ou des bordures

IV DISPOSITIF DE CONTROLE ET PROGRAMME DES MESURES

Mesures effectuées	Topographie	Le département des Ponts et Chaussées n'a effectué que des mesures initiales par polygonale et nivellement pour contrôler le comportement de l'ouvrage. Les premières mesures courantes n'ont pas été faites, vu que l'ouvrage ne montrait aucun signe de mouvement. Par ailleurs, il n'existe aucun relevé en profondeur ni d'inclinométrie ni de piézométrie.
	Contrôle des tirants	Après la mise en tension des tirants, entre décembre 1971 et février 1972, 5 campagnes de vérification de la tension des 11 tirants de contrôle, plus une lecture des jauges de contrainte équipant 4 tirants ont été effectués entre 1973 et 1983. 7 tirants de contrôle se situent sur la rangée supérieure, et 4 sur la rangée inférieure; ils sont injectés sur leur longueur libre par une graisse spéciale. La lecture avec les jauges de mesure Majak n'a été faite qu'une fois, car les résultats étaient trop différents de ceux obtenus par mise en tension. La précision des mesures lors de mise en tension est de l'ordre de 20 à 30 kN.

V PRINCIPAUX RESULTATS DES MESURES

Contrôle des tirants	La grande majorité des tirants ont déjà mis en évidence, lors de la 1ère mise en tension, des déformations dépassant largement le domaine élastique, de sorte qu'ils ont presque tous été tendus bien en dessous des valeurs maximales de service : six tirants de contrôle de la rangée supérieure avaient une tension initiale moyenne de 440 kN et les 4 tirants de la rangée inférieure, une tension initiale moyenne de 640 kN. De plus, la tension de pratiquement tous les tirants de la rangée supérieure a été réduite lors du contrôle du 15 décembre 1976 de 400 à 350 kN. Dans ces conditions, il est observé une baisse naturelle de tension de 7 tirants sur 11, variant de 8 à 18 %, alors que 4 tirants ont maintenu constant leur effort. De plus, la tendance à la stabilisation s'est manifestée pendant 7 ans au moins.
----------------------	---

VI COMMENTAIRES SUR LES PRINCIPES D'AUSCULTATION

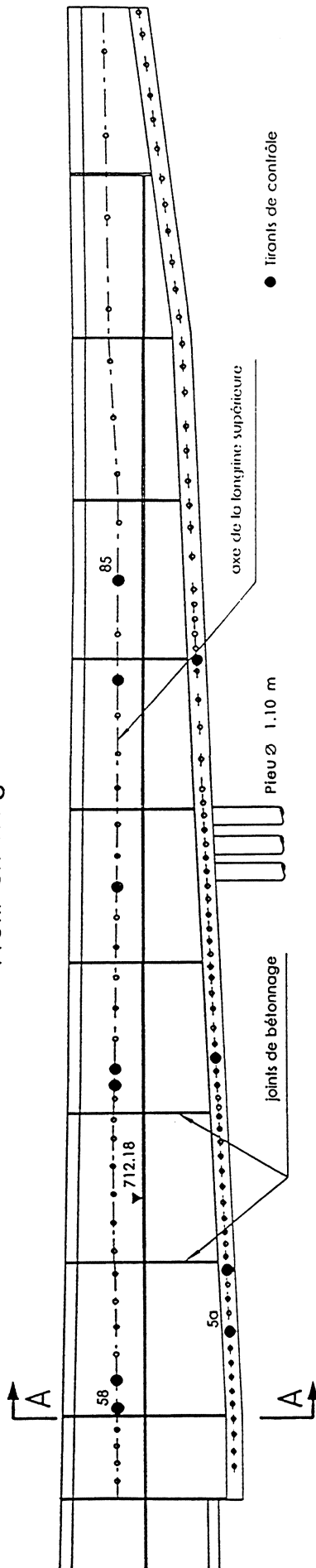
Evolution des mouvements du terrain	A défaut de mesure, on peut seulement relever qu'aucune déformation visible ne se manifeste
Adéquation du système d'auscultation au problème posé	L'élément essentiel pour apprécier la sécurité de la structure est le contrôle de la tension des ancrages, qui a été bien fait au cours des 10 premières années de la vie de l'ouvrage, mais plus depuis juillet 1983. Le système de contrôle des mouvements ne peut être évalué puisqu'aucune lecture courante n'a été faite. Enfin, il n'y a pas de contrôle piézométrique (mais il est possible que dans ce versant raide, les poussées d'eau soient négligeables).
Programme des mesures futures	Il n'est pas programmé de contrôle de l'ouvrage dans les prochaines années.
Organisation des mesures et du suivi	Le fait de ne pas mandater un bureau pour le contrôle géométrique et de donner un mandat limité à un bureau de géotechnique pour les contrôles de tirants a conduit à n'avoir aucun résultat d'auscultation fiable depuis 13 ans. Compte tenu des conditions géologiques défavorables, cette situation n'est pas correcte et ne correspond pas aux nouvelles normes de contrôle périodique.
Conclusions et recommandations	Il est vivement recommandé de procéder à un contrôle complet de l'ouvrage, du point de vue des mouvements et des tensions des ancrages, et d'examiner les résultats de ces contrôles avec le projeteur de l'ouvrage.

