Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau

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

Dipartimento federale dei trasporti, delle comunicazioni e delle energie
Ufficio federale delle strade

Comportement des fondations d'ouvrage d'art

Rapport final: Etude générale des fondations de 16 ouvrages routiers

Verhalten der Gründungen von Kunstbauten

Schlussbericht: Allgemeine Untersuchung der Gründungen von 16 Bauwerken

Laboratoire de mécanique des sols de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Bureau de Construction des Autoroutes, Lausanne
Bureau J.-C. Ott, Thônex

Mandats de recherche 05/80 et 05/82 sur proposition de l'Union des professionnels suisses de la route

Juni 1992

DEPARTEMENT FEDERAL DE L'INTERIEUR

OFFICE FEDERAL DES ROUTES

COMPORTEMENT DES FONDATIONS D'OUVRAGES D'ART

Etude générale des fondations
de 16 ouvrages routiers

Résultats des mesures,
interprétations et conclusions

GY19 Mars 1991

Institut des Sols, Roches et Fondations de
l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Bureau de Construction des Autoroutes, Lausanne

Bureau J.-C. Ott, Thônex

Travail de recherche No 5/82
sur proposition de l'

UNION DES PROFESSIONNELS SUISSES DE LA ROUTE (VSS)

Mars 1991

RESUME

Par l'observation d'ouvrages d'art situés dans des terrains instables ou très déformables, cette recherche devait permettre d'évaluer l'efficacité des fondations réalisées et des moyens de contrôle mis en place.

Un premier rapport contient la description de seize réalisations. Les caractéristiques principales de la superstructure, des fondations et du terrain y sont brièvement présentées. Le comportement jusqu'au début de cette étude y est analysé sur la base des mesures existantes.

Des équipements complémentaires ont été posés pour certains ouvrages.

Tous ces ouvrages se comportent bien. C'est dire que les mesures de déplacement ont confirmé leur immobilité relative, c'est-à-dire que les très faibles mouvements observés sur certains ouvrages correspondent bien à ceux qui avaient été prévus lors de la construction.

L'étude a montré qu'il est souvent insuffisant de se limiter à faire des contrôles à l'aide d'un seul système de mesures. Il est indispensable de diversifier les types de mesures lors de la conception d'un système de contrôle afin de garantir un suivi suffisant des ouvrages.

Nous sommes d'avis qu'actuellement, la maintenance des voies de circulation nécessite la définition d'une politique de contrôle de tous les ouvrages. C'est ce que nous proposons de faire ces prochains temps, au moins en ce qui concerne les fondations.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Forschungsarbeit sollte erlauben, die Fundationen von Kunstbauten auf unstabilen oder leicht verformbaren Böden zu untersuchen sowie den Wirkungsgrad der eingesetzten Kontrollvorrichtungen zu ermitteln.

Ein erster Bericht beschreibt sechzehn Bauwerke. Die wichtigsten Daten von Oberbau, Fundament und Boden sind aufgezeichnet. Das Verhalten bis zum Zeitpunkt dieses Berichtes wird anhand der bestehenden Messwerte analysiert.

Für einige Bauwerke wurden zusätzliche Vorrichtungen angeordnet.

Sämtliche dieser Kunstbauten verhalten sich gut. Die Verschiebungsmessungen haben ihre relative Immobilität bestätigt, d.h. die sehr geringen Bewegungen, welche an manchen Kunstbauten beobachtet wurden, entsprechen den während des Baues vorhergesagten Werte.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass es oft ungenügend ist, Kontrollen anhand eines einzelnen Messsystems durchzuführen. Während des Entwurfs eines Kontrollsystems ist es unerlässlich, die Messarten zu diversifizieren, damit eine ausreichende Kontrolle gewährt ist.

Wir sind der Meinung, dass heutzutage der Unterhalt der Strassen die Definition einer Kontrollpolitik aller Bauten benötigt. Dies werden wir in der nächsten Zeit vornehmen, wenigstens was die Fundamente anbelangt.

1. INTRODUCTION

1.1 Motif et buts de la recherche

Depuis 25 ans, il a été construit en Suisse un nombre considérable d'ouvrages d'art, dont beaucoup sont implantés dans des terrains de fondation réputés instables.

L'importance de ces ouvrages, dont la plupart appartiennent au réseau des routes nationales, et la valeur très élevée du capital investi ont conduit les maîtres d'oeuvre et les ingénieurs responsables des projets à exécuter des reconnaissances géotechniques très complètes, surtout dans les sites les plus instables.

Les dispositions adoptées pour la conception et la réalisation des fondations de ces ouvrages d'art sont basées sur les résultats des prospections et sur les connaissances des projeteurs dans le domaine de la technique des fondations à l'époque de la réalisation de ces constructions.

Les Laboratoires de mécanique des sols (LMS) et des roches (LMR) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) ont pensé qu'il était indispensable d'étudier le comportement d'un certain nombre d'ouvrages d'art placés en terrain instable, dans le but de rédiger des recommandations à l'usage des ingénieurs-projeteurs et des maîtres d'oeuvre responsables de l'entretien et de la sécurité.

Par la même occasion, le Bureau de construction des autoroutes du Canton de Vaud (BAR) avait l'avantage de bénéficier, pour certains des ouvrages de son réseau, de l'observation intensive de leur comportement dans le temps.

Enfin, il s'agit de sensibiliser les ingénieurs sur la nécessité du contrôle global du comportement des ouvrages d'art et d'attirer leur attention sur les dispositifs de contrôle, sur le type et la fréquence des contrôles, sur la fixation de seuils d'intervention et sur l'établissement d'un cahier des charges pour la surveillance.

1.2. Organisation de la recherche

Dans un premier temps, les laboratoires de mécanique des sols et des roches de l'EPFL ont établi un inventaire d'ouvrages d'art construits en terrain instable en cherchant à rassembler un maximum de renseignements déjà acquis (résultats des prospections géotechniques et des contrôles, plans des ouvrages, etc.) de manière à limiter les dépenses et à progresser rapidement dans la recherche 5/82.

Sachant que le BAR disposait d'une abondante documentation sur un grand nombre d'ouvrages construits sur le réseau vaudois des routes nationales, le LMS et le LMR ont proposé au BAR de participer à la recherche 5/82, puisqu'il était à même de fournir très rapidement les renseignements souhaités.

En effet, la construction des autoroutes dans le canton de Vaud a nécessité la réalisation d'un très grand nombre d'ouvrages d'art importants situés en terrain instable. Citons entre autres, les viaducs de Chillon, le passage entre Vennes et Chexbres, de l'autoroute du Léman dans les coteaux de Lavaux, obligeant à construire de nombreux ponts, viaducs, tunnels et soutènements ancrés, ainsi que les remblais sur sols tourbeux compressibles et déformables mis en place dans les plaines du Rhône et de l'Orbe.

Pour tous ces ouvrages, il existe une étude géotechnque spécifique, un dossier de plans conformes à l'exécution, ainsi que des mesures de contrôle (nivellements, polygonales, etc.) exécutées depuis le début de la construction.

Pour certains ouvrages, le BAR a confié des mandats de contrôle directs à certains bureaux ou laboratoires. Depuis 1972, le bureau J.-C. Ott assure la surveillance des murs ancrés du Lanciau et de Crau-Coulet sur l'autoroute du Léman, en collaboration avec le BAR.

Les centres de recherche sont donc les LMS et LMR de l'EPFL, le bureau Ott de Thônex et le BAR VD.

Le travail fut organisé de la manière suivante :

- BAR : mise à disposition des renseignements, exécution des opérations topographiques, participation aux campagnes géotechniques et d'équipements complémentaires.

- LMS + LMR : synthèse des renseignements (mesures initiales et complémentaires), choix des ouvrages à ausculter, mise en place de dispositifs complémentaires, exécution des nouvelles mesures, rapports de synthèse par ouvrage.

- Ott : mise à disposition d'un rapport de synthèse sur les mesures (initiales et complémentaires) exécutées sur les murs du Lanciau et de Crau-Coulet.

Les travaux préliminaires firent l'objet du mandat de recherche 2/80 : choix des ouvrages; dispositifs de mesure (compléments).

1.3. Résumé - Résultats principaux

1.3.1 L'observation directe, pendant plus de cinq années, de 16 ouvrages importants du réseau vaudois des routes nationales, a permis au BAR de bénéficier d'un contrôle constant et étendu de ces constructions, tout en assurant le financement de ce contrôle par les crédits de construction des routes nationales.

1.3.2 Les observations systématiques de ces 16 ouvrages ont aussi permis de recueillir des renseignements généraux qui ont conduit à la rédaction de recommandations générales pour le contrôle des constructions en terrain instable (voir chapitre "Conclusions"). Ce travail très important a été payé par les crédits du mandat de recherche 5/82.

1.4. Rapport final

Le rapport final de la recherche 5/82 est, en partie, comme indiqué plus haut, basé sur le mandat 2/80, notamment en ce qui concerne le choix des ouvrages retenus pour une étude plus approfondie.

On trouve dans ce rapport, outre ce chapitre introductif, une description et une critique du fonctionnement des dispositifs de contrôle utilisés dans cette recherche.

On y trouvera également la synthèse des observations et mesures effectuées sur les 16 ouvrages retenus; en plus, il est donné, chaque fois que cela était possible, un avis sur le comportement actuel de chaque construction.

Enfin, les conclusions générales permettent déjà de donner des recommandations pour l'étude, la conception et le choix des systèmes de contrôle les plus adéquats, ainsi que pour l'interprétation correcte des mesures et la fixation des seuils d'alarme ou d'intervention.

Dans les conclusions générales, on pourra lire également que la recherche 5/82, exécutée dans un cadre restreint, sur un nombre limité d'ouvrages, et avec des dispositifs parfois incomplets, n'a pas encore permis de mettre au point une méthodologie générale à l'usage de la Suisse entière.

Mais elle a jeté les bases d'une nouvelle recherche qui devrait être entreprise dans un cadre intercantonal avec l'appui de l'Office fédéral des routes : c'est dans ces conditions que l'on arrivera à établir une méthodologie générale et à établir un cahier des charges standard pour la surveillance des ouvrages d'art en site instable.

2. DISPOSITIFS DE CONTROLE

2.1 Liste des équipements

La liste des équipements mis en place lors de la construction des ouvrages et des dispositifs complémentaires installés ultérieurement, dans le cadre de cette étude sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

OUVRAGE		
Nom	**Type**	**Equipement de contrôle**
Paudèze	ponts	câle dynamométrique sur ancrages inclinomètre clinomètres
Lutrive	ponts	inclinomètres
Veveyse	ponts	extensomètres dans puits pendule inversé inclinomètres clinomètres
Chillon	viaducs	extensomètres dans puits inclinomètres distomètres
Veveyse de Fégire	pont	clinomètres inclinomètres distomètres
Crau-Coulet	ponts-murs	clinomètres
Cornallaz	ponts et glissement	inclinomètres
Criblette	mur	inclinomètres clinomètres
Lanciau	murs	inclinomètres clinomètres tirants non tendus
Converney	tranchée	piézomètres débit drainages
Chêne	viaducs	--
Ependes	viaducs	--
Yverdon	viaducs	--
Plaine du Rhône	viaducs	--
Plaine du Rhône	remblais	tassomètres
Plaine de l'Orbe	remblais	inclinomètres et cellules de pression interstitielle inclinomètre

Les données relatives aux mesures topographiques, qui sont effectuées sur chaque ouvrage, ne figurent pas dans ce tableau.

2.2 Description des équipements

2.2.1 MESURES TOPOGRAPHIQUES

Les mesures topographiques ont principalement consisté en nivellements de précision et en polygonales.

Le nivellement de chevilles en laiton placées sur les appuis des piles s'est effectué en aller et retour avec un équipement invar et un niveau Wild No 2 équipé d'un micromètre à lames parallèles. Le nivellement est rattaché à un réseau de points extérieurs, eux-mêmes reliés au nivellement cantonal.

Des triangulations locales ont permis de suivre l'évolution des déplacements des têtes des inclinomètres ou de repères fixés sur les piles. Dans les cas où un suivi de l'ouvrage par triangulation s'avérait trop délicat à cause d'un manque de visibilité ou d'un relief escarpé, des mesures de distance entre piles ont été entreprises au moyen d'un théodolite Mekometer Kern DKM2A équipé d'un DM501 pour la mesure électro-optique des distances.

Le distancemètre électro-optique permet de mesurer la distance séparant la station où est installé l'appareil à un point doté d'un miroir. L'appareil émet un signal lumineux modulé à très haute fréquence (jusqu'à 500 MHz) qui est réfléchi par le miroir composé d'un triple prisme possédant la propriété de revoyer le rayon lumineux parallèlement à lui-même, quelle que soit l'orientation du miroir. Le signal réfléchi est comparé au signal émis : la différence de phase indique le temps de parcours et, connaissant la vitesse de propagation du rayon lumineux, la distance parcourue. Un calculateur intégré effectue les calculs et corrections et fournit immédiatement la distance sous forme numérique.

Le Mekometer a une portée maximale de 3 km et l'erreur sur la distance n'excède pas $0.3 \pm 2 \cdot 10^{-6}\ D[mm]$.

2.2.2 PENDULE INVERSE

Cet appareil, largement utilisé pour l'auscultation des barrages, repose sur le principe du fil à plomb. Dans le cas du pendule inversé, le fil est ancré dans la partie inférieure de l'ouvrage alors qu'à la partie supérieure, il est accroché à un flotteur, disposé dans un cuve remplie d'eau, qui lui assure une tension constante.

Dans l'appareil mis en place dans la fondation du pont de la Veveyse, la mesure s'effectue au moyen d'un coordinomètre Gallileo. La précision de celui-ci est de 1/100 mm, mais celle de l'ensemble de l'appareillage n'est que de 0.5 mm à cause des effets thermiques. La plage de mesure est de 30 mm dans n'importe quelle direction horizontale.

Les avantages du pendule inversé sont multiples :

- la précision des mesures peut être plus grande que celle obtenue par une campagne géodésique précise.
- la mesure des mouvements peut être observée à intervalles fréquents sans coûts excessifs, le coordinomètre pouvant être utilisé pour plusieurs sites de mesures.
- les instruments qui constituent le pendule sont simples et fiables à long terme.

2.2.3 PIEZOMETRES

Les piézomètres placés dans le cadre de cette recherche sont de type classique. Ils sont constitués de tubes plastiques d'un diamètre de 50 mm, crépinés sur la hauteur aquifère.

Ces piézomètres ont été posés dans des forages de diamètre suffisant pour permettre la mise en place d'un filtre entre le terrain et le tube. Ce filtre est généralement constitué d'un géotextile entourant la hauteur crépinée du piézomètre et de gravillon. Un bouchon constitué de boulettes de bentonite est placé au-dessus du filtre pour éviter toute perturbation directe de la nappe lors de fortes pluies ou de ruissellement. En surface, ils sont protégés par un tube métallique scellé dans le sol et par un bouchon.

La mesure du niveau de l'eau se fait au moyen d'une sonde piézométrique traditionnelle. Cette dernière émet un signal optique ou acoustique lorsque son extrémité touche la surface de l'eau dans le piézomètre. Il suffit alors de lire la profondeur sur le ruban métrique du support.

Ce type de piézomètre de coût modeste, est un bon moyen de contrôle du niveau phréatique. Cependant, pour avoir un suivi exact des variations de l'eau, il faut que certaines règles soient bien respectées :

1°) la mise en place du piézomètre et du filtre doit être effectuée avec beaucoup de soin et le bouchon d'argile doit fonctionner.

2°) la zone aquifère doit être suffisamment perméable pour que le temps de réponse du piézomètre (lié au volume d'eau en mouvement dans le tube) ne soit pas trop important.

3°) les mesures doivent être effectuées dans des temps assez rapprochés pour avoir une bonne idée des variations du niveau phréatique.

4°) les piézomètres placés aux abords de remblais sur sols compressibles devraient être nivelés régulièrement, afin de s'assurer qu'ils ne sont pas influencés par les mouvements verticaux du terrain.

Pour suivre en continu les variations de hauteur de la nappe, nous avons parfois monté sur ces piézomètres un limnigraphe qui enregistre sur une feuille de papier le niveau de l'eau dans le tube. Ce niveau est donné par la position d'un flotteur. Dans ces appareils, le flotteur est relié à la poulie d'enregistrement par un fil et équilibré par un contre-poids. Quelques problèmes sont apparus lors de grandes variations de niveaux, lorsque le flotteur devait croiser le contre-poids, car cet appareillage est destiné principalement à des tubes de plus gros diamètre. Les diagrammes ainsi obtenus ne peuvent pas être directement utilisés; il faut encore soit les digitaliser ou alors les transformer manuellement en un tableau de chiffres, afin de mettre en évidence les variations de la nappe sur la période désirée.

Les récents progrès de l'électronique dans le domaine des capteurs et de l'acquisition de données nous ont conduits actuellement à remplacer le limnigraphe par un capteur de pression que l'on place dans le piézomètre, au-dessous du niveau minimum de la nappe. La variation de hauteur se traduit au niveau du capteur par une variation de pression. Cette valeur est stockée automatiquement sur un module d'acquisition de données de type MADD-1 et 2 par exemple. Les données peuvent ensuite être transférées et traitées directement par un ordinateur, qui tracera un graphique.

Suite aux expériences faites avec les piézomètres de 50 mm, nous avons placé dans des aquifères peu perméables des "micro-piézomètres". Ils sont constitués d'un tube plastique de 10 mm de diamètre et d'une bougie poreuse fixée à leur extrémité. Leur faible encombrement permet de placer dans le même forage plusieurs "micro-piézomètres" séparés entre eux par des bouchons imperméables. Le faible volume d'eau en mouvement dans ces piézomètres fait que leur temps de réponse aux variations du niveau phréatique est très faible. Un mini capteur de pression peut également être placé dans ces tubes pour une mesure en continu des variations de la nappe.

La précision de la mesure au moyen de la sonde piézométrique est de l'ordre du centimètre de hauteur d'eau. Pour les capteurs de pression, elle dépend de l'importance des fluctuations de la nappe, mais reste dans l'ordre de grandeur du centième de la hauteur à mesurer.

Au moyen de capteurs de pression de haut de gamme, compensés en température, cette précision devrait atteindre le millième de cette même variation de hauteur.

2.2.4 TASSOMETRES

Les tassomètres type LEGEP utilisés pour la mesure des tassements sous les remblais fonctionnent selon le principe des vases communicants. Ils évitent ainsi la pose de balises de nivellement qui sont gênantes pour les travaux de terrassement.

Ils sont constitués d'une cellule, contenant deux flotteurs, qui est placée avant les travaux de remblayage dans le terrain naturel. Deux tuyaux souples relient cette cellule à une colonne de mesure, localisée à une distance suffisante des pieds du remblai. Un liquide antigel est utilisé pour le remplissage du tassomètre. La mesure consiste à lire sur la colonne de mesure le niveau dans la cellule. Ce niveau est toujours le même aux deux extrêmités du circuit, ce qui fait que si la cellule tasse avec le remblai, le niveau dans la colonne de mesure descend de même. On utilise de l'air comprimé pour rétablir le niveau dans la cellule; ce dernier est contrôlé par les flotteurs qui agissent sur des contacteurs électriques. Une description détaillée du tassomètre est donnée dans un article du BTSR No 17 du 18 août 1973 : "Appareil de mesure des tassements sous remblai" par M. Odier.

La mise en place d'un tassomètre requiert un engin de terrassement pour creuser une petite tranchée entre la cellule et la colonne de mesure. Cette dernière est protégée par un cylindre de béton de 1 m de diamètre et de 1 m de hauteur. Il faut encore creuser un trou à la tarière de façon que la partie inférieure de la colonne de mesure soit toujours plus basse que la cellule proprement dite.

La précision de la mesure est de l'ordre du centimètre. Par ailleurs, un nivellement doit toujours être effectué pour suivre l'évolution du remblai et surtout pour détecter un éventuel mouvement vertical de la colonne de mesure.

Les principales causes d'ennui que nous ayons eues avec ces appareils étaient dues au remplissage du tube de protection en béton, parfois placé à mi-hauteur dans le sol, par de l'eau. Au moment où cette eau peut entrer dans la colonne de mesure, elle remplit complètement la cellule sous le remblai et il faut alors purger et remettre en état l'appareil.

Un nouveau tassomètre a été récemment mis au point par notre Institut pour les nouveaux remblais à ausculter. Le tassement est mesuré directement, grâce à un capteur de pression électronique, en enregistrant l'augmentation de hauteur d'une colonne de liquide antigel sur la cellule, placée sous le remblai. La colonne de mesure est donc supprimée; il ne reste qu'un récipient gradué, placé à hauteur d'homme et un système de double tuyau qui permet de purger de temps à autre la cellule.

Un simple coffret métallique protège la prise du capteur et le récipient gradué. Le nivellement du récipient gradué par rapport à un point fixe est toujours nécessaire pour détecter un éventuel déplacement vertical. La précision de ce nouvel appareil avoisine un pourcent de la hauteur maximale estimée.

2.2.5 CELLULES DE PRESSION

Cet appareil permet de mesurer la pression interstitielle dans le sol et de suivre son évolution dans le temps. La mesure de cette pression est précieuse surtout lors de l'édification de remblais sur des sols mous et compressibles.

Une cellule de mesure de la pression interstitielle est composée d'un cylindre muni d'une pierre poreuse à une extrémité permettant uniquement la transmission de la pression de l'eau sur une membrane souple. La mesure consiste à équilibrer, par une injection à débit constant d'un autre fluide (air ou huile), la pression exercée par l'eau sur cette membrane. L'appareil permettant d'effectuer cette mesure comprend une pompe ou un réservoir à air comprimé, un régulateur de débit et des manomètres. Des tuyaux semi-rigides en "polyamide" relient la cellule à l'appareil de mesure.

Une cellule de mesure de la pression interstitielle est généralement posée dans un forage exécuté spécialement pour elle, ou à la base d'un tube inclinométrique. Avant sa mise en place à la profondeur voulue (généralement au niveau d'une couche de terrain particulière) mais sous le niveau de la nappe phréatique, il faut que la pierre poreuse et les circuits d'eau soient saturés et remplis avec de l'eau désaérée. La cellule est ensuite disposée sur un lit de sable, puis pour éviter toute perturbation due au remaniement du sol par le trou du sondage, il faut mettre en place un bouchon étanche constitué de boulettes de bentonite.

Ces cellules sont fabriquées en matériaux inoxydables, elles résistent donc bien à la corrosion des sols organiques; ainsi les mesures restent fiables sur une longue durée. Les quelques dérangements que nous ayons pu observer provenaient soit d'une mauvaise mise en place ou alors de l'infiltration d'impuretés dans les tuyaux au moment du branchement ou du débranchement à l'appareil de mesure.

La précision obtenue est de 0.01 bar ($\sim 1\ kN \cdot m^{-2}$) dans la plupart des cas, ce qui correspond environ au 2 % de la valeur maximale des manomètres.

Lors de chargement de remblais, la pression interstitielle augmente instantanément, alors qu'elle ne diminue qu'en fonction de la perméabilité du terrain, jusqu'à sa valeur initiale, une fois que le squelette minéral du sol a repris cette surcharge. Cette pression interstitielle devrait être soigneusement mesurée lors de chaque étape de remblayage pour éviter qu'elle ne dépasse une certaine valeur et pour que le terrain garde une résistance au cisaillement suffisante requise pour l'édification du remblai.

La cellule de pression peut aussi être utilisée simplement pour connaître un niveau d'eau dans le sol, à la place d'un piézomètre, mais cet usage est restreint étant donnée son coût élevé par rapport à un simple tube crépiné à niveau libre.

2.2.6 EXTENSOMETRES A CORDE VIBRANTE

Ces appareils, mis en place dans les puits de fondations, aux Viaducs de Chillon et au Pont de la Veveyse, sont noyés dans le béton. Il s'agit d'appareils italiens de marque Gallileo.

Ces extensomètres sont formés d'un tube métallique, terminé par deux têtes portant des flasques qui définissent la base de mesure. A l'intérieur du tube un corde à piano est fixé aux flasques d'extrémités, avec une certaine tension initiale qui varie en fonction de la déformation du béton.

Un bobinage électrique permet d'une part de mettre en vibration le fil d'acier et d'autre part d'effectuer la mesure. Celle-ci s'opère au moyen d'un comparateur électro-acoustique dans lequel se trouve une corde vibrante dont on peut faire varier la fréquence. La mesure s'effectue en mettant à l'unisson la corde de l'extensomètre et celle du comparateur. La comparaison de la valeur à un temps donné avec la valeur initiale permet de calculer la déformation de l'extensomètre. La précision de la mesure est de l'ordre de quelques microns par mètre et il est possible d'effectuer des mesures précises à des distances importantes sans altération du signal.

2.2.7 CALES DYNAMOMETRIQUES

Trois cales dynamométriques, de marque Télémac, ont été mises en place pour suivre le comportement des tirants des fondations, rive droite du pont de la Paudèze.

Ces appareils sont destinés à mesurer la force que développent au moment de leur mise en tension ou ultérieurement les câbles de précontrainte ou les tirants d'ancrage.

Ces appareils se présentent sous la forme d'un cylindre creux en acier dur que l'on intercale entre la tête du câble et la surface d'appui sur l'ouvrage. Huit cordes vibrantes longitudinales, uniformément réparties sur la circonférence médiane, mesurent les contraintes de compression locales nées sous l'action de la force du câble. La moyenne de ces contraintes locales constitue la mesure de cette force.

Deux disques de répartition en acier doux, interposés sur chaque base entre la cale et les faces d'appui, assurent le bon centrage de la force.

La cale dynamométrique est reliée par un câble souple à un coffret de commutation qui permet la lecture successive des huit cordes.

L'étalonnage est effectué sous presse en laboratoire; un coefficient, propre à chaque cale est déterminé à la suite de cet étalonnage.

Dans ces appareils, les cordes vibrantes fonctionnent selon le système "en entretenu"; elles sont en effet maintenues en vibration au moyen d'un appel continu, modulé en permanence sur la vibration naturelle.

Pour l'auscultation, le procédé consiste à mesurer directement la fréquence des cordes au moyen d'un poste à comptage électronique et à calculer les déformations en comparant la fréquence, ou plus exactement son carré à celui de la fréquence initiale.

Les postes d'écoute contiennent également un pont de Wheastone qui permet une mesure de la température d'après la résistance ohmique des bobinages d'électro-aimants.

2.2.8 INCLINOMETRES

Le dispositif utilisé pour les mesures inclinométriques se compose de trois éléments :

- le tube rainuré, scellé dans le sol, au moyen d'un coulis de ciment
- la sonde inclinométrique mobile
- l'appareil de mesures digital.

L'inclinomètre Digitilt est un appareil construit par la maison Sinco, Slope Indicator Company de Seattle aux USA. Cet appareil est destiné à déterminer la déformée au cours du temps d'un tube placé verticalement dans le sol et, si possible, ancré dans le substratum en place.

La sonde qui est prévue pour travailler dans des forages équipés de tubes rainurés, est pourvue de deux paires de roulettes montées sur ressorts, qui lui assurent une orientation et un centrage constants, de façon à pouvoir établir les variations de la déformée du forage suivant deux directions perpendiculaires.

La mesure s'effectue au moyen de deux servo-accéléromètres disposés l'un dans le plan des roulettes et l'autre dans un plan perpendiculaire. Ces servo-accéléromètres consistent en une masse flottant dans un champ magnétique et dont la position est maintenue constante par asservissement. Ils sont placés dans des boîtiers étanches qui servent d'amortisseur hydraulique; on réalise donc une mesure indirecte de l'inclinaison.

Le digitilt peut travailler dans un domaine de ± 30° à partir de la verticale.

La précision du détecteur est de l'ordre de 1 mm/m, toutefois la précision de la mesure dépend de la longueur du tube et de son inclinaison.

Les premières mesures ont été effectuées avec un enregistreur à cassettes (Magtape de la maison Sinco), puis par la suite au moyen d'un appareil développé par les Laboratoires de mécanique des sols et des roches de l'EPFL et commercialisé sour le nom de MEDI-EPFL.

2.2.9 CLINOMETRES

Deux types de clinomètres ont été utilisés :

- les clinomètres à bulle
- les clinomètres électroniques.

Le clinomètre à bulle "Huggenberger" est un niveau de haute précision, thermiquement protégé. La précision est de 0.005 mm/m. L'appareil ne nécessite aucun étalonnage et ne présente pas de dérive s'il est manié avec précaution.

Cependant, vu sa haute sensibilité, les variations dues aux effets thermiques sur l'ouvrage apparaissent même pendant la mesure; des variations de ± 10" ne doivent pas être considérées comme significatives de déformations dues à la mise en charge de l'ouvrage.

Le clinomètre électronique utilisé est un Leveltronic A40 de la maison Wyler, raccordé à un indicateur digital Levelmeter 25.

Le principe de mesure du Leveltronic repose sur l'effet pendulaire d'un disque d'environ 1 gr suspendu entre deux électrodes. Ce disque constitue un condensateur différentiel.

Du fait de la suspension absente de tout frottement et de l'amortissement de ce disque-pendule, une très grande précision peut être obtenue. Le principe électronique de base repose sur un générateur de fréquence (5 kcs) avec détecteur de phase pour chaque direction. L'emploi de ce système de mesure le rend indépendant de toute influence en présence d'un champ magnétique.

Le Leveltronic a une progression en microns/m correspondants à la tangente de l'angle. Pour des angles jusqu'à 2 degrés, la valeur donnée correspond approximativement à l'angle exprimé en degrés. Pour un appareil dont la sensibilité est de 1 micron, 1 digit de l'affichage correspond à un angle arrondi de 0.2".

Le Leveltronic permet d'effectuer des mesures absolues (différence par rapport à l'horizontale), relatives de position (écart par rapport à une base de référence) ou même différentielles avec 2 appareils (p.ex. contrôle de pièces mécaniques).

2.2.10 DISTOMETRES

Le distomètre est un instrument de précision pour la mesure de longueurs à l'aide de fils invar. On l'utilise avant tout pour la détermination exacte des variations de longueurs lors des mesures de déplacements et de déformations.

Il a été développé par l'Institut pour la construction des routes, chemins de fers et ouvrages souterrains de l'Ecole polytechnique de Zurich (ISETH); il est fabriqué et commercialisé par la maison Kern.

La construction de l'équipement comprend uniquement des éléments mécaniques dont les trois principaux sont le dynamomètre, le comparateur et le fil d'invar.

- le dynamomètre sert à maintenir le fil d'invar sous la tension voulue en cours de mesure et consiste principalement en un ressort de précision en acier dont on mesure l'allongement au moyen d'un cadran.

- le comparateur mesure l'intervalle compris entre le distomètre et l'extrémité du fil d'invar fixé à l'instrument.

- le fil d'invar est pourvu de couplages permettant de le relier exactement au distomètre, d'une part, et au point fixe situé à l'autre extrémité, d'autre part.

L'équipement est complété par des boulons servant à assurer les points de mesure, ainsi que par deux rotules faisant la liaison entre boulon et fil et entre boulon et distomètre.

Le domaine de mesure est large : la longueur du fil peut varier entre 1 m et 50 m et l'étendue de la plage de mesure des déplacements est de 100 mm.

La précision de mesure est de ± 0.02 mm pour les fils d'une longueur allant jusqu'à 20 m; pour les fils de longueur supérieure, elle vaut environ $\pm 1*10^{-6}$ * la distance (erreur moyenne).

La valeur de mesure obtenue avec le distomètre dépend des indications fournies par les cadrans de mesure du dynamomètre et du comparateur. Le contrôle et le calibrage de ces cadrans sont donc essentiels et se font à.l'aide d'un bâti d'étalonnage.

Les avantages du distomètre sont appréciables : il offre la possibilité de mesurer des distances de n'importe quelle inclinaison; il ne nécessite pas de travaux importants pour la mise en place des boulons de référence et la confection des fils; il permet une mesure rapide et précise et n'exige qu'un personnel restreint.

2.2.11 TIRANTS NON TENDUS

Ce dispositif de mesure, imaginé par le bureau Ott, est constitué de plusieurs tirants scellés à des profondeurs différentes. Il consiste principalement en un faisceau de torons dont les scellements sont étagés respectivement à 10, 20, 30 et 40 m. Chaque scellement est pourvu d'un tube d'injection séparé. Les torons gainés et graissés coulissent à travers les zones injectées.

Chaque toron est mis en tension à 10 t. puis relâché pour contrôler la tenue du scellement et la réversibilité des mouvements, et éliminer des frottements résiduels.

La protection des tirants passifs est la même que celle des tirants actifs. La tête du tirant est protégée par un capot amovible.

En reliant les relations géométriques relatives aux allongements spécifiques dans la direction du "tirant passif" et les allongements spécifiques dans une direction quelconque, nous pouvons construire :

- la composante horizontale du déplacement au niveau du sol
- la déformée d'une verticale analogue à celle que l'on obtient par inclinométrie dans un forage vertical.

Le scellement à plusieurs niveaux est délicat et doit être exécuté par une entreprise spécialisée. La longueur libre doit être calculée exactement lors du cycle de mise en tension à 10 t, puis du relâchement. La mesure s'effectue au moyen d'un comparateur modifié.

La précision de lecture estimée d'après les résultats est d'environ ± 0.2 mm; cependant, les variations saisonnières de la température moyenne du sol peuvent provoquer des variations de ± 0.5 mm.

Ce dispositif de mesure est donc très semblable à celui des extensomètres à tiges du type Uni-Rod ISETH ou Interfels couramment utilisés pour les auscultations de tunnels par exemple.

2.2.12 DEBIT-METRES

La mesure ponctuelle du débit avec un seau et un chronomètre est bien connue, mais pour disposer d'enregistrements continus, notamment à la tranchée de Converney et sur le glissement de la Cornallaz, un appareil autonome a été réalisé; il consiste à mesurer, à l'amont d'un déversoir, la hauteur de l'eau, grâce à un flotteur relié à un limnigraphe. Les déversoirs ont été étalonnés en laboratoire avant leur installation "in situ". Pour la tranchée de Converney, le débit-mètre était placé sur le bord de l'autoroute, dans le but de mesurer les variations de débit d'un drain oblique. L'exutoire du drain était relié par un tuyau souple au déversoir triangulaire.

A la Cornallaz, nous avons utilisé un barrage de planches muni d'un déversoir triangulaire qui barrait complètement la galerie drainante. Le niveau de l'eau était mesuré par un flotteur relié à un limnigraphe posé au niveau du sol, au-dessus d'un puits d'accès.

La précision de ces appareils n'est pas très grande et ils ont surtout permis de chiffrer l'ordre de grandeur des variations de débit.

D'autre part, la dureté élevée des eaux de drainage a entraîné des dépôts de tartre sur le déversoir qui ont faussé considérablement les mesures. L'adjonction d'Eau de Javel au moyen d'un goutte-à-goutte pour dissoudre le tartre n'a pas donné les résultats escomptés (obturation des tuyaux, cristallisation, réglage du goutte à goutte sur une longue période).

De plus, par manque de crédit, les limnigraphes avaient été "récupérés" sur d'anciens appareils et le système de traçage sur le papier d'enregistrement était des plus rudimentaires.

Lors de fortes crues, le débit de la galerie de drainage de la Cornallaz augmente considérablement et le déversoir est alors souvent submergé, d'où des imprécisions concernant les débits maximums évacués par cette galerie.

D'autres mesures de débit ponctuelles ont été effectuées en parallèle au moyen d'un tube gradué ou d'un bidon. Tous les piézomètres de la tranchée de Converney et quelques profils de la galerie drainante de la Cornallaz ont ainsi été contrôlés à l'occasion d'un changement de papier des limnigraphes ou lors de l'inspection des appareils. Ces mesures permettent de calibrer et de contrôler régulièrement les résultats obtenus en continu.

3. COMPORTEMENT DES OUVRAGES

Pour chaque ouvrage un rappel des caractéristiques techniques et des problèmes d'instabilité précède la description de dispositif de contrôle et les résultats des mesures; des commentaires sur les résultats et des propositions pour des auscultations complémentaires éventuelles sont ensuite indiqués avant les conclusions selon le plan suivant :

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE
   - 1.1 Description des ouvrages
   - 1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie
   - 1.3 Problèmes d'instabilité
2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE
3. RESULTATS DES MESURES
4. COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS OBTENUS
5. PROPOSITION DE PROSPECTION ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES
6. CONCLUSIONS

3.1 PONTS SUR LA PAUDEZE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N9 Section km : 10.824-11.229

Traversée de la vallée de la Paudèze par deux ponts rectilignes indépendants (fig. 1 et 2)

Auteur du projet	Bureau Techn. Piguet S.A., Lausanne
Dossier géologique	A. Bersier, Lausanne
Dossier géotechnique	LEGEP, Lausanne
Construction	1971-1973
Longueur totale	422 m
Nbre d'appuis entre les culées	4
Portées du pont aval	58.2 - 104.0 - 104.0 - 104.0 - 51.8 m
Tablier	Poutre continue en béton précontraint Section en caisson, inertie variable
Piles	Deux palées (0.70 × 6.80) écartées de 8 m encastrées dans la superstructure, appuyées sur un massif commun
Fondations	Quatre puits (Ø 3.00 m) encastrés dans la molasse reliés en tête par des voiles en béton.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

Le cours d'eau suit le tracé d'une faille géologique, de 2000 m de rejet, séparant la molasse de Lausanne de celle de Belmont. La roche est donc très tectonisée.

Sur le versant droit et le bas du versant gauche, on trouve successivement :

- le massif rocheux stable mais très fissuré, formé d'une alternance de grès et de marnes
- la zone de roche fauchée, très altérée, en cours de tassement
- la couche superficielle composée de matériaux d'altération d'origine molassique, argileux et plastiques dont l'épaisseur est de 6 à 8 m, en état de glissement actif (l'angle de frottement ϕ = 13 à 16°).

Le relevé géologique effectué lors de la mise en place du tube inclinométrique IPz1 précise la succession lithologique des terrains au voisinage de la pile No 1 (annexes 1/2 - 1/5).

Sur le haut du versant gauche, la roche est recouverte de 10 à 20 m de moraine de fond de bonne qualité (ϕ 33-45°, cohésion jusqu'à 140 $kN \cdot m^{-2}$).

Riche en argile au voisinage du rocher, elle reste animée d'un lent mouvement de fluage.

Le régime des eaux souterraines est celui d'une nappe fissurale, très influencé par les précipitations. Les sous-pressions hydrauliques sont très variables et peuvent atteindre des valeurs élevées.

1.3 Problèmes d'instabilité

L'instabilité des flancs du vallon se présente sous deux formes :

- Le glissement actif des sols superficiels entraîne des pressions élevées sur les fondations qui traversent ces formations. Les mouvements, en général lents, peuvent s'accélérer brusquement et des masses considérables se déplacent alors de plusieurs mètres. Les puits doivent pouvoir résister à ces poussées. L'eau, par son effet lubrifiant et par les sous-pressions qui diminuent les frottements, est la cause de ces mouvements dont le plus récent date d'avril 1970.

- Les puits sont encastrés dans une molasse saine mais découpée en grands blocs par des diaclases proches de la verticale ou de l'horizontale. Sous l'effet des pressions hydrauliques fissurales, le massif rocheux d'encastrement délimité par les fissures peut se déplacer, le long d'une diaclase, vers la vallée. Ce mouvement sera lent car chaque déplacement fait chuter la pression d'eau et ne peut reprendre que lorsque la fissure est à nouveau alimentée.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

L'équipement actuel de la pile amont rive droite comprend (annexe 1/1) :

- des repères topographiques
- deux cales dynamométriques à cordes vibrantes Télémac
- une plaque pour mesures au clinomètre
- un tube pour mesures inclinométriques situé à proximité immédiate de cet appui.

Un cale dynamométrique équipe également un tirant de la pile aval.

2.1 Topograhpie

L'auscultation topographique de l'ouvrage comprend :

- Le nivellement de chevilles en laiton placées sur les piles et à la base des culées. Le nivellement s'effectue en aller et retour avec un équipement invar et le niveau Wild No 2 équipé d'un micromètre à lames parallèles. Il est rattaché à un réseau de points extérieurs, eux-mêmes reliés au nivellement cantonal.

- La mesure des distances entre piles de remplacement d'une triangulation locale rendue impossible par le manque de visibilité. Le principe appliqué est celui de la mesure de l'angle parallactique (stadia invar). A la base de chaque pile deux cibles ont été scellées, et depuis une station au théodolite T2, situé sensiblement

à mi-distance entre les piles, il s'agit de mesurer l'angle sous lequel on voit ces cibles. La distance est alors une fonction de la cotangente de cet angle.

2.2 Cales dynamométriques

Trois cales dynamométriques à cordes vibrantes placées entre la tête d'ancrage et la plaque d'appui des tirants permettent de suivre l'évolution dans le temps de la tension des ancrages (annexe 1/6).

2.3 Clinomètre

Une plaque métallique a été scellée à la base de la pile pour détecter un basculement éventuel du massif de fondation et tenter de confirmer les mouvements du sol repérés par les autres dispositifs de mesure.

2.4 Inclinomètre

Un tube inclinométrique a été posé pour permettre de suivre les mouvements horizontaux du sol en profondeur et d'expliquer la variation de tension dans les tirants.

3. RESULTATS DES MESURES

3.1 Topographie

Les mesures de nivellement ont mis en évidence un tassement respectif des piles 1 et 101 de 14 et 11 mm sur une période de 10 ans. On peut noter en outre que le tassement s'est avéré plus important du côté aval des piles, donc en direction de la Paudèze (annexe 1/7).

En ce qui concerne la mesure des déplacements relatifs des piles Nos 1 et 101, on admet par hypothèse que les culées 0 et 100 et que les piles Nos 2 et 102, sises dans le lit de la rivière, sont fixes.

Bien que les petits côtés entre cibles aient été mesurés avec grand soin, les calculs ont vite démontré que les variations étaient influencées par la température du béton et sa dilatation.

Chaque angle a été mesuré 6 fois. Le coefficient de dilatation admis est de 0.1 mm par mètre pour une différence de température de 10°C.

De 1974 à 1984, huit séries de mesures ont été effectuées, le résultat moyen étant :

Culée 0		Culée 100	
	53.388 m		59.823 m
pile No 1		pile No 101	
	94.390 m		94.059 m
pile No 2		pile No 102	

Les écarts par rapport à ces moyennes n'ont jamais dépassé 5 mm pour chacune des huit mesures. On peut donc dire qu'en 10 ans les piles Nos 1 et 101 n'ont pas accusé de mouvement significatif.

3.2 Cales dynamométriques

Les tirants furent tendus pour la première fois en automne 1972. La tension a été vérifiée au vérin 3 mois après. Détendus en juin 1973 pour permettre la pose des cales dynamométriques, ils furent retendus avec ces cales en septembre 1973.

Les résultats de mesure sont présentés sur l'annexe 1/8. On remarque que :

- l'évolution de la tension de l'ancrage 2-1 de la pile No 2 suit une allure normale
- en revanche, la perte de tension des tirants 1-1 et 1-2 de la pile No 1, régulière au début, augmente très nettement à partir de 1982

et atteint fin 1984 des valeurs proches de 50 % de la tension initiale.

En raison de ces pertes de tension importantes, le BAR a fait effectuer, par le maison Freyssinet, un contrôle à fin 1984.

A cet effet, un dispositif spécial a été construit pour permettre une remise en tension de deux tirants au vérin avec mesure simultanée au moyen des cales dynamométriques. Ces essais ont montré que la cale équipant le tirant 2.1 fonctionnait correctement comme l'indiquent les diagrammes des annexes 1/9 et 1/10. Par contre la cale du tirant 1.1 indique des valeurs qui divergent fortement de celles données par le vérin et ceci d'autant plus que la tension est élevée (annexe 1/11). La cale du tirant 1.2 n'a pas été contrôlée mais on peut toutefois supposer, par analogie, qu'elle présente la même défectuosité que celle du tirant 1.1.

3.3 Clinomètres

Les mesures effectuées entre le 1er juin 1983 et le 16 septembre 1987 indiquent un basculement vers l'aval d'environ 3 mm/m.

3.4 Inclinomètre

Les mesures ont été entreprises entre décembre 1982 et septembre 1987. Le déplacement total en tête enregistré pendant cette période est de 12 mm, soit environ 2.5 mm/an. L'annexe 1/12 donne l'évolution de la déformée encaissée par l'inclinomètre. L'anomalie de déplacement que l'on peut observer, entre 18 et 22 m pourrait être attribuée à un tassement des marnes occasionnant un flambage du tube inclinométrique; en effet, le levé géologique fait apparaître dans cette zone un taux de récupération d'environ 50 % qui met en évidence la qualité moindre de ces marnes.

4. COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS OBTENUS

L'ensemble des mesures topographiques, clinométriques et inclinométriques n'a pas mis en évidence de mouvement significatif de la pile No 1.

Les essais de contrôle des tirants ont d'autre part montré que les pertes de tension indiquées par les cales dynamométriques provenaient d'un mauvais comportement de ces appareils et qu'en réalité la tension restait normale.