Références
bibliographiques

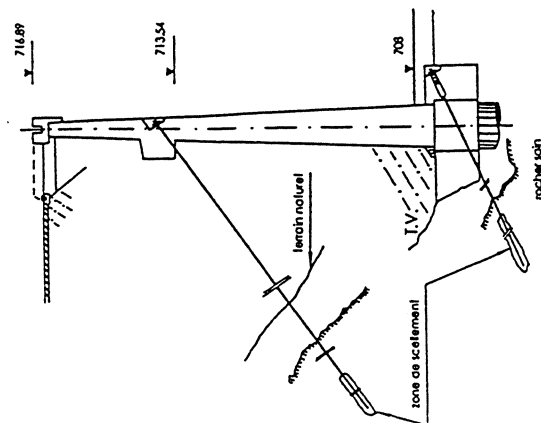
Gicot, O., 1983. Pont sur la Jogne, Mur de soutènement côté Bataille; rapport sur le contrôle des tirants d'ancrage précontraints. Sol-technique (rapport privé G11).

Cette fiche a été révisée par l'auteur du rapport ci-dessus, ainsi que par le Département des Ponts et Chaussées, qui ont aimablement formulé verbalement quelques remarques pertinentes.

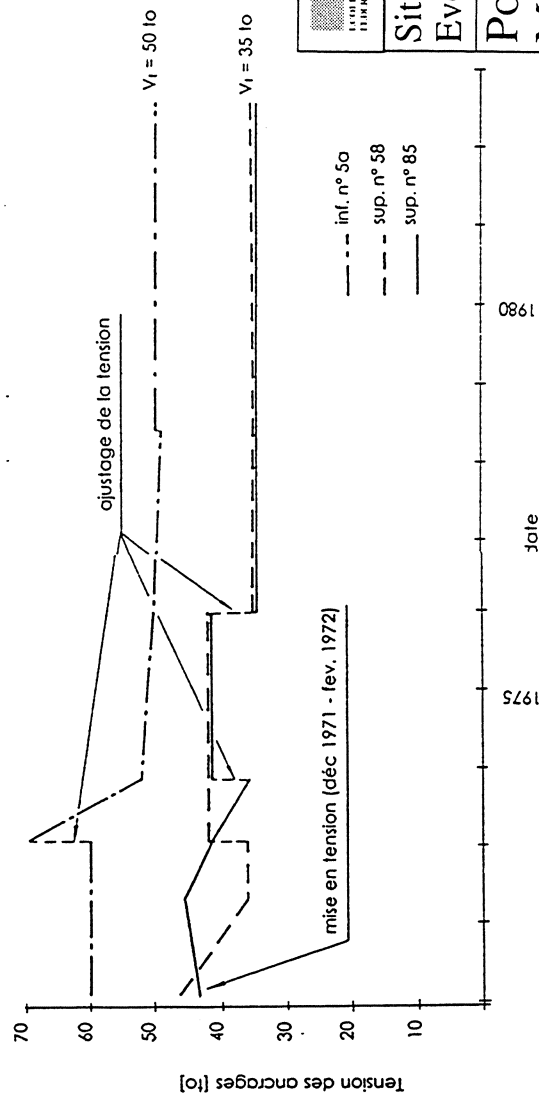
Profil en long 1:200



Coupe A-A 1:100



Evolution des tensions d'ancrages



I IDENTIFICATION DE L'OUVRAGE

Nom		Murs de soutènement ancrés du secteur Sylans-Neyrolles
Lieu	endroit	Au lieu-dit Les Vignettes, à 2 km à l'est de Nantua
	département	Ain (F)
	n° RC/RN	A 40
	Coord. franç. km	855.950 / 132.900
		117 (profils 700 - 715 : tronçon représentatif choisi)
Maître de l'ouvrage		Société des Autoroutes Paris - Rhin - Rhône
Intervenants		Scetauroute, Agence Rhône-Alpes
Chronologie	Période d'études	1977 - 1982
	Période de construction	1983 - 1985
	Période d'auscultation	1978 - 1995 (dossier de synthèse : 1986)

II DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

Type		Succession de murs ancrés, exécutés en sous-oeuvre et formés de poutres horizontales, et de massifs de terre armée, recouverts d'un parement de panneaux préfabriqués
Géométrie du mur	Longueur totale	300 m (pour le tronçon concerné)
	Longueur des poutres	30 m (sans joint)
	Hauteur totale	23 m (pour 3 murs étagés au profil 709)
	Espacement vertical des poutres	2.5 m
	Hauteur maximale des poutres	2.0 m
	Epaisseur maximale des poutres	0.9 m
	Hauteur max. des murs en terre armée	7.4 m (profil 709)
	Largeur max. des murs en terre armée	7.0 m (profil 708)
Ancrages	Un niveau par poutre	6 à 15 tirants de 500 à 900 kN par poutre
	Inclinaison	5° à 12°
	Longueur libre maximale	30 m

Nombre total d'ancrages entre Sylans et Neyrolles	1800
Pente moyenne du terrain	30°

III INSTABILITES

Conditions géologiques/ géotechniques		Pentes recouvertes d'éboulis à blocs, peu à moyennement argileux, contenant par endroits des paquets de marnes ou de calcaires glissés. Le substratum dont proviennent ces éboulis est principalement formé d'une alternance de calcaires roux en plaquettes et de calcaires marneux gris. Les pentes d'éboulis sont en état proche de la limite d'équilibre. Les angles de frottement interne effectifs des éboulis varient de 30° à 35°, alors que la cohésion effective est considérée comme nulle.
Type d'instabilité		Les observations géodésiques et photogrammétriques faites pendant les cinq ans précédant les travaux n'ont pas mis en évidence de mouvements. Grâce aux techniques de reprises en sous-oeuvre et aux efforts d'ancrage importants, aucun mouvement significatif d'ensemble n'a été perçu par inclinométrie pendant les travaux. Par contre des instabilités locales sont apparues liées à l'exécution en sous-oeuvre ou à des tassements, suite à la consolidation des éboulis. Il faut noter actuellement une grande stabilité de l'ensemble des ouvrages.
Dommages observés	oui	Plusieurs fissures sont apparues dans les poutres ancrées, suite à des déformations incompatibles avec les conditions de continuité et de rigidité de ces structures. La largeur des fissures est de l'ordre de 0.1 à 0.5 mm. Certaines se sont manifestées après la remise en tension de certains tirants. De plus quelques venues d'eau sont apparues, notamment entre les profils 711.5 à 713.5 à la base du mur ancré supérieur. Les dommages signalés concernent une partie mineure de l'ensemble des ouvrages.

IV DISPOSITIF DE CONTROLE ET PROGRAMME DES MESURES

Mesures effectuées	Topographie	Des contrôles des déplacements en surface à l'amont et à l'aval de l'autoroute sont faits par des campagnes de triangulation de précision, une fois par an. De plus, un suivi par mesures de distances au Mékomètre depuis le versant opposé a été mis en oeuvre après la fin des travaux. Les têtes des inclinomètres sont incluses dans le réseau de mesure de surface.
	Inclinométrie	Dans le secteur concerné, 3 tubes inclinométriques de 14.5 à 19 m de longueur (sur les 10 du tronçon complet Sylans-Neyrolles) font l'objet de mesures deux fois par an, malgré les difficultés de mise en oeuvre de certaines mesures (accès à partir de l'autoroute).
	Contrôle des tirants	Comme il a été décidé de cacheter les têtes d'ancrage par des parements en panneaux préfabriqués après stabilisation de la tension, un nombre assez important d'ancrages (7 % du total) a été équipé de cales dynamométriques; les deux modèles utilisés sont les cales Télémac à capteurs inductifs et les cales hydrauliques Glötzl à mesure par soupape. Avant le cachetage définitif, un contrôle de la tension par vérin a été effectué afin de compenser un éventuel fluage des sols d'appui des poutres. Les mesures d'auscultation régulière sont prévues tous les deux mois. Pour pallier au risque de fonctionnement incorrect à long terme de ces cales, le tirant voisin de chaque tirant muni d'une cale a été équipé d'une tête filetée permettant de contrôler sa tension au vérin; pour ce faire, les panneaux du parement disposent à cet endroit d'une fenêtre permettant cette remise en tension sans enlever le panneau.
	Drainage	Des contrôles bi-annuels des débits de drainages sont effectués dans les endroits où des venues d'eau avaient été observées pendant la construction et où des barbacanes ont été réalisées.
	Structures en Terre Armée	Pour contrôler la fiabilité des massifs de Terre Armée, des témoins de corrosion des armatures sont contrôlés une fois tous les dix ans.
	Mouvements des falaises dominantes	Dans les falaises des Cheminées dominant le secteur considéré, formées de dalles subverticales, deux grands secteurs menaçant, de 600 et 2000 m ³ , sont contrôlés par des mesures annuelles d'écartement de repères et par une inspection de l'état des fissures.
	Gestion des mesures	Après la fin des travaux, un premier programme de surveillance sur deux ans a été mis sur pied par le gestionnaire de l'autoroute. Pour les mesures

topographiques, il est prévu de faire appel à des sociétés privées équipées d'instruments performants. La Société Scetauroute effectue toutes les autres mesures et veille à leur interprétation et à leur exploitation. Seul le contrôle des falaises dominant l'autoroute requiert des spécialistes (CETE de Lyon).

Les mesures des premières années sont synthétisées dans un dossier très complet qui donne tous les principes des systèmes d'auscultation et les résultats des mesures.

Le premier plan de surveillance a finalement été poursuivi cinq ans après la mise en service, pour permettre d'acquérir suffisamment de mesures afin de caler les coefficients de la méthode d'interprétation. A l'issue de ce plan de surveillance, un nouveau plan sur une durée de cinq ans a été établi.