5. PROPOSITION DE PROSPECTION ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

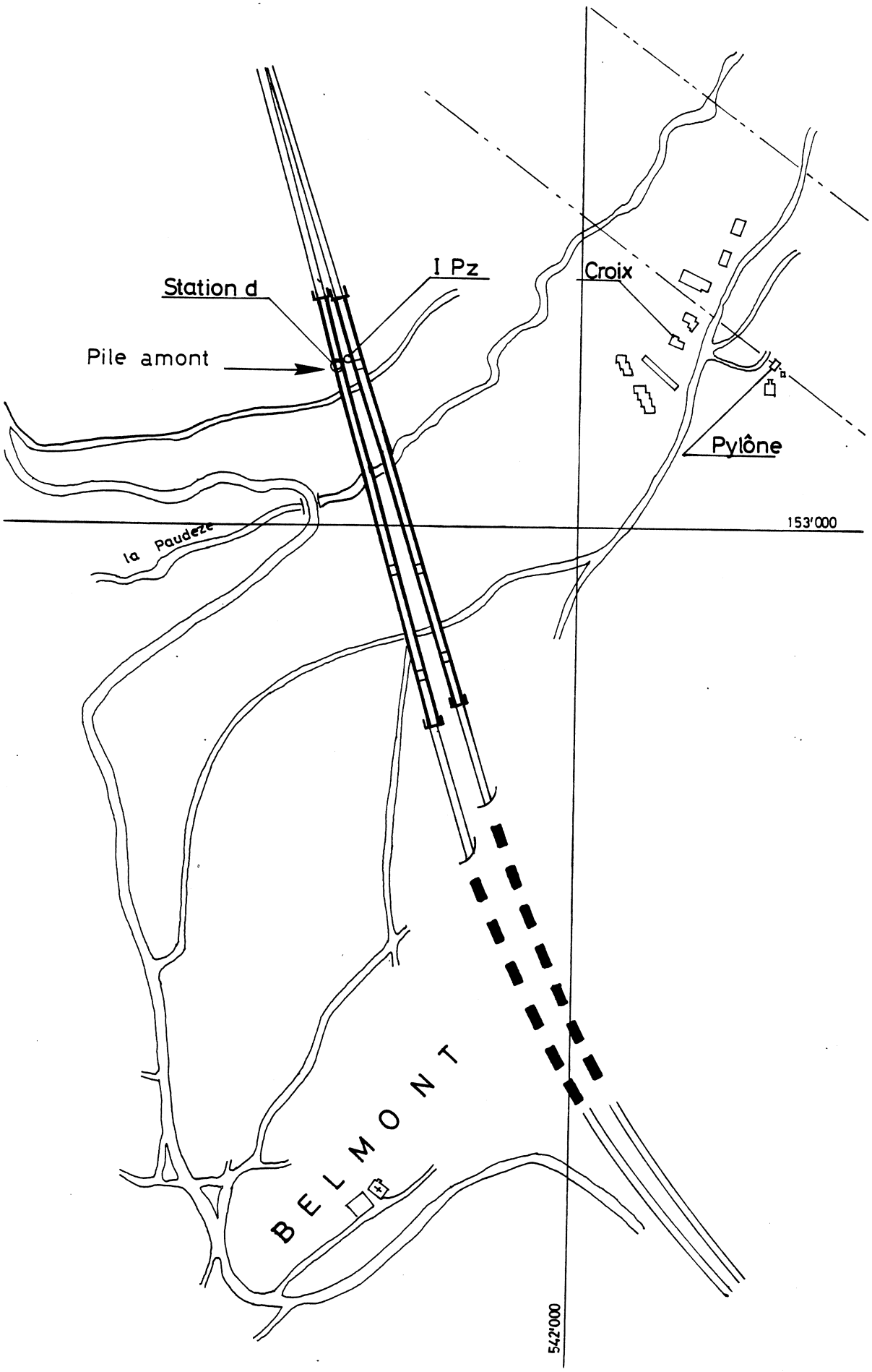
Une poursuite des auscultations au moyen du clinomètre, de l'inclinomètres pour la pile amont et de la cale du tirant 2.1 pour la pile aval, avec toutefois une fréquence réduite (2 à 3 ans) doit être envisagée.

Compte tenu de l'importance des tirants pour la bonne tenue de l'ouvrage, il serait utile de compléter le dispositif par la pose d'un ancrage, dont la tension puisse être contrôlée de manière sûre.

Un extensomètre subhorizontal pourrait également permettre de suivre avec précision les déplacements du bloc de fondation par rapport à un point fixe, situé en dehors de la zone en glissement.

6. CONCLUSIONS

Les observations effectuées au moyen du dispositif de contrôle indiquent que le comportement des fondations est satisfaisant. S'il paraît utile de compléter le système de mesure actuel, pour permettre un suivi plus précis des déformations, il ne semble par contre pas nécessaire d'envisager de travaux confortatifs.


Station d
I Pz
Croix
Pile amont
Pylône
153'000
la Paudeze
BELMONT
542'000

Annexe 1/1

SONDAGE N° I Pz 1 FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 541.779 X 153.160 Z 639,32

DATE D'EXECUTION 23 décembre 1981 PROFONDEUR 42.30

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ϕ 146 ϕ 131	100 %	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10		20° 20° 20°	Terre végétale brune Limon sableux argileux, beige jaune et brun, avec graviers, terre végétale, matières organiques, un morceau de bois et un bloc de béton. Marnes tendres argileuses, altérées, assez grasses, beige-verdâtre, avec passages marneux plus indurés. Marnes tendres, grasses bariolées, brunes et lie-de-vin, légèrement litées, avec gravillons marneux. Ensemble hétérogène constitué d'alternances de marnes et de grès, avec prédominance de marnes tendres, beige-verdâtre et lie-de-vin : récupérés en blocs. Marnes dures feuilletées bariolées. Grès fins, durs, gris. Marnes mi-dures, gris bleu, légèrement bariolées.			

SONDAGE N° I Pz — FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 541.779 X 153.160 Z 639,32

DATE D'EXECUTION 23 décembre 1981 — PROFONDEUR 42.30 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, crottier simple ϕ 131	100 %	11		40°	Marnes mi-dures, bariolées, bleu-verdâtres, avec niveau d'argile plastique, tendre, brun rouge (10.7 à 10.73 m).			
		12			Marnes tendres à mi-dures, bariolées, bleu-verdâtre.			
		13			Marnes grasses, plastiques, tendres, beige-verdâtre.			X
		14			Marnes mi-dures à tendres, bleu-vert.			
		15			Marnes mi-dures, bariolées, lie-de-vin.			X
					Marnes tendres à mi-dures, bariolées beige verdâtre, avec passages de grès marneux dur (15.3 m et 15.7 m).			
		16		40°	Grès durs, gris, récupérés en blocs.			
		17			Marnes mi-dures, bariolées, lie-de-vin et bleu-verdâtre, assez compactes. Perte totale entre 18.1 m et 18.5 m.			
ϕ 116	30 %	18						
		19						
	100 %	20			Grès moyens, gris, massifs, légèrement fracturés			

SONDAGE N° I Pz — FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 541.779 X 153.160 Z 639,32

DATE D'EXECUTION 23 décembre 1981 — PROFONDEUR 42.30 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
F. rot sec ø 116	100 %				Marnes et marno grès fragmentés, durs,			
	50 %	21			Marnes dures briolées, lie-de-vin, fragmentées.			
Forage rotation à l'eau, carottier double ø 101		22			Marnes mi-dures à dures, bariolées, lie-de-vin, avec passages plus durs de marno grès.			
					Grès fins, durs, massifs, gris.			
		23		45°	Marnes grises, dures.			
					Marno grès, compacts bariolés, lie-de-vin et gris bleu, durs quelques diaclases 45°.			
		24			Marnes tendres, grises.			
					Marno grès durs, compacts, gris.			
		25		45° 45°	Grès fins et marno grès durs, gris massifs, avec intercalation marneuse à 25.5 m, quelques fractures obliques.			
	100 %	26		40°	Marnes mi-dures, bariolées, lie-de-vin, verdâtre.			
					Marnes tendres, gris-foncé.			
		27			Marno grès, massifs, durs			
		28		45°	Marnes très grasses, tendres, gris-bleu, désagrégées.			
		29		45°	Marnes mi-dures gris-bleu			
		30			Marnes tendres, gris bleu à taches lie-de-vin désagrégées.			

SONDAGE N° I Pz1 FEUILLE N° 4

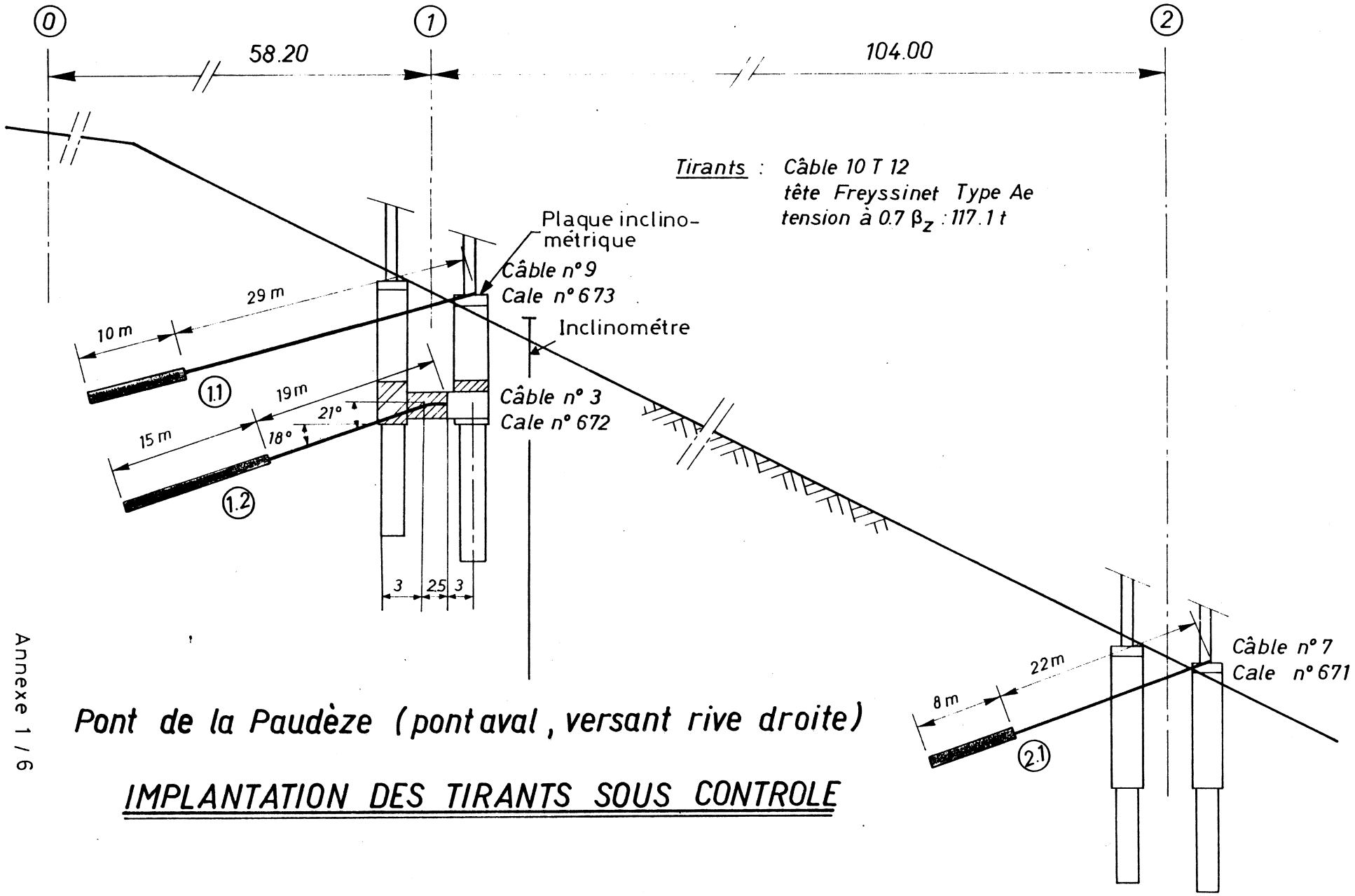
COORDONNEES Y 541.779 X 153.160 Z 639,32

DATE D'EXECUTION 23 décembre 1981 PROFONDEUR 42.30 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø 101 ø 86	100 %	31		45°	Marnes id. mi-dures compactes gris-bleu à violacé			
		32			Marnes grasses très tendres à tendres gris-bleu à lie-de-vin			
		33		40°	Marnes id. mi-dures avec passages de marno grès, durs			
				40°	niveau 2 cm d'argile plastique brun-rouge			
	50 %	34			Marnes tendres bariolées, gris verdâtres désagrégées			
	100 %	35			Marnes très tendres, gris-bleu			
		36			Marnes gréseuses, gris à violacée, compactes, mi-dures à dures			
		37		45°				
					Grès fin, gris			
		38		40°	Grès marneux, beige-gris, durs			
					Marno grès, gris verdâtre			
		39			Marnes tendres argileuses, gris-beige			
					Marnes tendres, bariolées, bleutées			
		40			Grès durs, gris, fragmentés			

Marnes bariolées, gris-verdâtre, bleutée, tendres ± argileuses

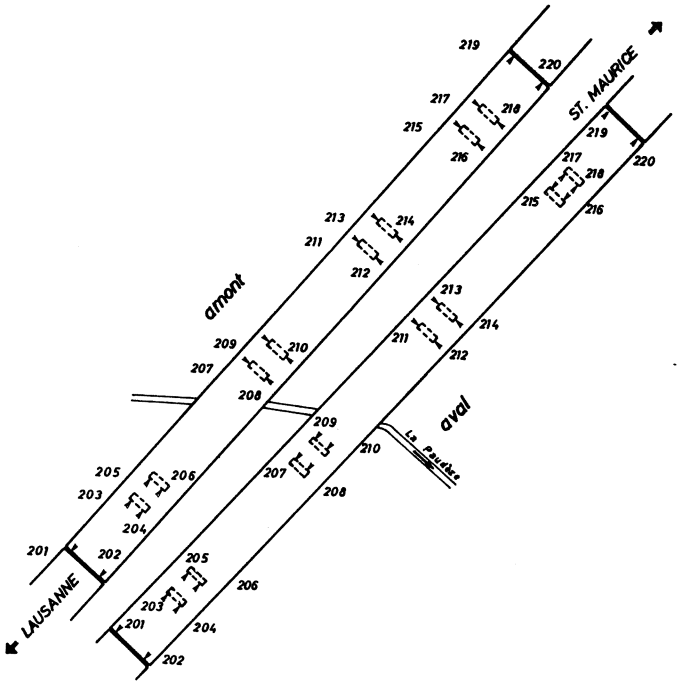
Annexe 1/5



Pont de la Paudèze (pont aval, versant rive droite)

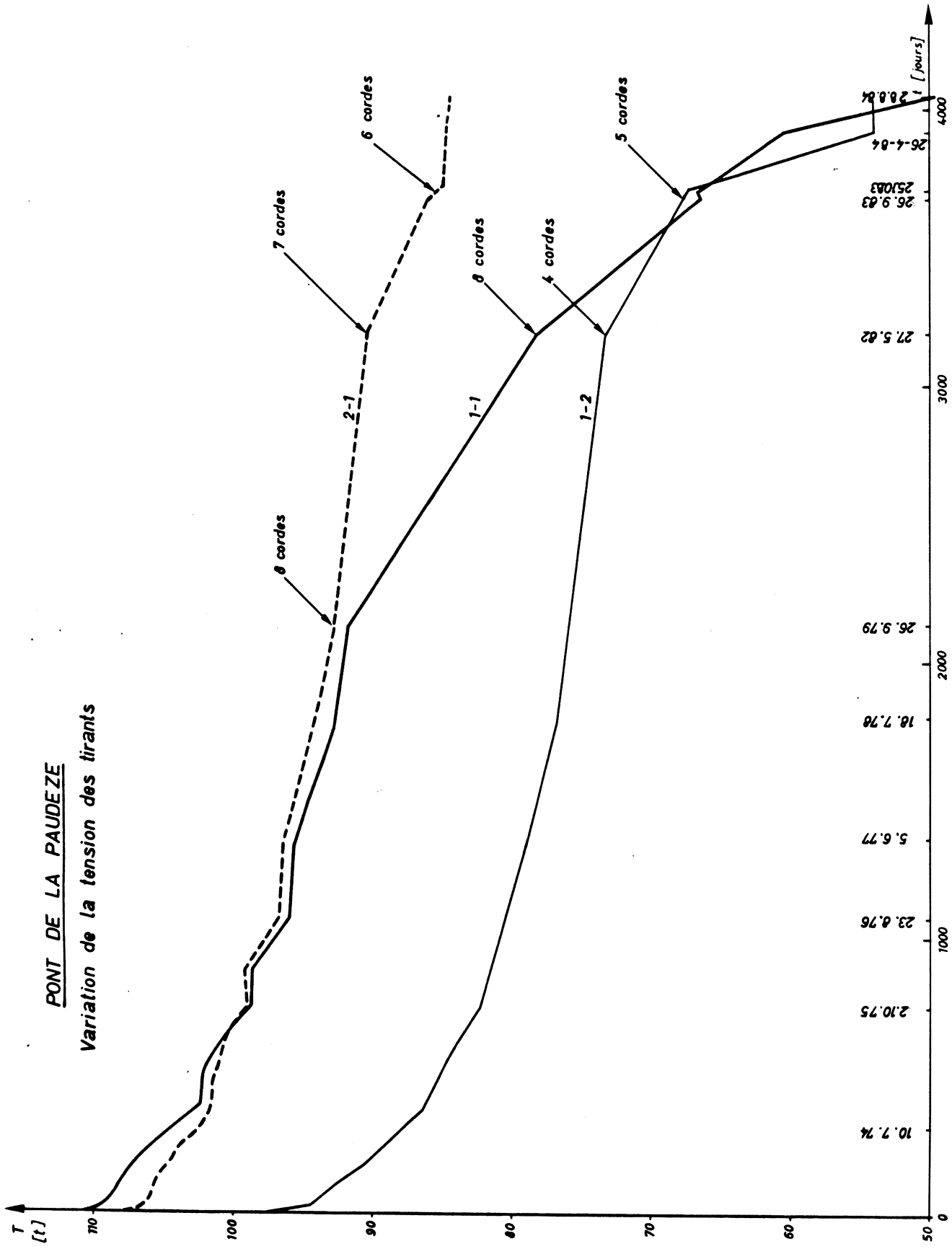
IMPLANTATION DES TIRANTS SOUS CONTROLE

Annexe 1 / 6



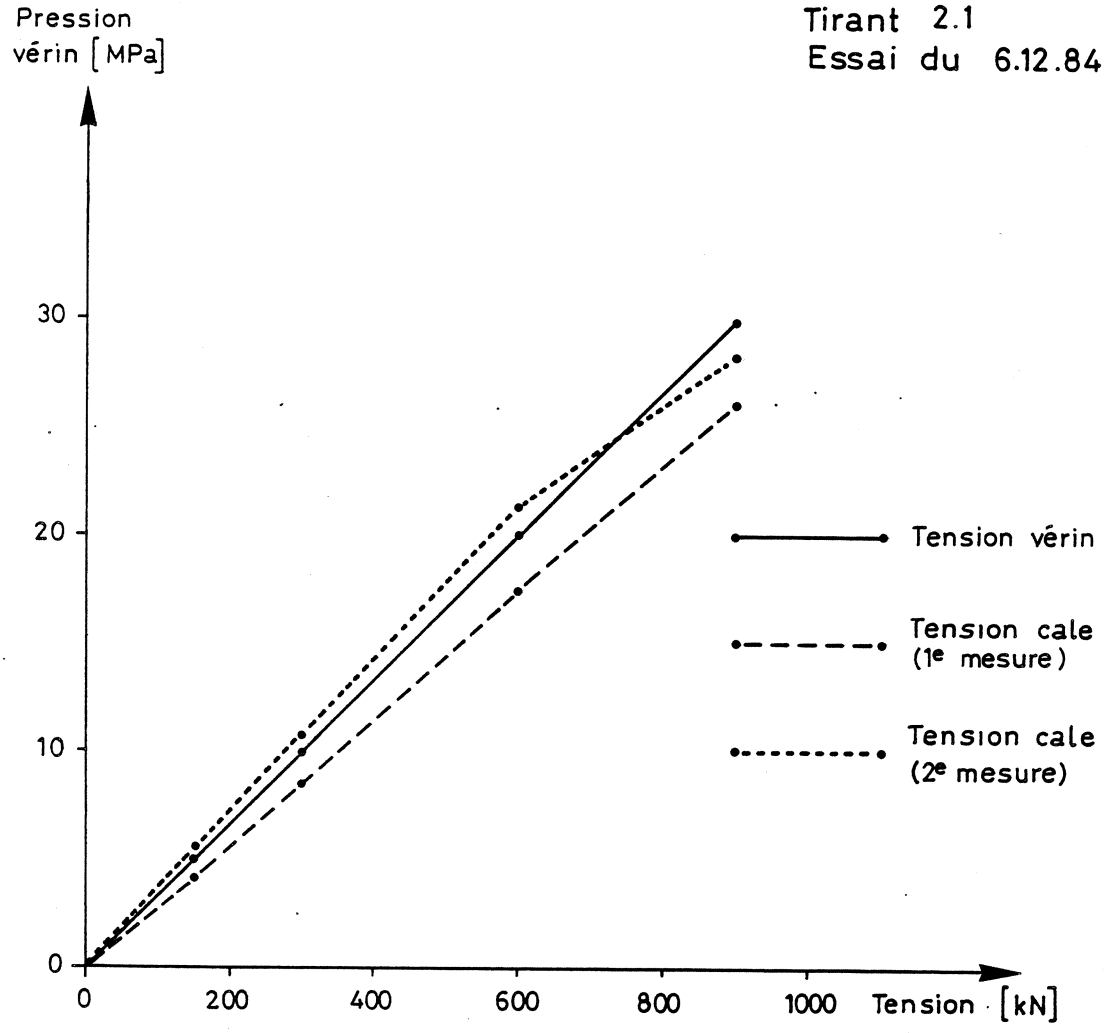
	Pont aval			Pont amont		
	1975	1977	1982	1975	1988	1982
201-2	--	-15	-21	-8	-11	-16
203-4	--	-6	-12	-2	-4	-11
205-6	--	-9	-16	-4	-6	-13
207-8	--	-11	-12	-5	-5	-3
209-10	--	-7	-7	-5	-5	-3
211-12	--	-6	-6	-1	-1	-1
213-14	--	-6	-6	-1	-1	0
215-16	--	-5	-6	-3	-2	-3
217-18	--	--	--	-2	-2	-2
219-20	--	-17	-22	-2	-3	-5

Mesures de nivellement de contrôle des ponts de la Paudèze


PONT DE LA PAUDEZE
Variation de la tension des tirants
T [t]
110
100
90
80
70
60
50
0
1000
2000
3000
4000
t [jours]
10.7.74
2.10.75
23.6.76
5.6.77
18.7.78
26.9.79
27.5.82
26.9.83
25.10.83
26-4-84
28.8.84
8 cordes
7 cordes
6 cordes
2-1
8 cordes
4 cordes
5 cordes
1-1
1-2

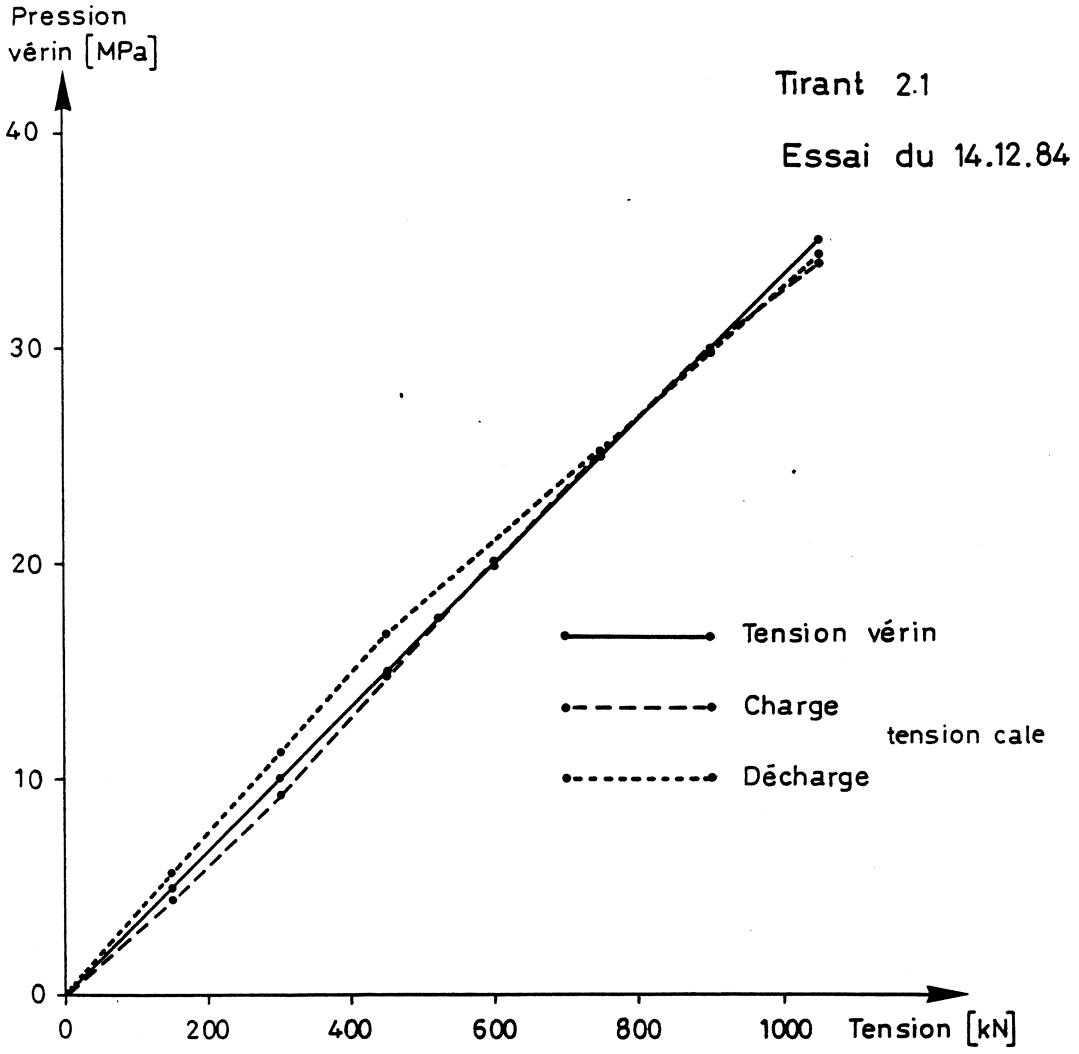
Ponts de la Paudèze

ESSAIS SUR TIRANT

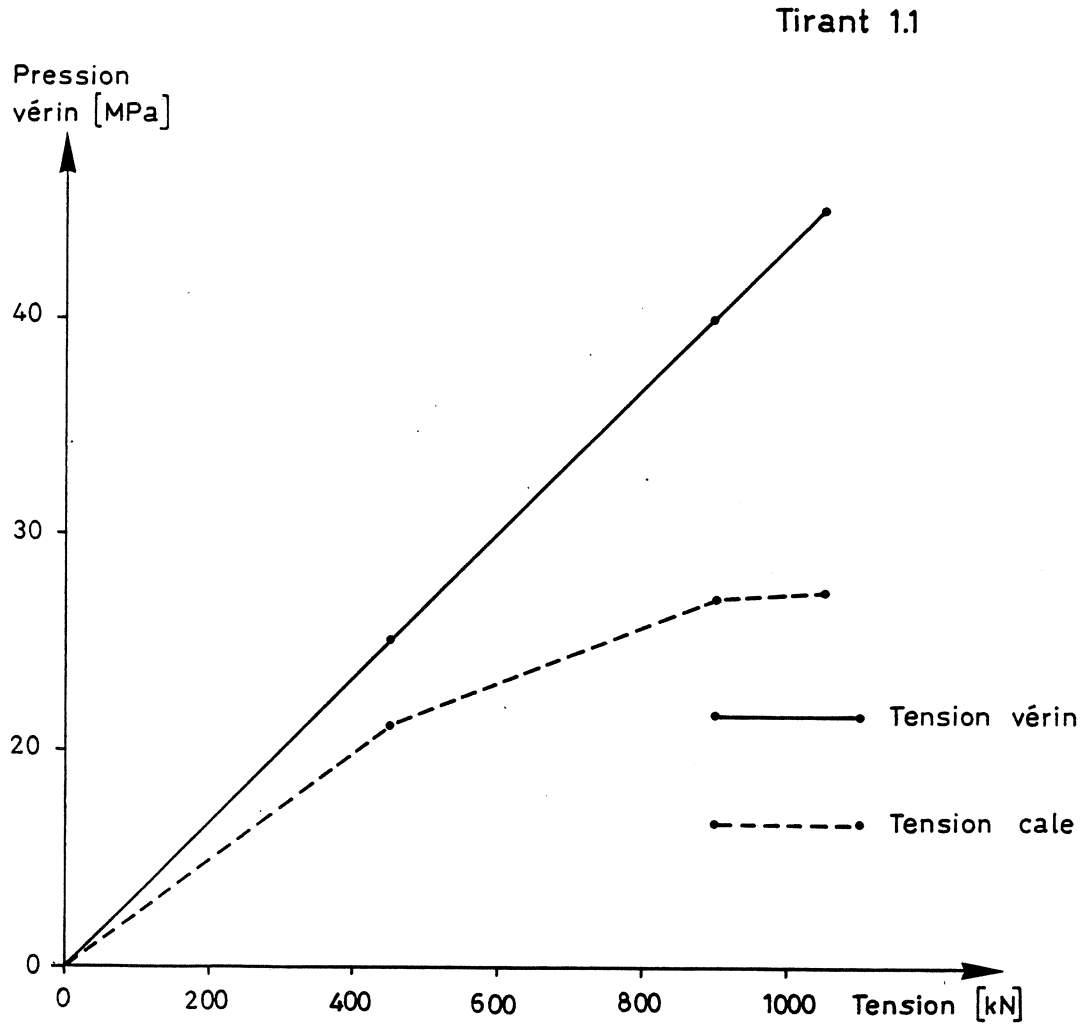


Ponts de la Paudèze

ESSAIS SUR TIRANT



Ponts de la Paudèze
ESSAIS SUR TIRANT

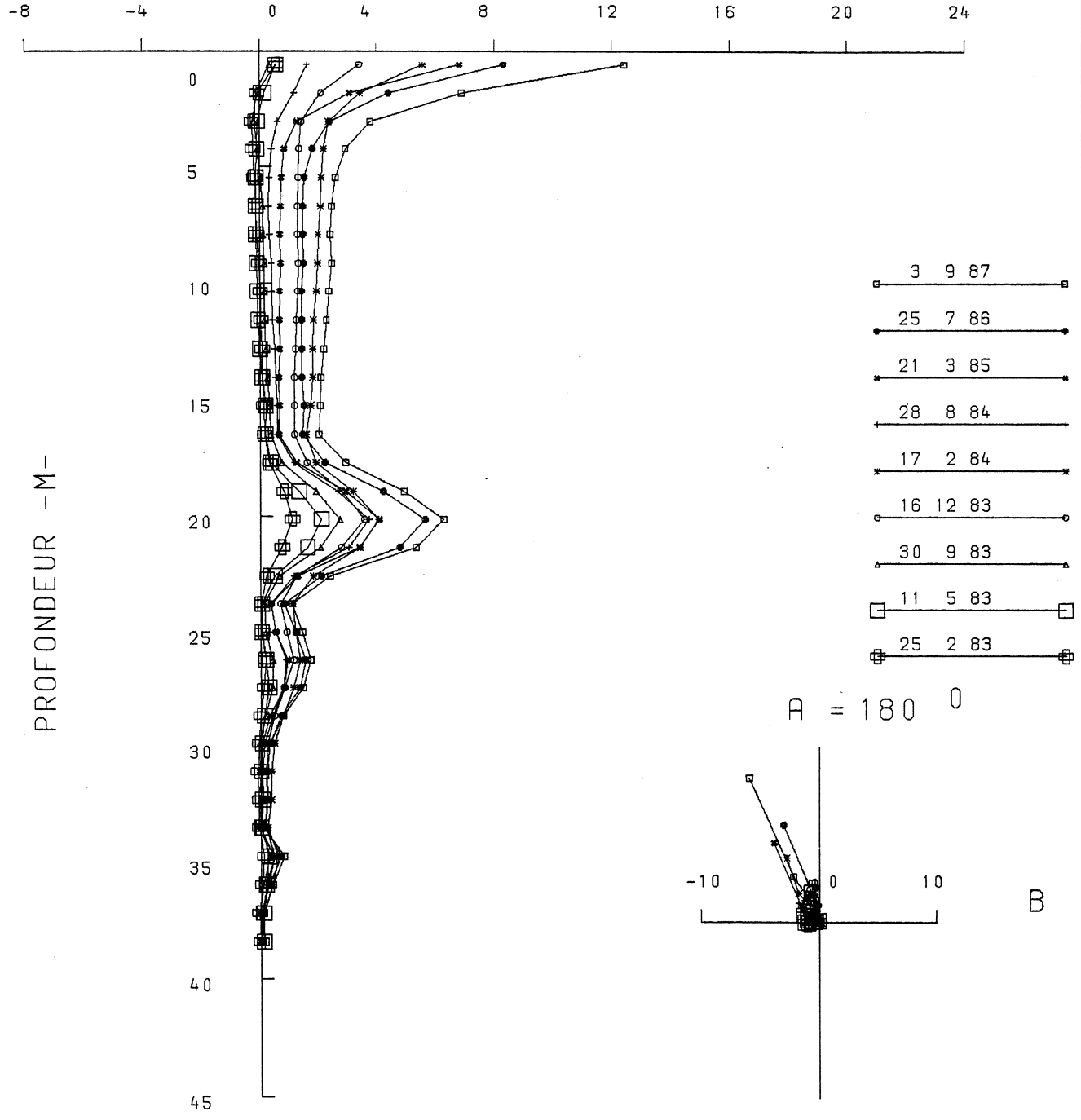


LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO IPZ1A3

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 6 12 82

DEPLACEMENTS (MM)



SELON AZIMUT DONNE
AZ= 180 DEGRES

3.2 PONTS SUR LA LUTRIVE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N9 Section 907 km : 12.754-12.969

Traversée par deux ponts parallèles, en courbe (R = 1'000 m) de la vallée de la Lutrive.

Auteur du projet	Bureau Techn. E. + A. Schmidt, Bâle
Dossier géologique	A. Bersier, Lausanne
Dossier géotechnique	H. B. de Cérenville, Lausanne
Construction	1972-1973
Longueur totale	395 m
Nbre d'appuis entre les culées	3
Portées du pont aval	58.0 - 129.5 - 143.5 - 64.0 m
Tablier	Poutre en béton précontraint articulée au milieu des portées Section en caisson, inertie variable
Piles	Deux palées (0.80 × 7.20) écartées de 1.20 m encastrées dans la superstructure et sur les fondations
Fondations	Piles : puits elliptiques de 4.0 × 7.0 m appuyés sur la molasse Culées : pieux forés (Ø 65cm) ancrés.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

Dans cette région, en raison de la présence de deux failles géologiques importantes, la roche est très tectonisée. On trouve successivement :

- la molasse en place formée de couches gréseuses ou macigneuses dures, alternées avec des horizons marneux plus tendres. Elle apparaît entre 8.0 et 15.0 m de profondeur
- plusieurs mètres (2.0 à 10.0) de roche marneuse altérée, broyée ou fauchée, très tendre et de faible résistance au cisaillement ($\phi = 30^{\circ}$, $C = 30\ kN \cdot m^{-2}$)
- un sol de 10 à 12 m d'épaisseur constitué par des argiles d'altération molassique, des débris marneux et des morceaux de grès. La résistance au cisaillement est également faible ($\phi = 29^{\circ}$, $C = 25\ kN \cdot m^{-2}$).
- en surface des limons argileux plus ou moins sableux dont l'épaisseur varie de 1 à 6 m.

De l'eau est présente dans des horizons aquifères locaux, alimentés par le ruissellement.

Les relevés géologiques effectués lors de la mise en place des tubes inclinométriques ILv1 et ILv2 précisent la succession lithologique des terrains à proximité des piles 1 et 2 (annexes 2/1 - 2/6).

1.3 Problèmes d'instabilité

Les sols de couverture, instables, forment une épaisse couche sur le versant ouest du vallon. Entre le Macheret et la Lutrive, ils sont en glissement actif et peuvent exercer des poussées sur la partie enterrée des constructions.

En dessus de cette zone, vers le sommet du coteau, des glissements couche sur couche des niveaux molassiques supérieurs sont à craindre à la faveur de la plastification des horizons marneux.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

L'équipement des deux piles rive droite du Macheret comprent :

- des repères topographiques
- deux tubes pour mesures inclinométriques.

2.1 Topographie

L'auscultation topographique de l'ouvrage comprend le nivellement de chevilles en laiton placées à la base des culées. Le nivellement s'effectue en aller et retour avec un équipement invar et le niveau Wild No 2 avec un micromètre à lames parallèles. Il est rattaché à un réseau de points extérieurs, eux-mêmes reliés au nivellement cantonal.

Une triangulation locale permet en outre de suivre les déplacements de la tête des inclinomètres (annexe 2/7).

2.2 Inclinomètres

Deux tubes de mesures inclinométriques ILv1 et ILv2 ont été posés pour permettre de déceler l'intensité d'éventuels mouvements de terrain, en profondeur.

3. RESULTATS DES MESURES

3.1 Topographie

Les sept campagnes de nivellement réalisées entre 1971 et 1977 n'ont mis en évidence que de très faibles tassements, ceux-ci n'ont guère dépassé 1 mm/an depuis 1973, date de la fin des travaux comme l'indiquent les valeurs du tableau ci-dessous :

Tassements cumulés des repères en mm

Date de la mesure	Pile 1				Pile 2			
	203	204	205	206	207	208	209	210
24.04.72					0	0	0	0
03.07.72	0	0	0	0	0	0	-2	-2
15.03.73	-6	-6	-7	-7	-10	-10	-14	-14
20.12.73	-7	-7	-10	-10	-14	-16	-17	-19
05.12.74	-7	-8	-12	-12	-15	-17	-18	-20
05.12.75	-10	-10	-15	-15	-16	-18	-19	-22
09.11.77	-10	-10	-16	-16	-17	-19	-21	-24

Les résultats des mesures de triangulation sont résumés dans le tableau ci-dessous :

ILv1	542'843.739	737	-2	748	+11
	151'968.459	467	+8	464	-3
	597.152	152	-0	151	-1
ILv2	542'946.920	919	-1	927	+8
	151'936.750	761	+11	755	-6
	576.078	076	-1	076	0

Ils indiquent des déplacements inférieurs au cm soit de l'ordre de grandeur de la précision de la mesure; toutefois, la résultante des déplacements mesurés selon x et y correspond à peu près à la ligne de plus grande pente.

3.2 Inclinomètres

Les mesures entreprises entre 1982 et 1987 indiquent un déplacement total en tête de 3 à 4 mm pour les deux tubes inclinométriques, soit environ 1 mm/an. Les annexes 2/8 et 2/9 donnent les déformations encaissées par ces deux tubes.

4. COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS OBTENUS

Bien que les valeurs restent faibles, les mesures topographiques et les mesures effectuées au moyen des inclinomètres indiquent une certaine analogie dans la direction des déplacements; ceux-ci correspondent également aux mouvements de glissement potentiel.

5. PROPOSITION DE PROSPECTION ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

Le dispositif de mesure actuel paraît suffisant pour permettre un suivi des déplacements éventuels avec une fréquence de 2 à 3 ans.

6. CONCLUSIONS

Malgré la présence à l'aval de l'ouvrage d'un glissement actif, on peut admettre que le comportement des fondations de ce pont est satisfaisant et que des travaux confortatifs ne sont pas nécessaires.

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ILv1 — FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 542'843 X 151'968 Z 597

DATE D'EXECUTION 19 novembre 1981 — PROFONDEUR 27.30 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple; ø 146; ø 131	100 %	1, 2			Remblai constitué de sables limoneux avec matériaux molassiques de prédominance marneuse	Remblai		
		3, 4, 5			Matériel marno-sableux, beige provenant probablement de l'altération de marnes molassiques	Matériel d'altération molassique	perte partie	
					Idem, mais gris-clair			
		6, 7, 8, 9, 10			Marnes altérées beiges et gris-bleu	Grès et marnes de la Molasse, glissé (?)		
					Grès fin marneux, micacé, gris			
					Marnes tendres gris foncé			
					Grès micacé, grain moyen à fin de la base vers le sommet, gris, fissuré de 8.20 à 8.90 m. Interlit marneux de 5 cm d'épaisseur à 8.90 m.		pertes partie	
					Marnes mi-dures feuilletées bleu-gris avec passage noirâtre plastique (9.60 - 9.75 m)			

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ILv1 FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 542'843 X 151'968 Z 597

DATE D'EXECUTION 19 novembre 1981 PROFONDEUR 27.30 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø 131	100%	11		5°	Marnes gréseuses indurées massives grises avec passages franchement gréseux, 10.5 m surface subhorizontale striée, calcitisée	Grès et marnes de la molasse, glissé (?)		
					Marnes mi-dures altérées bleu-gris			
		12		80°	Grès fin marneux, gris à stratifications obliques fracturé			
					Marnes tendres ± feuilletées, plastiques surtout à la base			
		13			Gris foncé-noirâtre à la base, gris vers le sommet			
					Matériel plastique argilo-marneux, vert olive			
		14			Ensemble de marno-grès micacés et marnes gris			
		15			Fractures suberticales à surfaces oxydées (13.80 m)			
		16			Marne très tendre plastique beige-vert			
					Grès fin gris			
					Marne tendre plastique bleue			
		17			Matière organique à la base			
Forage rotation eau, carottier double ø 101		18			Grès à grain moyen, gris, massif, fissuré	Grès et marnes de la molasse		
		19			Marnes tendres feuilletées grises grasses			
		20						

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ILv1 FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 542'843 X 151'968 Z 597

DATE D'EXECUTION 19 novembre 1981 PROFONDEUR 27.30 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø 101	100%	21			⊢15° Marnes tendres feuilletées grises, grasses	Grès et marnes de la Molasse		
		22			Marnes dures, grises			
		23			Marnes mi-dures, grises			
		24			⊢10° Marnes tendres argileuses feuilletées			
		25			Marnes mi-dures gris-beige			
					Marnes tendres bariolées lie-de-vin avec un niveau très plastique à la base		⊘	perte totale
		26			⊢15° Marnes dures grises			
		27			Marnes grises très tendres		⊘	perte totale
		28						

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ILv2 FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 542'947 X 151'937 Z 576

DATE D'EXECUTION 21 novembre 1981 PROFONDEUR 27.75 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø 146	100%	1			Terre végétale	Sables et Limons		
					Limon sableux terreux, beige-brun			
					Bloc de grès gris, micacé, massif stratifications obliques			
					Matériel terreux ± limoneux, brun			
		2			Limon sableux à blocs de marnes micacés beige verdâtre			
					Argile sableuse beige, plastique			
					Sables micacés (altération grès micacés) dans matrice limoneuse			
		3			Argile limoneuse beige à gris-beige ± plastique, contenant un bloc de grès à 3.50 m			
		4			Sables micacés gris à blocs et graviers (altération grès)			
Forage rotation à sec, carottier simple ø 131		5			Marnes tendres bariolées (gris-bleu et beige) ⊢10°	Marnes de la Molasse, glissé		
					Marnes id. très altérées, très plastiques à 5.00 et 5.20 m			
		6			Marnes mi-dures, lie-de-vin Passages plus indurés, fracturées de 5.70 - 6.30 m			
					Marnes gréseuses grises, indurées, fragmentées			
		7			Marnes mi-dures, grise et lie-de-vin			
					Argile beige plastique			
		8			Blocs de grès et marnes altérées			
					Marnes gréseuses fracturées, matrice argileuse			
		9			Marnes dures ± gréseuses, gris-violacé par places très fracturées, débit // au bedding. ⊢15°			
		10			Plissottements syn-sédimentaires à 9.10 m			

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ILv2 — FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 542'947 X 151'937 Z 576

DATE D'EXECUTION 21 novembre 1981 — PROFONDEUR 27.75 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau carottier simple ø115	100%	11, 12, 13, 14, 15			Marnes argileuses, tendres, gris-bleu à taches violacées Marnes grises mi-dures schistosées vers 11.70 m Marno-grès. Alternance (cm à 10 cm) de marnes et grès fin Marnes argileuses grises, tendres, altérées, décomposées, par places plastiques 10° Grès fin micacé gris massif Marne tendre, mi-dure, grise Grès moyen à fin, micacé, gris, massif 15°	Grès et Marnes de la Molasse		
Forage rotation à l'eau carottier double ø101		16, 17, 18, 19, 20			Marnes argileuses tendres, grises, massives Marnes tendres, très fortement micacées compactes, par places feuilletées, gris foncé 10° Marnes idem, plus feuilletées Présence de lamellibranches			

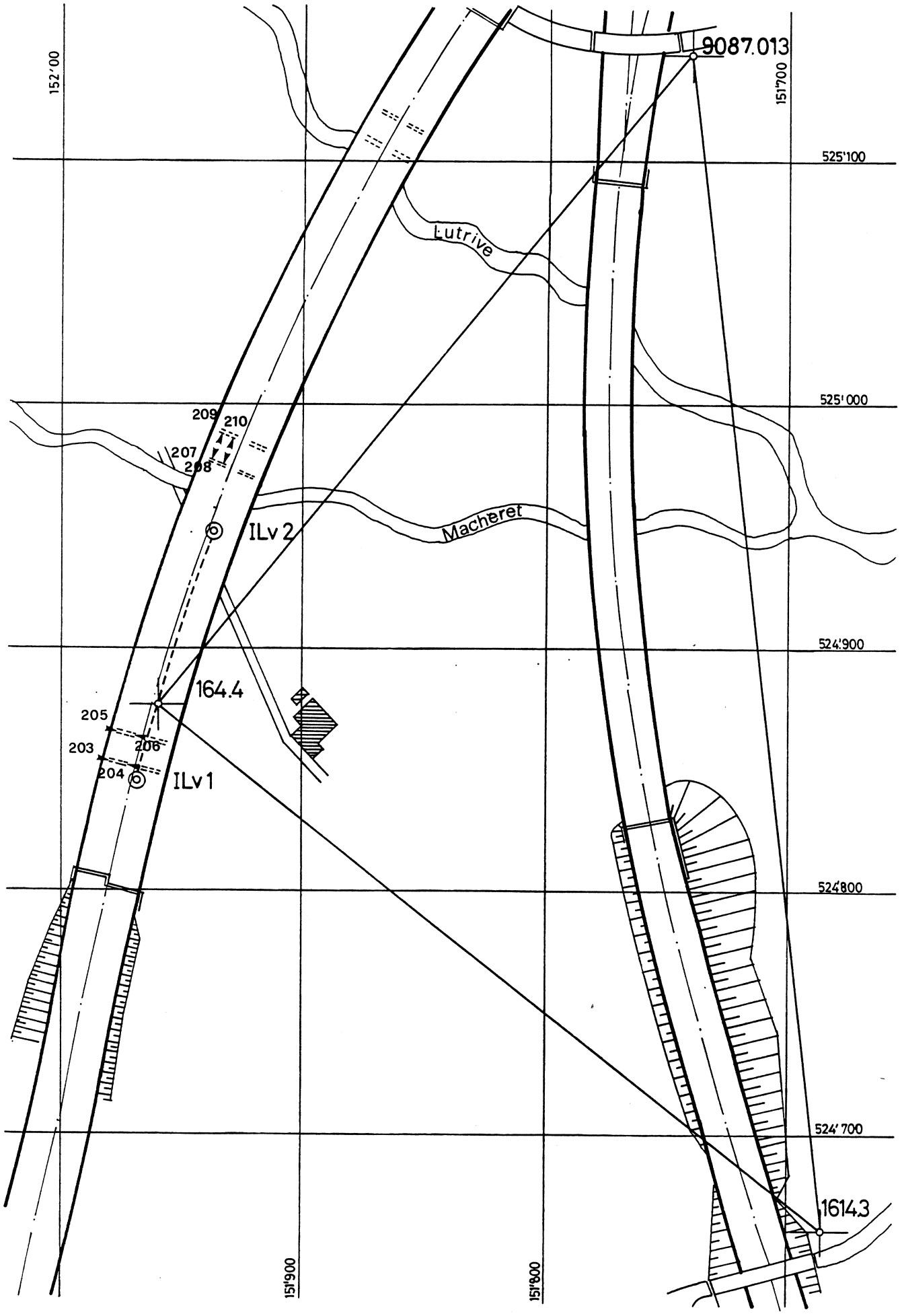
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ILv2 FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 542'947 X 151'937 Z 576