V PRINCIPAUX RESULTATS DES MESURES

Topographie	Tous les contrôles effectués n'ont pas détecté de mouvements significatifs (> 5 mm). Quelques mouvements localisés se sont produits pendant les travaux, mais les remises en tension des tirants les ont arrêtés.
Inclinométrie	Les mesures inclinométriques n'ont pas décelé de mouvements.
Contrôle des tirants	Après la première mise en tension, quelques tirants ont montré une légère perte de tension, en particulier dans la zone des Vignettes, mais en quelques mois elle s'est stabilisée, suite à la consolidation des éboulis et après une remise en tension finale, les efforts d'ancrage n'ont pratiquement pas évolué, si ce n'est selon un cycle annuel, qui peut être dû à la sensibilité des cellules hydrauliques aux variations thermiques.
Drainages	Les venues d'eau principales sont localisées en trois points à la base du mur ancré 30 Ouest, correspondant à des circulations au toit du substratum calcaire. Les débits enregistrés correspondants sont respectivement de 60, 8 et 12 l/min.

VI COMMENTAIRES SUR LES PRINCIPES D'AUSCULTATION

Evolution des mouvements du terrain	A ce jour, il ne s'est pas produit de mouvement significatifs dans le versant.
Adéquation du système d'auscultation au problème posé	Le système est parfaitement adapté aux nécessités du projet et aux conditions géologiques. Le poids donné au contrôle des tirants d'ancrage qui sont l'élément-clé du concept de stabilisation se justifie pleinement, ceci d'autant plus que ces mesures sont aisées.

Programme des mesures futures	Après une première phase d'auscultation de 5 ans, le plan initial a été réévalué pour définir les mesures les plus nécessaires. Le volume des mesures a été globalement divisé par deux; certains capteurs sont abandonnés, alors que pour d'autres, la fréquence est diminuée. Vu l'absence de mouvements, les mesures de distance au Mékomètre sont les observations les moins coûteuses pour contrôler régulièrement la stabilité des ouvrages. Les autres mesures topographiques ont été abandonnées. Il n'apparaît pas nécessaire de préconiser des mesures complémentaires à celles présentées dans le plan d'auscultation de 1986. A titre d'entretien, l'ensemble des mesures est effectué tous les deux ans.
Organisation des mesures et du suivi	La centralisation de la plupart des mesures, effectuées par Scetauroute, facilite l'interprétation des résultats, ceci d'autant plus que l'expérience de l'auscultation concerne un tracé de près de 50 km en terrain difficile. L'élaboration des dossiers d'auscultation, très complets, garantit une bonne vision d'ensemble du comportement des ouvrages. Il est important de donner un terme à chaque plan de surveillance afin qu'il puisse être réévalué, et éviter ainsi de tomber dans la routine qui peut conduire à l'abandon.
Conclusions et recommandations	Cet exemple montre un plan tout à fait réussi de suivi d'ouvrages complexes depuis leur construction jusqu'à leur exploitation courante. Les éléments contribuant le plus à la sécurité des ouvrages, soit les tirants, sont régulièrement mesurés et les données sont bien gérées par un modèle d'interprétation du comportement des ouvrages conçu par EDF.
Références bibliographiques	Dossier de surveillance du secteur Sylans-Neyrolles de l'Autoroute A40 préparé par Scétauroute, mai 1986 Y. Guerpillon, 1996. Surveillance à long terme des ouvrages, Document de cours de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées sur le contrôle des travaux de géotechnique, Paris, 38 p. Y. Guerpillon, 1996. Le contrôle et le suivi des soutènements et des ancrages, Documents de cours de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées sur le contrôle des travaux de géotechnique, Paris, 18 p. <i>Cette fiche a été révisée par la Division géomécanique de la Société Scetauroute, qui a aimablement formulé plusieurs remarques pertinentes et actualisé l'information disponible.</i>