DATE D'EXECUTION 21 novembre 1981 PROFONDEUR 27.75 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ϕ 101	100%	21			Marnes tendres, gris-brun, massives coquilles de Lamellibranches	Grès et marnes de la Molasse		
					20° Grès coquiller Lumaschellique			
		22			16° Marnes tendres grises, légèrement argileuses, ondulées			
		23			Marnes tendres grises à taches jaunâtres, disloquées à la base			
		24						
		25			Marnes tendres à passées mi-dures grise à beige verdâtre, bariolées par places décomposées			
		26						
		27			15° Marnes gréseuses passant progressivement vers la base à grès moyens verdâtres			
		28						
		29						
		30						


9087.013
152'00
151'700
525'100
Lutrive
525'000
209
210
207
208
ILv 2
Macheret
524'900
164.4
205
203
206
204
ILv 1
524'800
524'700
1614.3
151'900
151'800

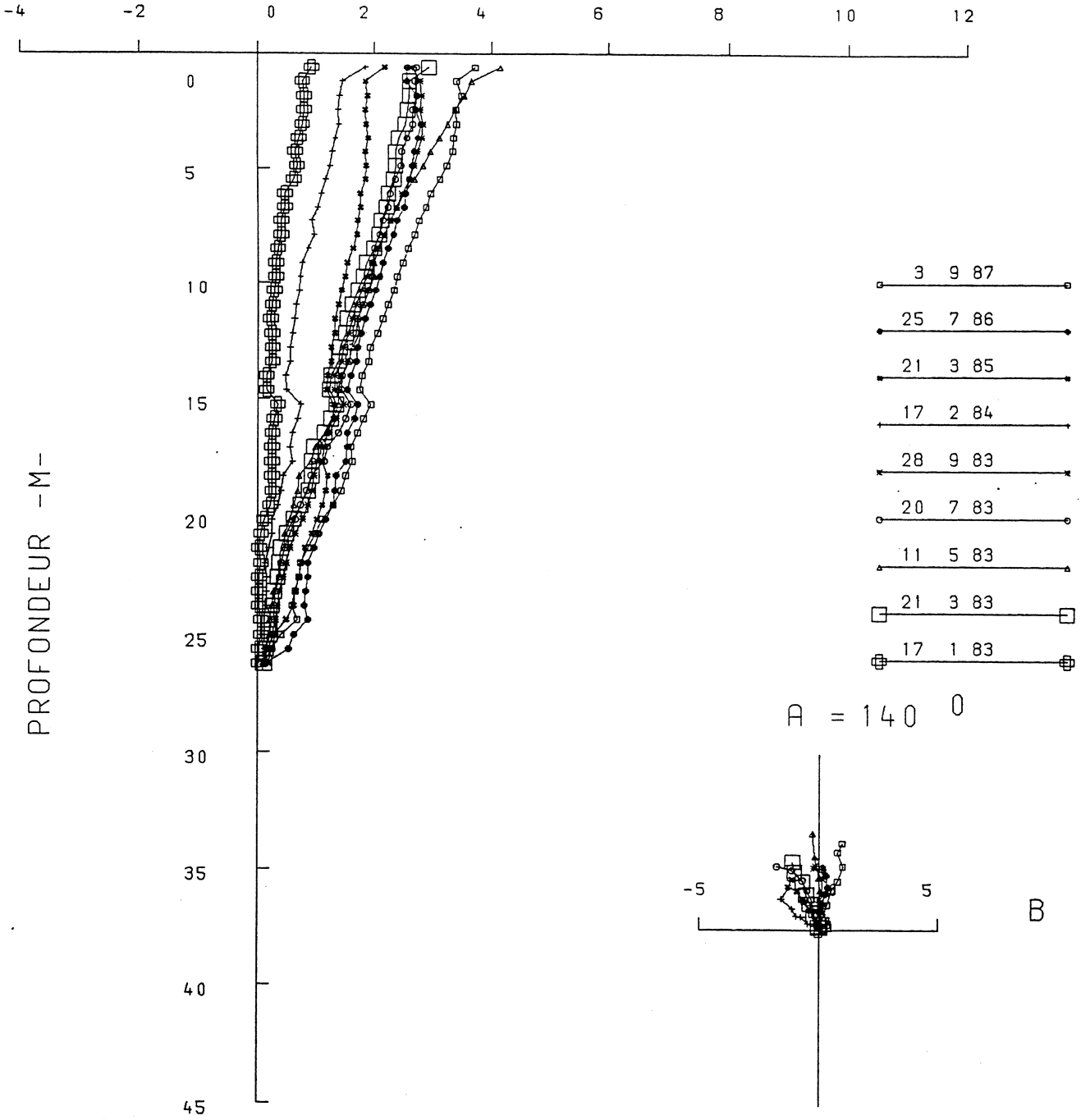
Annexe 2/7

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO ILV1A3

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 26 11 82

DEPLACEMENTS (MM)



SELON AZIMUT DONNE
AZ= 140 DEGRES

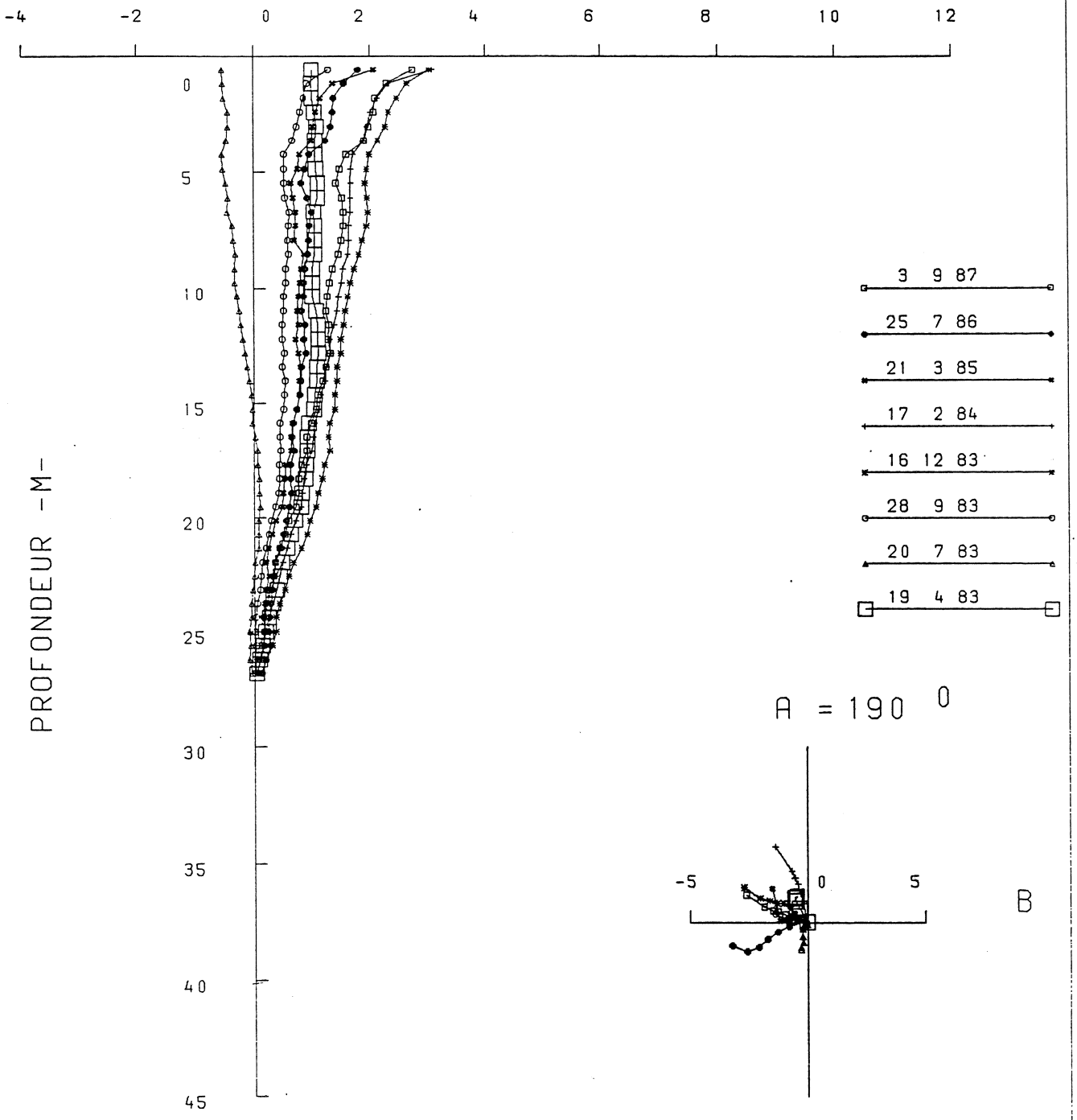
Annexe 2/8

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO ILV2A3

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 1 3 83

DEPLACEMENTS (MM)



SELON AZIMUT DONNE
AZ= 140 DEGRES

3.3 PONTS SUR LA VEVEYSE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N9 Section 916 km : 26.558-26.885

Traversée par deux ponts parallèles, en courbe (R = 900 m) de la vallée de la Veveyse.

Auteur du projet	ACMV + Ch. Menn, Coire
Dossier géologique	A. Bersier, Lausanne
Dossier géotechnique	LEGEP, Lausanne
Construction	1967-1969
Longueur totale	328 m
Nbre d'appuis entre les culées	2
Portées du pont aval	111 m - 129 m - 58 m
Tablier	Dalle en béton précontraint sur caisson métallique; poutre continue
Piles	Section rectangulaire (7.50 × 2.20 m) évidée, liée au tablier et aux appuis
Fondations	Rive gauche : semelles sur la molasse ou les graviers Rive droite : puits appuyés sur la molasse

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

La roche en place, relativement tendre, est de la molasse rouge composée de marnes et de marno-grès, très tectonisés. Le relevé géologique effectué lors de la mise en place de l'inclinomètre IVy1 précise la succession lithologique des terrains au voisinage de la pile 1 (annexes 3/1 - 3/3).

Sur le versant gauche les couches affleurantes sont fauchées. Elles sont recouvertes d'une moraine de fond limono-argileuse (ép. 0.50 - 2.0 m) imperméable sur laquelle se trouvent des graviers fluvio-glaciaires (ép. 25 m) de bonne qualité.

Sur le versant droit la roche, altérée par les circulations d'eau, est fortement fissurée. Les marnes sont transformées en argiles plastiques glissantes. La couverture meuble, de 15 à 20 m d'épaisseur, composée de matières argileuses et limoneuses avec quelques graviers, est imprégnée d'eau. Ces sols sont en glissement actif mais lent. Les caractéristiques géotechniques mesurées sont :

limons argileux graveleux : $W = 18\text{-}26\%$ $\phi = 14\text{-}26^{\circ}$ $C = 60\ kN \cdot m^{-2}$

sables et graviers limoneux : $W = 11\text{-}15\%$ $\phi = 32\text{-}38^{\circ}$ $C = 0\text{-}45\ kN \cdot m^{-2}$

Le régime des eaux souterraines est celui d'une nappe fissurale. Les écoulements se font par les fissures et surfaces de glissement de la molasse et des sols. Les débits sont en relation avec les précipitations. Les sous-pressions peuvent être élevées.

1.3 Problèmes d'instabilité

Le versant droit est caractérisé par l'instabilité des sols et des couches altérées de la molasse. La plastification des marnes, l'effet des pressions hydrauliques provoquent un déplacement des terrains vers la rivière. Les efforts appliqués sur la culée ou la pile de ce versant pourraient atteindre des valeurs excessives.

Le versant gauche est formé par les têtes affaissées et fissurées des bancs de molasse. La pile repose sur des horizons présentant un pendage incliné de 11° vers la rivière. La possibilité d'un glissement de couche, sous le niveau d'assise, a été retenue lors de la construction.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

L'équipement de la pile B3 comprend :

- des repères topographiques
- des extensomètres à corde vibrante
- un pendule inversé
- des plaques pour mesures au clinomètre
- un tube pour mesures inclinométriques

2.1 Topographie

L'auscultation topographique de l'ouvrage consiste en un nivellement de chevilles en laiton placées sur les appuis des piles. Le nivellement s'effectue en aller et retour avec un équipement invar et le niveau Wild No 2 équipé d'un micromètre à lames parallèles. Il est rattaché à un réseau de points extérieurs, eux-mêmes reliés au nivellement cantonal.

2.2 Extensomètres

Quatre séries de quatre extensomètres à corde vibrante de marque GALILEO ont été noyés dans le béton lors de la construction des puits des piles pour mesurer les déformations de la section de béton. L'annexe 3/4 présente un schéma de pose de ces extensomètres.

2.3 Pendule inversé

Un pendule inversé a été mis en place pour permettre l'observation d'un déplacement du sommet du puits de fondation par rapport à la base.

2.4 Clinomètres

Deux plaques métalliques, disposées parallèlement et perpendiculairement à l'axe du pont, ont été scellées à la base de la pile pour détecter un basculement éventuel de celle-ci au moyen d'un clinomètre et confirmer les mouvements du sol repérés par les autres dispositifs de mesures.

2.5 Inclinomètre

Uu tube inclinométrique (IVy1) a été mis en place à l'amont de la pile B3 pour permettre de :

- détecter d'éventuels mouvements de terrain
- disposer d'éléments supplémentaires pour l'interprétation des mesures précédentes
- établir l'influence des mouvements de terrain sur la déformation de la pile B3 en comparant les mesures d'inclinométrie avec celles du pendule inversé et des plaques clinométriques.

3. RESULTATS DES MESURES

3.1 Topographie

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de tassement des points de repères, dont la position est précisée à l'annexe 3/5.

Date de la mesure	211	212	213	214	215	216
14.03.1968	-	-	0	0	0	0
13.05.1968	0	0	-	-	-	-
10.04.1969	-3	-4	-2	-2	-3	-3
07.12.1970	-4	-5	-2	-2	-5	-5
06.06.1972	-4	-6	-2	-2	-5	-5
03.03.1975	-5	-7	-1	-1	-8	-10
21.08.1978	-5	-7	+1	+1	-5	-5

On constate qu'entre 1968 et 1972 la fondation de la culée côté Lausanne (repères 211 et 212) et celle de la pile côté St-Maurice (repères 215 et 216) accusent un tassement moyen de 5 mm alors que durant la même période, la fondation de la pile B3 n'a tassé que de 2 mm.

3.2 Extensomètres

Le tableau de la page suivante indique les valeurs des déformations spécifiques et leurs variations par rapport à l'auscultation initiale de novembre 1967.

Les annexes 3/6 et 3/7 donnent une représentation graphique de l'évolution dans le temps des déformations de chaque extensomètre et de leurs moyennes. On constate des déformations importantes entre 1967 et août 1968, période au cours de laquelle s'est déroulé le bétonnage de la pile; puis entre 1968 et 1971, date de la fin de mise en place du revêtement. A partir de fin 1971, les variations ε sont restées faibles, de l'ordre de $\pm 5 \times 10^{-5}$.

Afin de donner une représentation plus parlante du comportement de la fondation de la pile depuis la mise en service du pont, nous avons donné à l'annexe 3/8 un diagramme représentant les déformations intervenues aux différents niveaux entre 1971 et 1985. On peut observer que la partie médiane de la pile (7.5 - 13.0 m) subit un étirement marqué alors que la partie supérieure est comprimée; ceci pourrait résulter d'un effort de flexion engendré par une poussée latérale consécutive au glissement des terrains superficiels.

3.3 Pendule inversé

Les mesures effectuées par le laboratoire de La Veyre avec un pendule inversé placé dans la pile du pont amont indiquent, entre 1969 et 1986, un déplacement de 1 à 2 mm en direction N 142° E avec toutefois des mesures intermédiaires assez erratiques (annexe 3/9). On peut

Mesures extensométriques. Evolution des déformations dans le temps

No extensomètre	Déformations $\varepsilon \times 10^{-4}$									
	09.05.68	21.05.68	15.08.68	27.10.71	05.05.76	29.06.77	18.07.78	27.06.79	09.06.82	19.04.85
21	-1.39	-2.01	-4.18	-5.94	-6.09 -0.15	-6.20 -0.26	-6.23 -0.29	-6.30 -0.36	-6.23 -0.29	-6.05 -0.11
22	--	-0.52	-3.47	-5.23	-5.79 -0.56	-5.90 -0.67	-6.09 -0.86	-5.97 -0.74	-5.94 -0.71	-5.41 -0.18
23	0	-0.84	-2.71	-3.93	-3.78 +0.14	-4.03 -0.11	-4.03 -0.11	-4.14 -0.22	-4.11 -0.19	-3.96 +0.04
24	-0.07	-0.04	-1.23	-1.90	-1.60 +0.30	-1.98 -0.08	-2.28 -0.38	-2.20 -0.30	-2.24 -0.34	-1.49 +0.41
11	-0.68	-0.80	-1.82	-3.15	-3.80 -0.65	-3.84 -0.69	-3.91 -0.76	-3.95 -0.80	-3.50 -0.35	-3.38 -0.23
12	-0.46	-0.38	-1.29	-1.90	-1.75 +0.15	-1.75 +0.15	-1.63 +0.27	-1.48 +0.42	-1.33 +0.57	-0.80 +1.10
13	-0.15	-0.26	-0.92	-0.95	-0.48 +0.47	-0.59 +0.36	-0.59 +0.36	-0.66 +0.29	-0.66 +0.29	-0.73 +0.22
14	+0.51	+0.44	-0.33	-0.92	-0.70 +0.22	-0.84 +0.08	-0.84 +0.08	-0.84 +0.08	-0.77 +0.15	-0.47 +0.45
41	-0.29	-0.26	-0.99	-1.61	-1.50 +0.11	-1.61 0	-1.61 0	-1.72 -0.11	-1.72 -0.11	-1.80 -0.19
42	-0.80	-0.69	-5.87	-6.03	-5.44 +0.59	-5.60 +0.43	-5.65 +0.38	-5.65 +0.38	-5.49 +0.54	-5.49 +0.54
43	-0.04	-0.04	-0.40	-0.59	-0.22 +0.37	-0.37 +0.22	-0.33 +0.26	-0.31 +0.28	-0.37 +0.22	-0.18 +0.41
44	+0.05	0	-0.66	-0.87	-0.87 0	-0.44 +0.43	-0.44 +0.43	-0.55 +0.32	-0.38 +0.49	-0.22 +0.65
31			--	+1.73	+1.67 -0.06	+1.51 -0.22	+1.30 -0.43	+1.19 -0.54	+1.13 -0.60	+1.13 -0.60
32			-0.42	-0.61	-0.53 +0.08	-0.53 +0.08	-0.53 +0.08	-0.57 +0.04	-0.57 +0.04	-0.53 +0.08
34			-0.34	-0.26	+0.11 +0.37	-0.04 +0.22	-0.04 +0.22	-0.11 +0.15	0 +0.26	+0.15 +0.41

donc penser qu'un mouvement du terrain pourrait provoquer une flexion de la fondation encastrée à sa partie inférieure. Il semble, cependant, qu'un mouvement horizontal devrait également entraîner une composante verticale mesurable par topographie.

3.4 Clinomètres

Les cinq mesures effectuées mettent en évidence un très faible basculement de la pile vers N 145°, soit dans la même direction que celle indiquée par le pendule inversé (annexe 3/10).

3.5 Inclinomètre

Les huit séries de mesures réalisées entre novembre 1982 et septembre 1987 n'ont révélé qu'un déplacement maximum de 3 mm, selon un azimut N 290° (annexe 3/11); soit une valeur qui est du même ordre de grandeur que la précision de la mesure.

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

Le dispositif de mesure complémentaire (clinomètre, inclinomètre) mis en place au début de cette étude permet de faire les constatations suivantes :

- les mesures effectuées au moyen du clinomètre semblent indiquer l'existence d'un glissement de faible intensité provoquant une flexion du puits de fondation déjà observée par les mesures aux extensomètres et au pendule inversé
- les résultats des mesures inclinométriques par contre ne permettent pas, en raison des valeurs très faibles de déplacement, de confirmer la présence de ce glissement.

5. PROPOSITIONS DE PROSPECTIONS ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

Si une poursuite des mesures au moyen du dispositif déjà en place, avec toutefois une fréquence réduite (2 à 3 ans), présente un intérêt certain, il ne semble par contre pas utile de mettre en oeuvre d'autres types d'appareils, au stade actuel.

Il faut toutefois relever que les mesures effectuées au moyen des extensomètres à corde vibrante sont toujours plus difficiles en raison de l'usure du matériel.

6. CONCLUSIONS

Les observations effectuées depuis la construction de l'ouvrage montrent que le comportement des fondations est satisfaisant et qu'il n'est pas nécessaire d'envisager de mesures confortatives complémentaires.

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IVs 1 — FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 555'200 X 147'400 Z 464

DATE D'EXECUTION 10 avril 1982 — PROFONDEUR 30.0 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø 146	100%	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10			Terre limoneuse ± végétale Matériel molassique décomposé en limon très finement sableux, un peu argileux, rosâtre, à gros éléments de grès très durs (1.70 - 2.50); beige-jaune dès 2.50 m Matériel molassique décomposé, à forte dominante marneuse, compacte, avec quelques gros éléments de grès; niveaux organiques charbonneux (4.10 - 4.45 et 4.50 - 4.65 m); dès 5.30 m présence de débris charbonneux et quelques graviers morainiques	Matériel décomposé molassique, glissé		
					Limons sableux à graveleux (galets roulés) légèrement argileux, brunâtres (mélange entre matériaux sus- et sous-jacents) Sables moyens très graveleux, légèrement limoneux, gris-beige, avec un bloc à 6.50 m (fluvio-glaciaire) Graviers sablo-limoneux, gris-beige, humides (matériel arrondi, alluvial) Limons, graviers finement sableux, beige rose , jaune , très compacts à durs Limons stratifiés (glaciaux-lacustres) compacts jaune-beige, avec gros morceau grès Blocs de grès pris dans un gangue limoneuse (comme précédemment)	Matériel morainique et fluvioglaciaire, glissé		
ø 114					Grès marneux jaunes, partiellement disloqués			

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IV_S 1 FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 555'200 X 147'400 Z 464

DATE D'EXECUTION 10 avril 1982 PROFONDEUR 30.0 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø 114	57 %	11			Marnes silteuses schisteuses disloquées Matériel hétérogène : marnes silto-gréseuses; marnes schisteuses; marno-grès calcaires gris jaunâtre, puis rose-gris-noir	Molasse rouge disloquée, glissée		
	100 %	12			Grès gris fracturés Grangue marneuse à éléments durs, bariolée Marnes silto-calcaires dures			
		13			Marnes silteuses décomposées, disloquées, puis compactes Marnes gris-noir, disloquées			
		14			Marnes jaune-gris décomposées, compactes jusqu'à 13.8 m, puis disloquée Marnes silto-calcaires dures, gris-jaune, disloquées			
		15			Grès fins légèrement marneux, très durs, fracturés			
		16			Marnes calcaires, plus ou moins silteuses, gris-rose, disloquées, avec gangue argilo-limoneuse dès 15.90 m			
		17			Marnes décomposées Marnes bariolées, d'allure remaniée			
		18			Marnes rougeâtre riches en éléments de grès tectonisés			
		19			Grès marno-calcaires très durs, à passées plus gréseuses et plus marneuses; roche massive non litée, non stratifiée, à pendage pratiquement indéterminable	Molasse rouge		
		20						

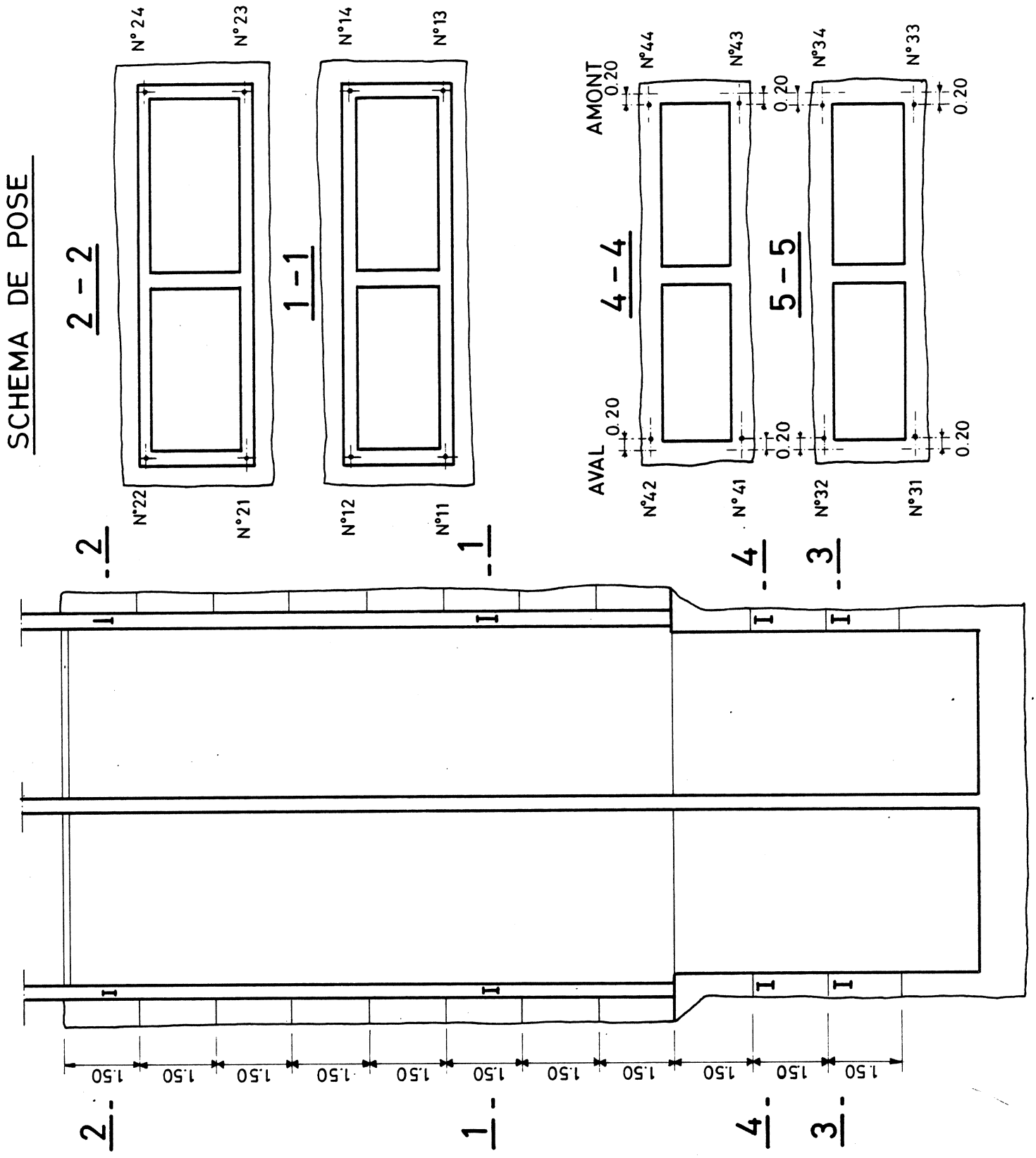
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

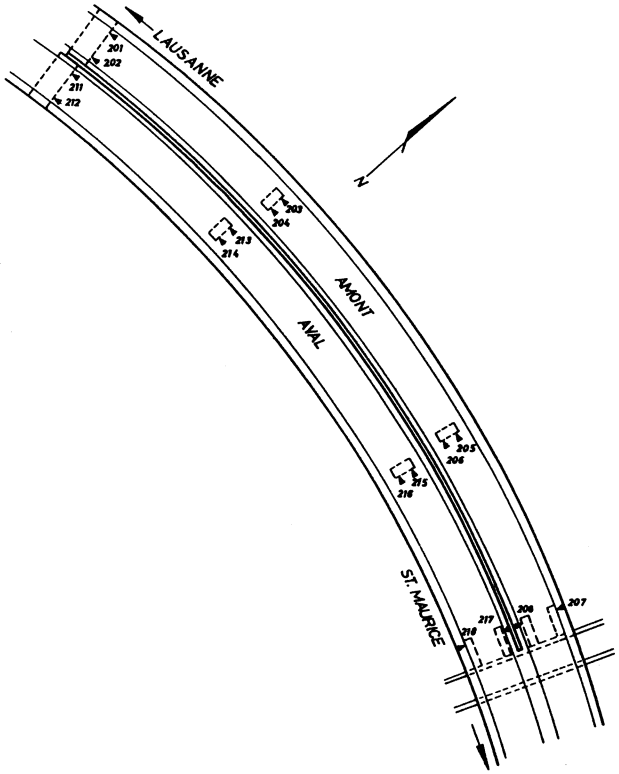
SONDAGE N° IV_S 1 — FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 555'2002 X 147'400 Z 464

DATE D'EXECUTION 10 avril 1982 — PROFONDEUR 30.0 m

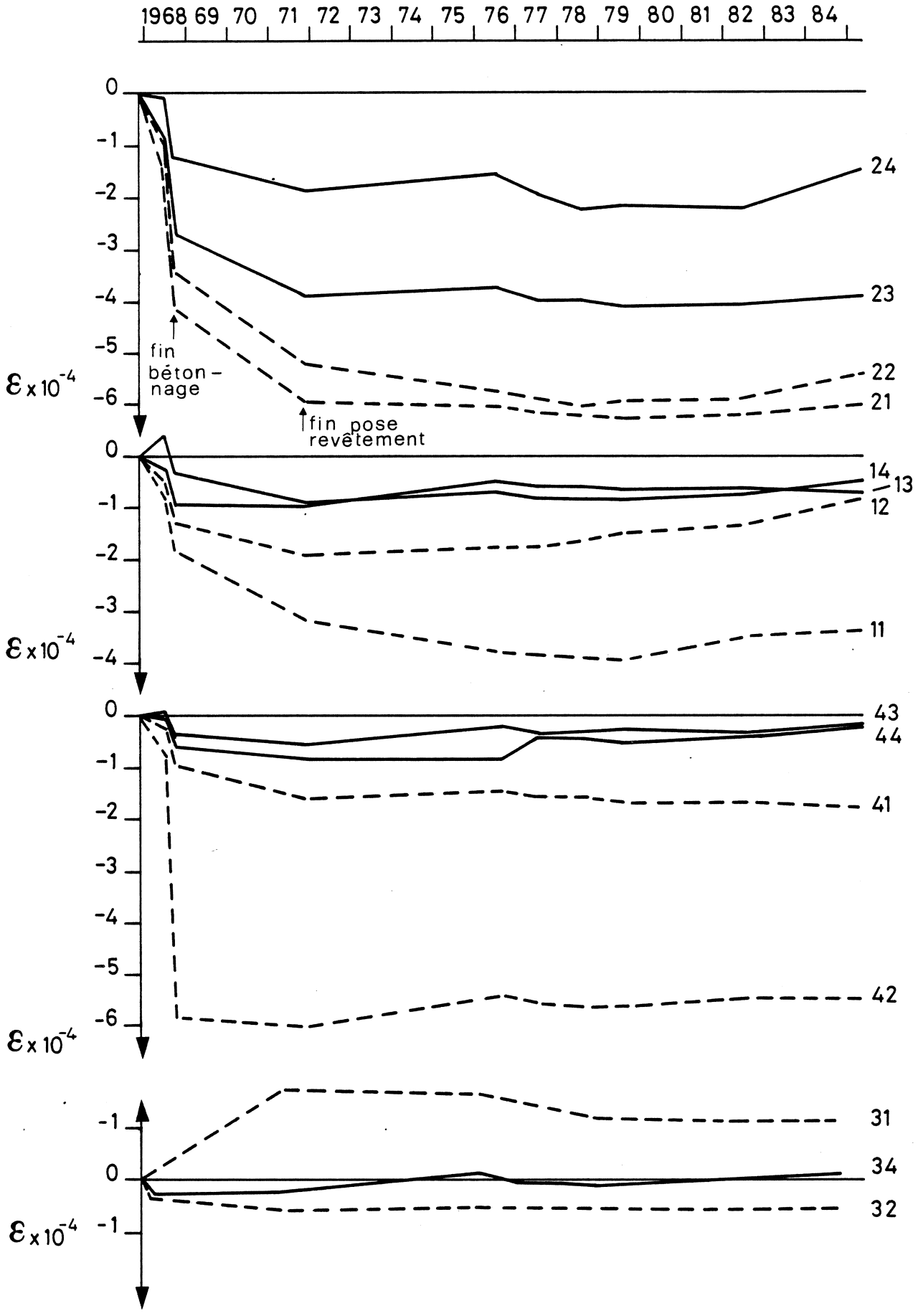
Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø 101 / ø 114	100 %	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30		80°	Grès marno-calcaires très durs, massifs, gris rougeâtre, à passées plus gréseuses et plus marneuses; roche non litée, non stratifiée, à pendage pratiquement indéterminable. Faille subverticale de 20.2 à 20.8 m. Surface lustrée et striée horizontale à 21.55 m sur niveau calcitisé. Quelques fissures subverticales; une fracture ouverte ondulant autour de la verticale (vers 25.0 m)	Molasse rouge, serie marno-gréseuse massive		

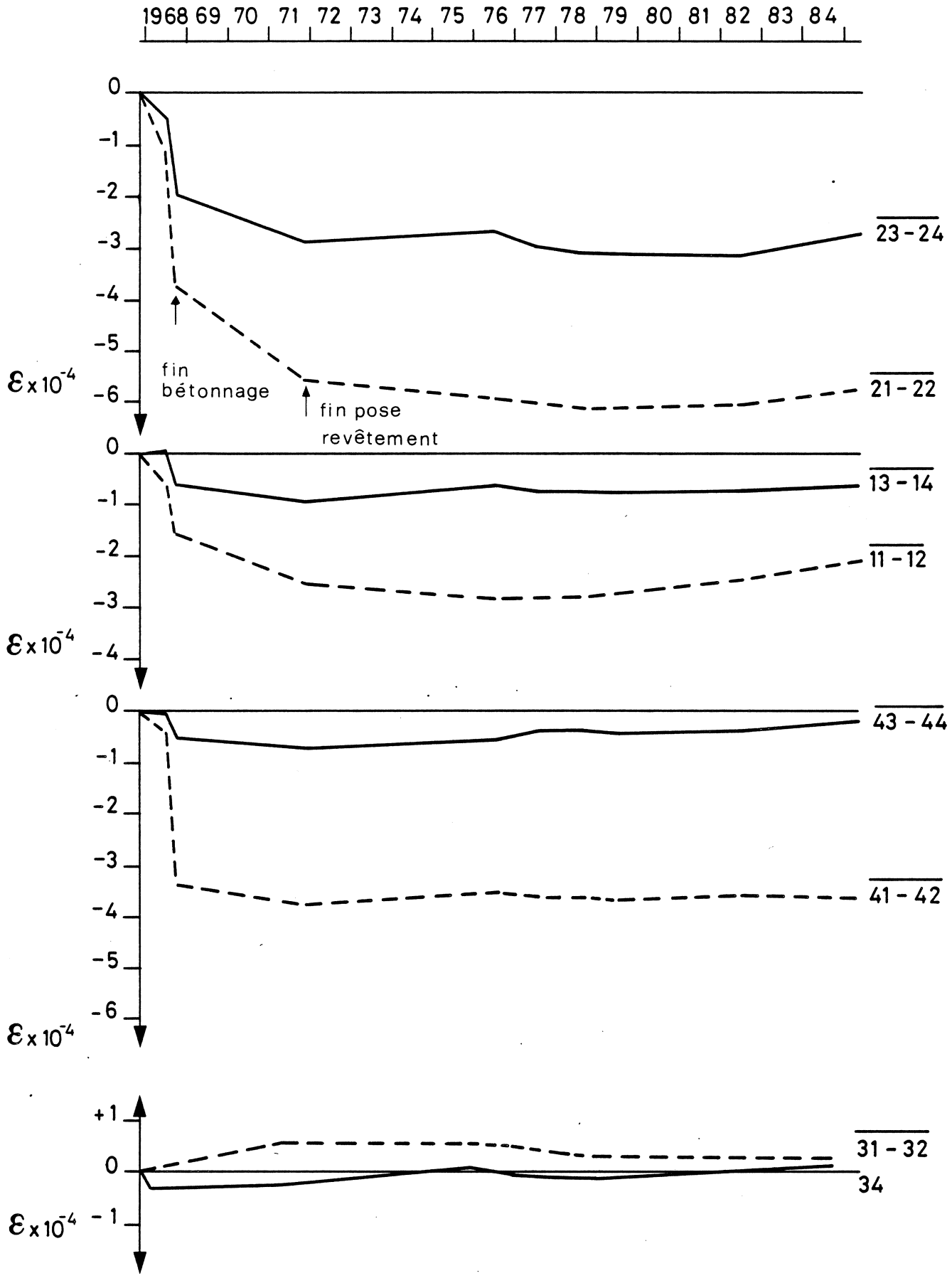

SCHEMA DE POSE
2 - 2
1 - 1
4 - 4
5 - 5
N°24
N°23
N°14
N°13
N°22
N°21
N°12
N°11
N°44
N°43
N°34
N°33
N°42
N°41
N°32
N°31
AMONT
AVAL
0.20
2
1
4
3
1.50

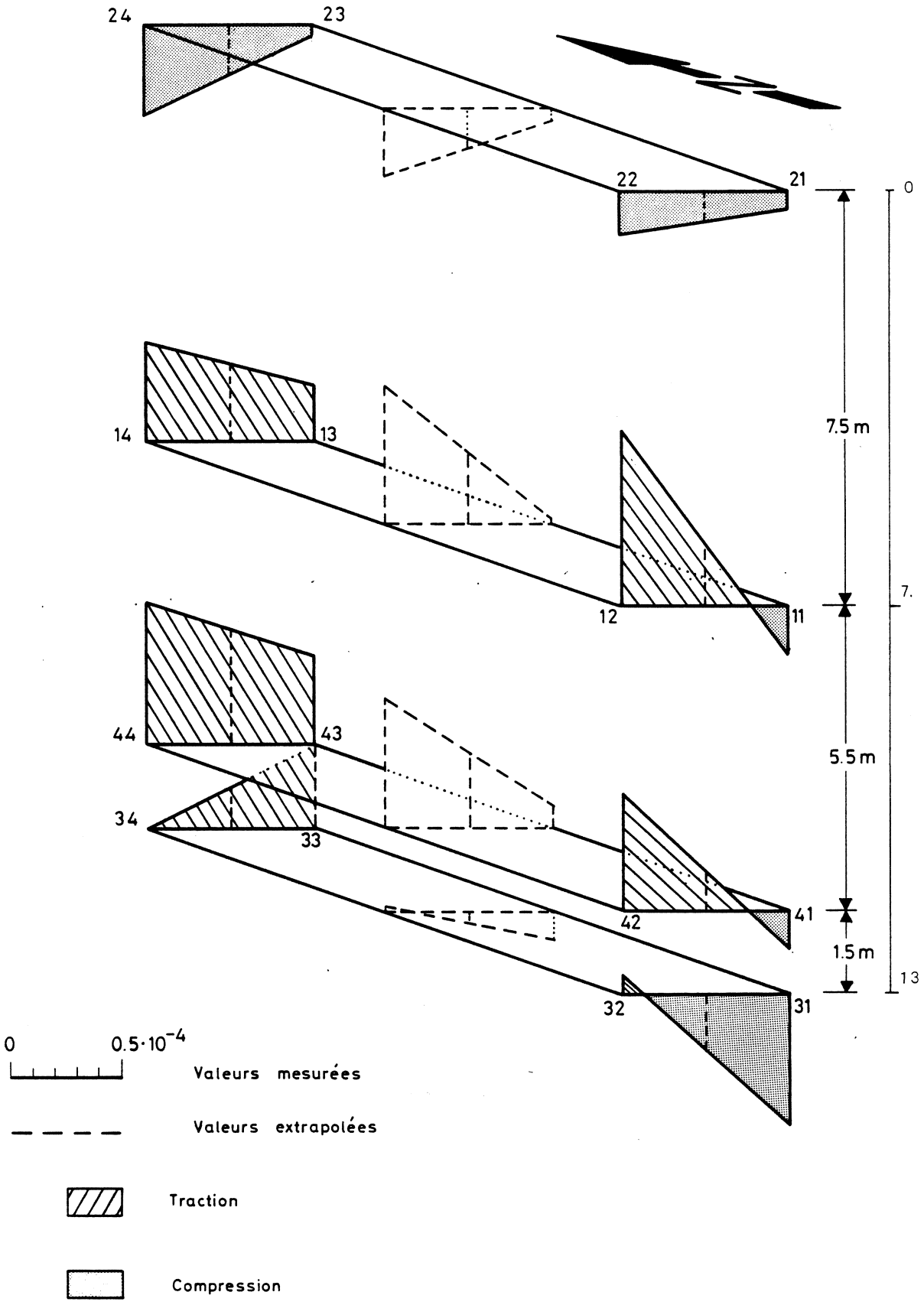


Pont	Date	4/69	12/70	6/72	3/75	8/78
amont	201-11	-2	-3	-3	-4	-3
	203-4	-3	-3	-3	-2	0
	205-6	-4	-6	-6	-6	-7
	207-8	-3	-4	-5	-5	-5
aval	211-12	-4	-5	-5	-6	-6
	213-14	-2	-2	-2	-1	+1
	215-16	-3	-5	-5	-9	-5
	217-18	-2	-3	-4	-4	-4

Mesures de nivellement de contrôle des ponts de la Veveyse

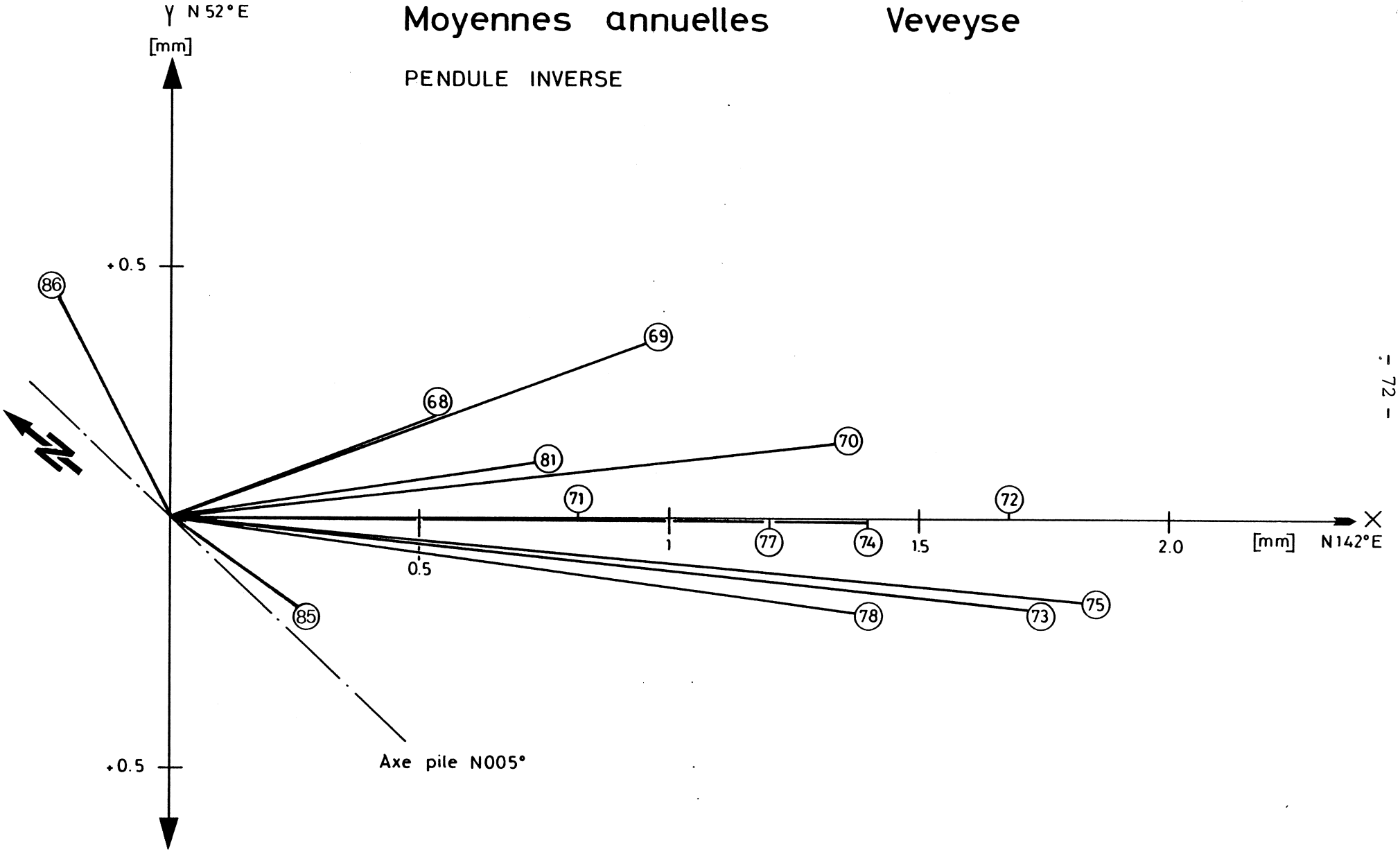

1968 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
ε x 10⁻⁴
fin béton-nage
fin pose revêtement
24
23
22
21
14
13
12
11
43
44
41
42
31
34
32


1968 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
ε x 10⁻⁴
fin bétonnage
fin pose revêtement
23 - 24
21 - 22
0
-1
-2
-3
-4
ε x 10⁻⁴
13 - 14
11 - 12
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
ε x 10⁻⁴
43 - 44
41 - 42
+1
0
-1
ε x 10⁻⁴
31 - 32
34

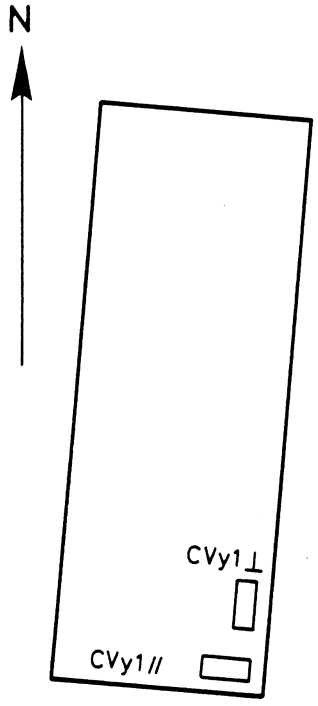

24
23
22
21
0
14
13
7.5 m
12
11
7.
44
43
5.5 m
34
33
42
41
1.5 m
13
32
31
0
0.5·10^-4
Valeurs mesurées
Valeurs extrapolées
Traction
Compression

Moyennes annuelles Veveyse

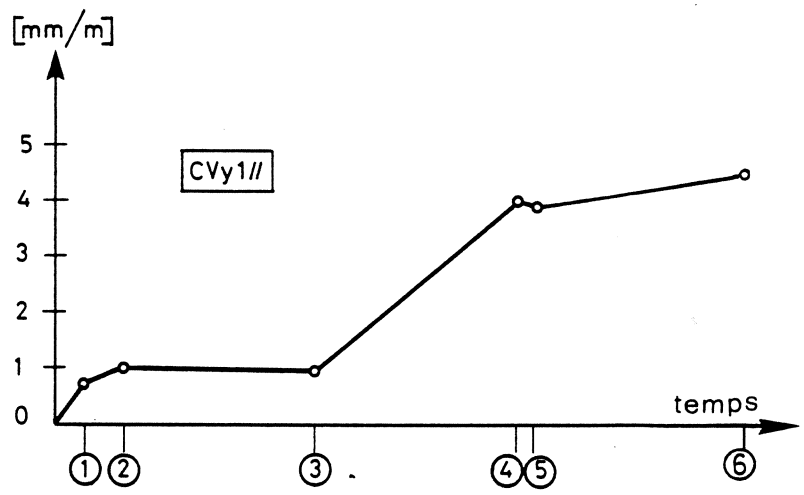
PENDULE INVERSE

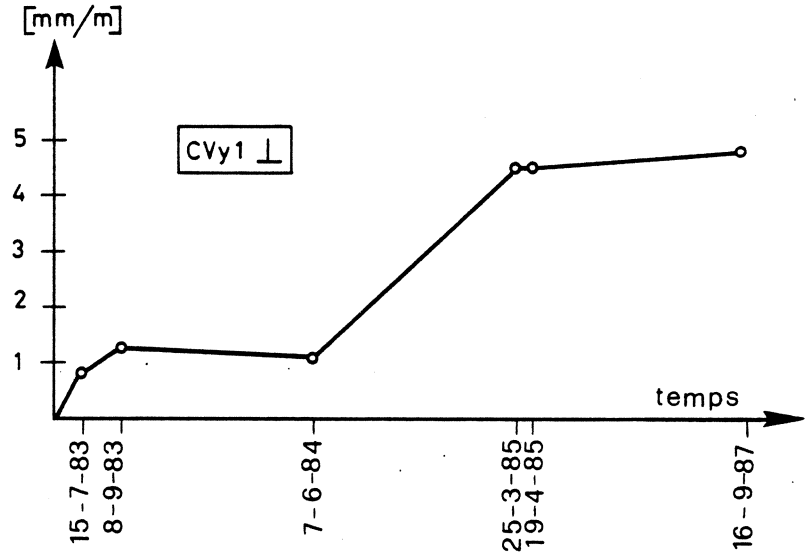


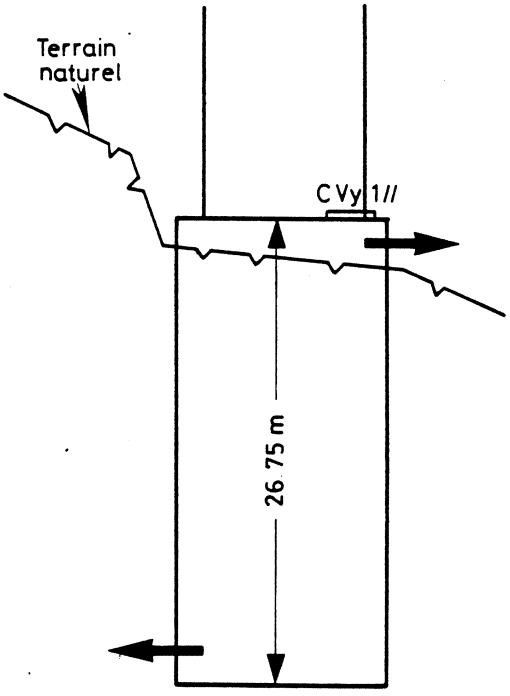
Annexe 3/9



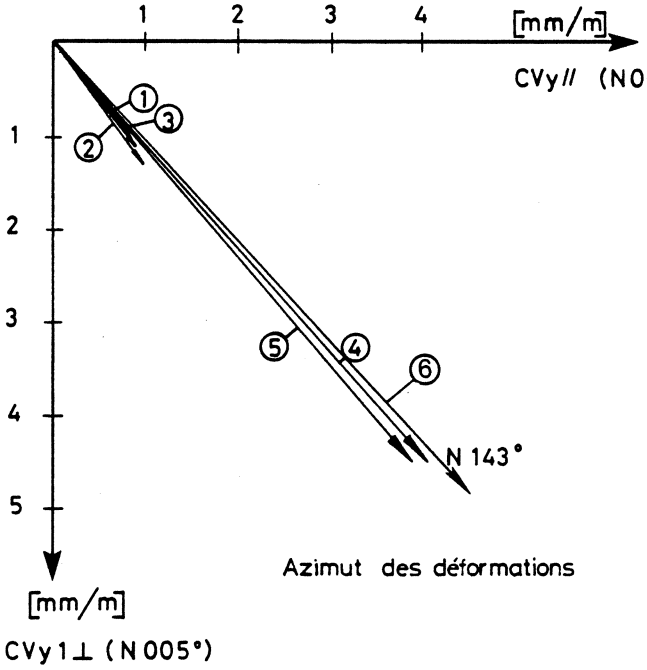
Plan







Elévation



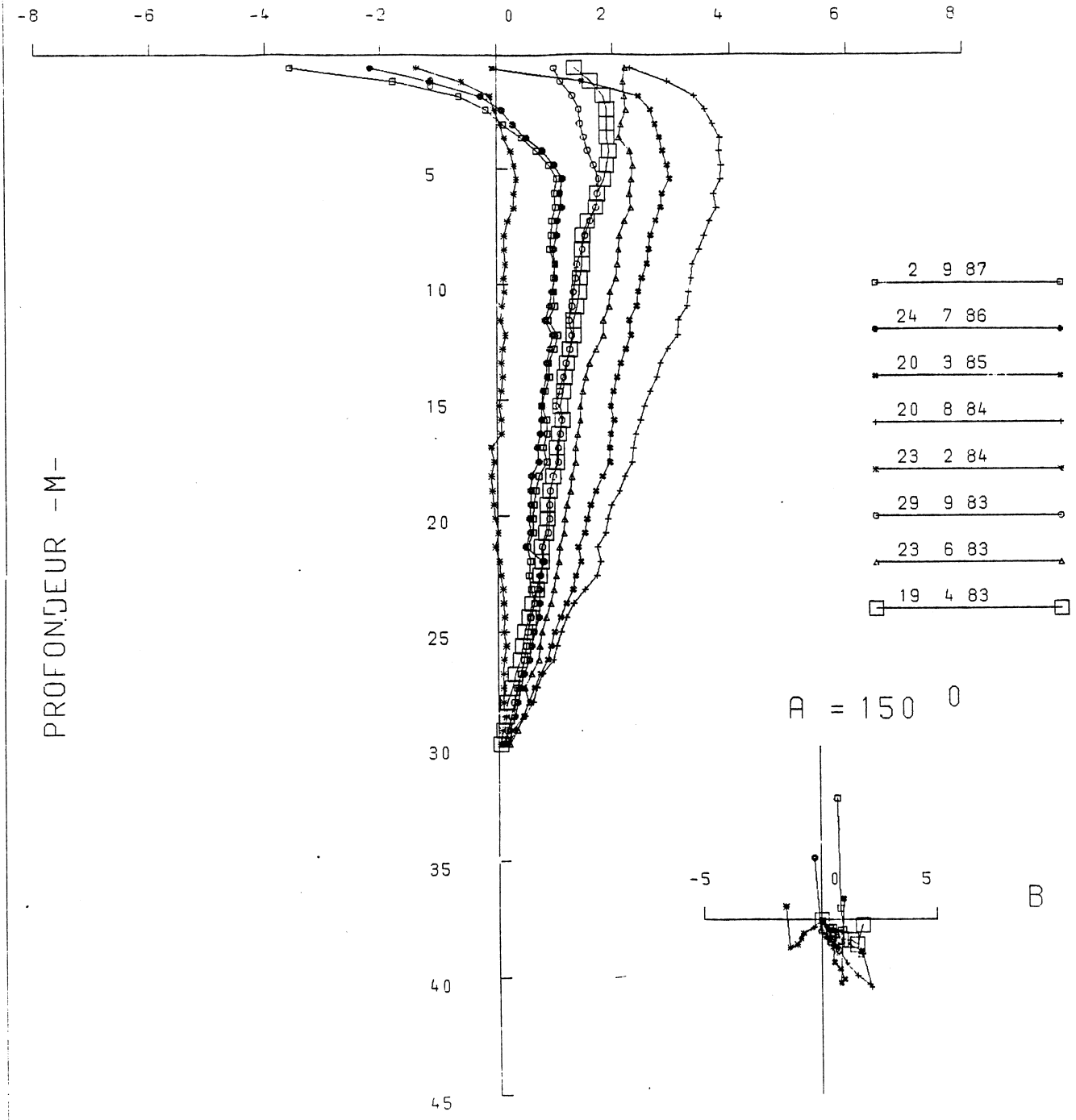
Azimut des déformations

Mesures clinométriques - Veveyse pile B3

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL
EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO IVY198

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 25 11 92

DEPLACEMENTS (MM)



SELON AZIMUT DONNE
AZ= 290 DEGRES

3.4 VIADUCS DE CHILLON

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N9 Section 921 km : 35.460-35.780

Passage en viaduc le long du versant lémanique de Veytaux à Chillon, par deux ouvrages dénivelés.

Auteur du projet	Bur. Techn. Piguet SA, Lausanne
Dossier géologique	J. Norbert, Lausanne
Dossier géotechnique	H. B. de Cérenville, LEGEP, Lausanne
Construction	1966-1969
Longueur totale	2'150 m
Nbre d'appuis entre les culées	22
Portées	92 m - 98 m ou 104 m
Tablier	Poutre continue en béton précontraint
Piles	Deux palées (0.80 × 5.00 m) écartées de 8.0 m encastrées dans la superstructure, en général pendulaires.
Fondations	Massifs appuyés sur le rocher par des semelles ou quatre puits pleins (Ø 2.20 m), parfois ancrés.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

La roche en place appartient aux terrains d'âge secondaire de la zone externe des Préalpes médianes. Elle est formée de bancs de calcaires marneux ou dolomitiques, intercalés de schistes marneux en couches plus ou moins épaisses. La roche est de bonne qualité.

Les sols de couverture varient en épaisseur et en qualité le long du tracé. Les formations cohérentes et compactes, de bonne stabilité sont les moraines de fond et les cônes de déjection des rivières. Les sols instables incohérents et peu compacts sont les moraines latérales peu argileuses et les éboulis des falaises. L'angle de frottement interne de ces terrains est compris entre 35° et 45° alors que leur cohésion est nulle ou très faible.

Les venues d'eau, dues surtout à l'infiltration sont faibles. Leur écoulement est assuré par la perméabilité en grand la la roche.

Les relevés géologiques effectués lors de la pose des tubes inclinométriques ICh3 et ICh4 précisent la succession lithologique des terrains au droit des piles 3 et 14 (Annexes 4/1 - 4/9).

1.3 Problèmes d'instabilité

La pente élevée du versant, proche de l'angle de frottement interne des sols de couverture, est la cause de leur instabilité. L'épaisseur des sols est très variable. Elle peut atteindre 26 m dans les éboulis schisteux.

Le glissement des sols superficiels le long de la pente peut provoquer des poussées latérales sur les puits de fondation.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

L'équipement des piles 3 et 14, situées dans les zones les plus instables, comprend :

- des repères topographiques
- des extensomètres à corde vibrante
- des plaques pour mesures au clinomètre (pile 3)
- une base de mesure pour distomètre (pile 3)
- deux tubes pour mesures inclinométriques.

2.1 Topographie

L'auscultation topographique de l'ouvrage consiste en un nivellement de chevilles en laiton placées sur les appuis des piles. Le nivellement est rattaché à un réseau de points extérieurs, eux-mêmes reliés au nivellement cantonal.

Une triangulation locale permet d'autre part de suivre le déplacement d'un repère de la pile 3.

2.2 Extensomètres

Deux puits de chacune des piles 3 et 14 sont équipés, à trois niveaux, d'extensomètres à corde vibrante de marque GALILEO noyés dans le béton lors de la construction. L'annexe 4/10 donne un schéma de pose de ces extensomètres.

Une série de mesures a été faite lors de la pose en 1967, puis répétée à huit reprises entre 1968 et 1985.

2.3 Clinomètres

Deux plaques métalliques, disposées parallèlement et perpendiculairement à l'axe du viaduc, ont été scellées à la base de la pile 3 pour détecter un éventuel basculement de celle-ci.

2.4 Distomètre

Une base de mesure pour distomètre a été mise en place entre l'inclinomètre ICh3 et la pile 3 pour permettre d'observer les mouvements de la tête de l'inclinomètre par rapport à la pile, dont les déplacements sont déterminés par levés topographiques.

2.5 Inclinomètres

Deux tubes inclinométriques ICh3 et ICh14 ont été mis en place à l'amont des piles 3 et 14 pour permettre de :

- détecter d'éventuels mouvements de terrain
- disposer d'éléments supplémentaires pour l'interprétation des mesures précédentes
- juger de l'utilité d'étendre les contrôles à d'autres appuis.

3. RESULTATS DES MESURES

3.1 Topographie

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de tassement des piles 3 et 14 pour la période de 1967 - 1977.

TASSEMENTS CUMULES DES REPERES EN MM								
Date de la mesure	pile 3				pile 14			
	1	2	3	4	1	2	3	4
03.07.68	0	0	0	0				
08.04.68					0	0	0	0
23.10.68	-2	-3	-1	-2				
08.07.68					-1	-2	+2	0
20.03.70	-4	-5	-3	-4	-3	-4	-1	-2
09.12.77	-6	-8	-8	-5	-5	-6	-2	-4

Ces valeurs restent faibles (inférieures à 1 mm/an) et on peut admettre que l'on n'a pas de tassement significatif des appuis.

Les résultats des mesures de triangulation sont reportés à l'annexe 4/11. Ils indiquent un déplacement de la base de la pile vers l'amont d'une valeur de 10 mm.

3.2 Extensomètres

Les tableaux des annexes 4/12 et 4/13 donnent les valeurs des déformations ε, calculées par rapport à la mesure initiale du 22.09.1967.

Les annexes 4/14 et 4/15 montrent l'évolution des déformations dans le temps. On peut noter pour les deux piles 3 et 14 des déformations importantes entre 1967 et 1968, date de la fin du bétonnage, puis à partir de 1971, date de la pose du revêtement définitif, une stabilisation des déformations.

Aux annexes 4/16 et 4/17, nous avons représenté graphiquement les déformations enregistrées entre 1971 et 1985.

On peut imaginer que ces déformations proviennent d'un glissement provoquant une flexion de la fondation composée d'une compression découlant de la présence d'ancrages en tête et d'encastrement plus ou moins marqué à la base.

Le comportement différent des puits des piles 3 et 14 est probablement dû à la position de la roche en place par rapport à l'extrémité des puits.

En effet, dans la fondation 14, les puits pénètrent dans la roche en place en assurant ainsi un encastrement; ceux de la pile 3 par contre se terminent au-dessus dans un matériel rocheux remanié (selon le levé géologique effectué lors de la mise en place du tube inclinométrique ICh3), dont la tenue n'est probablement pas parfaite. La surface de la roche en place présente d'autre part une pente plus importante sous la fondation 3 que sous la fondation 14.

3.3 Clinomètres

Les cinq mesures effectuées entre les 1.6.1983 et 25.3.1985 ont mis en évidence un basculement du massif de fondation vers l'aval (N 235°) de l'ordre de 2.3 mm/m.

Ces résultats sont représentés graphiquement à l'annexe 4/18.

3.4 Distomètre

Les neuf mesures entreprises sur la pile 3 entre le 10.11.1982 et le 25.3.1985 révèlent de faibles variations avec cependant une légère tendance, à partir de juillet 1983, vers un raccourcissement de la distance inclinomètre - pile (env. 2 mm).

Le représentation graphique de ces résultats fait l'objet de l'annexe 4/19.

3.5 Inclinomètre

Pour la période comprise entre novembre 1982 et septembre 1987, les deux inclinomètres indiquent des déplacements en tête vers l'aval respectivement de 6 et 3 mm pour les piles 3 et 14 (annexes 4/20 et 4/21), sans toutefois mettre en évidence de plan de glissement.

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

Les résultats des mesures effectuées au moyen des inclinomètres n'ont pas permis de mettre en évidence l'existence d'un plan de glissement et de mouvements significatifs qui permettraient d'expliquer les déformations détectées au moyen des extensomètres.

Il faut toutefois relever que la période d'observation est courte et que les déplacements restent très faibles, environ 1 à 2 mm par année, soit du même ordre de grandeur que la précision de la mesure. Il en est de même pour les mesures réalisées au moyen du clinomètre et du distomètre, ainsi que pour les mesures topographiques par triangulation dont les résultats ne permettent pas, pour le moment, de donner une explication satisfaisante des phénomènes.

5. PROPOSITION DE PROSPECTION ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

Une poursuite des auscultations au moyen du dispositif actuel, avec toutefois une fréquence réduite (2 à 3 ans) doit être envisagée. Il faut cependant relever que la détermination des déformations au moyen des extensomètres à corde vibrante est toujours plus difficile en raison de l'usure du matériel.

Pour permettre de suivre avec précision l'évolution des déplacements en tête, il serait utile de compléter le dispositif par la pose d'un ancrage dont la tension soit contrôlée ou d'un extensomètre parallèle aux tirants.

6. CONCLUSIONS

Les observations effectuées au moyen du dispositif de contrôle n'indiquent pas, au stade actuel, de déplacements importants et on peut admettre que le comportement des fondations est satisfaisant et qu'il n'est pas nécessaire d'envisager de travaux confortatifs.

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICh3 FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 560'895 X 141'048 Z 443

DATE D'EXECUTION 10 novembre 1981 PROFONDEUR 46.0 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø146	100 %	1		?	Remblai			
		2			Limon sableux, graveleux avec beaucoup de matériaux organiques (racines), brun quelques pierres et blocs bruns			
		3			Graviers, pierres et blocs pris dans une matrice limono-sableuse, gris	Eboulis		
		4		?				
		5						
		6		?				
		7						
		8			Limon sableux, plus ou moins argileux et graveleux avec des pierres et quelques blocs isolés, gris-beige, passages noirâtres	Cône de déjection		
		9		?				
		10						

Annexe 4/1

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICh3 FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 560'895 X 141'048 Z 443

DATE D'EXECUTION 10 novembre 1981 PROFONDEUR 46.0 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø146	100 %	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20		? V V ? V V ? V ?	Limon sableux, plus ou moins argileux et graveleux, avec graviers et blocs, gris beige Idem gris foncé à noirâtre Idem beige Schistes argileux noirs tendres, désagrégés	Cône de déjection		

Annexe 4/2

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICh3 FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 560'895 X 141'048 Z 443

DATE D'EXECUTION 10 novembre 1981 PROFONDEUR 46.0 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
For. à eau, carot. double ø 115				V	Calcaires marneux gris-noirs, durs récupérés en blocs ⊢ 75 - 80°			
		21			Calcaires marneux schisteux noirs, avec intercalations de calcaires gris, récupérés en morceaux			
				V	Schistes argileux, noirs, tendres, broyés en pâte par le forage à sec			
		22			Alternance de schistes argileux, noirs, tendres, marnes grises, mi-dures et de calcaires dolomitiques durs, très désagrégés. Roche broyée.			
		23						
		24			Roche id. complètement broyée, tendre, formant une pâte limono-argileuse			
Forage rotation à sec, carottier simple ø 146	100%	25			Schistes argileux, noirs, tendres, friables, désagrégés en graviers, repris en une matrice argileuse noire	Matériel rocheux remanié		
		26						
		27			Morceaux de calcaires marneux, dans une masse limono-argileuse gris beige			
		28			Calcaires, calcaires marneux mi-durs à durs, récupérés en débris en morceaux			
		29		V	Mélange hétérogène de morceaux et débris de calcaires, calcaires marneux et de schistes tendres, noirs feuilletés dans un pâte limono-argileuse beige			
		30						

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICh3 — FEUILLE N° 4

COORDONNEES Y 560'895 X 141'048 Z 443

DATE D'EXECUTION 10 novembre 1981 — PROFONDEUR 46.0 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
For. à sec, carot. simple ø115	100%	31		V	Calcaires gris foncé			
				V	Calcaires schisteux marneux gris			
Forage rotation a l eau carottier double ø115	50%	32		V	Ensemble bréchique constitué d'éléments divers recimentés par une matrice argilo-sableuse. Blocs de calcaires gris noir (Rhétien) et de cornieule vacuolaire (Trias).	Matériel rocheux remanié		
	100%	33		V				
	50%	34		V				
	100%	35		V				
	70%	36			Calcaires dolomitiques	Roche en place sûre Cornieule vacuolaire (Trias)		
	80%	37			Cornieule altérée beige, vacuolaire			
		38			Cornieule vacuolaire			
	40%	39						
		40						

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICh3 FEUILLE N° 5

COORDONNEES Y 560'895 X 141'048 Z 443

DATE D'EXECUTION 10 novembre 1981 PROFONDEUR 46.0 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø115	30%	41			Cornieule vacuolaire	Roche en place sûre Cornieule vacuolaire (Trias)		
	30%	42						
	30%	43						
	80%	44						
	60%	45						
	100%	46						

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IChl4 FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 561'087 X 141'066 Z 431

DATE D'EXECUTION 15 janvier 1982 PROFONDEUR 32.0 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø 131	100%	1 2 3 4 5 6		V V V V V	Graviers de toutes dimensions, pierres et blocs avec sable un peu limoneux, débris terreux vers le haut	Remblai		
		6 7 8 9 10		V V V V	Graviers limono-argileux avec des traces de matières organiques, brun Graviers limono-argileux, finement sableux, brun-beige, compacts. Passage de gravier propre entre 6.90 et 7.10 m. Graviers, pierres, blocs et sable légèrement limoneux, gris clair Graviers sablo-limoneux, un peu argileux, bruns. Passage humide entre 9.2 et 10.4 m	Eboulis		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IChl4 FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 561'087 X 141'066 Z 431

DATE D'EXECUTION 15 janvier 1982 PROFONDEUR 32.0 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ϕ 131	100 %	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20		V	Blocs de granite et de gneiss pris dans une matrice limono-argileuse brune	Moraine		
				V	Graviers et sable grossier gris			
					Limon argileux, brun, très graveleux, légèrement sableux, avec qq. pierres et blocs. Consistance dure.			
				V	Graviers sableux, un peu limoneux, gris-brun, très compacts.			
				V	Graviers limono-sableux, brun-beige, avec qq. pierres et petits blocs, très compacts.			
				V	Blocs calcaire			

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IChl4 FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 561'087 X 141'066 Z 431

DATE D'EXECUTION 15 janvier 1982 PROFONDEUR 32.0 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø131		21 22 23 24		V V	Graviers limono-sableux id.	Moraine		
Forage rotation à l'eau carottier double ø114	100 %	25 26 27 28 29 30		45 85 75 80 20 45 70 20	Calcaire très dur, gris-noir, fracturé; fractures recimentées. Perte totale à 24.30 m. Niveau de matériel terreux de 26.35-26.40 m Calcaire dur très fracturé, par places brèche calcaire cimentée. Fractures verticales 75° avec stries horizontales. A 27.30 fracture ouverte avec nombreux crx de calcite Schistes noirs Calcaire dur, gris, fracturé, tectonisé à passages bréchiques, nombreux veinules et fractures recimentées par calcite Ensemble de calcaires et schistes noirs	Roche en place calcaires et schistes tectonisés		

Annexe 4/8

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IChl4 FEUILLE N° 4

COORDONNEES Y 561'087 X 141'066 Z 431

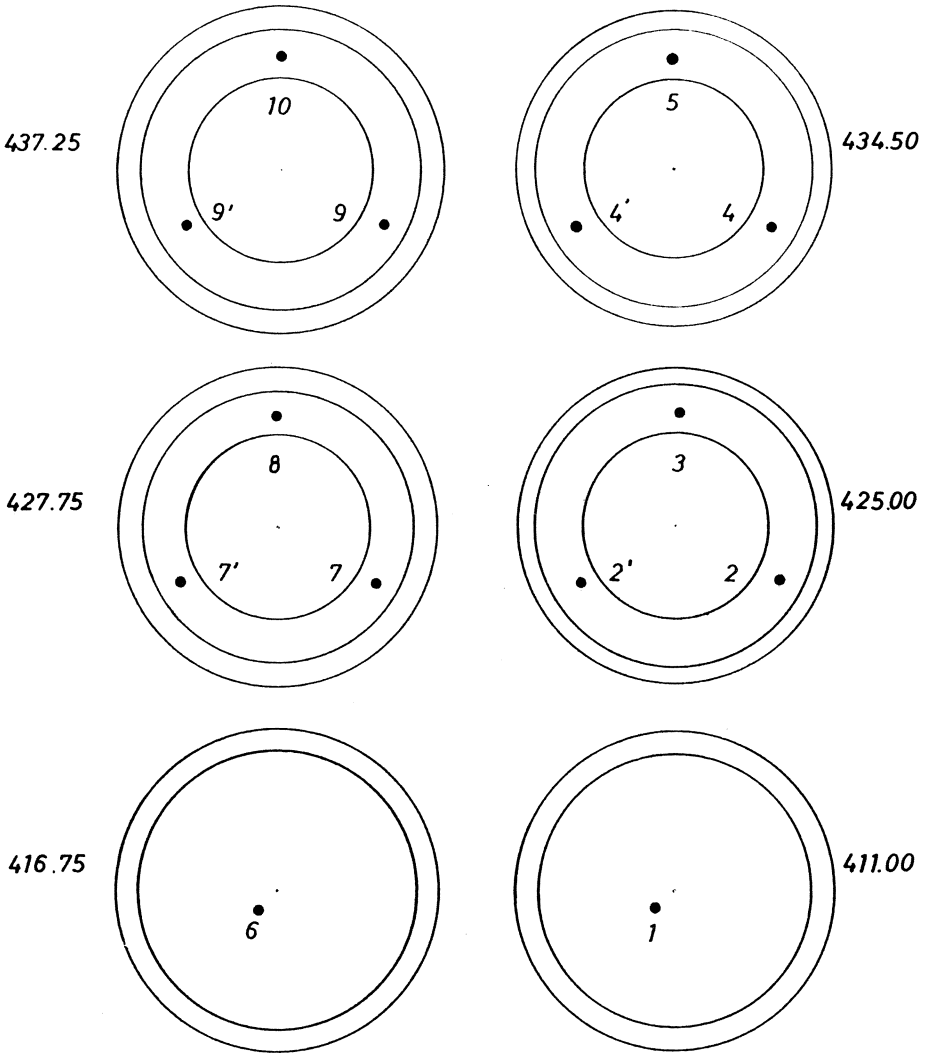
DATE D'EXECUTION 15 janvier 1982 PROFONDEUR 32.0 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage eau, carottier double ø 114	100 %	31		50	Calcaires gris-noir, durs, très fracturés, tectonisés, par places bréchiques (30.35 + 30.85 m). Qq. interlits schisteux.			
				90	Fractures 50° avec stries calcitisées orientées dans le sens de la pente.			
		32						

VIADUC DE CHILLON - SCHEMA DE POSE DES EXTENSOMETRES

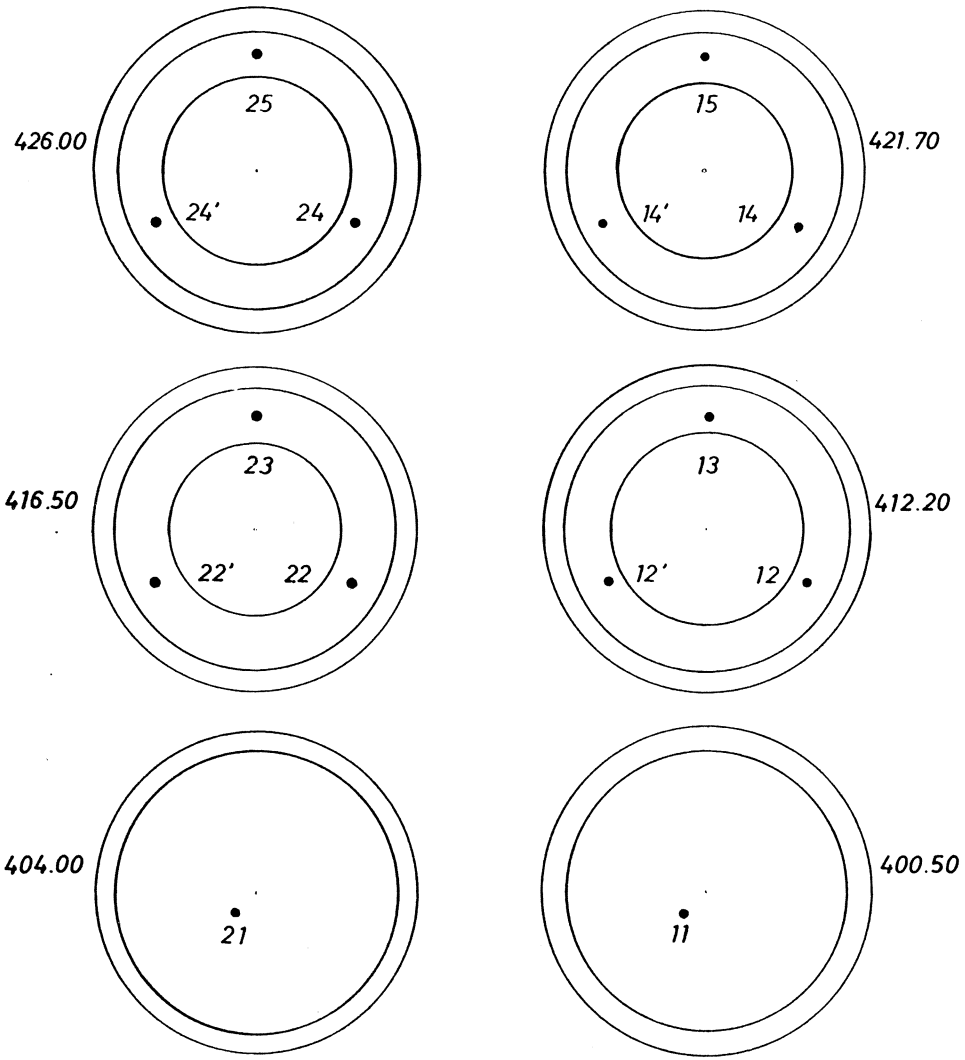
Pile 3 selon plan AR 921-589

puits amont | puits aval

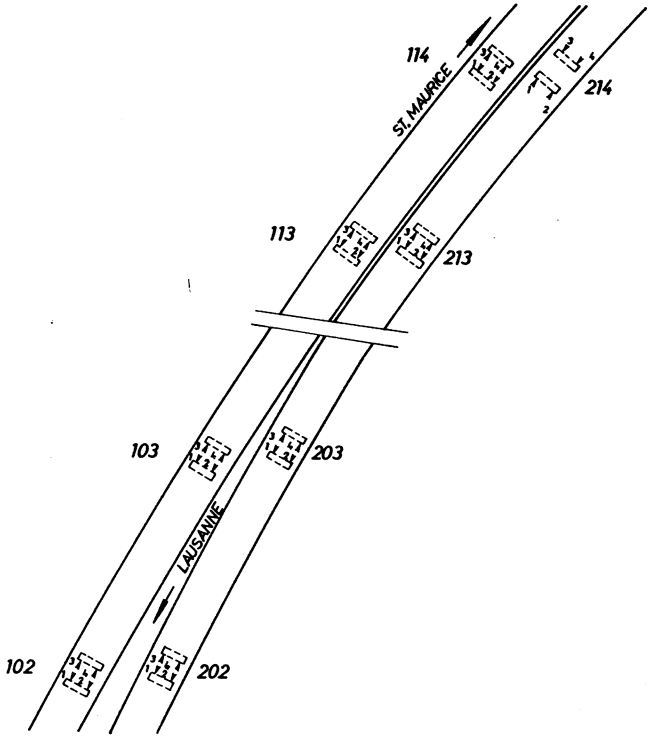


Pile 14 selon plan AR 921-578

puits amont | puits aval



Annexe 4 /10



Pile		Date	1968	1970	1977
3	aval	203 1/2	-3	-5	-7
		3-4	-2	-4	-7
	amont	103 1/2	-5	-8	-9
		3-4	-4	-7	-7
14	aval	214 1-2	+2	-4	-6
		3-4	-2	-2	-3
	amont	114 1-2	-2	-4	-9
		3-4	+1	-5	-7

Annexe 4/11 Tassements cumulés des repères en [mm]

No Extensomètre		Déformations $\varepsilon \times 10^{-4}$															
		05.11.68	$\bar{\varepsilon}$	27.10.71	$\bar{\varepsilon}$	05.05.76	$\bar{\varepsilon}$	29.06.77	$\bar{\varepsilon}$	18.07.78	$\bar{\varepsilon}$	27.06.79	$\bar{\varepsilon}$	09.06.82	$\bar{\varepsilon}$	19.04.85	$\bar{\varepsilon}$
Puits aval	1	+0.30	+0.30	-0.04	-0.04 (0)	-0.22	-0.22 (-0.18)	-0.41	-0.41 (-0.37)	-0.56	-0.56 (-0.52)	-0.90	-0.90 (-0.86)	-1.42	-1.42 (-1.38)	-1.90	-1.90 (-1.86)
	2	-2.28		-3.43		-3.77		-4.14		-4.48		-4.63		-5.34		-5.94	
	2'	-3.81	-3.25	-5.64	-4.78 (0)	-6.20	-5.32 (-0.54)	-6.57	-5.74 (-0.96)	-6.91	-6.13 (-1.35)	-7.17	-6.38 (-1.60)	-7.88	-7.22 (-2.44)	-8.36	-7.87 (-3.09)
	3	-3.65		-5.28		-6.00		-6.50		-6.99		-7.33		-8.44		-9.31	
	4	-1.31		-2.13		-1.60		-1.87		-1.87		-1.87		-1.57		-1.27	
	4'	-1.25	-1.74	-2.13	-3.08 (0)	-1.87	-2.33 (+0.75)	-2.09	-2.61 (+0.47)	-2.20	-2.70 (+0.38)	-2.24	-2.71 (+0.37)	-2.05	-2.47 (+0.61)	-1.94	-2.36 (+0.72)
	5	-2.66		-3.99		-3.53		-3.88		-4.03		-4.03		-3.80		-3.88	
Puits amont	6	+0.53	+0.53	+0.53	+0.53 (0)	+0.83	+0.83 (+0.30)	+0.80	+0.80 (+0.27)	+0.87	+0.87 (+0.34)	+0.68	+0.68 (+0.15)	+0.65	+0.65 (+0.12)	+0.87	+0.87 (+0.34)
	7	-3.21		-4.55		-5.30		-5.71		-6.01		-6.23		-6.76		-7.32	
	7'	-3.12	-3.78	-4.69	-5.30 (0)	-5.35	-6.09 (-0.79)	-5.72	-6.47 (-1.17)	-5.98	-6.75 (-1.45)	-6.20	-6.99 (-1.69)	-6.56	-7.29 (-1.99)	-6.93	-7.85 (-2.55)
	8	-5.00		-6.65		-7.62		-7.99		-8.25		-8.55		-8.55		-9.30	
	9			-0.82		-0.37		-0.49		-0.56		-0.52		-0.19		0	
	9'			-1.08	-0.73 (0)	-1.04	-0.38 (+0.35)	-1.16	-0.44 (+0.29)	-1.23	-0.46 (+0.27)	-1.19	-0.41 (+0.32)	-0.93	0 (+0.73)	-0.67	+0.42 (+1.15)
	10			-0.30		+0.26		+0.34		+0.41		+0.49		+.1.12		+1.94	

Annexe 4/12

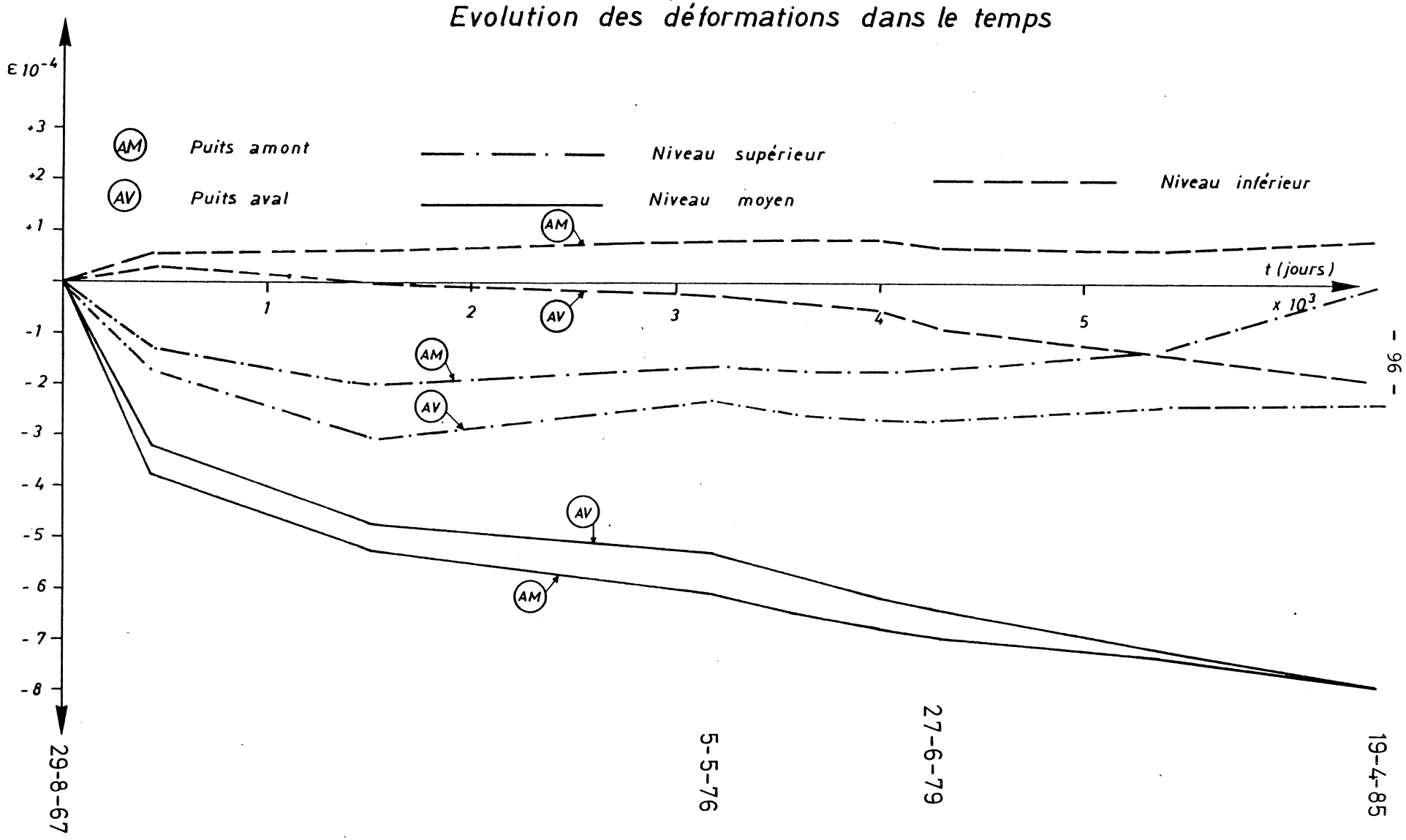
Viaduc de Chillon - Pile No 3

No Extensomètre		Déformations $\varepsilon \times 10^{-4}$															
		04.07 68	$\bar{\varepsilon}$	27.10.71	$\bar{\varepsilon}$	05.05.76	$\bar{\varepsilon}$	29.06.77	$\bar{\varepsilon}$	18.07.78	$\bar{\varepsilon}$	27.06.79	$\bar{\varepsilon}$	09.06.82	$\bar{\varepsilon}$	19.04.85	$\bar{\varepsilon}$
Puits aval	11	+0.05	+0.05	+0.48	+0.48 (0)	+1.60	+1.60 (+1.12)	+1.65	+1.65 (+1.17)	+1.81	+1.81 (+1.33)	+2.13	+2.13 (+1.65)	+3.04	+3.04 (+2.56)	+3.73	-3.73 (+3.25)
	12	-1.01		-1.44		-1.39		-1.49		-1.65		-1.81		-2.24		-2.56	
	12'	-1.06	-0.91	-1.39	-1.25 (0)	-1.21	-1.13 (+0.12)	-1.28	-1.21 (+0.04)	-1.36	-1.30 (-0.05)	-1.39	-1.39 (-0.14)	-1.47	-1.55 (-0.30)	-1.54	-1.67 (-0.42)
	13	-0.67		-0.93		-0.78		-0.86		-0.90		-0.97		-0.93		-0.90	
	14	-1.52		-2.39		-1.86		-1.98		-2.05		-1.98		-1.75		-1.41	
	14'	-1.57	-1.73	-2.20	-2.76 (0)	-1.72	-2.34 (+0.42)	-1.87	-2.51 (+0.25)	-1.87	-2.54 (+0.22)	-1.83	-2.53 (+0.23)	-1.64	-2.38 (+0.38)	-1.19	-2.10 (+0.66)
	15	-2.09		-3.70		-3.45		-3.67		-3.70		-3.78		-3.74		-3.70	
Puits amont	21	+0.40	+0.40	+0.69	+0.69 (0)	+3.59	+3.59 (+2.90)	+5.13	+5.13 (+4.44)	+6.89	+6.89 (+6.20)	+7.88	+7.88 (+7.19)	-	-	+6.34	+6.34 (+5.65)
	22	-0.92		-1.51		-1.35		-1.46		-1.51		-1.62		-1.67		-1.73	
	22'	-0.79	-1.14	-1.37	-1.74 (0)	-1.22	-1.64 (+0.10)	-1.26	-1.74 (0)	-1.33	-1.79 (-0.05)	-1.40	-1.87 (-0.13)	-1.22	-1.83 (-0.09)	-0.94	-1.79 (-0.05)
	23	-1.72		-2.35		-2.35		-2.49		-2.53		-2.60		-2.60		-2.71	
	24	-3.04		-4.94		-4.56		-4.64		-4.64		-4.64		-4.48		-4.48	
	24'	-2.54	-1.88	-3.66	-2.92 (0)	-3.39	-2.52 (+0.40)	-3.51	-2.59 (+0.33)	-3.51	-2.63 (+0.29)	-3.43	-2.55 (+0.37)	-3.25	-2.29 (+0.63)	-3.06	-2.04 (+0.88)
	25	-0.07		-0.15		+0.37		+0.37		+0.26		+0.41		+0.86		+1.42	