SECTEUR SYLANS - NEYROLLES MURS DE SOUTÈNEMENT ANCRES

PLAN D'ENSEMBLE

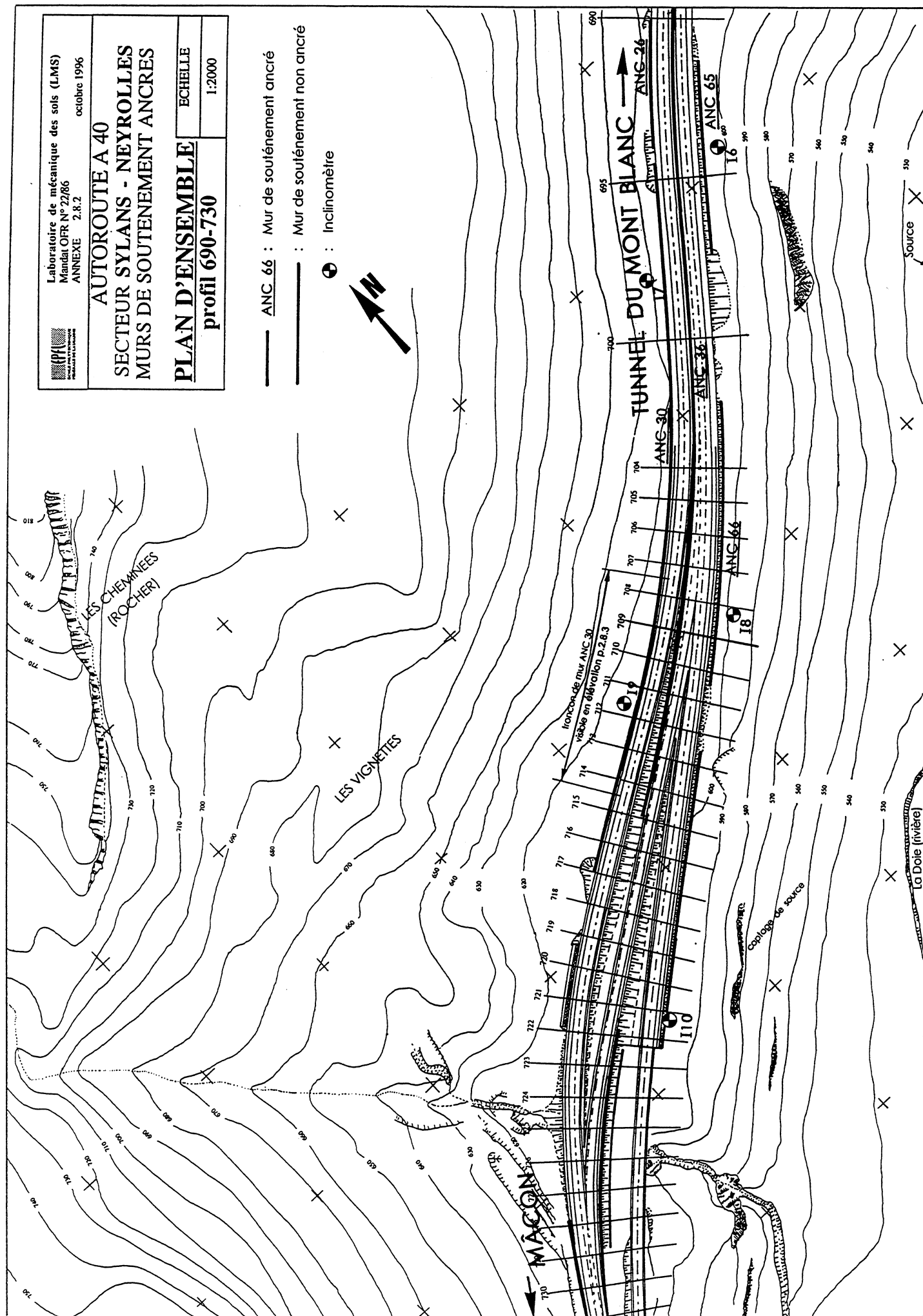
ECHELLE

1:2000

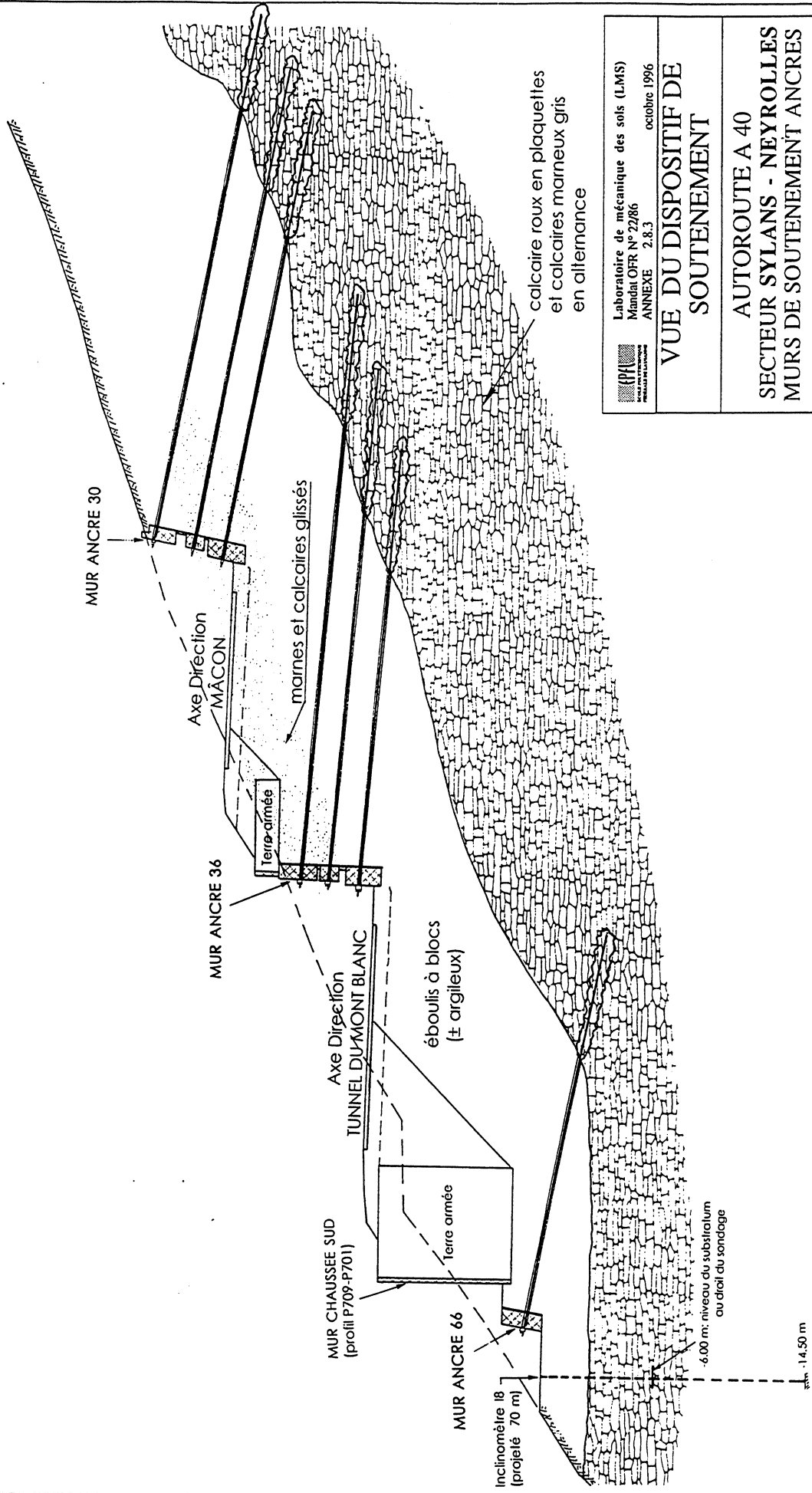
ANC 66 : Mur de soutènement ancré

: Mur de soutènement non ancré

⊕ : Inclinomètre