Viaduc de Chillon - Pile No 14

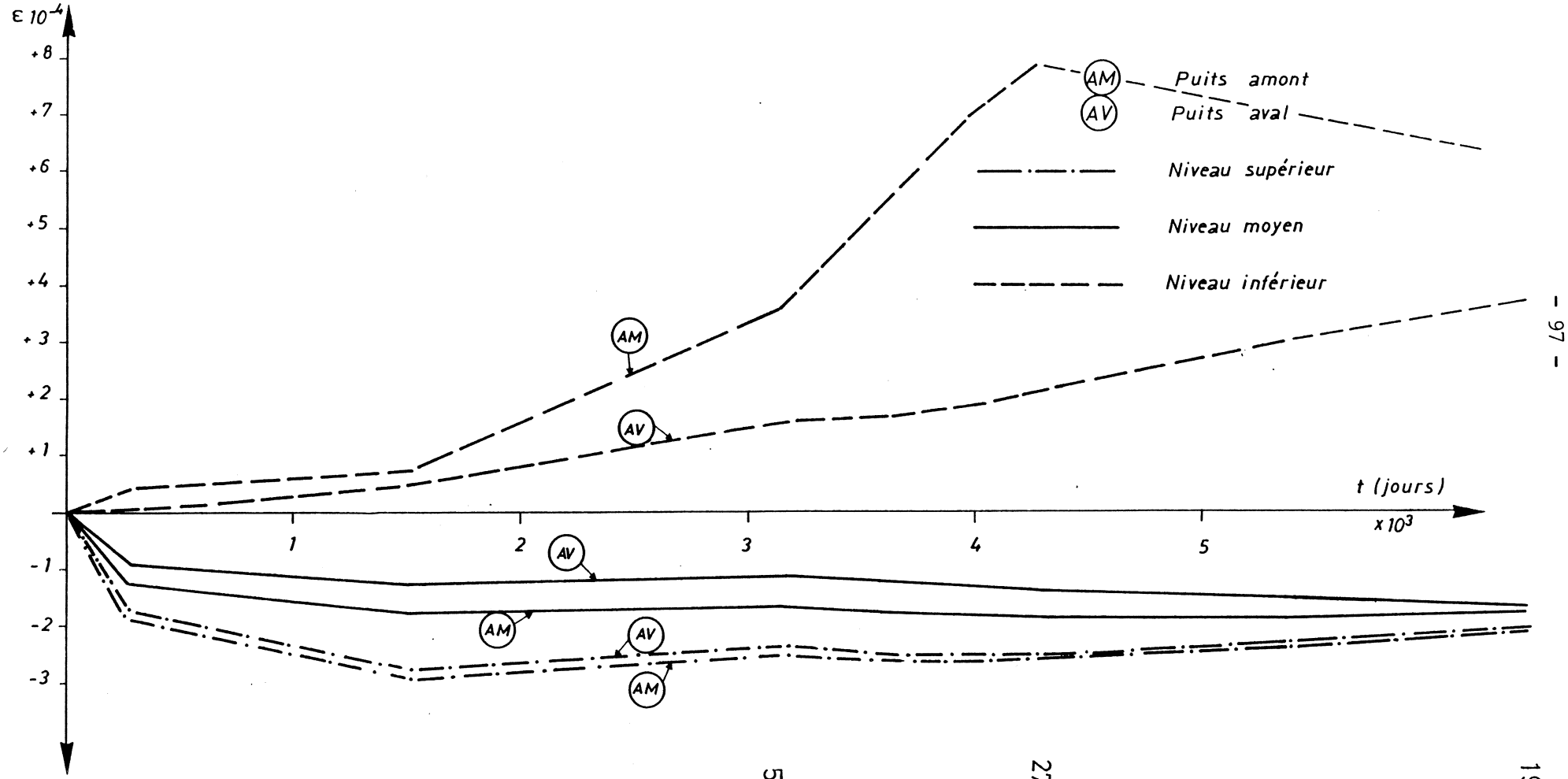
VIADUC DE CHILLON - PILE N°3

Evolution des déformations dans le temps

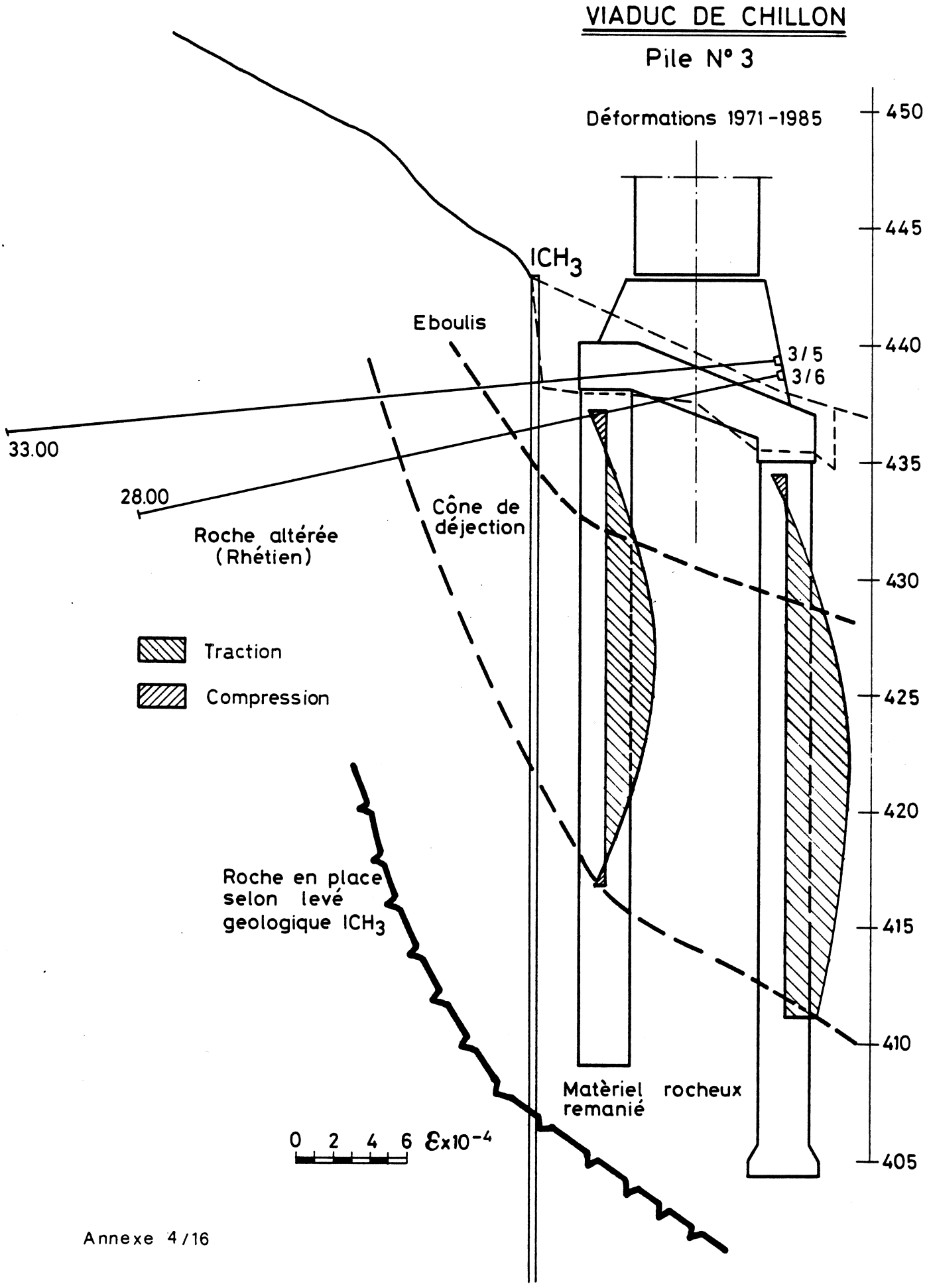


VIADUC DE CHILLON-PILE N°14

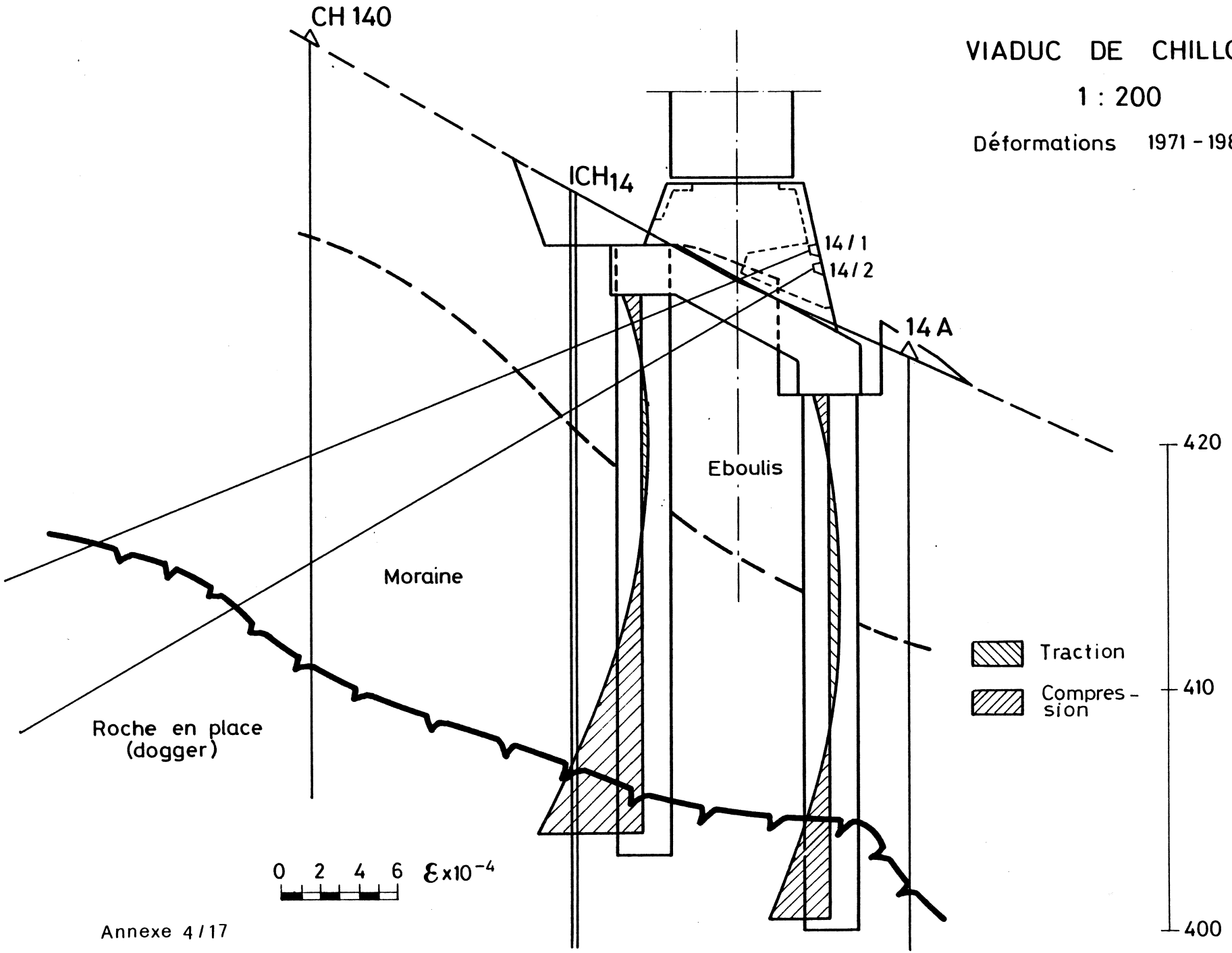
Evolution des déformations dans le temps



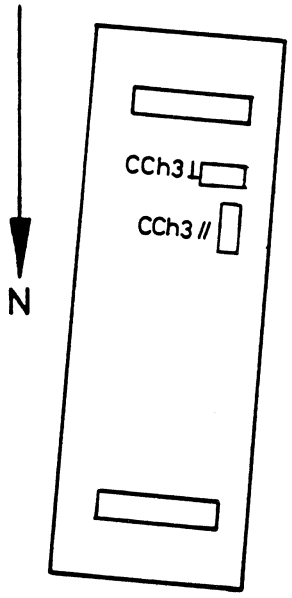
1 : 200



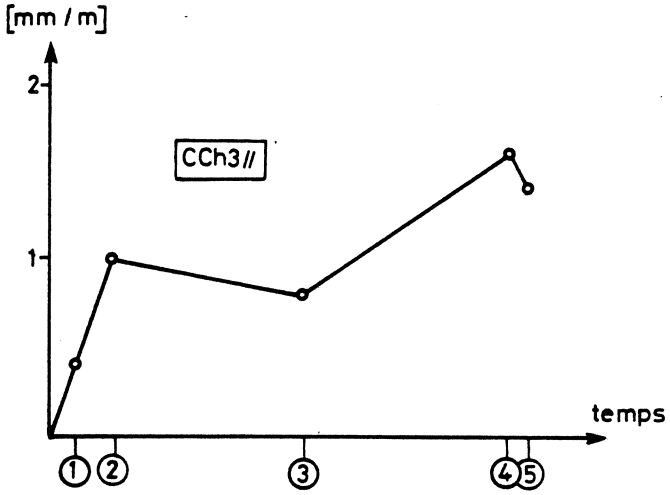
Annexe 4/16

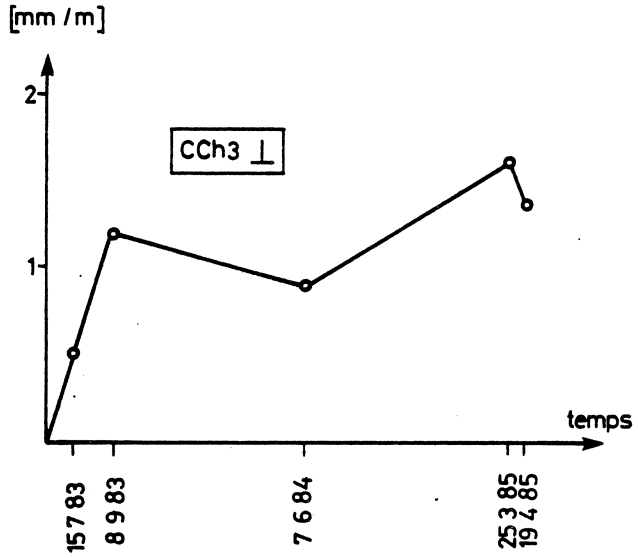

VIADUC DE CHILLON Pile n°14
1 : 200
Déformations 1971 - 1985
CH 140
ICH14
14/1
14/2
14 A
Eboulis
Moraine
Roche en place
(dogger)
Traction
Compres-
sion
420
410
400
0 2 4 6 ε x10⁻⁴

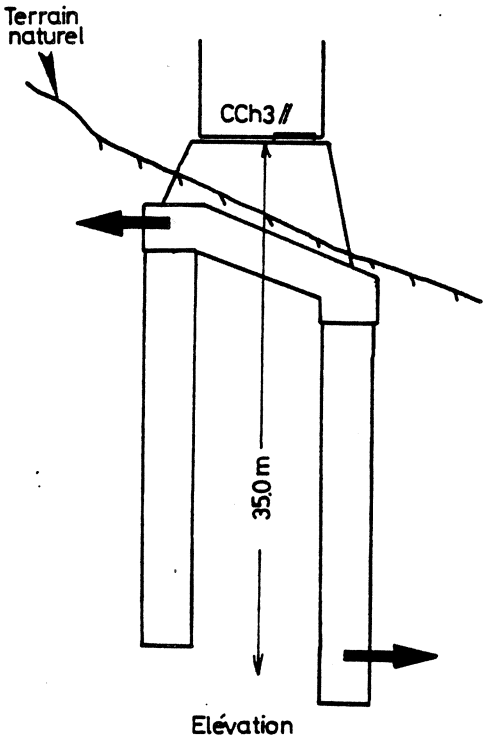
Annexe 4/17



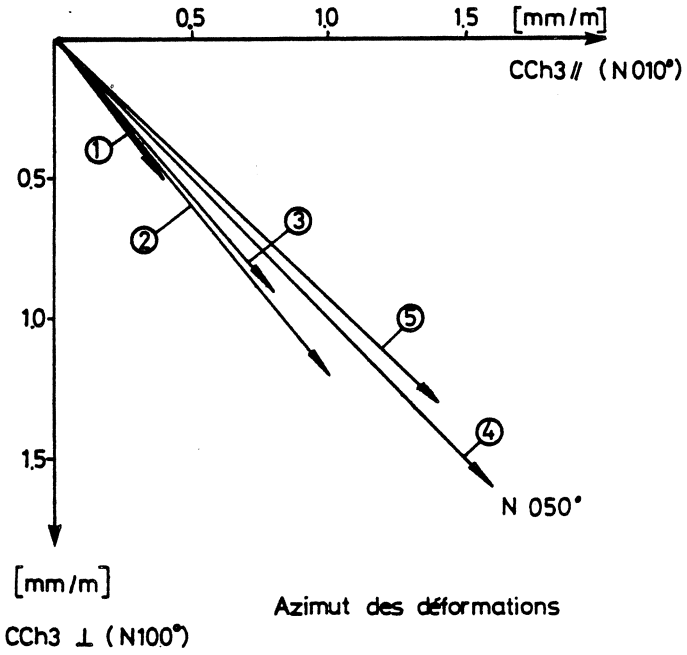
Plan







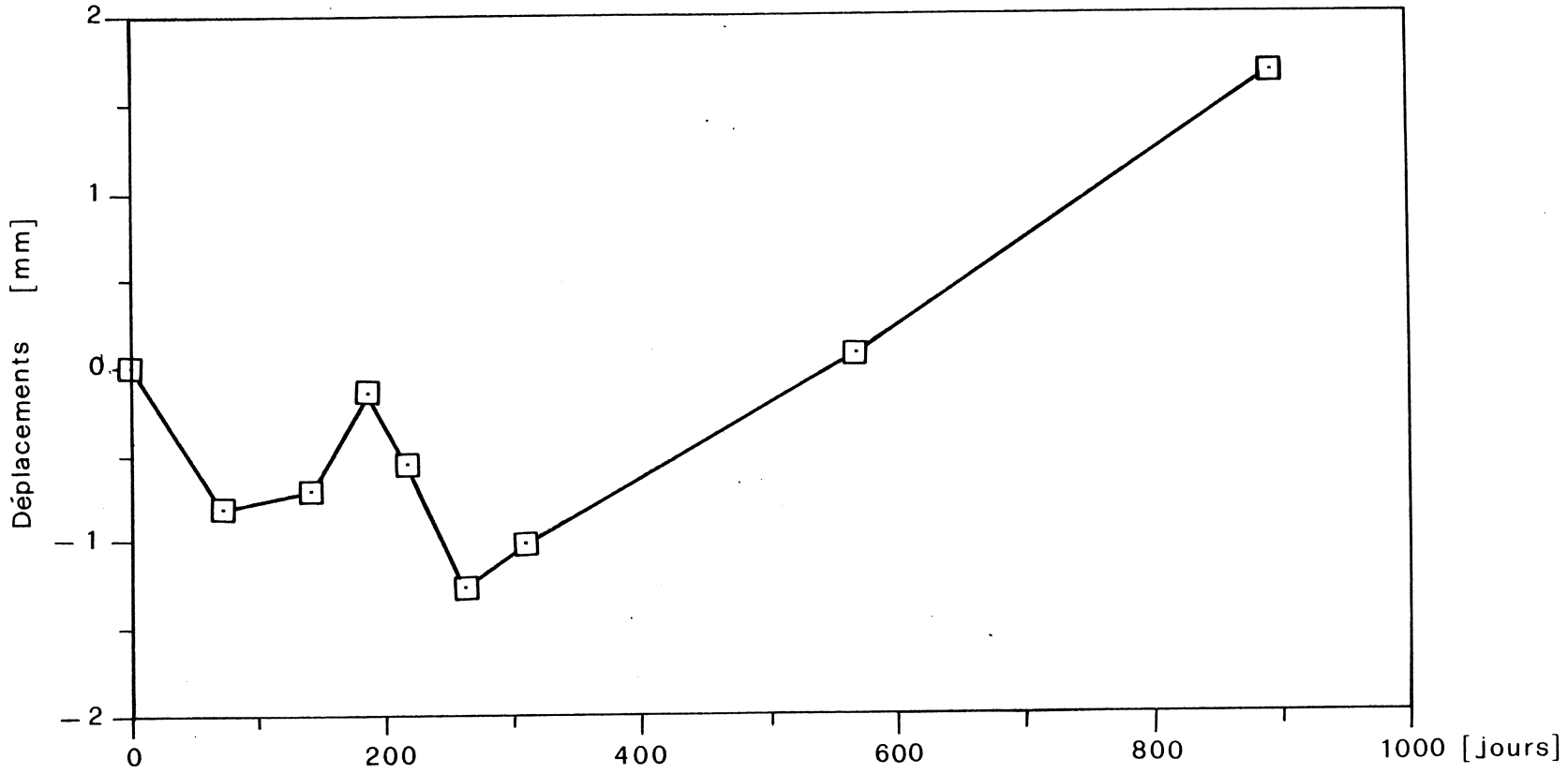
Elévation



Azimut des déformations

Mesures clinométriques - Chillon pile 3

MESURES AU DISTOMETRE



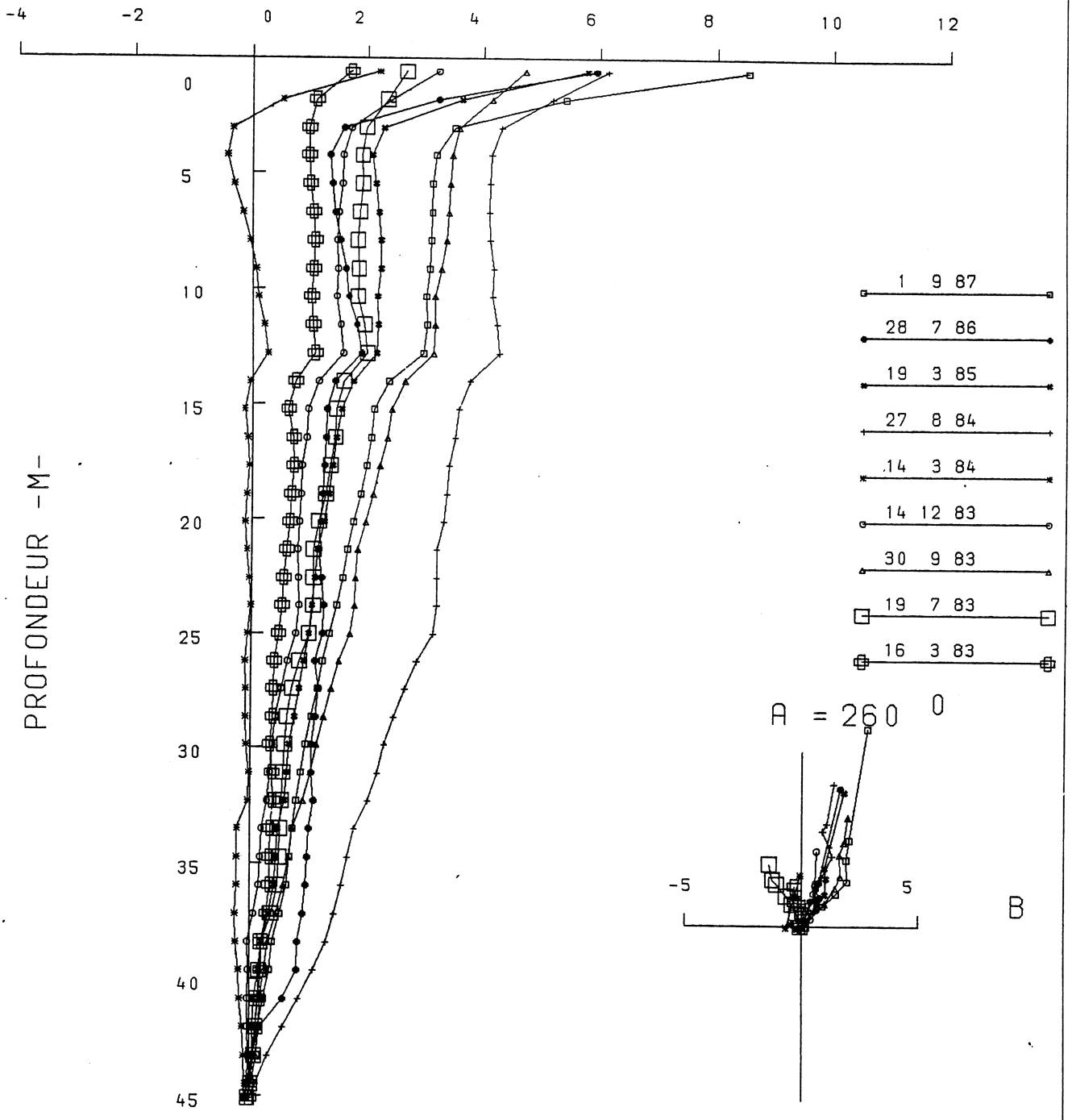
Annexe 4 / 19

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO ICH3A3

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 26 11 82

DEPLACEMENTS (MM)



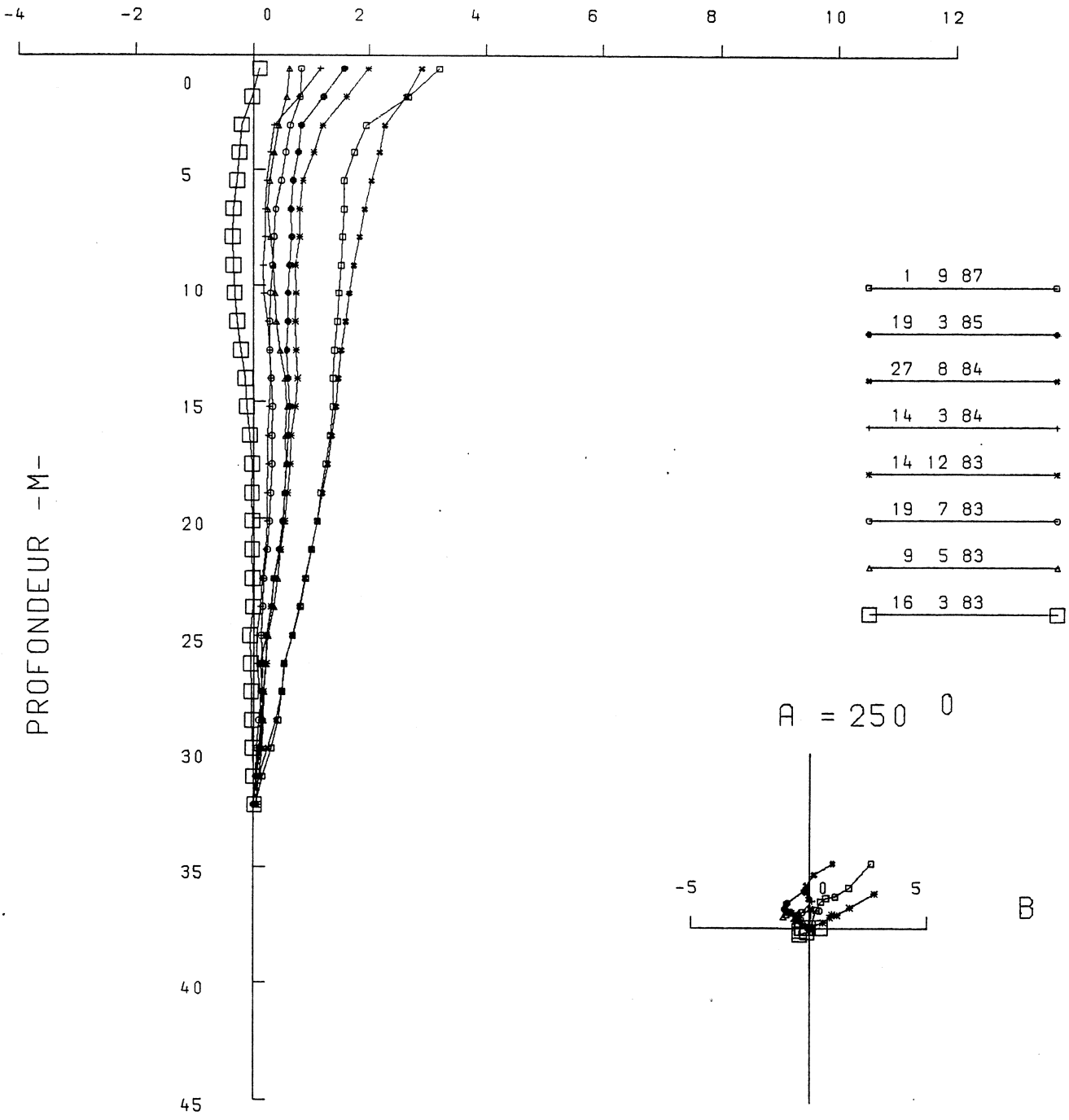
SELON AZIMUT DONNE
AZ= 260 DEGRES

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO ICH4A3

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 26 11 82

DEPLACEMENTS (MM)



SELON AZIMUT DONNE
AZ= 260 DEGRES

3.5 PONTS SUR LA VEVEYSE DE FEGIRE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N12 Section 1205 km : 6.203-6.715
(Autoroute Vevey-Fribourg)

Traversée du vallon de la Veveyse de Fégire par un pont unique et rectiligne.

Auteur du projet	Réalini et Bader, Lausanne Barras, Fribourg
Dossier géologique	J. Norbert, Lausanne
Dossier géotechnique	H. B. de Cérenville, Lausanne
Construction	1979
Longueur totale	512 m
Nbre d'appuis entre les culées	5
Portées	74.15m, 3×106.75 m, 74.37 m, 43.33 m
Tablier	Profil en caisson en béton précontraint à inertie variable Largeur du tablier : 20.7 m
Piles	Quatre piles rectangulaires par appui, section 2.80 × 1.60 m (2 piles à l'appui No 5)
Fondations	Quatre puits Ø 2.40, par appui sauf appui No 5 côté Fribourg (seulement deux puits) culées sur fondations superficielles.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

Le profil en long géologique est représenté de façon simplifiée sur la coupe en long de l'annexe 5/1. Les levés géologiques effectués lors de la mise en place des tubes inclinométriques sont figurés dans les annexes 5/2 à 5/11.

La **roche en place** est composée de deux types de roche, à savoir :

- une série marneuse (calcaires marneux et schistes)
- une série gréseuse (grès et accessoirement conglomérat).

Ce soubassement rocheux, sain en profondeur, est altéré dans sa partie supérieure sur une épaisseur très variable.

La limite entre la roche saine et la roche dégradée n'est pas nette mais progressive, présentant des degrés de dégradation différents d'un endroit à un autre.

Le **soubassement rocheux** que l'on trouve sur la rive droite seulement est une formation constituée de roche altérée et disloquée, éventuellement déplacée lors d'un ancien glissement.

La **moraine** recouvre les formations rocheuses sur une épaisseur allant jusqu'à 15 m sur rive gauche. Dans cette couche sont également incluses la zone de blocs de grès trouvée sur rive droite et la couche d'éluvions du Flysch qui recouvre le substratum rocheux sur rive droite.

Géotechniquement, il faut traiter les deux rives séparément en ce qui concerne la qualité des sols rencontrés :

- **Rive gauche** : à l'exception des dépôts argileux où il a été recommandé de n'avoir aucune fondation, les couches morainiques ou composées de matériaux morainiques présentent les qualités requises pour les fondations de l'ouvrage; il en va de même de la roche en place.

- **Rive droite :** le matériel morainique que l'on trouve sur le haut de cette rive permet d'envisager des fondations superficielles pour la culée de l'ouvrage. Les formations de blocs gréseux et d'éluvions n'ont pas les qualités requises pour recevoir les fondations de l'ouvrage. La moraine rencontrée sous ces couches d'éluvions ou blocs, tout comme la roche en place, présentent les mêmes qualités que sur la rive gauche. Le soubassement rocheux présente des risques d'instabilité, problème évoqué ci-après.

Le régime hydrologique est difficilement définissable. Il est probable que l'eau rencontrée dans quelques sondages provient de la circulation de l'eau superficielle à l'intérieur des matériaux en partie perméables, d'autres sondages étant restés secs.

1.3 Problèmes d'instabilité

Rive gauche : la zone qui comprend la RC 734 et descend pratiquement jusqu'à la Veveyse est une zone de glissements déclarés.

Rive droite : on distingue les glissements certains, ayant affecté la couverture de terrain meuble (déplacement de la RC 734 à la fin des années 50) et un glissement probable plus profond affectant, en plus du terrain meuble, une certaine tranche de rocher dont la surface de glissement a été repérée dans le soubassement rocheux; elle comprend la zone de blocs de grès qui a été sans aucun doute le siège du mouvement.

En général, il ressort du rapport géologique que les terrains qui ont été ou sont encore le siège de glissement, peuvent se réactiver ou s'accélérer et que des glissements peuvent affecter des zones pas encore touchées par des mouvements ; les causes de ces phénomènes peuvent être naturelles ou la conséquence des travaux (construction du pont, route d'accès, etc).

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

L'auscultation de l'ouvrage comporte :

- des repères topographiques scellés sur la base des piles
- des plaques pour mesure au clinomètre
- trois bases de mesure pour distomètre
- trois tubes pour mesures inclinométriques

2.1 Topographie

Au vu du manque de visibilité et du relief escarpé, un suivi complet de l'ouvrage par triangulation s'avérait très délicat. On a donc essayé de mesurer les variations éventuelles de distance entre les piles. Pour cela des piliers ont été bétonnés sur les longrines de fondation, et sur ces piliers des embases de centrage forcé ont été scellées. Les mesures de distance ont été faites au moyen d'un théodolite KERN DKM_2A équipé d'un DM501 pour la mesure électro-optique des distances. Les mesures ont été corrigées en fonction de la température et de la pression atmosphérique, mais n'ont pas été réduites au niveau de la mer.

Une triangulation locale a été réalisée pour essayer de suivre le déplacement de la tête des tubes inclinométriques (annexe 5/12).

2.2 Clinomètres

Les piles 4 et 5 ont été équipées chacune de deux plaques clinométriques, disposées l'une parallèlement et l'autre perpendiculairement à l'axe du pont, dans le but de préciser une éventuelle inclinaison de ces piles.

2.3 Distomètres

Trois sections de mesures distométriques ont été installées entre les piles 2, 4 et 5 et la tête des tubes inclinométriques respectifs.

2.4 Inclinomètres

La pose des trois tubes inclinométriques (IVf2 sur rive gauche, IVf4 et Vf5 sur rive droite) devrait permettre de préciser les éventuels mouvements de terrain en profondeur.

3. RESULTATS DES MESURES

3.1 Topographie

Les résultats des mesures de distances ont montré une anomalie au niveau de la constante d'addition de l'appareil, qui bizarrement ne semble pas constante du tout ! Les distances ont été mesurées sont entre les piles 1 - 3, 1 - 4, 1 - 5, 2 - 3, 2 - 4, 2 - 5, 4 - 5 et elles ont été observées dans les deux sens. Les distances 1-2 et 3-4 ne peuvent être obtenues que par calcul. Vu l'incertitude sur la précision des résultats, deux campagnes de mesures ont eu lieu en mars 1980 et en juillet 1982 en collaboration avec la maison KERN à Aarau et leur mekomètre ME 3000.

En ne tenant compte que de ces deux séries de mesures, on pourrait admettre les déplacements suivants :

piles :	1	2	3	4	5
	→		←	←	←
déplacements :	3 mm	0	2 mm	5 mm	7 mm

Les déplacements des têtes des tubes inclinométriques sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Numéro	Date		
	29.10.82	01.09.83	
1205.065 tuyau	559 193.044 151 147.361	044 361	0 0
1205.247 cheville	559 496.881 151 350.004 775.482	881 004 482	0 0 0
1205.248 inclino. IVf5	559 340.564 151 599.451 808.919	568 451 917	+ 4 0 - 2
1205.249 inclino. IVf4	559 317.720 151 535.005 797.602	726 004 602	+ 6 - 1 0
1205.252 inclino. IVf2	765.057	057	0

Mesures de triangulation

3.2 Clinomètres

Les mesures effectuées sur les fondations des piles 4 et 5 font l'objet de l'annexe No 5/13 ; elles indiquent un basculement vers l'aval de l'ordre de 4 mm/m sur une période de 2 ans.

La direction relative à la pile 4 correspond bien à la ligne de plus grande pente alors que celle de la pile 5 s'en écarte sensiblement. On peut toutefois constater une variation de cette direction au cours des différentes auscultations qui tend à se rapprocher de celle des glissements visibles sur le terrain.

3.3 Distomètres

Les déplacements mesurés entre les fondations des piles et les têtes des tubes inclinométriques sont représentés graphiquement à l'annexe No 5/14.

Ces mesures appellent les remarques suivantes :

- rive droite : la base DVf4 donne des valeurs de déplacement erratiques et n'est plus mesurable actuellement ; la base DVf5 n'accuse que de très faibles variations qui ne dépassent pas le mm et qui ne sont dès lors pas significatives
- rive gauche : la base DVf2 indique un léger allongement qui augmente progressivement à une vitesse de l'ordre du mm/an.

3.4 Inclinomètres

Les déplacements mesurés lors des différentes auscultations par rapport aux mesures initiales du 2.12.82 et 13.1.83 sont représentées aux annexes No 5/15 à 5/17.

Les 2 tubes mis en place sur rive droite présentent des déformations de même ordre de grandeur avec une valeur en tête de 6 - 7 mm avec toutefois des directions sensiblement différentes. Pour l'inclinomètre IVf4 la direction des déplacements correspond bien à la ligne

de plus grande pente avec 2 décrochements vers 15 et 24 m de profondeur qui correspondent à des zones de flysch schisto-marneux avec des surfaces de glissement.

Pour l'inclinomètre IVf5, par contre, la déformée du tube semble indiquer des déplacements dans la direction opposée au sens du glissement observé sur le terrain. Ce phénomène pourrait s'expliquer par un déplacement de la base du tube, que l'on considère comme fixe pour le calcul de la déformée (cumul des déplacements élémentaires depuis le pied). Le tube IVf2 implanté sur rive gauche ne présente pas de déformation significative à l'exception du déplacement sur le dernier mètre qui est vraisemblablement lié à un mauvais scellement de la tête de l'inclinomètre.

Ce déplacement est du même ordre de grandeur que celui mesuré au moyen du distomètre.

4. COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS OBTENUS

Bien que les déformations mesurées soient en général faibles on note toutefois, sur rive droite, des déplacements liés aux glissements observés en surface ; ce phénomène est observé aussi bien au moyen des tubes inclinométriques scellés directement dans le sol au voisinage des piles qu'avec les plaques clinométriques mises en place au bas des piles.

5. PROPOSITION DE PROSPECTION ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

Le dispositif mis en place paraît suffisant pour suivre l'évolution des déplacements dans le temps.

Compte tenu des observations effectuées, la poursuite des auscultations doit être envisagée avec une fréquence de 2 ans.

6. CONCLUSIONS

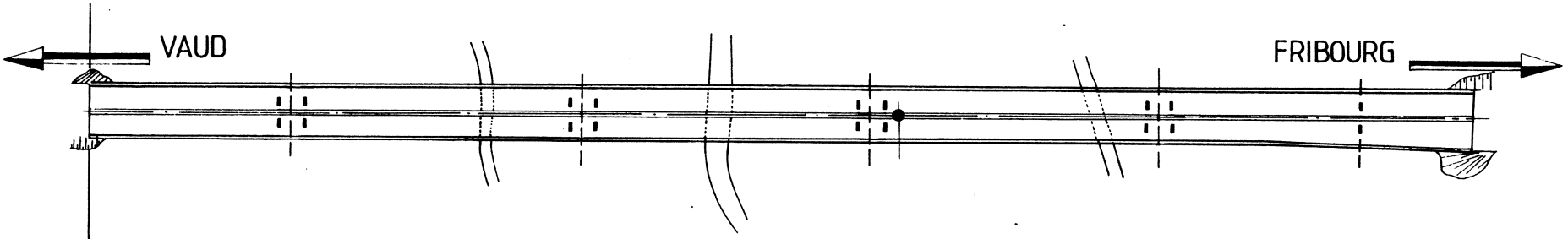
Au stade actuel, on peut admettre que les fondations de l'ouvrage présentent un comportement satisfaisant et qu'il n'est pas nécessaire de prévoir d'envisager des travaux confortatifs.

Si les déplacements devaient s'accélérer, il conviendrait d'étudier un drainage du versant.

PONT DE LA VEVEYSE DE FÉGIRE

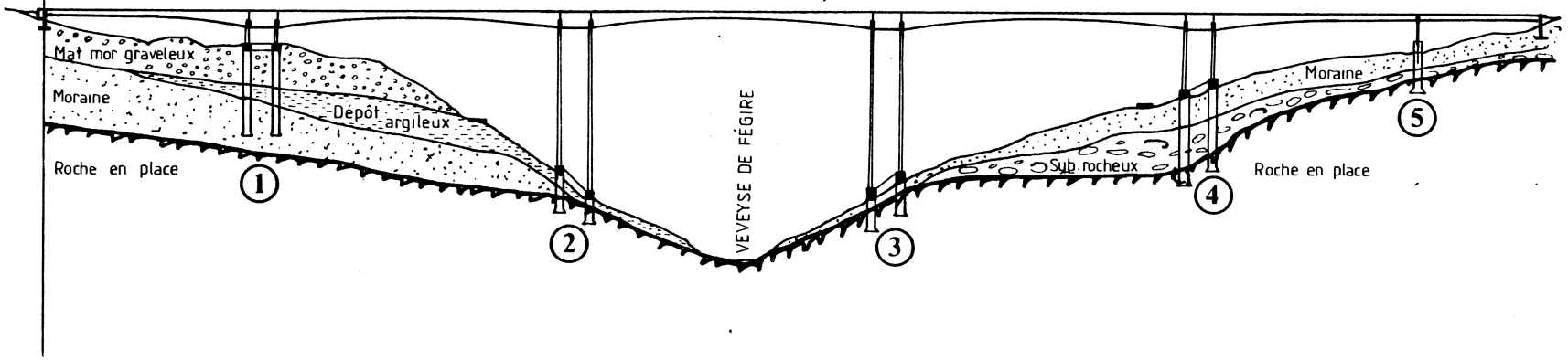
Plan de situation

Echelle, 1 : 2000



Coupe en long

Echelle, 1 : 2000



ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IVf2 FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 559'250 X 151'350 Z 765

DATE D'EXECUTION 30 septembre 1981 PROFONDEUR 17.50 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø146	100 %	1 2 3			Terre végétale Moraine limono-argileuse et graveleuse grise, glissée	Moraine glissée		
		4 5 6 7 8 9 10			Flysch marneux complètement décomposé (par le forage à sec) Flysch schisto-marneux décomposé, disloqué en morceaux et débris (par forage à sec)	Roche altérée probablement en place Flysch marneux décomposé par le forage		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IVf2 — FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 559'250 X 151'350 Z 765

DATE D'EXECUTION 30 septembre 1981 — PROFONDEUR 17.50 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø101	100 %	11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18		V, V, 30, 50, 80, 70, 60	Flysch schisto-marneux très délité et disloqué, gris-noir, à traces de tectonisation, pendage très variable Marnes argileuses, plaquetées, ± délitées, à passages disloqués, gris-noir	Roche en place sûre (Flysch) Marnes plaquetées à passages disloqués		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IVf4 FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 559'350 X 151'575 Z 797

DATE D'EXECUTION 29 septembre 1981 PROFONDEUR 32.60 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ϕ131	100%	1			Terre végétale	Couche terreuse et moraine glissée		
					Moraine très altérée, limono-sableuse et graveleuse			
		2			Moraine altérée, limono-sableuse et graveleuse, gris-brunâtre, avec pierres			
		3						
		4			Matériel de Flysch complètement décomposé en uue gangue sablo-limoneuse, un peu argileuse, graveleuse, à morceaux de grès et calcaires gréseux, gris-brunâtre	Matériel de Flysch très décomposé, glissé		
		5						
		6						
		7			Calaires gréso-marneux durs, à schistosité verticale, désagrégés en fragments, débris et sables			
		8						
		9			Flysch schisto-argileux et gréseux altéré et décomposé en une pâte limono-argileuse gris brun, à morceaux de grès			
		10						

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IVf4 FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 559'350 X 151'575 Z 797

DATE D'EXECUTION 29 septembre 1981 PROFONDEUR 32.60

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø131	100%	11, 12			Flisch schisto-argileux et gréseux altéré et décomposé en une pâte limono-argileuse gris brun, à morceaux de grès	Flysch décomposé, glissé		
					Flysch schisto-marneux décomposé en une gangue limono-argileuse et sableuse gris à brunâtre (12.35 m) à fins éléments gréseux			
Forage rotation à l'eau, carottier double ø101		13, 14, 15, 16, 17, 18, 19			Flysch schisto-marneux et gréseux, structuré, altéré, fragmenté, à niveaux complètement broyés. Nombreuses surfaces lustrées, surtout dès 19.20 m	Roche probablement glissée - Flysch marno-gréseux, schisteux, broyé, riche en surfaces lustrées et striées		
		20			Schistes argileux, feuilletés, calcitisés			

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IVf4 FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 559'350 X 151'575 Z 797

DATE D'EXECUTION 29 septembre 1981 PROFONDEUR 32.60 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø101	100%	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30		50, 90, 50, 70, 90, 50, 25, 55	Marnes peu délitées, fissurées, dures, grises, pendage vertical de 21.0 à 21.6 m, compris entre 50 et 70° ailleurs. Niveau de schistes argileux à 20.40 m	Roche en place possible - Flysch schisto-gréseux, très tectonisé très riche en surfaces lustrées et striées (tectonisation ou glissement)		
					Marnes idem, tectonisées, avec une fracture verticale calcitisée			
					Schistes marneux délités partiellement fracturés			
					Schistes argileux, feuilletés, fragmentés, avec des surfaces lustrées, broyés dès 23.00 m (forage)			
					Marnes plaquetées, fragmentées jusqu'à 23.45 m. Pendage 20 à 35°; surfaces lustrées et striées selon la ligne de plus forte pente.			
					Grès tectonisés (fissures calcitisées), à passées schisto-argileuses feuilletées, pyriteuses, ± broyées, renfermant des surfaces lustrées; pendage 25 à 60°			
					Schistes argileux, localement gréseux, très tectonisés, passablement fragmentés, renfermant de nombreuses surfaces lustrées			
					Marnes massives, légèrement tectonisées entre 28.70 et 28.95 m, silto-gréseuses dès 29.20 m	Roche en place sûre		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IVf4 FEUILLE N° 4

COORDONNEES Y 559'350 X 151'575 Z 797

DATE D'EXECUTION 29 septembre 1981 PROFONDEUR 32.60 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
For. à l'eau, carot. double ø 101	100%	31 32		55	Marnes silto-gréseuses Marnes argileuses, localement feuilletées, assez fragmentées, délitées, renfermant des surfaces lustrées : pendage 55°	Roche en place sûre		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IVf5 — FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 559'375 X 151'625 Z 808

DATE D'EXECUTION 21 novembre 1981 — PROFONDEUR 37.75 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø 146	100 %	1			Terre végétale	Moraine glissée		
					Matériel morainique remanié, terreux, limono-sableux et graveleux, à galets ronds, bruns			
		2			Matériel morainique organique, remanié, sablo-limoneux, assez graveleux, avec qq. pierres, gris-brun; gros morceaux de bois à 1.95 m			
					Moraine finement sableuse et limoneuse, graveleuse, jaune beige			
					Gravier limono-sableux gris, compacts			
		3			Moraine altérée, limono-sableuse et graveleuse beige			
		4						
		5			Moraine limono-graveleuse, un peu argileuse, grise, compacte			
ø 131		6			Schistes marneux très altérés et complètement désagrégés en pâte limono-argileuse et fins débris, gris-jaune	Masse de Flysch glissée		
		7						
		8			Schistes marneux, très altérés, gris-jaune, décomposés en limons et fins débris			
		9			Marnes silteuses altérées et très disloquées, alternativement en gros morceaux et fins débris (9.10-9.30; 9.60-10.0; 10.90-11.30). Les niveaux les moins disloqués montrent un pendage vertical; couleur grisâtre et rouille.			
For. à eau ø 101		10						

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IVf5 — FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 559'375 X 151'625 Z 808

DATE D'EXECUTION 21 novembre 1981 — PROFONDEUR 37.75 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
F. eau ø101					Marnes silteuses altérées et très disloquées alternativement en gros morceaux et fins débris; les niveaux les moins disloqués montrent un pendage vertical; couleur grisâtre et rouille. (Disloqués par forage à sec)			
Forage à sec, carot. simple ø 116		11						
		12			Schistes marneux gris réduit en pâte limono-argileuse à fins débris (par le forage à sec essentiellement)			
		13			Schistes argileux désagrégés			
		14			Pâte limono-argileux à débris de schistes			
Forage rotation à l'eau, carottier double ø 101	100%	15			Schistes argileux gris disloqués en morceaux puis en pâte dès 15.65 m	Masse de Flysch glissée		
		16		50	Marnes grises			
		17			Schistes argileux gris désagrégés, réduits en pâte à la base, morceaux de grès sub-arrondis, ensemble récupéré en carottes compactes, non remaniées			
		18						
		19						
		20		20				

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IVf5 FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 559'375 X 151'625 Z 808

DATE D'EXECUTION 21 novembre 1981 PROFONDEUR 37.75 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø 101	100 %	21			Grès fins, durs, gris, fragmentés, qq. frissures calcitisées. Le contact à 19.60 m est constitué par une surface lustrée inclinée à 20°.	Roche en place possible Flysch marno-schisteux, nombreuses surfaces lustrées et striées		
		22			20 — Schistes argileux à niveaux silteux, disloqués et désagrégés, gris			
		23			Marnes silteuses dures, grises, disloquées, surface lustrée à 23.80 (inclinaison 35°)			
		24			35 — Marnes silto-gréseuses, grises dures, assez peu fragmentées (sauf 24.25-24.45:schistes disloqués), fissures calcitisées et nombreuses surfaces lustrées. A 25.35 25.40 pendage divergent de part et d'autre d'un niveau broyé. Idem à 25.55 de part et d'autre d'une surface lustrée et striée inclinée à 50°			
		25			60 50			
		26			90 Marnes schisteuses grises, peu fragmentées, à pendage vertical			
		27			Schistes argileux désagrégés en pâte et plaquettes, gris			
		28			Marnes silteuses (grès 27.33-27.52) grises, dures, le plus souvent disloquées, à nombreuses surfaces lustrées			
		29			Marnes compactes, dures, grises			
		30			15 Marno-grès durs, gris, assez massifs; niveau désagrégé dès 29.75-29.85; pendage 15-20°. Surfaces lustrées et striées			

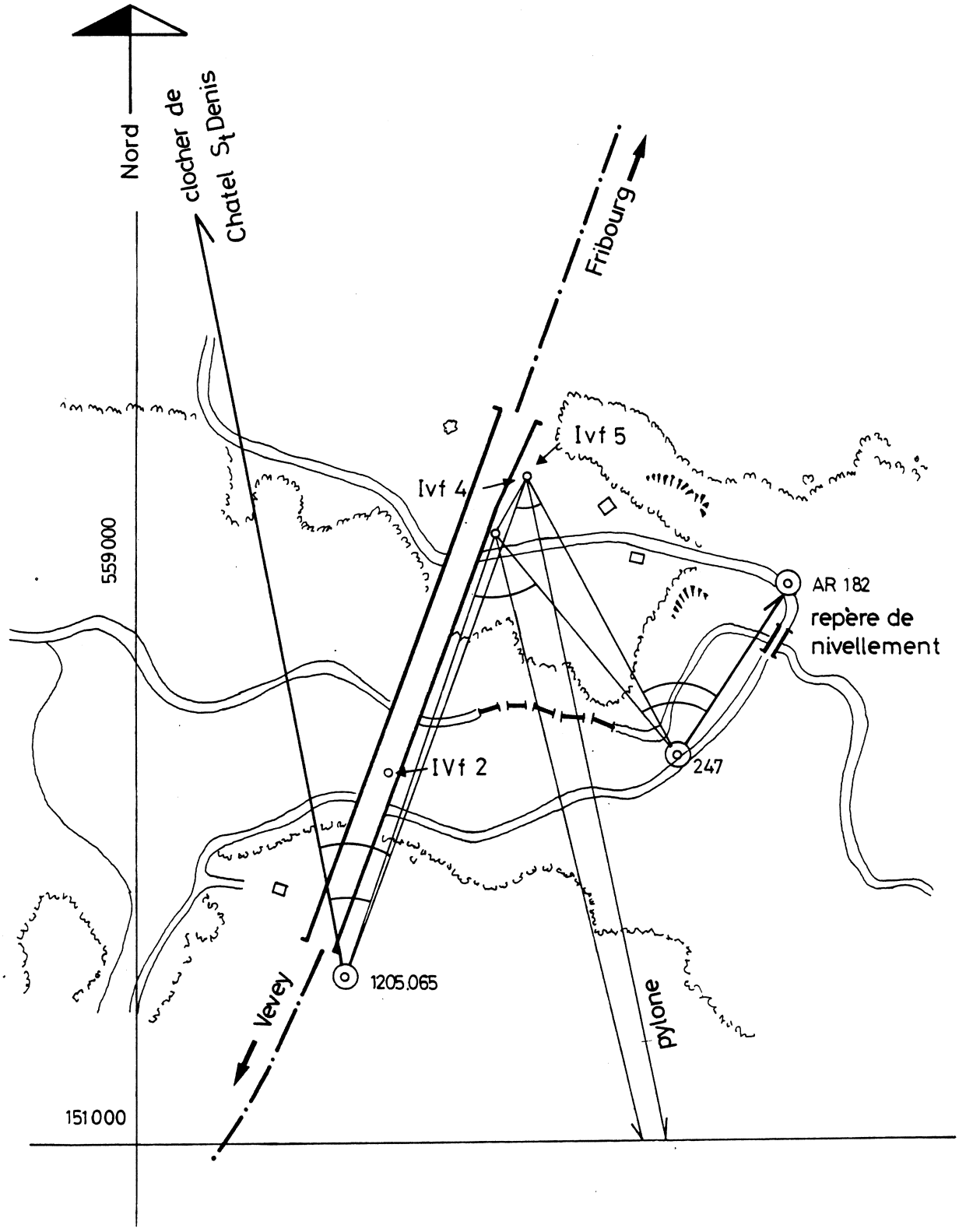
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

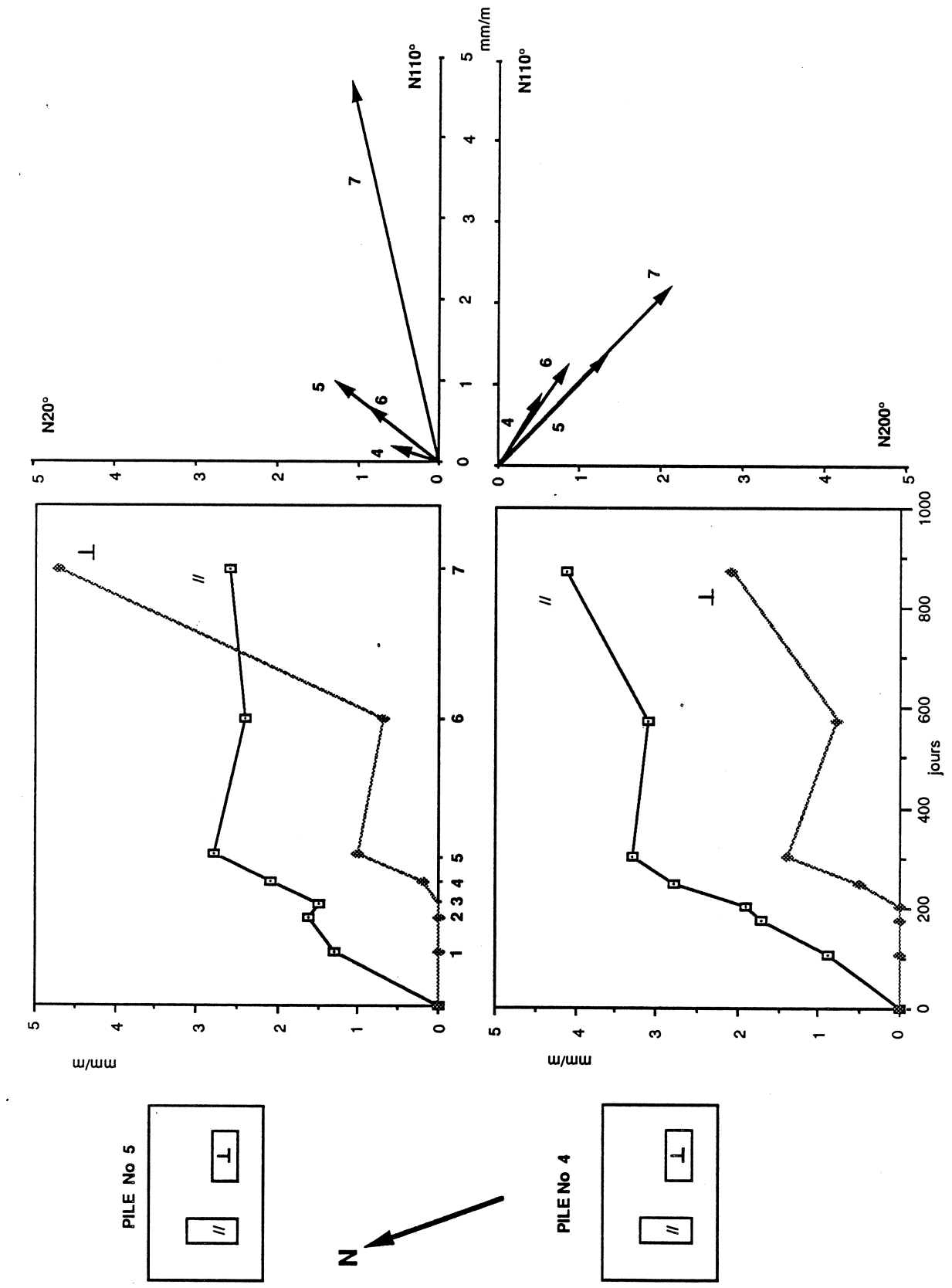
SONDAGE N° IVf5 FEUILLE N° 4

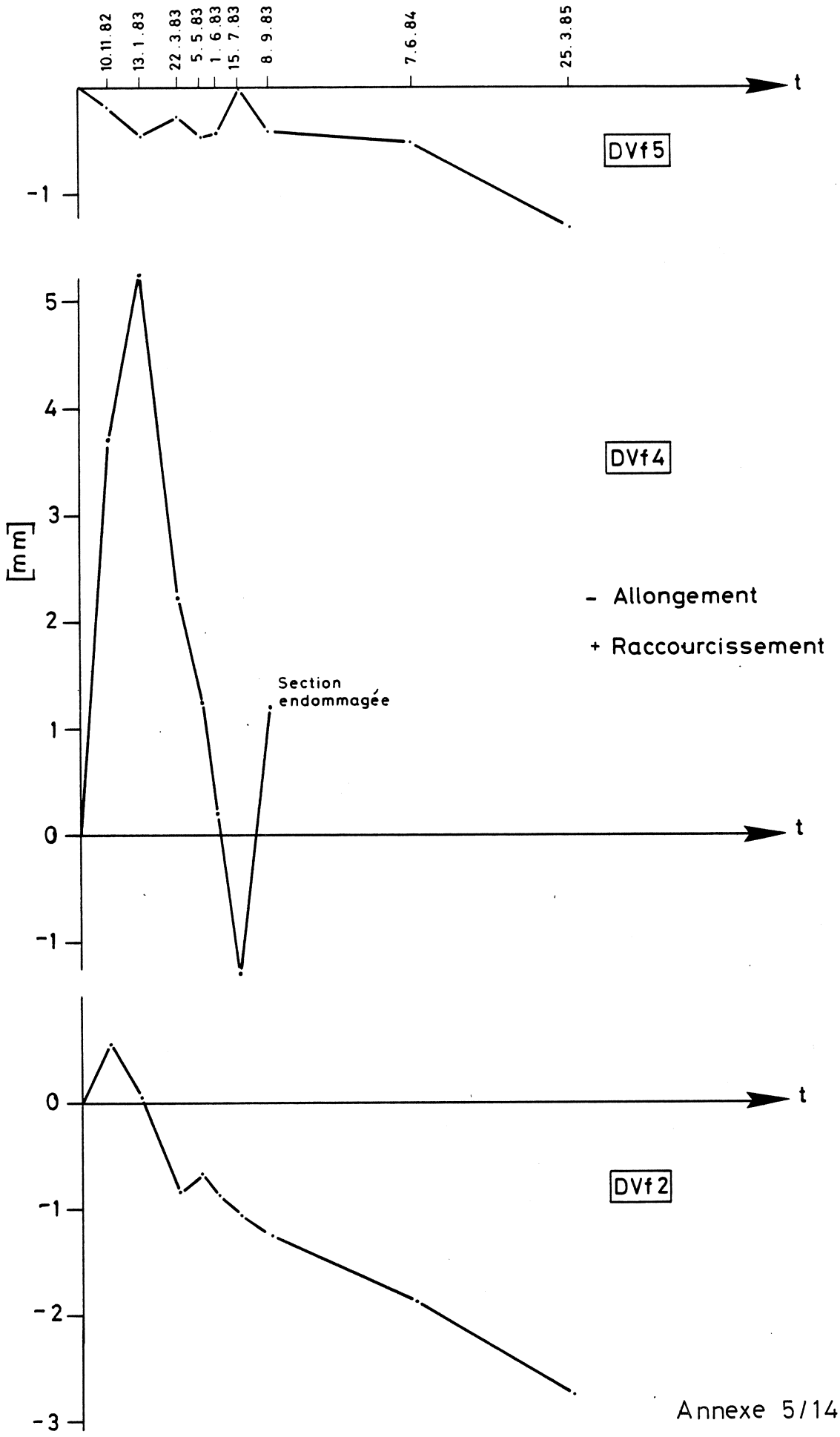
COORDONNEES Y 559'375 X 151'625 Z 808

DATE D'EXECUTION 21 novembre 1981 PROFONDEUR 37.75 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø101	100%	31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38			Marnes schisto-argileuses, mi-dures, grises récupérées en carottes compactes Marnes silteuses, litées, grises, compactes; fissures calcitisées Marnes schisto-argileuses, mi-dures, grises, récupérées en carottes compactes Marnes calcaires et silteuses litées (massives à la récupération), grises, dures. Qq. fissures calcitisées. Pendage généralement 60°. (60) Marnes schisto-argileuses, tectonisées et calcitisées assez fragmentées dès 35.65, désagrégées. Plissements, pendage 60° à 90°. (60, 90) Marnes litées, massives, dures, grises (65) Marnes argileuses litées, assez dures, gris-noir à fissures calcitisées. Fissures calcitisées et striées et surfaces lustrées à 36.20 et 36.30. (25)	Roche en place sûre (Flysch) Marnes et marnes silto-gréseuses compactes, à niveaux délités		


Nord
clocher de
Chatel St Denis
Fribourg
Ivf 5
Ivf 4
559 000
AR 182
repère de
nivellement
247
IVf 2
1205.065
Vevey
pylone
151 000


N20°
N110°
N110°
N200°
mm/m
mm/m
mm/m
jours
PILE No 5
PILE No 4
N
T
//


10.11.82
13.1.83
22.3.83
5.5.83
1.6.83
15.7.83
8.9.83
7.6.84
25.3.85
t
DVf5
-1
5
4
3
2
1
0
-1
[mm]
DVf4
- Allongement
+ Raccourcissement
Section endommagée
t
0
-1
-2
-3
DVf2
t

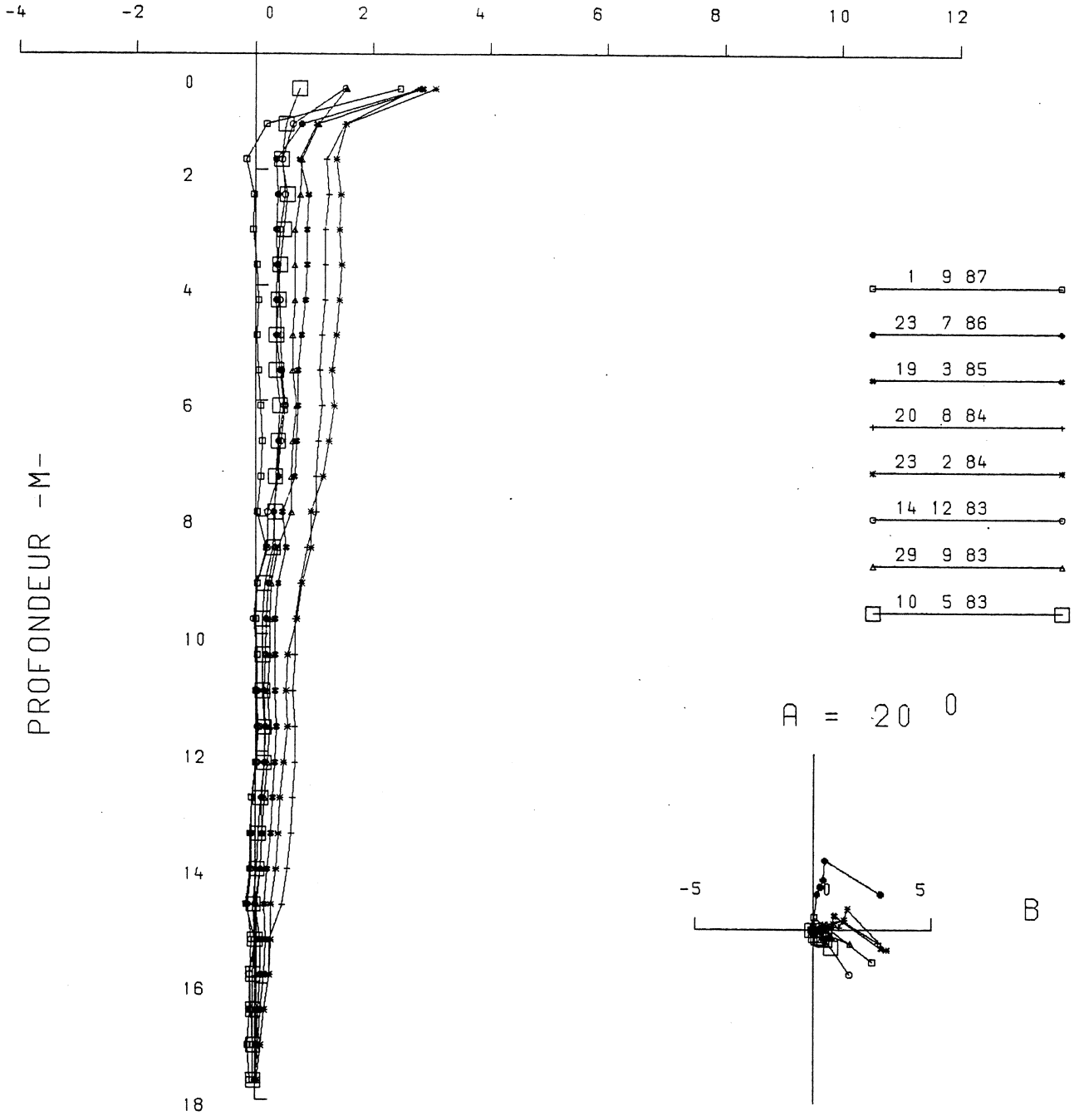
Annexe 5/14

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO IVF2A3

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 13 1 83

DEPLACEMENTS (MM)

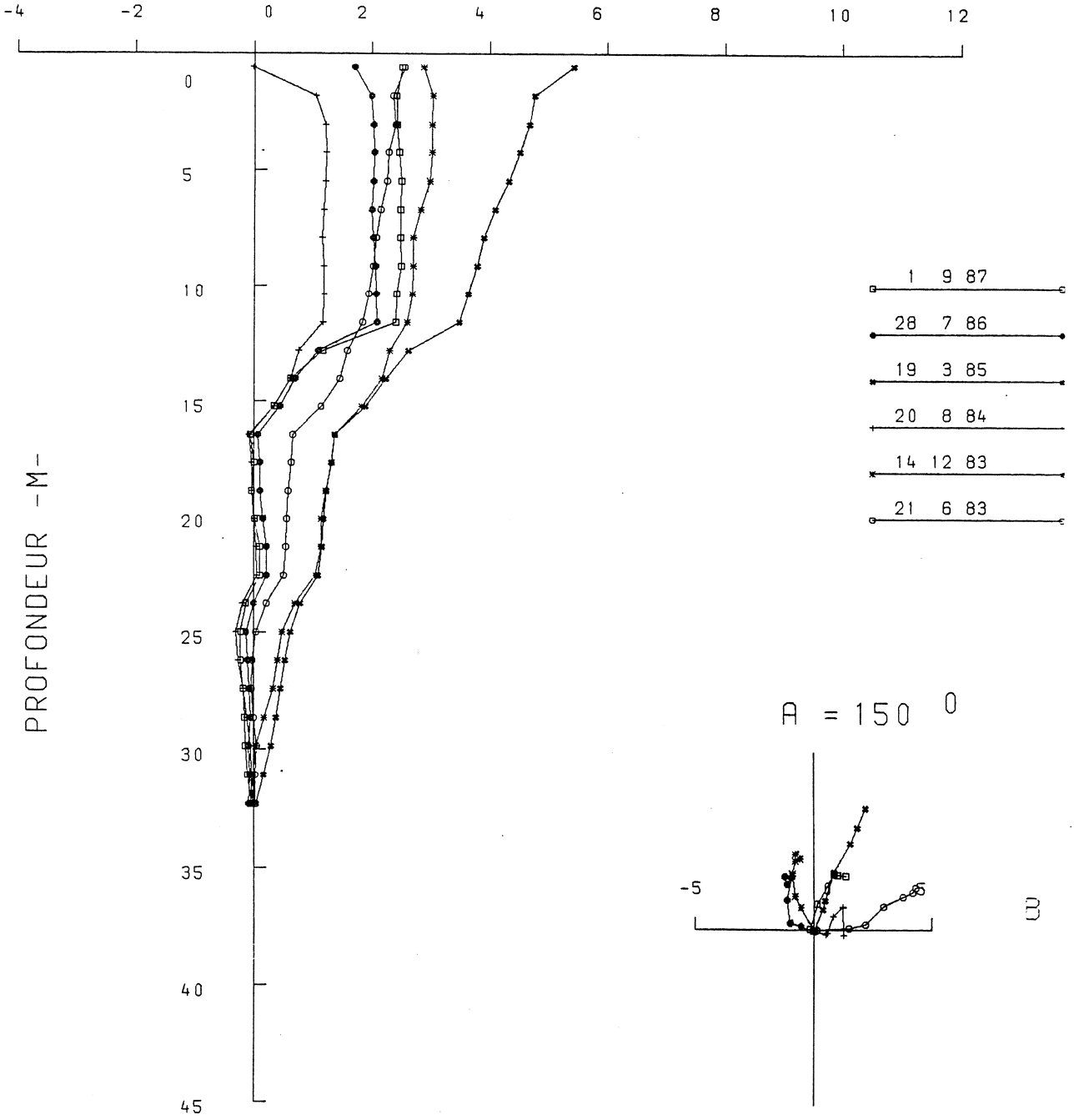


SELON AZIMUT DONNE
AZ= 110 DEGRES

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL
EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO IVF4A3

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 13 1 83

DEPLACEMENTS (MM)



SELON AZIMUT DONNE
AZ= 160 DEGRES

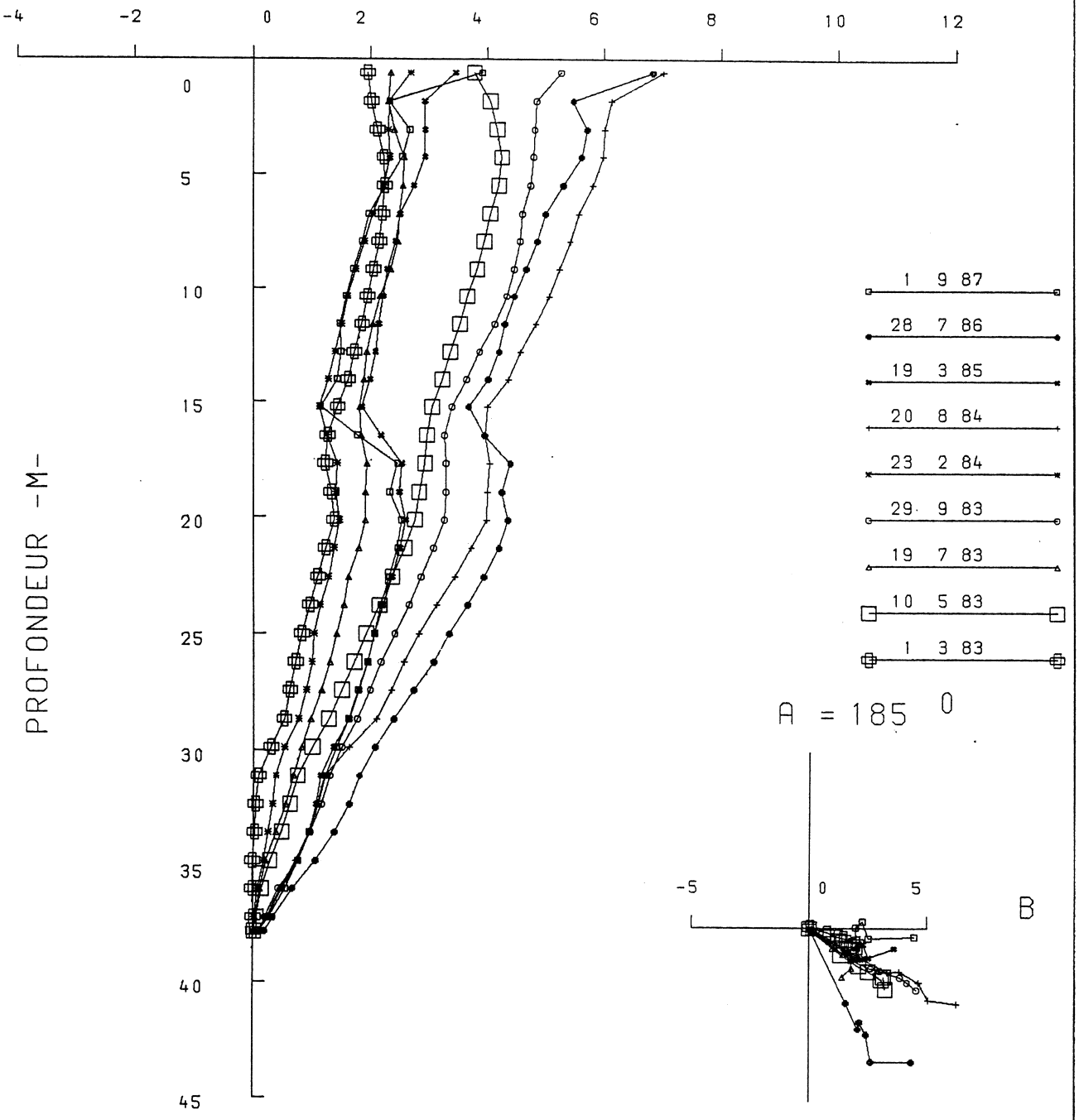
Annexe 5 / 16

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO IVF5A3

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 2 12 82

DEPLACEMENTS (MM)



SELON AZIMUT DONNE
AZ= 310 DEGRES

3.6 PONTS ET MURS DU CRAU-COULET

Cet ouvrage n'a pas fait l'objet d'un rapport particulier.

3.7 GLISSEMENT ET PONT DE LA CORNALLAZ

1. GENERALITES

1.1 Description de l'ouvrage

Route nationale N9 Section 910 km : 18.200-18.335

Passage, par deux ponts indépendants, au-dessus de la zone frontale du glissement de La Cornallaz.

Auteur du projet	Réalini + Bader, ingénieurs SA
Dossier géologique	J. Norbert, A. Bersier, Lausanne
Dossier géotechnique	LEGEP, H.B. de Cérenville, Lausanne
Construction	1969-1971
Longueur totale	135 m
Nombre d'appuis entre les culées	2
Portées	43.0 m - 49.0 m - 43.0 m
Tablier	Poutre continue en béton précontraint Section en caisson
Piles et fondations	Palées simples de largeur variable, encastrées dans la molasse. Les palées traversent les sols instables dont elles sont protégées par un blindage indépendant, appuyé sur la molasse. A l'amont des ponts, les sols sont drainés de façon à empêcher tout mouvement important du terrain.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

Le vallon de La Cornallaz est bordé au Nord-Est par une falaise en cours de tassement. Cet affaissement de pans rocheux est à l'origine des trois glacis étagés qui forment la dépression actuelle.

La roche en place est formée de molasse à bancs alternativement gréseux ou marneux. Les séries stratigraphiques plongent régulièrement vers le Sud-Est avec un pendage de 10 à 20°. La molasse est fracturée par un réseau orthogonal de failles et diaclases qui favorise le tassement par panneaux de la paroi rocheuse ainsi que la segmentation des couches.

Les sols meubles comprennent essentiellement des marnes argileuses avec des débris marno-gréseux plus ou moins volumineux.

Ces matériaux proviennent de la décomposition de la molasse. Leur épaisseur augmente de 2 m, vers le haut du vallon, jusqu'à 20 m au voisinage des ponts. Ils sont très homogènes du point de vue de leur composition granulométrique comme de leurs propriétés de plasticité. Ils sont composés, en moyenne, de : 33% d'argile, 44% de limon, 13% de sable et 10% de gravier. Leur résistance au glissement est déterminée par un angle de frottement compris entre 13 et 25° et une cohésion de 34 à 55 $kN \cdot m^{-2}$.

Les eaux souterraines forment une nappe hétérogène très sensible aux précipitations atmosphériques. L'eau se concentre surtout dans les fissures présentes au voisinage des plans de glissement. Le fond molassique est aussi parcouru par un écoulement fissural, alimenté d'assez loin par les eaux percolant à travers les couches morainiques. Au gré des déformations et des transports solides, le réseau fissural peut se refermer et se mettre en pression. Ces pressions internes jouent un rôle primordial dans la dynamique du mouvement.

1.3 Problèmes d'instabilité

L'érosion des parois amène sur les glacis des blocs et matériaux fins qui s'altèrent et se fondent peu à peu dans la masse argileuse. Sous l'effet de son poids, cette masse, d'autant plus plastique que les venues d'eau sont plus abondantes, glisse lentement vers l'aval. Ces éboulis sont probablement aussi poussés latéralement par les tranches rocheuses en cours de tassement dont le mouvement, d'abord vertical, s'incurve vers le bas pour rejoindre le plan de glissement de fond.

Le déplacement des sols s'effectue sur le plafond molassique recouvert d'une couche argileuse, plastique et souvent humide de 1 à 20 cm d'épaisseur. Cependant il n'y a pas seulement une translation de l'ensemble mais surtout de nombreux écoulements au sein même de la masse, le long de surfaces de rupture intermédiaires.

Ces mouvements sont en général lents, voire nuls. Cependant, à la faveur de causes telles que les venues d'eau superficielles ou souterraines, la plastification de couches marneuses, la mise en pression hydraulique de surfaces de rupture, des déplacements brusques et importants peuvent se produire.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

2.1 Inclinomètres

Aux mois d'octobre et novembre 1981, trois forages ont été exécutés et équipés de tubes de mesures inclinométriques. Leur situation est reportée sur le plan (annexe 7.1).

Le tableau ci-dessous donne leurs coordonnées, leur profondeur, ainsi que la profondeur à laquelle la molasse chattienne est atteinte.

Inclinomètre	Coord. X	Coord. Y	Coord. Z	Prof. [m]	Prof. molasse [m]
ICA1	149'543	547'406	636.022	20.50	14.60
ICA2	149'477	547'459	631.457	33.50	27.70
ICA3	149'300	547'410	602.829	23.00	16.90

Les annexes No 7/2 à 10 donnent la coupe verticale des sondages exécutés pour la mise en place des inclinomètres avec la nomenclature des couches rencontrées.

2.3. Drainages

D'importants travaux de drainage ont été effectués depuis la fin du siècle dernier jusqu'aux années 1970 à l'intérieur de ce glissement (voir annexe 7.1).

C'est dans la galerie A-B-C que nous avons entrepris nos mesures. Ces dernières sont faites en quatre endroits distincts :

- au droit d'un petit drain aboutissant dans la moitié supérieure du puits A
- à la jonction du drain ø 40 cm avec la galerie entre A et B
- au droit du puits B
- à l'arrivée de la galerie dans le puits C.

D'autres mesures ont été prises au droit de petits barrages implantés dans la cunette, cependant lors de débits supérieurs à 50 ℓ/min, il y a débordement, ces mesures furent donc abandonnées.

2.4 Mesures topographiques

Dès août 1982, des déterminations en coordonnées ont été réalisées au droit des inclinomètres ICA1 et ICA2, ainsi que des nivellements de précision sur les trois inclinomètres présents sur le site.

3. RESULTAT DES MESURES

3.1 Contrôle des mouvements grâce aux inclinomètres et au distomètres

3.1.1 Inclinomètres

Les mesures initiales ont été réalisées en décembre 1981 pour les trois inclinomètres. Trois mesures ont été alors faites jusqu'en juin 1982. A cette époque, la sonde inclinométrique utilisée a été détruite. De nouvelles mesures initiales (nouvelle sonde !) furent donc entreprises dès que possible; c'est-à-dire en décembre 1982.

Dès cette date, des mesures mensuelles furent exécutées jusqu'en septembre 1983. Les mouvements étant faibles, décision fut prise d'espacer les intervalles de temps entre chaque mesure.

3.1.2 Distomètres

Les mesures initiales furent effectuées le 16 septembre 1982.

Etant donné l'imprécision des mesures dues aux vibrations du pont lors de chaque passage de véhicules, les mesures recueillies ne sont pas exploitables. Une mesure de contrôle en juin 1984 et une en avril 1985 présentèrent le même défaut.

3.2 Contrôle des débits des drainages

Les premières mesures de débits ont été faites dès le 20 juillet 1982 au droit des puits B et C, et dès le 10 mars 1983 au droit du petit drain de la partie supérieure du puits A et du drain ø 40 entre A et B. Dès lors chaque mois une mesure fut prise.

Il est à relever que dès le 25 août 1983, un limnigraphe ainsi qu'un déversoir en V ont été montés au droit du puits C afin d'enregistrer de façon permanente les variations de débits présentés par les drainages. Ce système permet de connaître précisément des débits compris entre 1 et 220 ℓ/min.

3.3 Pluviométrie

Un pluviographe a été mis en place le 28 août 1983 afin de connaître précisément la pluviométrie du lieu. Début décembre 1983, le gel nous contraignit à le retirer. Dès le 24 janvier 1984, il fut réinstallé.

Il existe dans la région plusieurs stations pluviométriques : Tour de Gourze, Riex, Pully et Lausanne. Il semble que ce soit à Riex que l'on observe les phénomènes pluvieux les plus semblables à ceux relevés à La Cornallaz.

Nous utiliserons donc les informations données par Riex lorsqu'elles nous manqueront sur place.

3.4. Mesures topographiques

Une campagne de mesures topographiques a été entreprise en septembre 1983. Les résultats de cette campagne sont reportés sur le tableau suivant.

date → No ↓	août 1982	sept. 1983		
Ca 1 Inclino.	547 405.872 149 543.211 636.022	864 217 019	- 8 + 6 - 3	Y X Z
Ca 2 Inclino.	547 458.801 149 476.578 631.457	800 572 456	- 1 - 6 - 1	Y X Z
Ca 3 Inclino.	602.829	829	0	Y X Z

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

4.1. Evolution des mouvements observés au niveau du plan de glissement grâce aux inclinomètres

Les mouvements relevés lors de chaque mesure au droit des inclinomètres sont reportés sur le tableau ci-après et sur le dessin (annexe 7/11). Les déplacements observés en ICA3 étant à la limite de la précision de l'appareil, on peut admettre qu'ils sont nuls.

Les vitesses moyennes de déplacements sur près de 5 ans sont de ~ 2.0 mm/an pour ICA1 et de ~ 2.5 mm/an pour ICA2. On observe lors des périodes très pluvieuses une accélération sensible puisque les vitesses peuvent atteindre 13.5 mm/an respectivement 18.0 mm/an (entre mars et juin 1983).

Quoiqu'il en soit ces vitesses correspondent à des glissements de faible activité. Tout le mouvement se manifeste dans le plan de glissement, au toit de la molasse.

Inclinomètre No	ICA1	ICA2	ICA3
Prof. du plan de glis.	entre 14.60 et 15.20 m	entre 25.60 et 27.40 m	
Date des mesures	Déplacements en mm		
07.12.81*	0	0	0
12.03.82	1.1	1.9	-
22.04.82	1.3	2.1	-
07.06.82	1.2	2.3	-
02.12.82**	0	0	0
17.01.83	0.5	0.8	-
04.03.83	0.5	0.9	-
17.03.83	0.5	0.7	-
19.04.83	2.6	3.8	-
10.05.83	2.5	4.0	-
21.06.83	3.9	5.4	-
19.07.83	3.9	5.0	-
19.08.83	3.9	4.8	-
28.09.83	3.8	4.9	-
16.12.83	3.9	5.1	-
17.02.84	4.3		-
14.03.84		6.0	
10.07.84	4.6	5.9	-
20.03.85	5.2	6.7	-
24.07.86	6.1	7.9	-
02.09.87	9.0	11.8	-

* mesure initiale

** nouvelle mesure initiale

4.2 Evolution des débits des drainages

Les débits relevés ponctuellement du 20 juillet 1982 au 29 juillet 1984 sont reportés sur le tableau ci-dessous..

Débits des drainages mesurés ponctuellement à La Cornallaz (en ℓ/min)

Emplacement mesures Date	au puits B	au puits C	drain ø40cm	Petit drain au puits A
20.07.82	7.30	6.70		
30.07.82	13.00	12.10		
17.09.82	7.40	6.00		
12.01.83	22.20	24.00		
03.02.83	80.90	79.10		
24.02.83	18.00	18.60		
10.03.83	28.00	30.30	19.80	0.64
24.03.83	28.00	30.70	20.00	0.70
17.04.83	36.00	36.00	16.00	1.43
05.05.83	156.00	144.00	132.00	13.20
22.06.83	10.50	10.20	4.00	goutte
21.07.83	5.30	4.50	1.10	sec
22.08.83	1.75	1.70	0.66	sec
21.09.83	8.50	8.50	6.50	0.14
18.10.83	41.20	40.00	25.00	6.20
21.11.83	1.45	1.53	0.78	goutte
22.12.83	130.00	132.00	112.00	16.00
31.01.84	63.00	69.00	51.00	3.00
24.02.84	32.00	33.00	21.00	goutte
13.03.84	45.00	42.00	27.00	6.50
24.05.84	52.00	54.00	36.00	1.20
13.06.84	15.00	15.00	8.50	sec
19.07.84	3.30	3.40	0.90	sec

Ils ont également été reproduits sous forme de graphe sur le dessin (annexe 7/12). La première observation que l'on peut formuler est la grande différence entre les minima et les maxima : facteur de 1 à 100 pour les puits B et C (min. ≈ 1.7 ℓ/min, max. ≈ 150 ℓ/min) et facteur 1 à 200 pour le drain Ø 40 cm (min. = 0.66 ℓ/min, max. = 132 ℓ/min).

Sur le dessin (annexe 7/12), la pluviométrie de la région a également été reportée. On remarque qu'une corrélation entre cette dernière et les débits observés ne peut pas être tirée; par contre on observe que la réaction des différents drainages est tout à fait parallèle, ce qui prouve le bon fonctionnement de chacun d'entre eux.

Les débits enregistrés en continu au droit du puits C ainsi que la pluviométrie du lieu ont été reportés sur deux graphiques parallèles, et ceci pour deux périodes : de fin août à fin novembre 1983 et de mi-mars à début juillet 1984. On y constate de façon précise la relation événements pluvieux/débits du drainage, et en particulier :

- le temps de réponse du drain, qui lors de précipitations suffisamment importantes peut varier de deux heures (lorsque les événements pluvieux se succèdent dans le temps de façon très rapprochée) à 8 heures (lorsqu'une longue période sèche précède l'événement pluvieux). Ce temps de réponse relativement court peut certainement s'expliquer par une perméabilité "de fissure" des terrains. Le fait d'avoir trouvé à l'intérieur du drainage des feuilles mortes va également dans le sens de perméabilité "de fissure".

- le rapport entre les débits minimum (1.6 ℓ/min) et maximum (400 ℓ/min) montre un facteur de 1 à 250, donc deux fois et demie plus élevé que celui observé lors de mesures ponctuelles (Annexe 7/12).

- l'influence de la fonte des neiges sur les débits est remarquablement transmise par l'appareil au fil de la journée (mi-mars à fin mars 1984).

- les orages ou les événements pluvieux isolés n'ont pas ou que très peu d'influence sur les débits des drainages. Leur eau n'est donc pas infiltrée mais est évacuée sous forme de nappe perchée très temporaire (écoulement hypodermique).

4.3. Evolution de la situation des têtes des tubes inclinométriques

La seule mesure (septembre 1983) réalisée ne permet pas d'observer une tendance de l'évolution de la topographie ! Les différences mesurées par rapport à la mesure initiale sont d'ailleurs comprises pratiquement dans les valeurs limites que peut donner une telle méthode.

5. PROPOSITIONS DE PROSPECTIONS ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

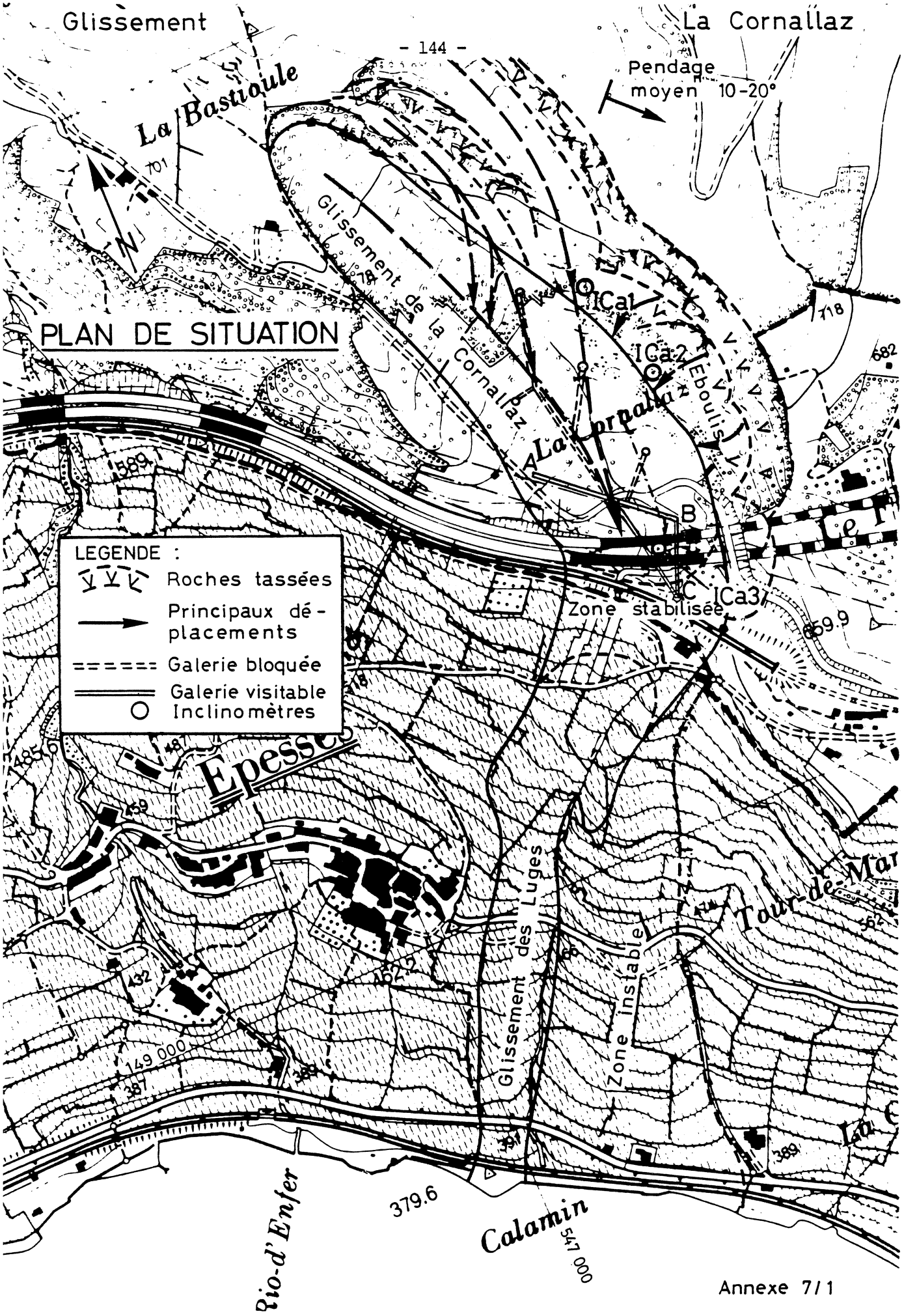
Les types de mesure adaptés sur le site peuvent être considérés comme parfaitement justifiables et valables. Elles sont suffisantes pour le contrôle du bon comportement de l'ouvrage.

Aucune prospection complémentaire n'est nécessaire.

La fréquence des mesures peut être maintenue à deux par année, pour autant qu'aucun élément nouveau (réactivation de la partie supérieure du glissement) n'intervienne.

6. CONCLUSIONS

En tout état de cause, le glissement de La Cornallaz, bien qu'actif, ne montre plus que de faibles mouvements et seulement dans la partie amont. Il semble donc que les mesures confortatives qui furent prises ont été efficaces, garantissant par là une durabilité de l'ouvrage. De toute façon, l'espace compris entre le blindage des puits et des palées autorise toujours d'éventuels mouvements importants. Cette situation favorable peut donc se maintenir à long terme, à condition que le réseau de drainage soit bien entretenu et fonctionne à satisfaction.