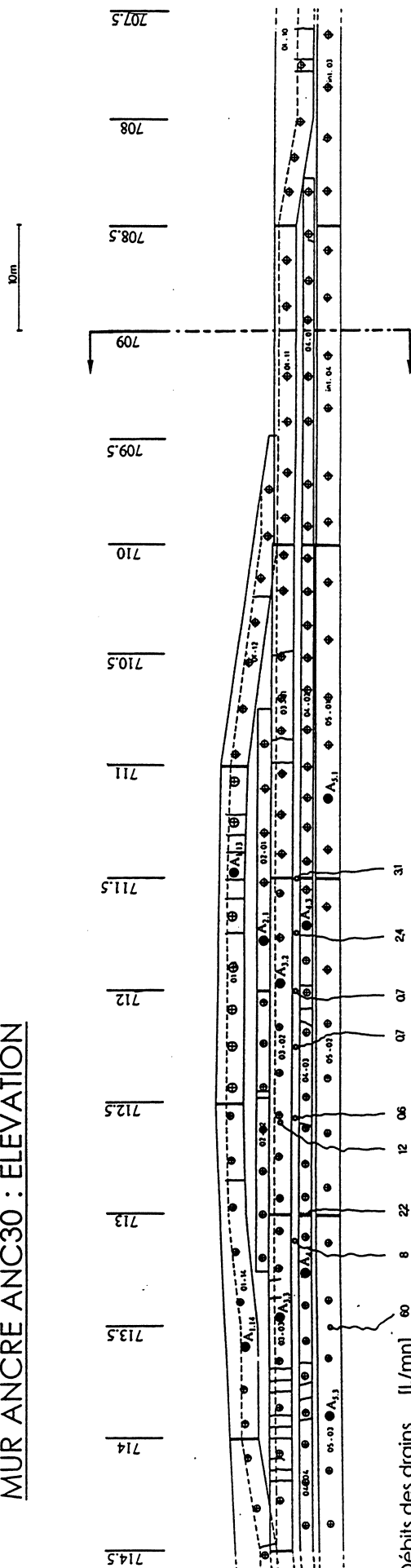


PROFIL P709 1:200



 Laboratoire de mécanique des sols (LMS) Mandat OFR N° 22/86 ANNEXE 2.8.3	VUE DU DISPOSITIF DE SOUTÈNEMENT	
	AUTOROUTE A 40 SECTEUR SYLANS - NEYROLLES MURS DE SOUTÈNEMENT ANCRES	
PROFIL P709		ECHELLE 1:200