Glissement
La Cornallaz
Pendage moyen 10-20°
La Bastioule
Glissement de la Cornallaz
PLAN DE SITUATION
ICa1
ICa2
ICa3
Eboulis
La Prpalla
A
B
C
Zone stabilisée
LEGENDE :
Roches tassées
Principaux déplacements
Galerie bloquée
Galerie visitable
Inclinomètres
Epesses
Glissement des Luges
Zone instable
Tour de Mar
Rio-d'Enfer
Calamin
379.6
149 000
547 000

Annexe 7/1

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICal — FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 547'406 X 149'543 Z 636

DATE D'EXECUTION 14 octobre 1981 — PROFONDEUR 20.50 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø 146 / ø 131 / ø 116	100%	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10			Terre végétale Limon argileux avec graviers, pierres et blocs de grès à ciment légèrement calciteux. Présence de matériaux organiques (racines) ver le haut. Limon argileux gris-beige, passages argileux plastiques, graviers et petits blocs plus ou moins abondants. Argile molle. Pénétromètre de poche : 0- 6 m p = 0.4 kg/cm² 6-10 m p = 2.5 kg/cm²	Masse glissée		

Annexe 7/ 2

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICal — FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 547'406 X 149'543 Z 636

DATE D'EXECUTION 14 octobre 1981 — PROFONDEUR 20.50 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø116	100%	11, 12, 13, 14			Limon argileux gris-beige graviers et blocs épars Argile molle de 10 à 14.6 m : p = 1.5 - 2.0 kg/cm²	Masse glissée		
Forage rotation à l'eau, carottier double ø101		15, 16, 17, 18, 19, 20			Marnes silteuses indurées grises plus gréseuses vers le sommet Marnes gris-bleu et marno-grès fragmentés en blocs Marnes mi-dures à tendres, beige-bleu Marnes silto-gréseuses très indurées. Passage progressif aux grès Grès fin induré Marnes silteuses bariolées dures Marnes tendres lie-de-vin bigarrées	Marnes et grès de la Molasse		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICa2 FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 547'459 X 149'477 Z 631

DATE D'EXECUTION 2 novembre 1981 PROFONDEUR 33.5 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø146 ø131	100%	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10			Limon sableux, argileux, graveleux, gris verdâtre, consistance assez ferme Limon arglieux, finement sableux, avec qq. graviers gris verdâtre consistance moyenne à assez ferme Graviers de toute dimension, anguleux + blocs de grès fin pris dans une matrice limono-sableux ± argileux Blocs de grès fins, durs à très durs, gris	Masse glissée		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICa2 FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 547'459 X 149'477 Z 631

DATE D'EXECUTION 2 novembre 1981 PROFONDEUR 33.5 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage eau ø 101								
Forage rotation à sec, carottier simple ø 131 ø 116	100 %	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20			Limon plus ou moins argileux sableux beige à brun-beige, avec gravier molassique de toute dimension et quelques pierres et blocs; passées argileuses Traces de m.o à 14.30 m Consistance : - ferme à très ferme de 10.5 à 14.0 m - moyenne à ferme de 14 à 17.5 m - assez ferme à ferme de 17.5 à 20 m	Masse glissée		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICa2 — FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 547'459 X 149'477 Z 631

DATE D'EXECUTION 2 novembre 1981 — PROFONDEUR 33.5 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø 116	100 %	21			Limon sableux plus ou moins argileux beige à brun-beige, avec gravier de toute dimension, quelques blocs et pierres Traces de m.o à 21.90 m Consistance : - assez ferme à ferme de 20 à 21 m - moyenne de 21 à 24 m - assez ferme à dure de 24 à 26.1 m	Masse glissée		☒
		22						
		23						☒
		24						
		25						☒
		26			Bloc marne gréseuse			
Forage à l'eau, carottier double ø 101		27			Marnes tendres, friables, bariolées (lie-de-vin et grises)	Grès et marnes de la Molasse		
		28			Grès très fin marneux, gris : passage progressif à marnes gréseuses grises Marnes gréseuses grises tendres Marnes bariolées, lie-de-vin vert jaunâtre			
		29			15°			
		30			Marnes id. tendres			

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICa2 FEUILLE N° 4

COORDONNEES Y 547'459 X 149'477 Z 631

DATE D'EXECUTION 2 novembre 1981 PROFONDEUR 33.5 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage à l'eau, carottier double ø101	100 %	31			Marnes bariolées tendres	Grès et marnes de la Molasse		
					Marnes gréseuses à grès très fins très indurées, gris			
				⇄	‖-80°			
		32			Marnes tendres			
					⊢-15° Marnes gréseuses			
		33		⇄	‖-75°			
					Marnes tendres			

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICa3 FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 547'410 X 149'300 Z 602

DATE D'EXECUTION 6 novembre 1981 PROFONDEUR 23.0 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø 146	100%	1			Terre végétale brune Limon argileux beige-brun avec gravillons	Masse glissée		
		2			Limon argileux, un peu sableux, beige-brun avec graviers toutes dimensions			
		3			Idem, brun avec taches jaunes Consistance moyenne			
		4			Limon argileux sableux, gris avec taches jaunes, un morceau de bois et un bloc de grès			X
		5			Idem, plus sableux, gris Consistance assez ferme à très ferme			
		6						X
		7			Limon argileux, sableux, avec intercalations franchement sableuses et gravier fin à moyen, gris Consistance assez ferme			
		8						
		9			Idem avec présence de matières organiques			
		10						X

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICa3 FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 547'410 X 149'300 Z 602

DATE D'EXECUTION 6 novembre 1981 PROFONDEUR 23.0 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø146 ø131	100 %	11			Limon argileux finement sableux avec traces de matières organiques, gris, avec un bloc à 10.60 m. Consistance moyenne	Masse glissée		
		12			Idem, avec un bloc de grès à 12.30 m Consistance ferme à dure			
		13						
		14			Limon argileux, sableux, avec nombreux éléments de marnes molassiques altérées, gris foncé à gris-bleu Consistance assez ferme			
		15						
		16						
					Limon argileux, beige avec gravier fin et deux blocs. Consistance très tendres			
Forage à l'eau, carottier double ø101		17			Marnes bariolées indurées, lie-de-vin avec une fracture subverticale présentant une surface oxydée	Grès et marnes de la Molasse		
		18			Marno-grès, gris, massif, très dur. Fracture verticale.			
		19			Marnes gréseuses indurées, bariolées, lie-de-vin, avec fractures subverticales à surfaces oxydées			
		20			Marnes tendres légèrement bariolées			

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICa3 FEUILLE N° 3

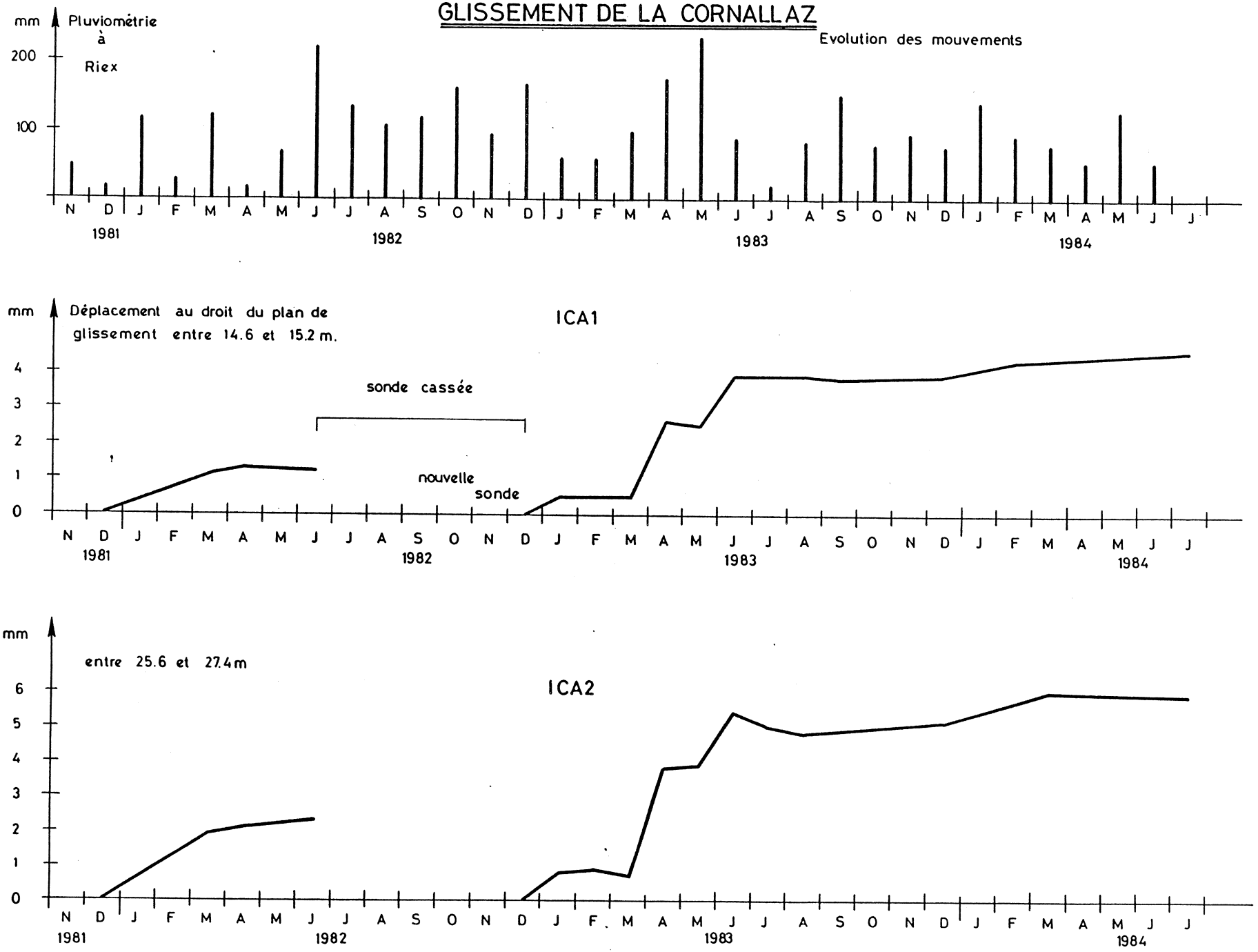
COORDONNEES Y 547'410 X 149'300 Z 602

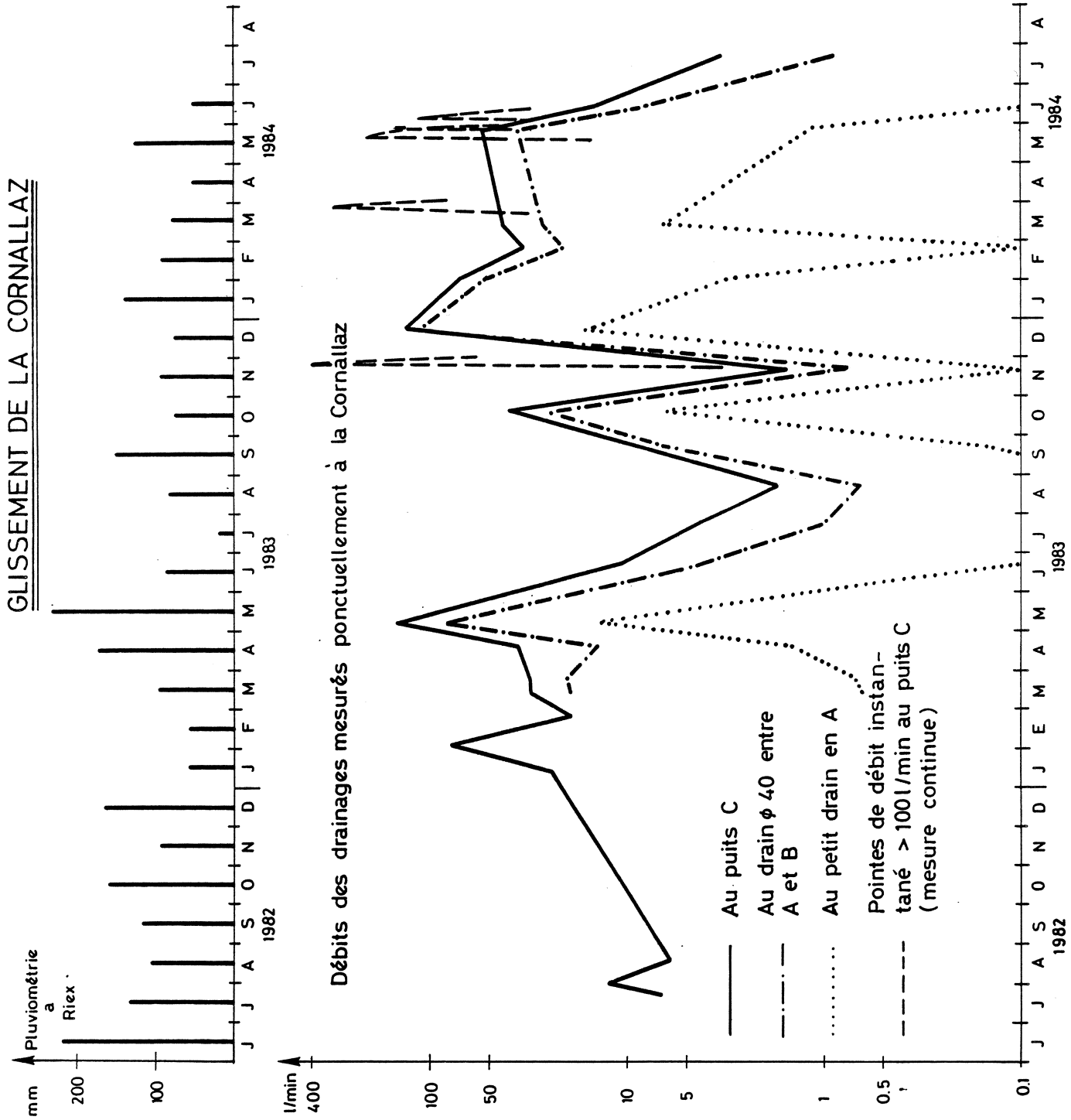
DATE D'EXECUTION 6 novembre 1981 PROFONDEUR 23.0 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage à l'eau, carottier double ø 101	100%	21			Grès fins à moyens, massifs gris, ciment calcaire. Une fracture 80° cimentée par la calcite	Grès et marnes de la Molasse		
					Marnes tendres légèrement gréseuses, grises à bariolées			
		22			Marnes indurées plus ou moins gréseuses, grises, massives			
		23						

GLISSEMENT DE LA CORNALLAZ

Evolution des mouvements




GLISSEMENT DE LA CORNALLAZ
Pluviométrie à Riex
mm
200
100
1982
1983
1984
Débits des drainages mesurés ponctuellement à la Cornallaz
l/min
400
100
50
10
5
1
0.5
0.1
Au puits C
Au drain ϕ 40 entre A et B
Au petit drain en A
Pointes de débit instantané > 100 l/min au puits C (mesure continue)

3.8 MUR ANCRE DE LA CRIBLETTE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N9 Section 910 km : 16.295-16.445

Soutènement de la paroi nord de la tranchée de Bahyse, à l'entrée est des tunnels de la Criblette (mur ancré en rocher).

Auteur du projet	Société Générale pour l'Industrie Lausanne
Dossier géologique	A. Bersier, Lausanne
Dossier géotechnique	LEGEP, H.B. de Cérenville et G. Lombardi
Construction	1972

D'une longueur de 150 m, l'ouvrage atteint une hauteur max. de 24.0 m en quatre gradins de hauteur variable (max. 6.0 m par gradin). L'excavation fut exécutée par étapes descendantes, l'étape suivante n'étant entreprise que lorsque les ancrages de l'étape précédente étaient mis en tension.

Les têtes d'ancrage étaient placées dans les piliers verticaux repris en sous-oeuvre; le clavage des piliers n'intervenait que lorsque tous les ancrages d'un pilier étaient en tension. Un voile de béton poreux (= chemise drainante) fut placé entre les piliers et un placage en béton armé recouvrant le tout fut exécuté depuis le bas.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

Par opposition aux conditions géologiques rencontrées sur les pentes du Crau-Coulet et de la Cornallaz, les molasses de la Criblette se caractérisent par l'absence d'épais bancs de grès : les bancs de marne ont une épaisseur de l'ordre du mètre, tandis que les bancs de grès ont une épaisseur de l'ordre du décimètre. Ces couches sont fortement inclinées et coupées de failles et diaclases, formant des

panneaux disjoints, facilitant les éboulements. Il y a peu ou pas de terrains meubles de couverture, disparus par glissement ou érosion. De l'eau circule dans le réseau de failles si ces dernières sont en communication avec des zones aquifères. Un relevé plus précis de la succession lithologique a été effectué lors de la mise en place des inclinomètres (annexes 8/1 - 8/10).

1.3 Problèmes d'instabilité

Le mur amont de la tranchée de Bahyse a pour but de retenir une paroi de molasse susceptible de former un glissement couche sur couche. Le pendage des couches accuse une pente sensiblement égale à celle du terrain naturel.

La méthode d'équilibre des forces ne s'applique pas à cette situation particulière. Les auteurs ont basé leurs estimations sur l'observation de quelques glissements rocheux, couche sur couche. Ils montrent que ce n'est pas le versant entier qui se met en mouvement mais qu'un premier glissement de dimensions réduites se forme d'abord au gré des fissures du massif et que ce dernier déclenche un deuxième glissement et ainsi de suite. Le principe adopté pour le dimensionnement des ancrages de ce soutènement, qui est d'empêcher ce premier glissement, est basé sur cette observation.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

Le dispositif de contrôle comprend :
- des repères topographiques scellés dans la partie supérieure
- des plaques pour mesures au clinomètre réparties sur les murs
- deux tubes pour mesures inclinométriques situés à l'amont du mur.

2.1 Topographie

Les repères placés au sommet des murs en 1975 ont été mesurés par recoupement depuis trois points de base situés dans la voie d'arrêt de la chaussée aval de l'autoroute.

Deux séries de mesures ont été effectuées en 1982 et 1985. Les points, calculés en coordonnées, ont ensuite été projetés orthogonalement sur l'axe de l'autoroute. La comparaison des kilométrages et des écarts permet de se faire une idée des déplacements. Il s'agissait ainsi, par des moyens simples, de mesurer des déplacements importants éventuels (en tous cas supérieurs au centimètre).

L'inconnue réside dans la stabilité de la voie d'arrêt de l'autoroute.

2.2 Clinomètres

Huit plaques clinométriques C1 à C8 ont été scellées sur le sommet des murs afin de déceler un basculement possible des murs.

La position de ces plaques ainsi que celle des repères topographiques est représentée à l'annexe No 8/11.

2.3 Inclinomètres

Deux tubes inclinométriques ICr1 et ICr2 ont été posés pour permettre de détecter un éventuel mouvement du terrain à l'arrière du massif ancré.

3. RESULTATS DES MESURES

3.1 Topographie

Les résultats des mesures topographiques sont résumés dans le tableau suivant :

Repère No	10.11.1982	28.11.1984
11	-5	-8
12	-5	-4
13	-3	-2
14	-3	+4
21	-6	-9
22	-3	-2
23	-4	-3
31	-11	-15
32	-11	-11
33	-1	0
41	-3	-5
42	-2	-1
43	-3	0

Tableau 1 : Ecarts en mm par rapport à la mesure initiale du 25.4.1975

3.2 Clinomètres

Les résultats des mesures effectuées au moyen des clinomètres font l'objet du tableau ci-dessous et sont représentés sous forme graphique à l'annexe No 8/12.

Date	5.5.83	1.6.83	15.7.83	8.9.83	7.6.84	25.3.85	16.9.87
Nbre de jours	112	138	182	236	504	795	1701
T°	15	16	22	18	11	13	16
C1	+0.9	+0.7	+1.9	+2.0	+2.2	+2.9	+3.5
C2	+0.7	+0.9	+1.5	+1.7	+2.0	+0.9	+2.9
C3	+0.7	+0.6	+2.0	+1.8	+2.0	+3.7	+4.1
C4	+1.0	+0.8	+2.2	+1.5	+1.7	+5.6	+7.5
C5	+1.0	+0.7	+2.1	+1.8	+1.9	+5.9	+5.1
C6	+1.0	+0.9	+2.8	+2.0	+1.9	+3.9	+5.0
C7	+1.1	+0.7	+2.2	+1.4	+2.1	+4.1	+4.4
C8	+1.4	+1.0	+2.6	+2.0	+2.5	+2.1	+3.7

Résultats des mesures clinométriques [mm/m]

3.3 Inclinomètres

Les mesures entreprises entre décembre 1982 et septembre 1987 sont représentées graphiquement aux annexes Nos 8/13 et 8/14; elles n'indiquent que de faibles déplacements de l'ordre de 2 à 4 mm et ne mettent pas en évidence de plan de glissement.

4. COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS OBTENUS

D'une manière générale, les valeurs de déplacement restent faibles.

Si l'on considère les résultats topographiques de 1982 et 1984 par rapport à la mesure initiale de 1975, il semble que l'on assiste à un très léger déplacement des murs vers l'aval; il faut toutefois relever que seuls deux points sur les 14 qui sont suivis accusent un déplacement supérieur à 10 mm, limite inférieure de précision du système de mesure. Les mesures au clinomètre indiquent un très léger basculement des murs vers l'aval de l'ordre du mm/m pour la période de 1982 à 1985. La direction de ces déplacements n'est toutefois pas toujours en concordance avec les résultats des mesures topographiques effectuées durant la même période.

Les mesures inclinométriques ne permettent pas non plus de confirmer ou d'infirmer les résultats des autres mesures.

5. PROPOSITION DE PROSPECTION ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

En complément des mesures réalisées avec les différents appareils, des observations ont permis de faire les constatations suivantes :

- L'eau sort non seulement des barbacanes mais également de certains joints, à l'origine étanches, à une hauteur variable sur le parement du mur, témoignant d'une mise en charge de l'eau derrière le soutènement, donc d'un mauvais fonctionnement de la chemise de drainage en béton poreux; elle forme des dépôts calcaires près des exutoires.
- L'examen des joints entre les placages semble indiquer des mouvements relatifs entre les différentes plaques (mastic disloqué et non-alignement des plaques adjacentes).

En plus de la poursuite des auscultations au moyen des appareils déjà en place avec une fréquence réduite (2 à 3 ans) afin de disposer de valeurs sur un période plus représentative, il serait utile de compléter le dispositif de la façon suivante :

- pose de piézomètres à l'amont des murs pour détecter le niveau de l'eau et calculer la pression supplémentaire qui en résulte
- mise en place d'appareils de type Joint meter Huggenberger sur les joints entre éléments de béton pour mesurer dans les trois directions leurs mouvements relatifs
- réalisation d'ancrages dont on puisse mesurer la tension ou mise en place d'extensomètres qui permettraient de suivre par rapport à un point fixe situé en profondeur les déplacements horizontaux éventuels des murs; en effet sur un total dépassant 700 unités, aucun ancrage n'est actuellement contrôlable.

6. CONCLUSIONS

Si les observations effectuées au moyen du dispositif de contrôle indiquent que le comportement des murs ancrés est satisfaisant à l'état actuel, les observations de surface semblent montrer toutefois que le système de drainage n'a plus son efficacité optimale et qu'une surveillance simple mais régulière s'avère nécessaire.

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICr1 FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 545'715 X 150'122 Z 638

DATE D'EXECUTION 10 novembre 1981 PROFONDEUR 41.85 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Ø 146	100%	1			Terre végétale			
					Marnes altérées bariolées tendres, broyées par le forage à sec			
					Grès fin massif très dur fracturé gris beige			
		2			Marnes altérées beige à olivâtre, grasses			
					Grès fin induré fracturé			
					Marnes bariolées altérées avec bancs de grès à la base			
Forage rotation à sec, carottier simple		3			Marnes tendres à mi-dures bariolées ± altérées gris bleuté à lie-de-vin niveaux parfois plus indurés généralement fracturés vers 4.30 et 5.10 m	Grès et marnes de la molasse		
		4						
		5						
		6			Marnes bariolées id. ci-dessus mi-dures Passages fracturés			
Ø 131		7						
				30°	Grès très fin induré, gris, fracture subverticale ouverte, tapissée de cristaux de calcite			
		8			Marnes tendres friables bleu à lie-de-vin			
		9		75°	Grès très fin, dur, massif, fracturé surfaces des fractures oxydées			
		10		25°	Marnes gréseuses et grès marneux durs compactes, qq. passes moins indurés (9.50 et 9.80 m)			

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICr1 FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 545'715 X 150'122 Z 638

DATE D'EXECUTION 10 novembre 1981 PROFONDEUR 41.85 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Ø131		11		45°	Marnes gréseuses et grès marneux durs, massifs, qq. passages moins durs			
Forage rotation à sec, carottier simple	100%	12			Marnes mi-dures à tendres feuilletées gris-bleu, avec un niveau de marnes argileuses à la base			
		13			Marnes mi-dures gris bleu à taches brunâtre, tendres à la base			
		14			Marnes id., plus dures Ancrage	Grès et marnes de la molasse		
		15						
		16			Marnes mi-dures, gris bleu, à taches brunâtre , très fracturées (15.80 à 16.8 m)			
Ø 116		17		80°-45°	Ensemble de grès très fins et marnes gréseuses beige à gris beige, fracturés. Fractures surfaces oxydées			
		18		45° 50°	Marnes tendres gris bleu à taches brunâtres			
		19			Marnes, id. dures; fracture verticale oxydée			
		20		90°	Grès fin à moyen gris beige fracture verticale oxydée Marne dure gris bleu			

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICr1 FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 545'715 X 150'122 Z 638

DATE D'EXECUTION 10 novembre 1981 PROFONDEUR 41.85 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, double carottier ϕ 101	100%	21			Marne tendre gris bleu	Grès et marnes de la molasse		
					Interlit argileux			
		22			Marne mi-dure gris bleu à taches brunâtres			
					Marne idem dure; interlit argileux à 22.95 m			
		23						
		24			Ensemble de marnes gréseuses et grès fins gris beige et rougâtre (23.20 à 24.00)			
				80°				
				50°	Fractures à surfaces oxydées			
				45°				
				45°				
		25						
		26			Marnes bariolées gris bleu et lie-de-vin, mi-dure; à tendres Interlit argileux à 27.50 et 27.98 m			
		27						
				60°				
		28						
					Marnes gris bleu; passées de grès très fin gris, fracturé, oxydation des surfaces de fissures			
		29						
				80°				
					Marnes bariolées lie-de-vin mi-dures Interlit argileux à 29.65 m			
		30						

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICr1 FEUILLE N° 4

COORDONNEES Y 545'715 X 150'122 Z 638

DATE D'EXECUTION 10 novembre 1981 PROFONDEUR 41.85 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø 101	100%	31 32 33 34 35 36 37 38 39 40		45° 50°	Grès fin à moyen gris beige, massif, qq. passées marnes argileuses Marnes lie-de-vin mi-dures Grès fin à moyen gris, stratifications obliques Marnes dures gris à lie-de-vin Marnes argileuses gris brunâtre altérées Marnes gris bleu à lie-de-vin, mi-dures à dures, massives, très peu fracturées, par places légèrement gréseuses	Grès et marnes de la molasse		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICr1 FEUILLE N° 5

COORDONNEES Y 545'715 X 150'122 Z 638

DATE D'EXECUTION 10 novembre 1981 PROFONDEUR 41.85 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double Ø101	100 %	41			Marnes idem			
		42						

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICr2 FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 545'711 X 150'142 Z 643

DATE D'EXECUTION 26 novembre 1981 PROFONDEUR 45.10

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ϕ 131 ϕ 146	100%	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10			Limon argileux, sableux, graveleux, brun terreux vers le haut Limon argileux, finement sableux avec gravier, beige Limon argileux, gris foncé, noirâtre avec gravillons et graviers; présence de matériaux organiques Graviers fins, sableux, limoneux, gris foncé Limon argileux, gris foncé avec du gravier Limon argileux, gris foncé, stratifié Limon argileux, gris foncé, avec gravillons isolés Limon argileux, gris foncé Limon argileux, gris foncé, avec qq. gravillons Bloc	Moraine argilo-sableuse et produits d'altération de la molasse		
					Limon argileux, provenant de l'altération de marnes et marno-grès rougeâtre Grès et marno-grès, gris beige à gris bleu, fracturé, récupéré en débris (forage à sec) Marnes tendres gris bleu 25° Grès et grès marneux durs, fracturés jusqu'à 6.65 m, puis assez massifs. 60° Quelques fractures obliques à surfaces oxydées 30° 65° Marnes tendres feuilletées gris bleu 70° Grès compact gris beige, ± fracturé 90° fractures à surfaces oxydées vers le bas passage à des grès marneux Marno-grès massifs, gris beige	Marnes et grès de la molasse		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICr2 FEUILLE N° 2

COORDONNEES Y 545'711 X 150'142 Z 643

DATE D'EXECUTION 26 novembre 1981 PROFONDEUR 45.10

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø 131 ø 116	100%	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20		45° 90° 90° 25° 90° 60°	Limon argileux avec gravillons, gris Marnes tendres à mi-dures ± gréseuses, grises Marno-grès durs gris-bleu à verdâtre Grès marneux et marno-grès durs à très durs massifs, gris, avec fracture à 13.20 m Débris marnes tendres altérés pris dans une matrice limono-argileuse Grès marneux dur, gris, massif Débris d'ancrage Marnes tendres à mi-dures, gris bleu Grès fin gris, fissuré, surface oxydée Marnes gréseuses dures puis tendres dès 15.50 m, massives Grès fin à moyen, dur, fracturé, surfaces fissurées oxydées. Passages grès marneux à la base Marnes tendres gris bleu, fragmentées Marnes feuilletées dures, gris verdâtre Marnes dures, gris verdâtre, massives Marnes id., disloquées	Marnes et grès de la molasse		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICr2 FEUILLE N° 3

COORDONNEES Y 545'711 X 150'142 Z 643

DATE D'EXECUTION 26 novembre 1981 PROFONDEUR 45.10

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Ø 116 / Forage rotation à l'eau carottier double Ø 101	100%	21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30		25°, 70°, 80°, 25°, 70°, 25°, 30°, 25°	Marnes et marno-grès massifs, rougeâtres à lie-de-vin, bariolées, dures avec un fossile (gastéropode) Id., récupérées en débris Idem, disloquées ver le haut, puis massives Marnes altérées, désagrégées en limon argileux, tendres, gris beige Marnes tendres, gris bleu à taches lie-de-vin Grès marneux, gris, massif Marnes mi-dures Grès fin gris, fracture subverticale oxydée Ensemble de marnes gréseuses à passées de grès fin, gris bleu fractures obliques à surfaces oxydées (25.6 m et 27.4 m) Marnes tendres lie-de-vin et grises	Grès et marnes de la molasse		

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICr2 FEUILLE N° 4

COORDONNEES Y 545'711 X 150'142 Z 643

DATE D'EXECUTION 26 novembre 1981 PROFONDEUR 45.10

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau, carottier double ø 101	100%	31			Marnes dures à passages plus tendres, grises à taches lie-de-vin, massives, qq. fissures obliques	Grès et marnes de la molasse		
		32						
		33						
		34		45°	Grès moyen, gris, massif			
		35			Marno-grès gris, à lie-de-vin, massif			
				75°	Grès moyen à fin, gris, massif			
		36		90°				
		37			Marnes dures, légèrement gréseuses, massives, gris et lie-de-vin, par places plus tendres (38.7 - 39.2 et 39.9 - 40.4)			
		36						
		39						
		40						

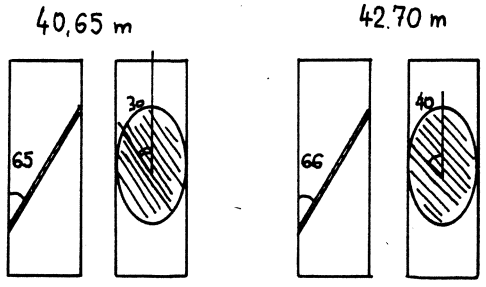
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° ICr2 FEUILLE N° 5

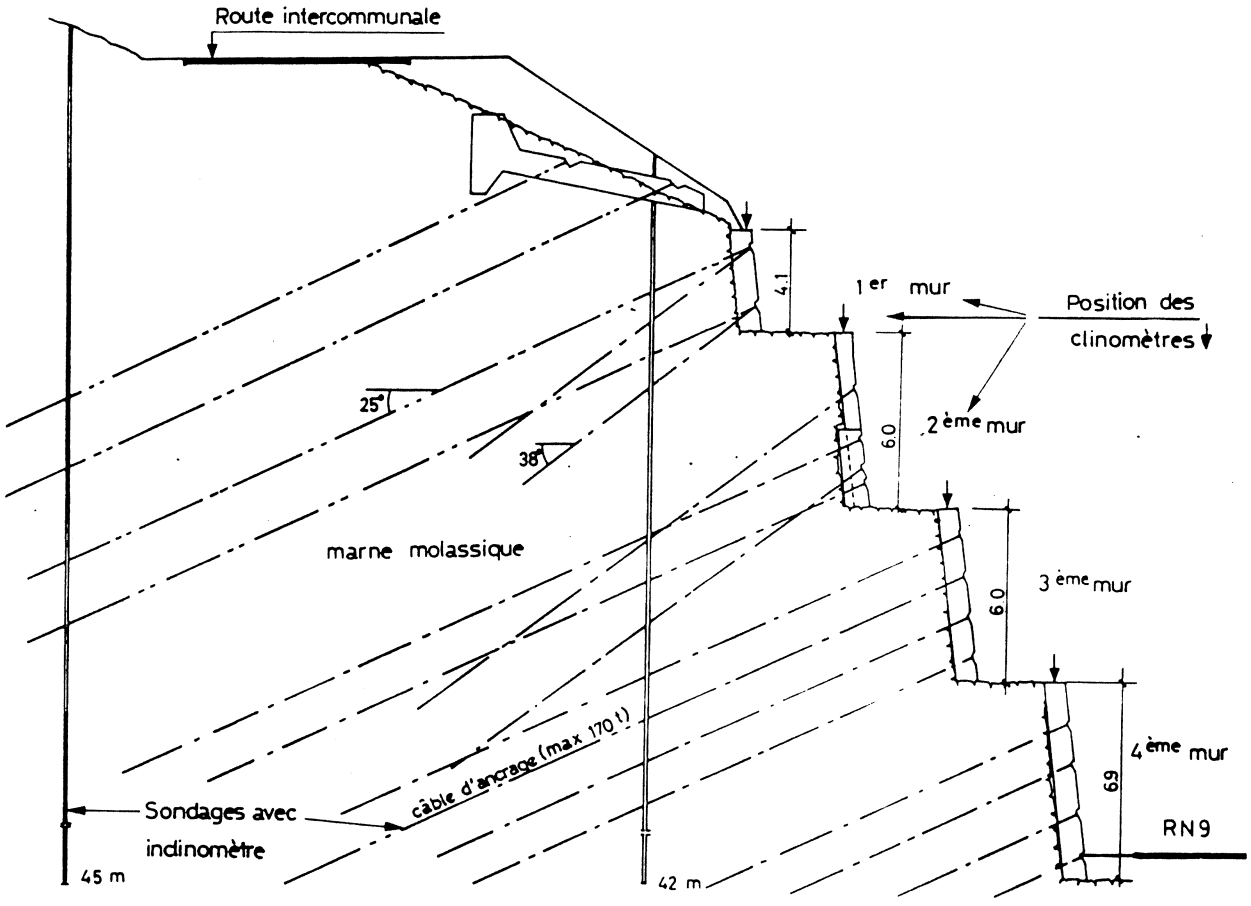
COORDONNEES Y 545'711 X 150'142 Z 643

DATE D'EXECUTION 26 novembre 1981 PROFONDEUR 45.10

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à l'eau carottier simple ϕ101	100%				A 40.65 fracture ouverte cicatrisée par calcite surfaces striées obliques (30°) par rapport à l'axe de plus grande pente (30° / 60°)	Grès et marnes de la molasse		
	90%	41			Marnes très tendres, bleues, mauvaise récupération			
	0%							
	20%	42						
	100%	43			Grès fins et marno-grès avec passage de grès moyens de 43.60 à 44.0 m (40° / 65°)			
		44						
		45						



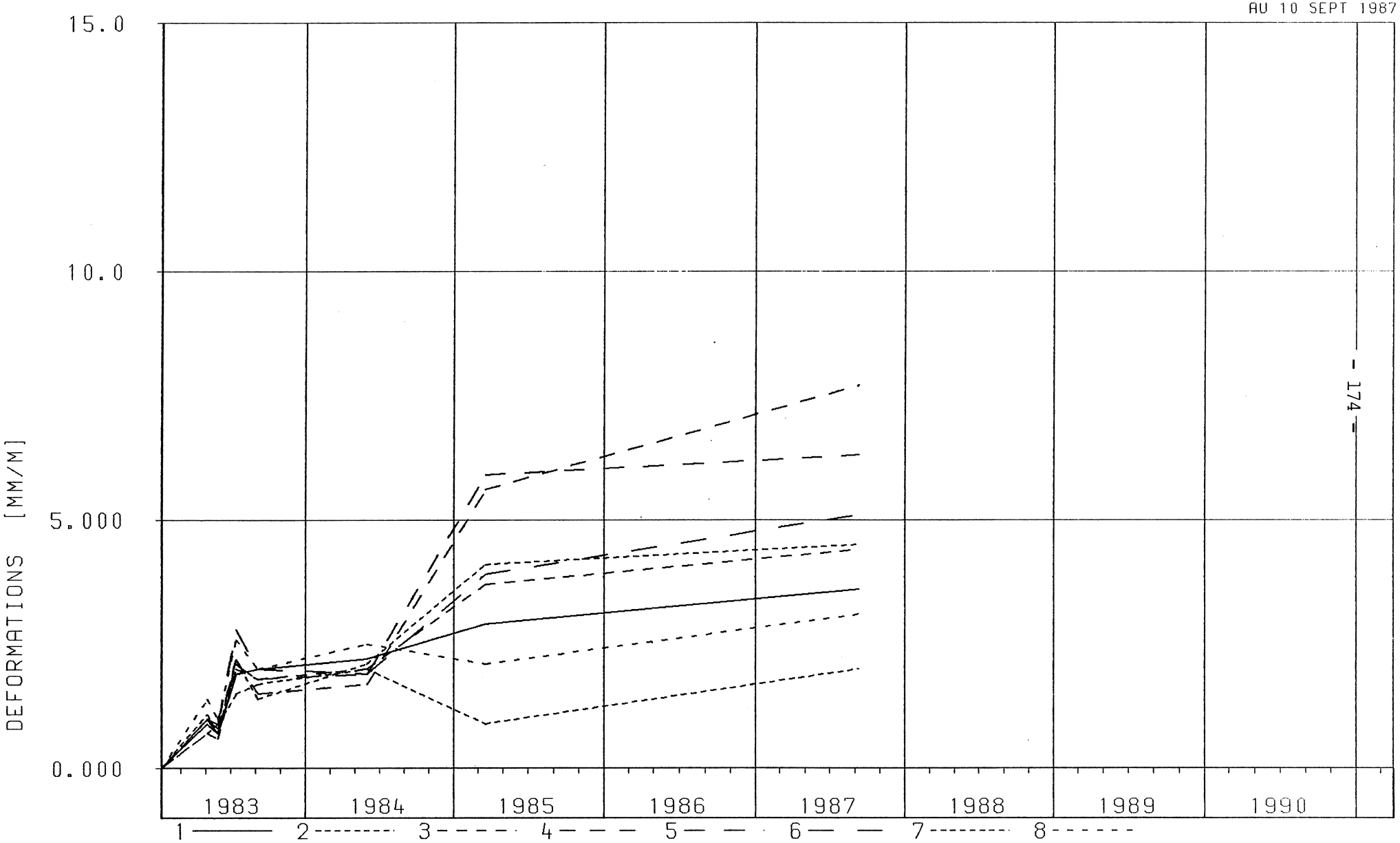
DISPOSITIF DE CONTROLE



EPFL - LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS

MUR DE LA CRIBLETTE

MESURES DU 13 JAN. 1983
AU 10 SEPT 1987



Annexe 8/12

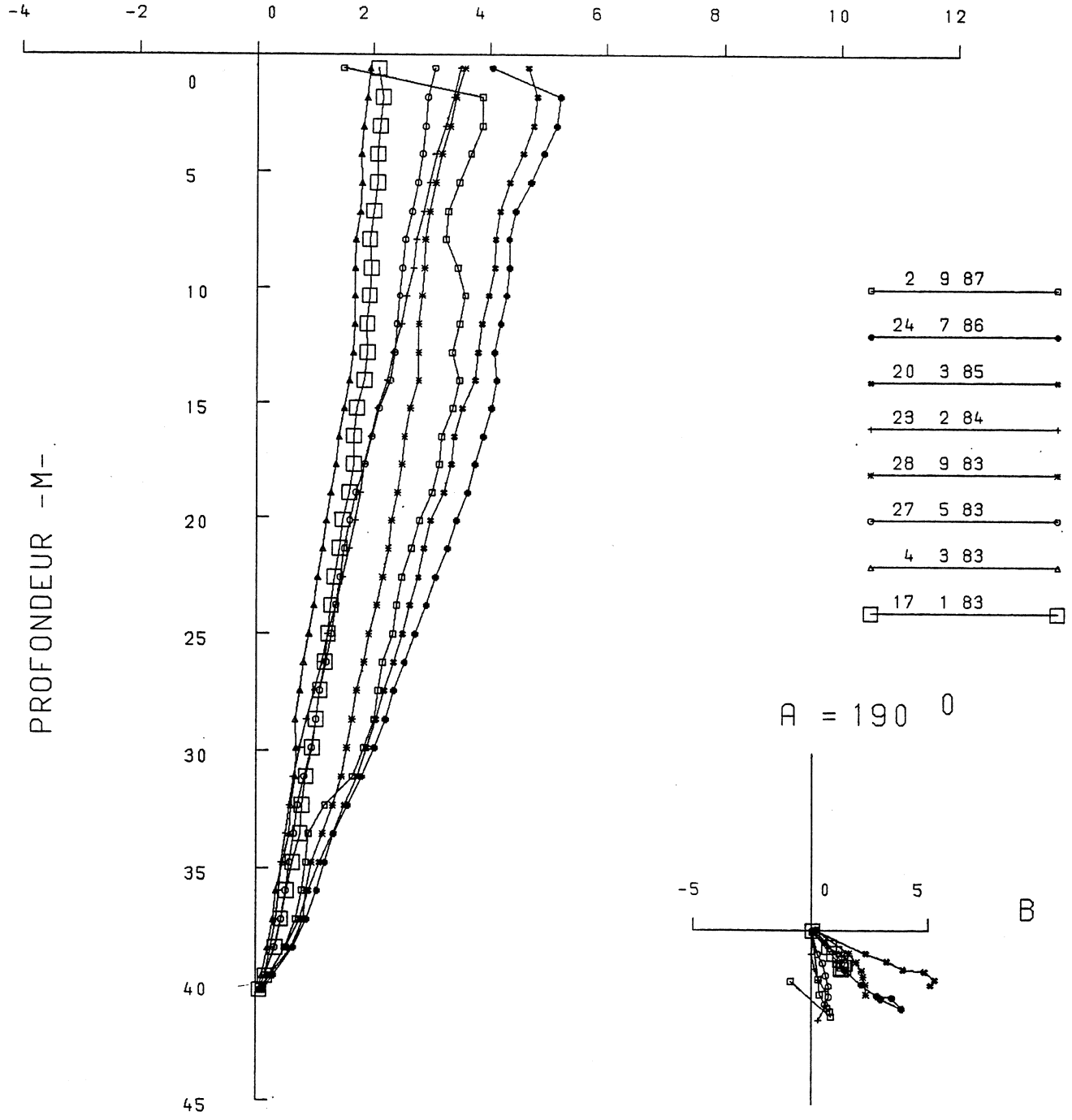
18-SEP-1987

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO ICR1A3

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 6 12 82

DEPLACEMENTS (MM)



SELON AZIMUT DONNE
AZ= 340 DEGRES

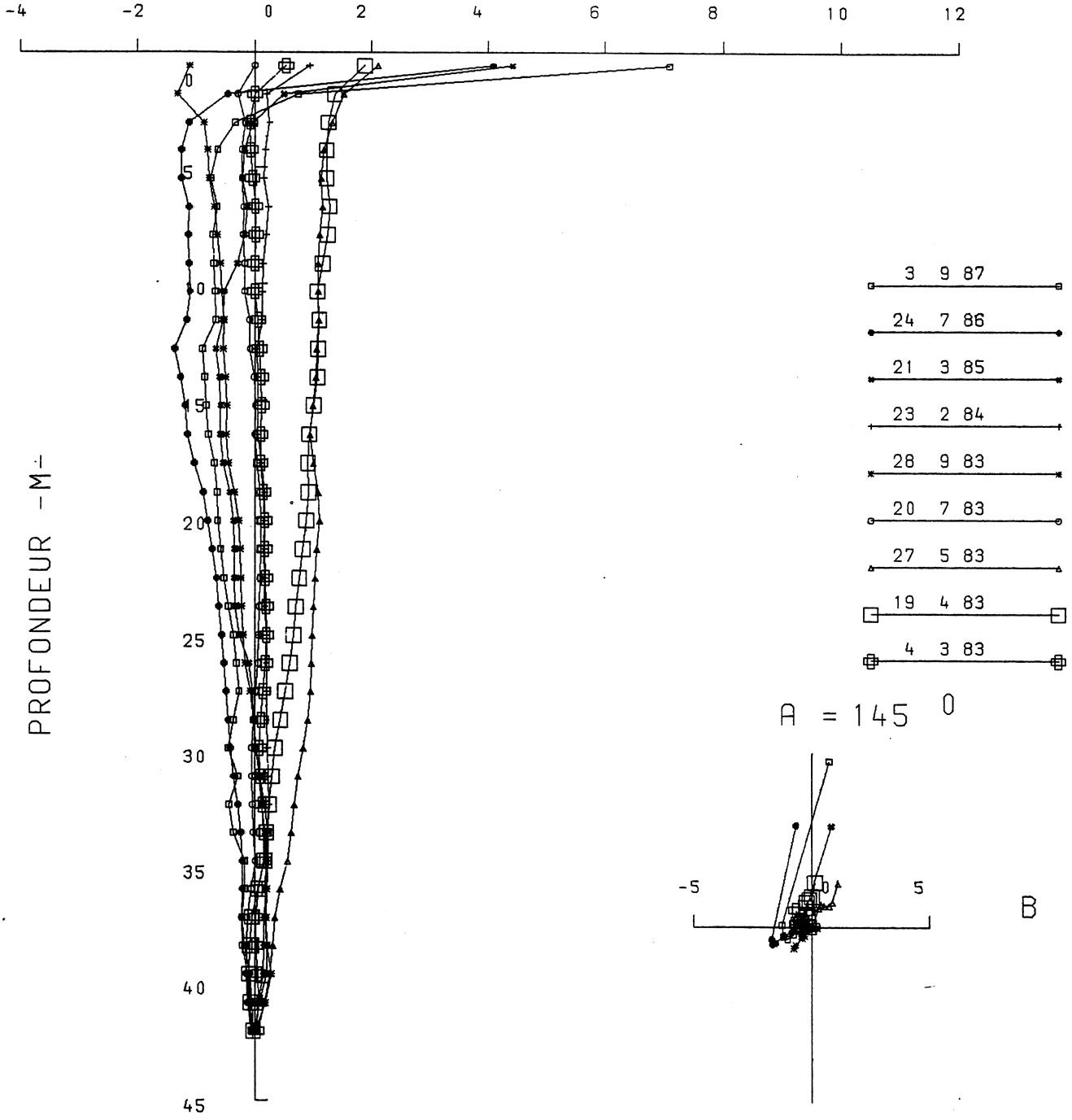
Annexe 8/13

LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

EXPLOITATION MESURES SUR TUBE NO ICR2A3

UTILISANT LES MESURES INITIALES DU 6 12 82

DEPLACEMENTS (MM)



SELON AZIMUT DONNE
AZ= 160 DEGRES

3.9 LA TRANCHEE DE CONVERNEY

1. GENERALITES

1.1 Description de l'ouvrage

Route nationale N9 Section 907 km : 11.870-12.080

Passage en tranchée, à la sortie Est des tunnels de Belmont, à travers le glissement de Converney.