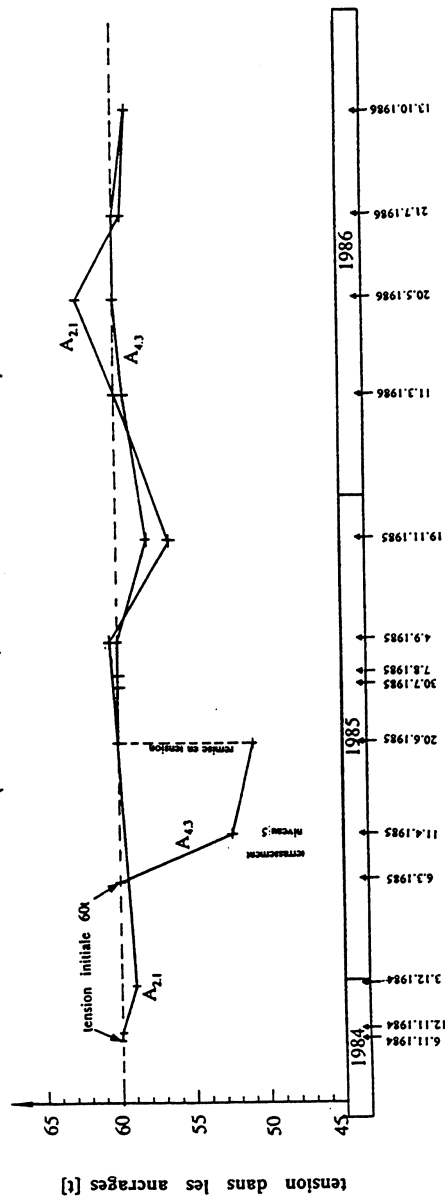
MUR ANCRE ANC30 : ELEVATION



Débîts des drains [L/mn]
après construction et
période d'intempérie 24.1.86

- ◆ : Ancrages
- : Tirants de contrôle

EVOLUTION DE LA TENSION DANS LES ANCRAGES (2cas: avec/sans remise en tension)



Laboratoire de mécanique des sols (LMS)
Mandat OFR N° 22/86
ANNEXE 2.8.4 octobre 1996

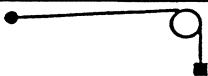
SYSTEME AUSCULTATIF
Débits des drains (24.1.86)
Relevé de fissuration
Evolution de la tension dans les ancrages

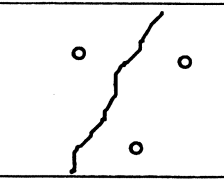
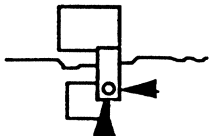
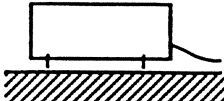
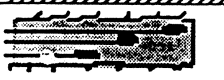
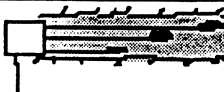
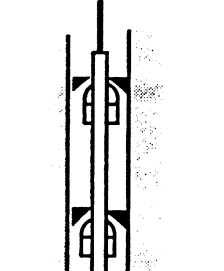
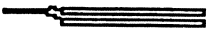
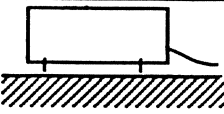
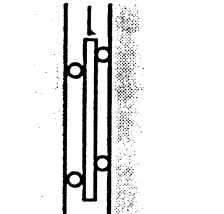
AUTOROUTE A 40
SECTEUR SYLANS - NEYROLLES
MURS DE SOUTÈNEMENT ANCRÉS

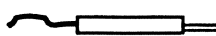
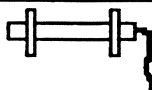
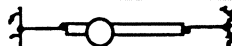
MUR ANCRE ANC30
Tronçon P707.5 - P714.5
ELEVATION

ANNEXE 3 - DISPOSITIFS D'AUSCULTATION

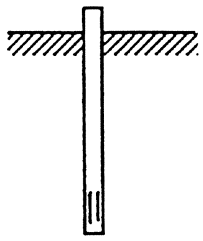
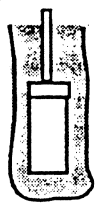
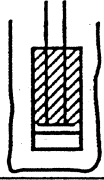
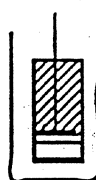
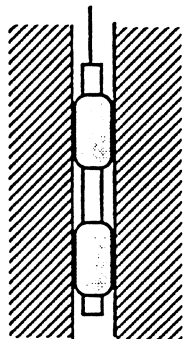
I. MESURE DES DÉPLACEMENTS

Appareil	Schéma	Grand- eur mesurée (directe- ment ou non)	Précision	Commentaire
Oeil humain			?	Indispensable
Niveau		Δz	1-2 mm	Choix du point fixe important; simplicité; pas automatique; problèmes réfraction
Niveau de précision		Δz	1/10 mm	
Niveau digital		Δz	1/10 mm	Acquisition automatique possible
Niveau motorisé		Δz	1/10 mm	Possibilité de viser automatiquement plusieurs points
Théodolite		$\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta l$	1 mm	Souplesse utilisation; résultats indirects (calculs); mesure manuelle par pers. qualifié; lent
Théodolite motorisé		$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	1 mm	Automatisation des mesures
Distancemètre électronique		Δl	1 mm	Mesure à distance; influence réfraction
Distancemètre laser (interférométrie)		Δl	1 mm	Visualisation point laser sur surface plate nécessaire; dist. max 0-10 m
GPS (global positioning system)		$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	dépend du système, au mieux 10 mm	Mesure rapide; indépendant météo; problème en zones « cachées »
Fil à plomb		dévi- ation verticale	2 mm	Simple; mesure relative
Fil invar		Δl	10 mm	Grandes distances (100 m); mesure automatique

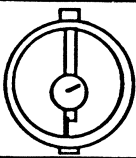
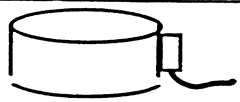
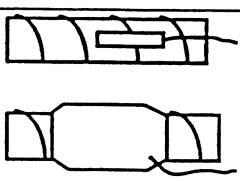
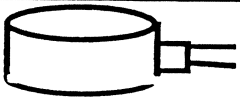
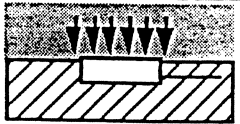
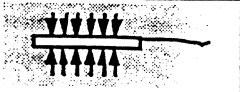
Appareil	Schéma	Grandeur mesurée (directement ou non)	Précision	Commentaire
Témoin de fissure (verre ou plâtre)		-	-	Pour visualiser la réactivation de fissure existante; pas de mesure quantitative
Témoin de fissure 2D		$\Delta s_x, \Delta s_y$	1/10 mm	Simple et très bon marché; lecture manuelle
Témoin de fissure 3D		$\Delta s_x, \Delta s_y, \Delta s_z$	1/10 mm	Automatisation possible
Géophones		vitesse particulaire	0.1 mm/s	Mesure de vibrations; acquisition automatique;
Extensomètre à tiges		Δl	1/10 mm	Robuste; accès au point de mesure?; lecture manuelle
Extensomètres à tige, tête électrique		Δl	1/10 mm	Mesure automatique; fragilité tête électronique
Extensomètre coulissant (Gleitmikrometer ISETH)		Δl	1/100 mm	Accès au tube de mesure?; lecture manuelle et lente; très robuste
Extensomètre à fibre optique		Δl	1/100 mm	Nouveau; économique; fixé dans structure; comportement très long terme?
Clinomètre (électro-nivelle)		variation d'angle	1/100 mm par m	Pour murs et bâtiments; automatisation possible
Inclinomètre		angle; déplacement par intégration	0.2 mm/m	Lecture manuelle; automatisation des mesures possible (inclinomètre fixe)

Appareil	Schéma	Grand- eur mesurée (directe- ment ou non)	Précision	Commentaire
Extensomètre- inclinomètre (Trivec)		$\Delta\Delta x$, $\Delta\Delta y$, $\Delta\Delta z$,		Combine extensomètre coulissant et inclinomètre; mesure manuelle et lente
Comparateur		Δl	1/100 mm	Simplicité; accès au point de mesure?; lecture manuelle
Comparateur électronique		Δl	1/100 mm	Lecture automatique possible
Jauge de déformation (résistance, corde vibrante, induction)		Δl	1/100 mm	Fixé à l'armature; automatique; comportement très long terme?
Distomètre à fil invar (appareil ISETH)		Δl	1/10 mm	Pas automatique; accès aux points de mesure?; stockage des fils invar; l = 0-10 m
Tassomètre		Δz	5 mm	Principe des vases communiquants; acquisition automatique possible (capteurs pression)

II. MESURE PIÉZOMÉTRIQUE

Appareil	Schéma	Grand- eur mesurée (directe- ment ou non)	Précision	Commentaire
Puits d'observation ou tube piézométrique	Tuyau perforé 1-2" 	hw	1 cm	Simple, facile à mettre en place, lecture facile possibilité d'équiper avec mesure automatique; résultat de faible qualité (mesure non ponctuelle); temps de réponse très longs
Piézomètre à surface libre	Tête-filtre et tuyau 1/4" 	hw	1 cm	Fiable, grande expérience, lecture facile, existe sous forme de piézo. battu; grand temps de réponse, colmatage du filtre possible
Piézomètre pneumatique		u	0.1 kPa	Robuste, temps de réponse court; lecture manuelle et lente; pas de prélèvement d'eau possible; système lourd
Piézomètre électrique	résistance, piézoélectrique ou corde vibrante 	u	0.05 kPa	Lecture précise; acquisition automatique possible; temps de réponse très court; $u < 0$ possible (sols non sat.); pas de prélèvement d'eau possible; sensible à foudre
Piézomètres multipoints		u		Plusieurs points de mesure; mise en place complexe, lecture manuelle

III. MESURE DE FORCE ET PRESSION

Appareil	Schéma	Grand- eur mesurée (directe- ment ou non)	Précision	Commentaire
Anneau dynamométrique		force F , max 2000 kN	1 %	Lecture automatique possible par comparateur électronique
Cellule mécanique, disque mécanique	Divers modèle, même idée que l'anneau dynamomé- trique	F		En général, lecture manuelle
Pesons (avec jauge résistance ou corde vibrante); cellule de force		force F		Nombreux types, . formes, charge max; lecture automatique possible
Cellules électriques de déformation		F		Collées sur clous, armature, etc. Force calculée à partir de la déformation (connaissance de EA nécessaire)
Cellule à pression hydraulique		F	1%	A été utilisé pour contrôle force ancrage, ou force en pointe de pieu (vérin plat)
Cellule à diaphragme pour mesure pression de sol/roche sur ouvrage		p		Souvent sur- ou sous- estimation des pressions (la cellule modifie le champ de contraintes)
Cellule à diaphragme pour mesure pression dans le sol		p		Différents systèmes (pneumatique, hydraulique, électrique); corde vibrante souvent préférée