Auteur du projet	Bureau de contruction des autoroutes
Dossier géologique	A. Bersier, Lausanne
Dossier géotechnique	Schopfer + Karakas, Lausanne
Construction	1971-1973
Longueur totale	210 m

Au lieu dit Converney, l'autoroute entaille le versant par une tranchée profonde de 12 m. En cet endroit les sols de couverture de la molasse, épais de 35 à 50 m, sont en équilibre instable. Ils participent en effet au grand glissement ancien qui s'étend depuis les hauts de Belmont jusqu'au Léman. Pour réduire les risques de mise en mouvement des sols formant la plate-forme et le talus amont de l'autoroute, d'importants travaux de drainage, décrits ci-après, furent entrepris.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

La molasse de Belmont constitue le soubassement rocheux. Elle est composée d'une succession de minces bancs de marnes, de marno-grès et de grès. On y trouve également quelques couches de charbon et de calcaire fin lacustre. Le pendage de cette formation est de 13 à 15° vers le Sud-Est. Les bancs sont débités en grands panneaux par de nombreuses failles.

Les sols de couverture sont très hétérogènes. Ils sont formés par une matrice limono-argileuse enrobant des paquets de moraine de fond et des blocs, plus ou moins décomposés, de grès et de marne. Ce mélange est dû aux glissements qui ont suivi le retrait du glacier Rhodanien.

Les plaques molassiques glissées et décomposées se sont mélangées aux moraines qui les recouvraient.

Les caractéristiques géotechniques sont, en conséquence, très variables. Les études ont montré que l'on peut admettre, pour l'ensemble des sols, les valeurs moyennes $\phi_u = 25^o$, $c_u = 10\ kN \cdot m^{-2}$.

La nappe phréatique est hétérogène. L'eau s'infiltre dans les fissures de la masse plastique et de la molasse. Les précipitations influencent rapidement le niveau de l'eau, ce qui est caractéristique d'une nappe fissurale.

1.3 Problèmes d'instabilité

La stabilité de la tranchée de l'autoroute dépend essentiellement de la résistance au cisaillement des sols et des conditions hydrologiques.

L'effet de l'excavation sur l'équilibre de l'ensemble du versant est faible. Le risque de glissement sur le plafond molassique n'est pas modifié par la présence de l'autoroute.

Par contre, la tranchée peut provoquer des mouvements le long de surfaces de glissement se développant au sein des sols meubles. La présence de telles surfaces et de niches d'arrachement anciennes indique que l'équilibre est précaire. Il peut être compromis par de fortes précipitations et les infiltrations consécutives dans les fissures de la masse meuble. L'eau, par les sous-pressions, réduit le frottement sur les plans de rupture potentiels. Elle est le principal agent déstabilisant.

L'accroissement de la sécurité du coteau vis-à-vis du glissement a été obtenu par un réseau de drainage.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

2.1 Piézomètres

Nous disposons sur le site de 18 piézomètres posés en 1971 et 1972. Leur situation est reportée sur le dessin No AR 907-123 et sur l'annexe 9/7. Le tableau ci-dessous donne leur profondeur et la longueur du tube crépiné.

No piézomètre	longueur totale [m]	longueur crépinée [m]
Lu 98	16	10
Lu 99	13	2
Lu 202A	9	6
Lu 202B	15	12
Lu 203	9	6
Lu 204A	15	12
Lu 204B	9	6
Lu 205	15	12
Lu 206	15	12
Lu 207	15	12
Lu 208	10	6
Lu 209B	9	6
Lu 209C	25	10
Lu 210A	9	6
Lu 210B	15	12
Lu 210C	25	10
Lu 211	25	10
Lu 212	25	10

2.2 Drainage

Le réseau de drainage comprend :

- un collecteur drainant, longeant le sommet du talus amont à 40 m de l'axe de l'autoroute, posé à une profondeur de 7 m

- un collecteur drainant central, 4 m sous l'axe de l'autoroute, complété par des forages verticaux de décharge de 15 m de profondeur, écartés de 3 m;
- une série de 29 forages drainants parallèles de 44 m de long, descendant avec une pente de 30 % depuis le bord aval de l'autoroute, et recoupant le collecteur drainant central;
- une série de 32 forages drainants parallèles de 27 m de long, montant avec une pente de 6% depuis le bord amont de l'autoroute, et dont les débits peuvent être mesurés;
- une série de 10 forages drainants situés au début du chemin des A.F. 1901.

Tous ces drainages sont reportés sur un profil en travers (annexe 9/10).

2.3 Mesures topographiques

Le système de contrôle géométrique existant est composé :

- D'un réseau triangulé sur piliers. Ce réseau a été mis en place en 1971 pour la construction du tunnel de Belmont et les divers contrôles de stabilité pendant le percement de ce dernier.

- De deux bases qui ont été implantées de part et d'autre de la tranchée de Converney, à hauteur des piliers 2 et 8. Il s'agit d'un alignement de bornes (5 bornes sur la base 2 et 9 sur la base 8) bétonnées et surmontées d'une cible. En stationnant sur le pilier (centrage forcé) et en pointant le repère de référence (cheville sur bâtiment hors de la zone concernée), on mesure les écarts latéraux par rapport à la mesure initiale.

- De nombreux repères de nivellement qui ont été placés dans les villas environnantes, sur la berme centrale et sur les voies d'arrêt de l'AR, ainsi que sur un puits (point No 773.3) contruit dès le début du chantier de l'AR.

Tout ce système est représenté sur le plan AR 907-092.

3. RESULTATS DES MESURES

3.1 Contrôle du niveau de la nappe

En continuation avec les mesures commencées en octobre 1971, les niveaux de la nappe ont été relevés chaque mois dans les 18 tubes piézométriques dont nous disposons sur le site. Dans le cadre de notre mandat de recherche, ces mesures ont été effectuées entre mars 1982 et décembre 1983.

Il est à noter que dès le 6 juin 1983, un limnigraphe a été installé sur le piézomètre Lu 205, afin d'enregistrer en permanence les variations du niveau de la nappe.

3.2 Contrôle des débits des drainages

Relevons tout d'abord que le nettoyage des têtes de drains a débuté le 7 juillet 1982. Les premières mesures de débit ont également été faites à cette date, au droit des drains situés à l'amont de la route des améliorations foncières. Nous disposons pour cette série de drains de 20 mesures réalisées jusqu'à fin 1983.

Quant aux drains situés au bord amont de l'autoroute, les premières mesures ont été réalisées le 2 mars 1983. Nous disposons de 17 mesures exécutées jusqu'à fin 1983. Un appareil servant à mesurer le débit en permanence a été mis en place le 20 mai 1983; le gel nous a obligés à le retirer le 12 décembre 1983.

Des mesures de débit ont été effectuées à l'axe de l'autoroute dans les drains descendants. Cependant, elles n'ont pas permis d'observer des variations significatives. En effet, tous les drains étaient secs ou suintants. Il a été décidé de les abandonner, au moins momentanément.

En outre, l'idée de mesurer dans les 2 collecteurs drainants fut laissée de côté, lorsque l'on s'apperçut qu'ils n'étaient pas exclusivement utilisés pour le drainage de cette région.

3.3 Pluviométrie

Chaque année d'avril à novembre, le BAR met en fonction un pluviographe sur le site même de Converney. Il existe en outre plusieurs stations pluviométriques dans la région : Tour de Gourze, Riex, Pully et Lausanne. En première analyse, il semble que ce soit à Pully où l'on observe les phénomènes pluvieux les plus semblables à ceux remarqués à Converney. Nous utiliserons donc les informations données par Pully lorsqu'il nous en manquera sur place.

Sur le tableau ci-après sont reportés :

- les hauteurs des précipitations mensuelles relevées à la station de Pully pour les années 1977 à 1983;
- leurs totaux, c'est-à-dire les hauteurs des précipitations annuelles:
- les indices d'humidités calclués pour ces années : l'indice d'humidité i est égal au rapport des précipitations annuelles par la moyenne de ces mêmes précipitations annuelles, mais calculées sur une grande période; pour la période s'étendant entre 1901 et 1960, cette moyenne a été de 1'111 mm à Pully;
- la moyenne mensuelle des précipitations est la hauteur annuelle des précipitations divisée par 12; pour la moyenne des précipitations annuelles, cette valeur de 1'111 mm/12 = 92,6 mm.

Précipitations [mm]							
mois \ année	1977	1978	1979	1980	1981	1892	1983
Janvier	132	128	185	146	85	93	44
Février	170	115	120	74	39	24	24
Mars	75	131	125	111	142	91	93
Avril	188	84	61	18	11	13	159
Mai	98	114	76	86	182	59	238
Juin	122	158	81	176	66	198	42
Juillet	160	80	41	158	92	126	17
Août	93	179	135	99	24	129	70
Septembre	16	65	40	61	134	89	140
Octobre	99	35	72	165	201	157	68
Novembre	76	10	96	60	41	81	93
Décembre	82	192	161	57	175	160	71
Totaux [mm]	1311	1291	1193	1211	1192	1220	1089
Indice d'humidité	1.18	1.16	1.07	1.09	1.07	1.10	0.98
Moyenne mensuelle [mm]	109.3	107.6	99.4	100.9	99.3	101.7	90.8

3.4 Mesures topographiques

Le nivellement et le contrôle des déplacements de tous les repères disponibles sur le site ont été régulièrement effectués par le BAR de 1971 à 1983.

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

4.1 Evolution du niveau de la nappe

4.1.1 Généralités

Sur les annexes 9/1 à 6 sont reportées les variations du niveau de la nappe sur la base des différentes mesures effectuées de 1977 à 1983. La pluviosité mensuelle de Pully est aussi représentée sur ces mêmes dessins pour cette période, ainsi que les moyennes mensuelles pour chaque année.

Le premier point à remarquer quant aux variations du niveau de la nappe est la différence de densité des mesures annuelles puisque l'on passe de 2 (1979/80) à 17 (1983). Il est bien clair qu'avec de telles différences, toute comparaison d'une année à l'autre n'est plus possible. Cependant, en regardant de près cette collection de mesures, on se rend compte que l'année 1983 apparaît comme une année "modèle". En effet, elle présente un maxima (en mai) et un minima (en novembre), ces extrêmes étant tout à fait concordants avec ceux observés les années précédentes.

L'annexe 9/7 donne la carte des isopièzes correspondant à ces valeurs maximum et minimum. Pour le réaliser, il a fallu éliminer les piézomètres ayant des valeurs "parasites", soit :

- le Lu 202A : il présente de plus grandes variations que le Lu 202B et subit peut-être des influences extérieures
- le Lu 204B : il est très semblable au Lu 204A, mais est peut-être un peu moins sensible que ce dernier
- les Lu 209C, 210C et 211 : ils mesurent des "nappes" profondes
- le Lu 210A : il ne semble pas suivre l'évolution "normale" de la nappe.

De la carte des isopièzes, on peut voir une nappe à surface piézométrique très régulière lors du minimum, qui s'écoule du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Cet écoulement est le même lors du maximum, mais la

surface piézométrique est perturbée au droit des piézomètres Lu 204A et 207. Ces désordres peuvent être dus à des phénomènes très ponctuels. A ce titre, il est intéressant de relever l'observation directe d'un de ces phénomènes possibles :

Le 29 février 1984, nous observions sur le piézomètre Lu 205, les niveaux suivants :

à 13h30 - 625.70
à 13h40 - 626.23
à 14h05 - 626.66
à 16h00 - 626.38

Cette remontée phénoménale de la "nappe" de près de 1 mètre en 35 minutes peut s'expliquer de la façon suivante : des résidus neigeux sur le talus de l'autoroute, exposés au grand soleil de ce jour-là, ont fondu; l'eau s'est infiltrée dans des fissures au droit du piézomètre provoquant dans ce dernier la remontée que l'on sait.

Il se peut que d'autres piézomètres subissent des influences semblables à celles décrites plus haut, cependant, ces manifestations étant très ponctuelles, ces piézomètres sont d'une façon générale encore parfaitement utilisables.

A titre de comparaison, l'annexe No 9/8 indique les isopièzes que l'on pouvait observer lors du minimum (octobre) et du maximum (décembre) de l'année 1972. On remarque que l'écoulement se fait régulièrement du Nord-Est vers le Sud-Ouest.

Des coupes transversales sont reportées sur les annexes No 9/9 à 11. On y observe ce que M. B. GRAF (1974) avait vu, à savoir l'efficacité du système de drainage.

4.1.2 Niveaux maximum et minimum

Pendant l'année 1983, les niveaux maximum ont été atteints en mai, la nappe présentant d'une façon générale une remontée dès le début janvier et ceci en parfaite concordance avec la pluviométrie; à ce

sujet, il est bon de rappeler les 159 mm de pluie tombés en avril et surtout les 238 mm tombés en mai.

A partir de ce mois, la nappe baisse plus ou moins régulièrement jusqu'en novembre où elle arrive à son minimum. Enfin, une brusque remontée se fait en décembre.

La différence entre le maximum et le minumum est la plus grande à l'amont où elle atteint près de 5 m, alors qu'à l'aval celle-ci n'est que de 2 m.

En 1972, ces différences étaient égales à 4 m, respectivement 1 m.

Afin de mieux comprendre la relation précipitations/mouvements de la nappe, un limnigraphe a été installé sur le piézomètre Lu 205, dès le 6 juin 1983.

Dès ce jour, et jusqu'aux premiers jours de décembre, cet appareil a bien fonctionné, puis le froid ayant fait son apparition, des problèmes de gel sont venus se greffer à d'autres dus aux trop brutales remontées. Ces dernières nous posant des questions insolubles du point de vue matériel, les tubes prézométriques utilisés étant d'un trop faible diamètre par rapport aux instruments de mesure mécaniques choisis (choix pratiquement imposé vu l'éloignement de toute source d'énergie électrique).

Nous aurions souhaité pouvoir connaître, entre autre :

- la relation précipitations/remontée de la nappe
- l'intensité de pluie déterminant une remontée
- la vitesse de la remontée. Pour cette dernière question, il est à noter que nous avons observé au début 1984 des remontées de 0,80 m en 14 h et 1.50 m en 48 h, mais pour les raisons évoquées plus haut, ces valeurs sont difficilement corrélables avec les précipitations.

Cependant pendant les 6 mois durant lesquels le limnigraphe a bien fonctionné, des renseignements intéressants ont été récoltés. On peut

remarquer que l'altitude de la nappe baisse continuellement de juin à fin novembre et ceci malgré les épisodes pluvieux qu'on observe pendant ce laps de temps. Ce n'est que vers la fin novembre - début décembre, après 6 jours consécutifs de pluie, que la nappe présente une tendance à la remontée.

4.2 Evolution des débits des drainages

Pour quelques drains, les débits mesurés en 1983 ont été reportés sur les annexes No 9/12 et 13. Sur ces différents documents, nous remarquons le grand parallélisme de débit sur tous les drainages. Afin de mieux cerner le rapport précipitations/débit des drains, un appareil a enregistré les débits en permanence du 20 mai au 12 décembre 1983, alors qu'un pluviographe du BAR était également en fonction sur place.

Les mesures en continu permettent de montrer que le drain a en permanence évacué de l'eau. En période sèche, le débit était d'environ 0.2 l/min. Il doit certainement s'agir d'une source. Malgré ce "bruit de fond", ce drain a toujours très bien fonctionné.

Lors d'événements pluvieux très rapprochés (comme en mai 1983), le temps de réponse entre le début d'une précipitation et l'augmentation de débit observé sur le drain est de 2 h; alors qu'après un intervalle de temps plus ou moins long sans précipitations, lors d'un événement pluvieux, soit ce dernier est trop faible et rien ne se passe au niveau du drain (l'eau est alors entièrement évapotranspirée par la végétation, évacuée par écoulement hypodermique et retenue par le sol) soit il est suffisamment important et alors ce temps de réponse est de environ 8 h (en septembre, octobre et novembre).

Ces temps de réponse, somme toute assez courts, sont énigmatiques dans ces terrains réputés peu perméables. Si seul l'un ou l'autre de ces drains réagissait comme l'ensemble réagit, on pourrait supposer une perméabilité de fissures, mais comme tous les drains ont l'air de fonctionner de la même façon, cette explication ne convient pas.

Le drain semble évacuer totalement l'eau qui s'infiltre lors d'événements pluvieux pas trop intenses ni trop longs, ce qui évite, du moins en partie, la réalimentation de la nappe et le danger potentiel de sous-pression.

4.3 Evolution des mouvements du terrain

Les déplacements horizontaux et verticaux entre 1971 et 1982 sont reportés sur les annexes No 9/14 et 15. On y observe un léger déplacement horizontal (moins de 1.2 cm) en direction de la tranchée commun aux deux bases, alors que les déplacements verticaux montrent un enfoncement compris entre 0.7 et 2.4 cm pour la base 8, ainsi que pour les points A et 2 de la base 2; le reste des points situés sur cette dernière présentant une remontée de 0.4 à 1.1 cm.

Quant aux clous implantés sur les bandes d'arrêt (No 80 à 85), ils indiquent des mouvements appareils compris entre + 0.5 et -4.4 cm, la remontée s'effectuant côté tunnel et l'abaissement côté pont.

5. PROPOSITIONS DE PROSPECTIONS ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

Les types de mesure adoptés sur le site peuvent être considéré comme parfaitement valables et justifiables. Elles sont suffisantes pour le contrôle du bon comportement de l'ouvrage.

Aucune prospection complémentaire n'est nécessaire.

Pour les piézomètres, la fréquence des mesures devrait être d'environ six par année, pour vérifier que l'ordre de grandeur des fluctuations de la nappe reste constant et que les drainages fonctionnent toujours correctement.

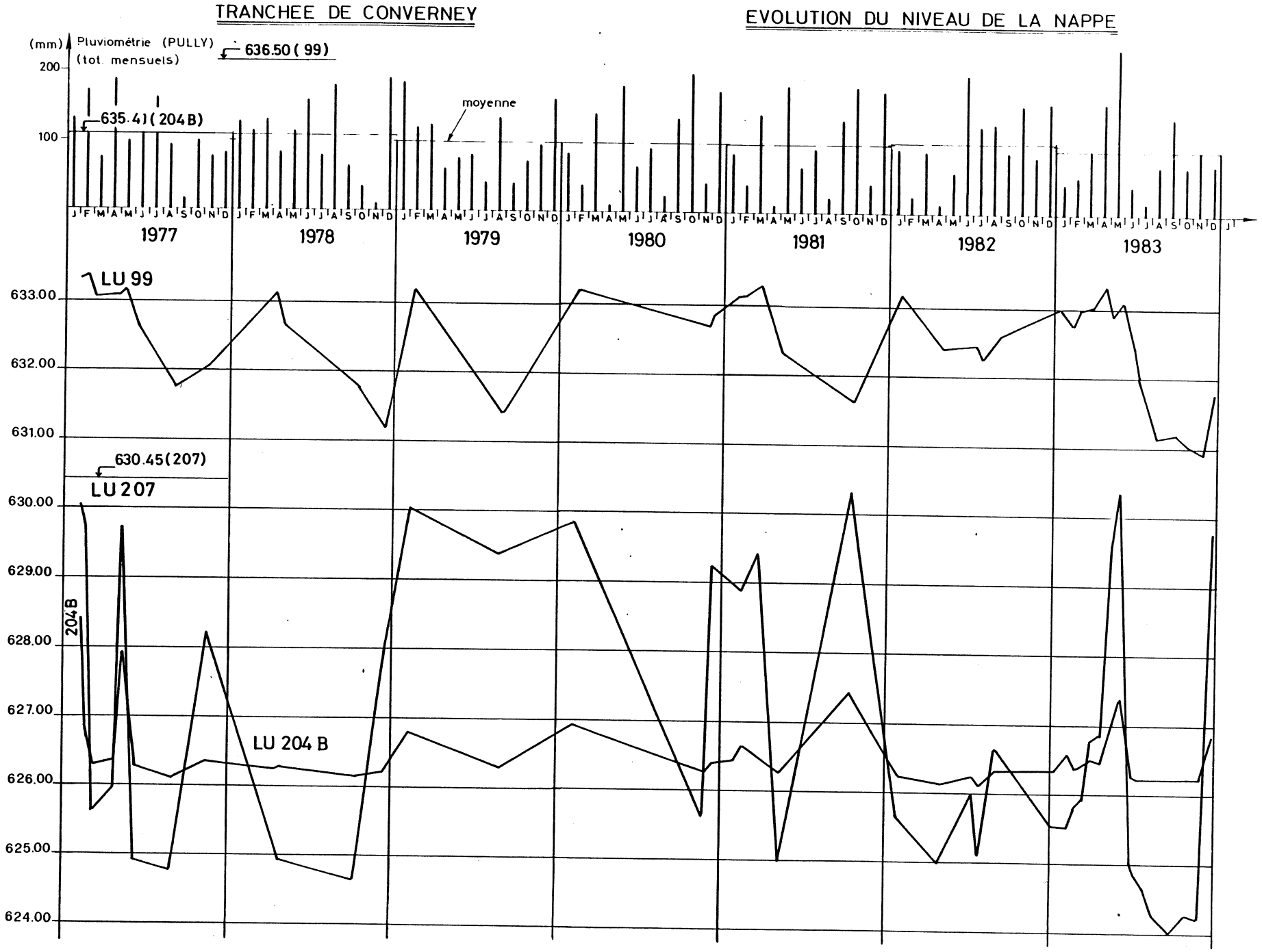
Une inspection annuelle de la tête des drains permettra de contrôler que ceux-ci ne sont pas bouchés.

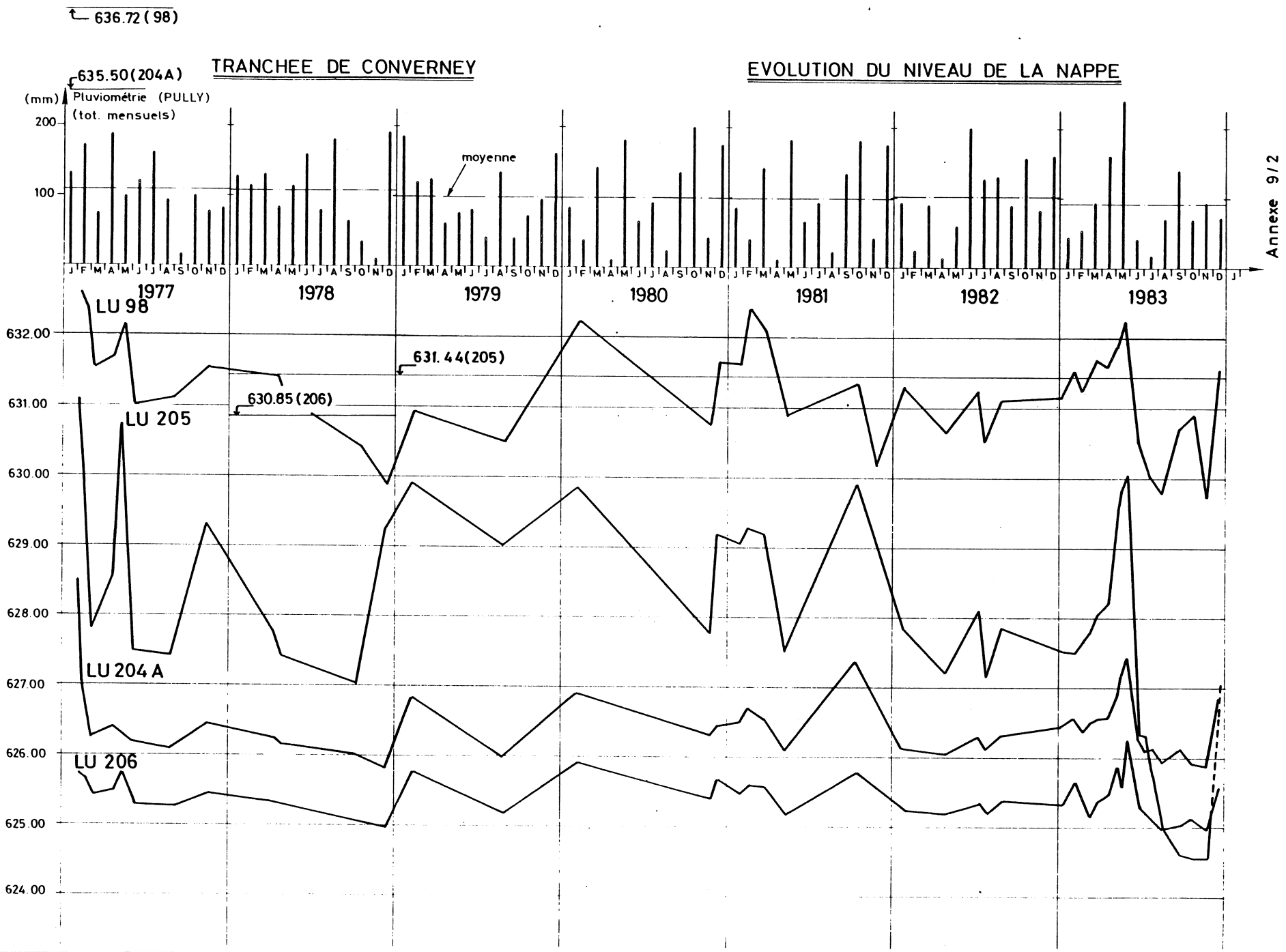
Les mesures topographiques devraient être faites au maximum une fois par année pour autant qu'une anomalie ne soit détectée dans le niveau de la nappe.

6. CONCLUSIONS

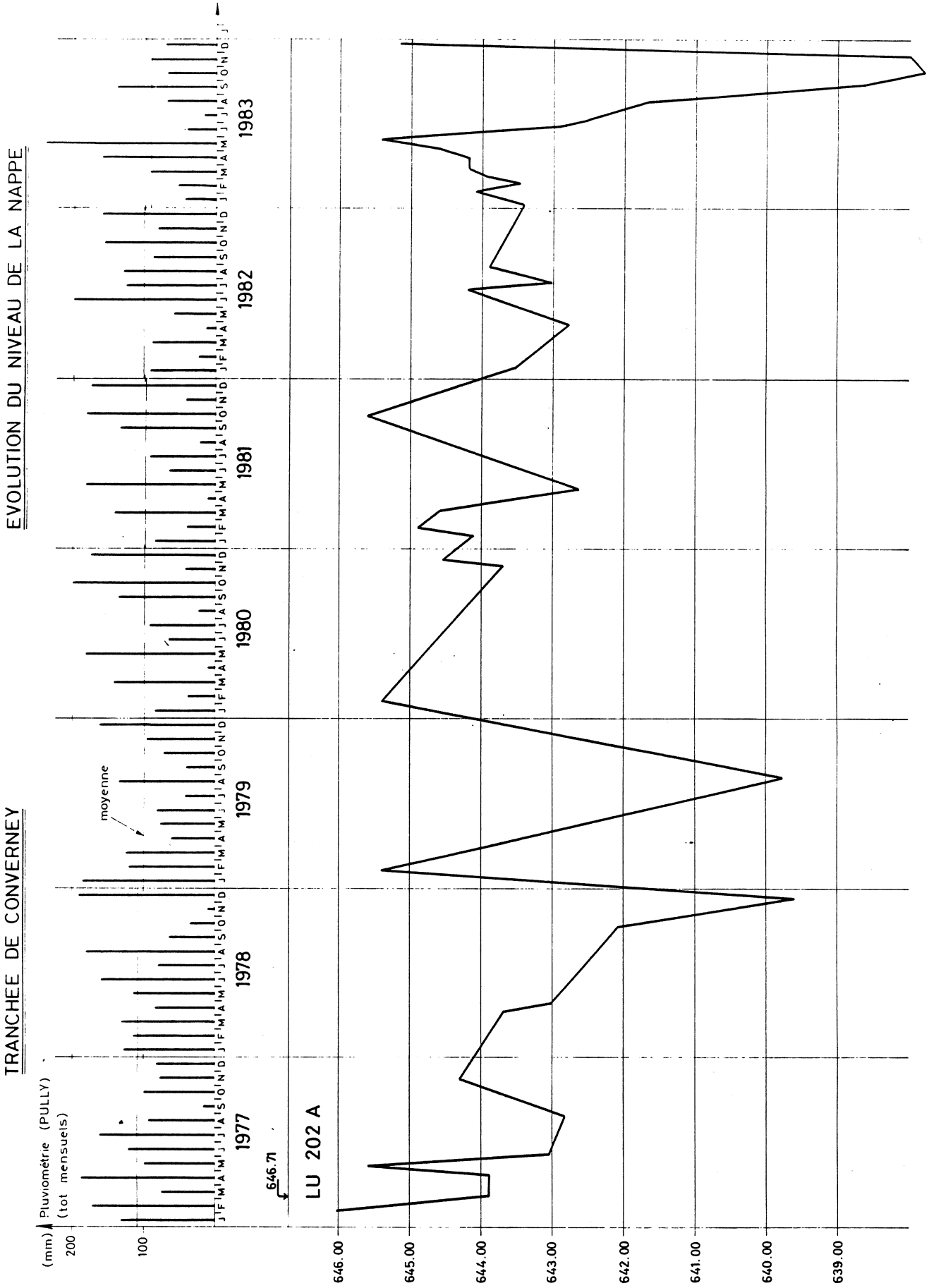
La stabilité de la tranchée de Converney, qui dépend essentiellement des conditions hydrologiques, est assurée grâce à l'important réseau de drainages mis en place. Ceux-ci évacuent l'eau infiltrée et maintiennent suffisamment bas les niveaux d'eau dans le sol pour que l'équilibre du talus et du versant soit garanti.

Les mesures topographiques montrent le bon fonctionnement du système.

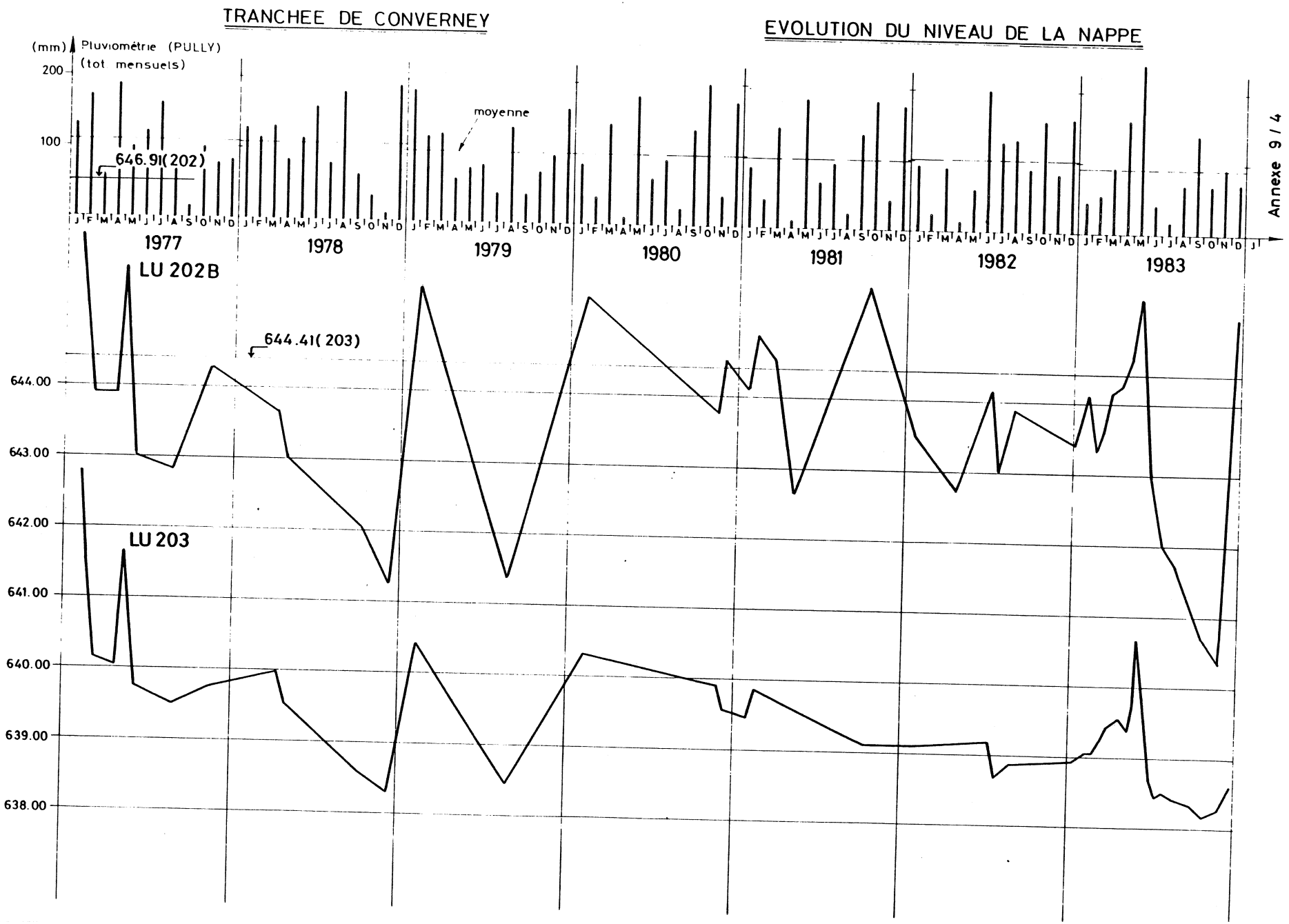

TRANCHEE DE CONVERNEY
EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE
(mm)
Pluviométrie (PULLY)
(tot. mensuels)
636.50 (99)
635.41 (204 B)
moyenne
200
100
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
LU 99
633.00
632.00
631.00
630.45 (207)
LU 207
630.00
629.00
628.00
627.00
626.00
625.00
624.00
204 B
LU 204 B

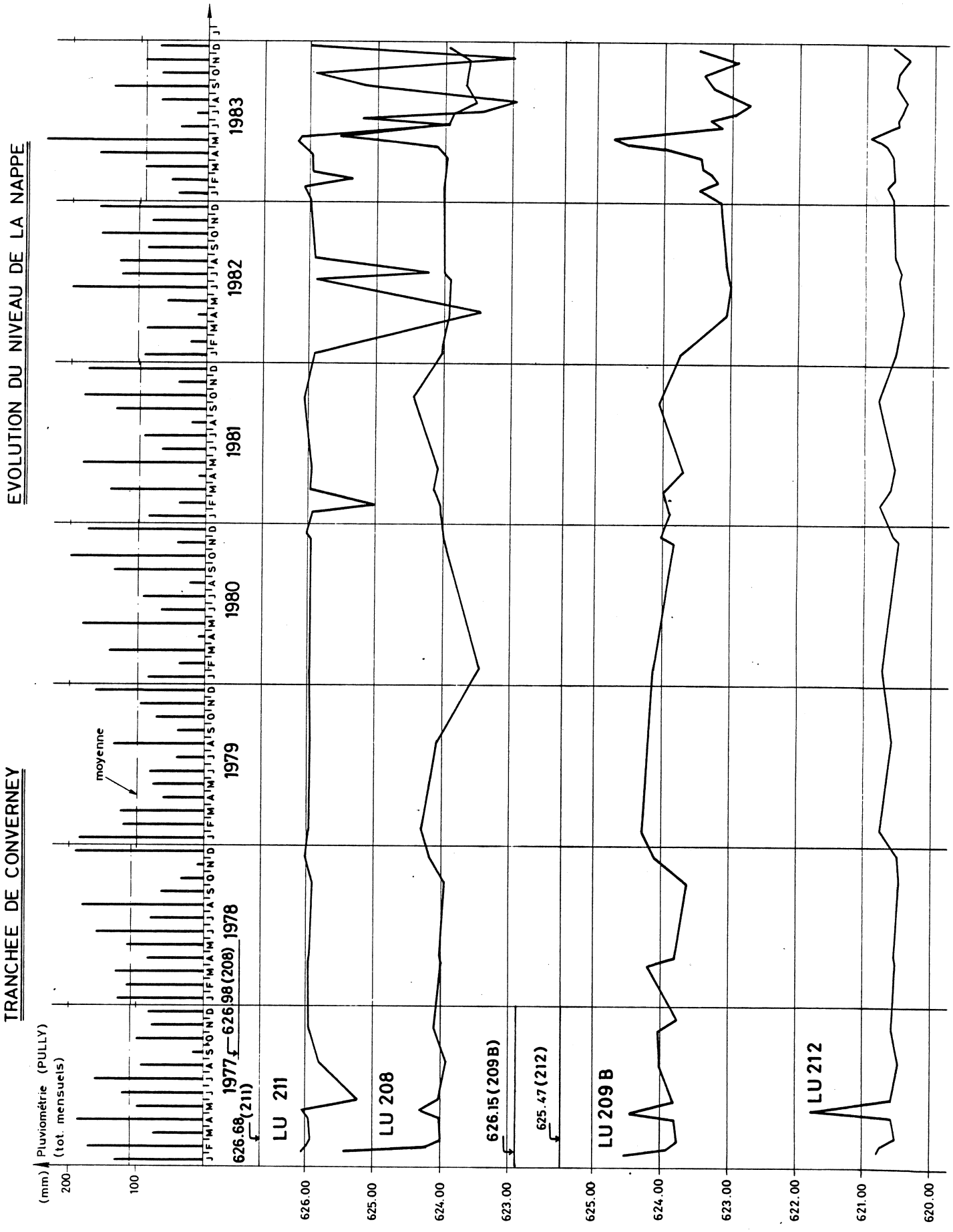

636.72 (98)
TRANCHEE DE CONVERNEY
EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE
635.50 (204A)
(mm)
Pluviométrie (PULLY)
(tot. mensuels)
200
100
moyenne
J F M A M J J A S O N D
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
LU 98
632.00
631.44 (205)
631.00
630.85 (206)
LU 205
630.00
629.00
628.00
LU 204 A
627.00
626.00
LU 206
625.00
624.00

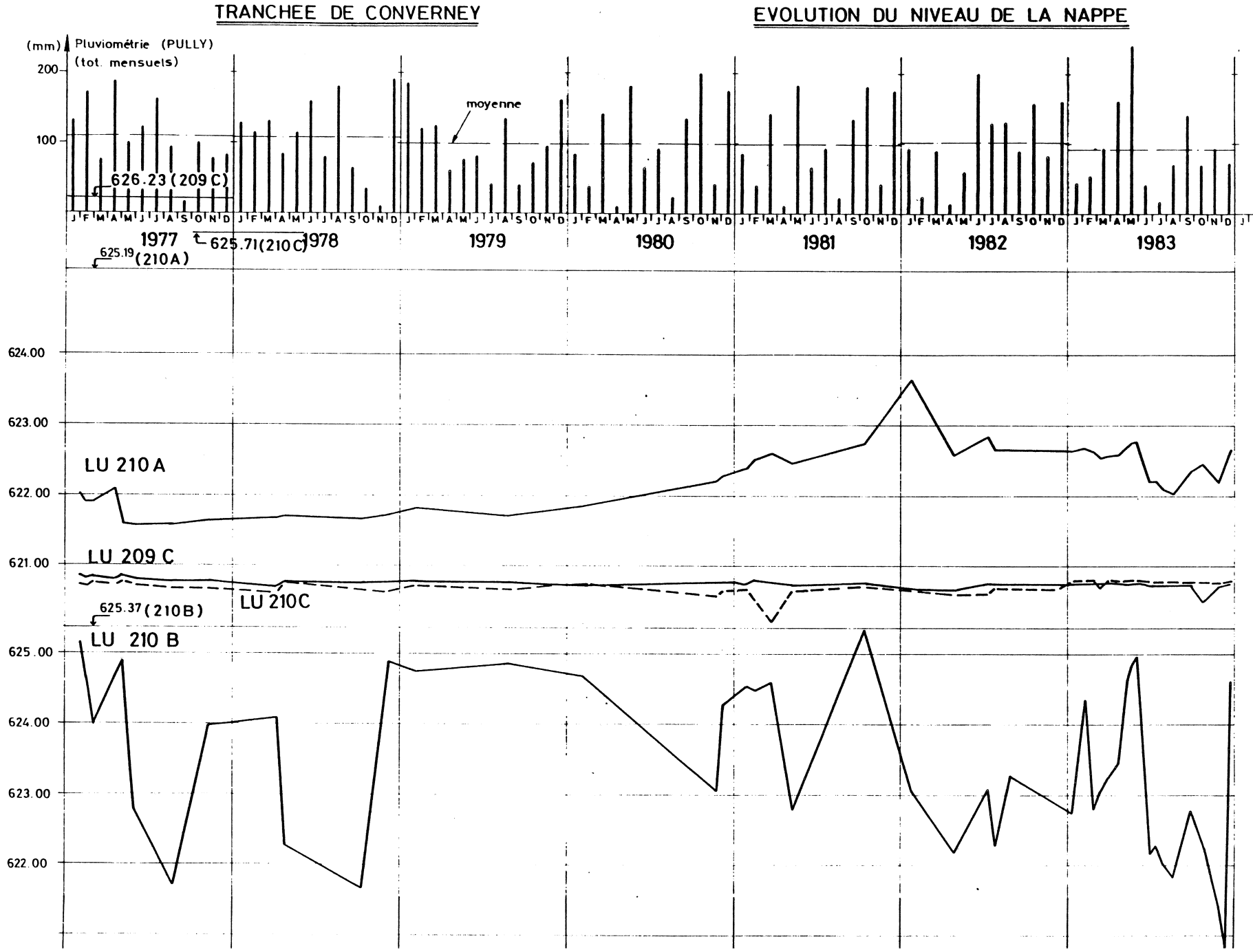
Annexe 9/2


TRANCHEE DE CONVERNEY
EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE
Pluviométrie (PULLY)
(tot mensuels)
(mm)
200
100
moyenne
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
646.71
LU 202 A
646.00
645.00
644.00
643.00
642.00
641.00
640.00
639.00

Annexe 9/3

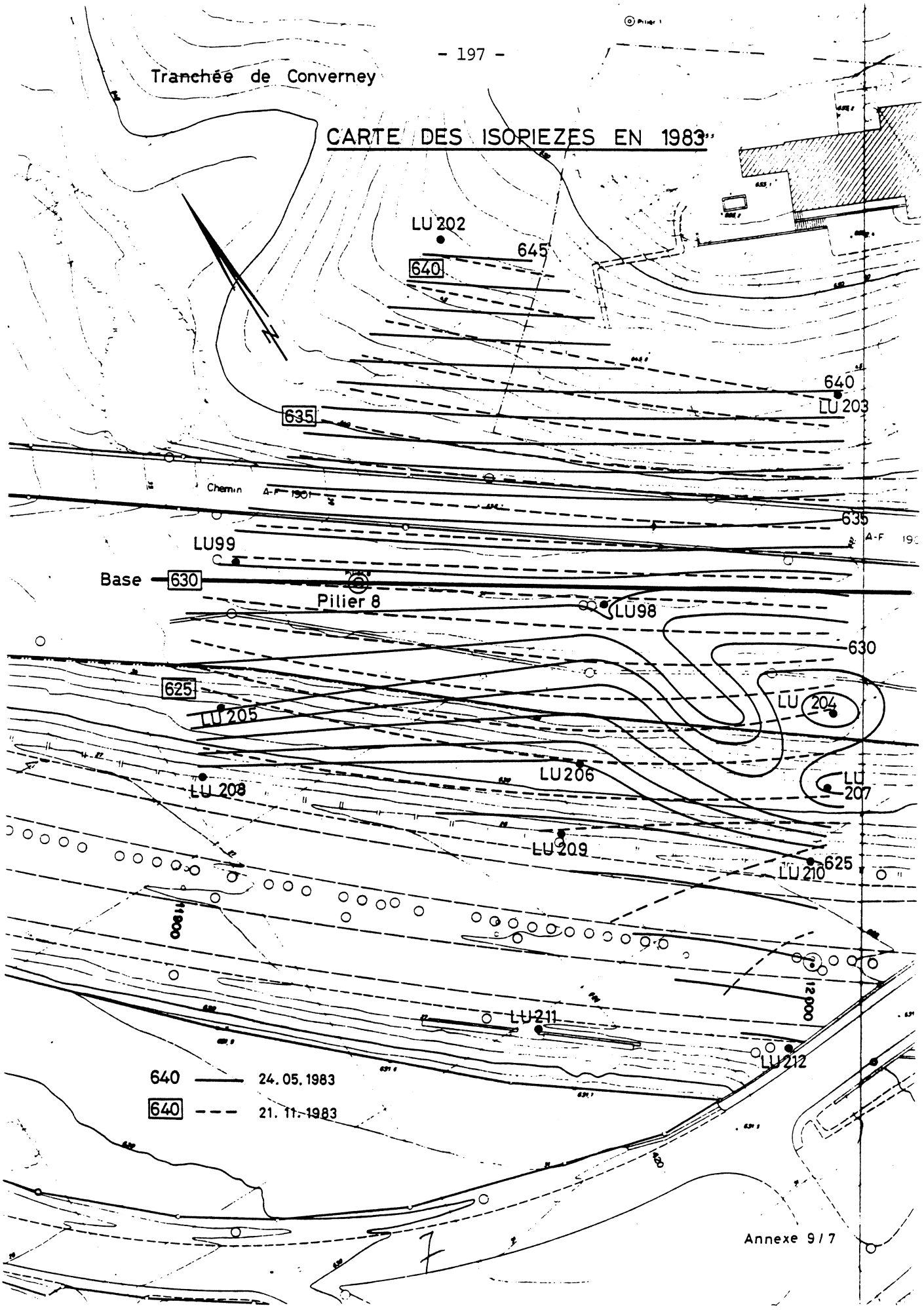

TRANCHEE DE CONVERNEY
EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE
(mm) Pluviométrie (PULLY)
(tot. mensuels)
200
100
moyenne
646.91(202)
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
LU 202B
644.41(203)
644.00
643.00
642.00
641.00
640.00
639.00
638.00
LU 203
Annexe 9 / 4


TRANCHEE DE CONVERNEY
EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE
Pluviométrie (PULLY)
(tot. mensuels)
(mm)
200
100
moyenne
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
626.68 (211)
626.98 (208)
LU 211
LU 208
626.15 (209B)
625.47 (212)
LU 209 B
LU 212
626.00
625.00
624.00
623.00
625.00
624.00
623.00
622.00
621.00
620.00

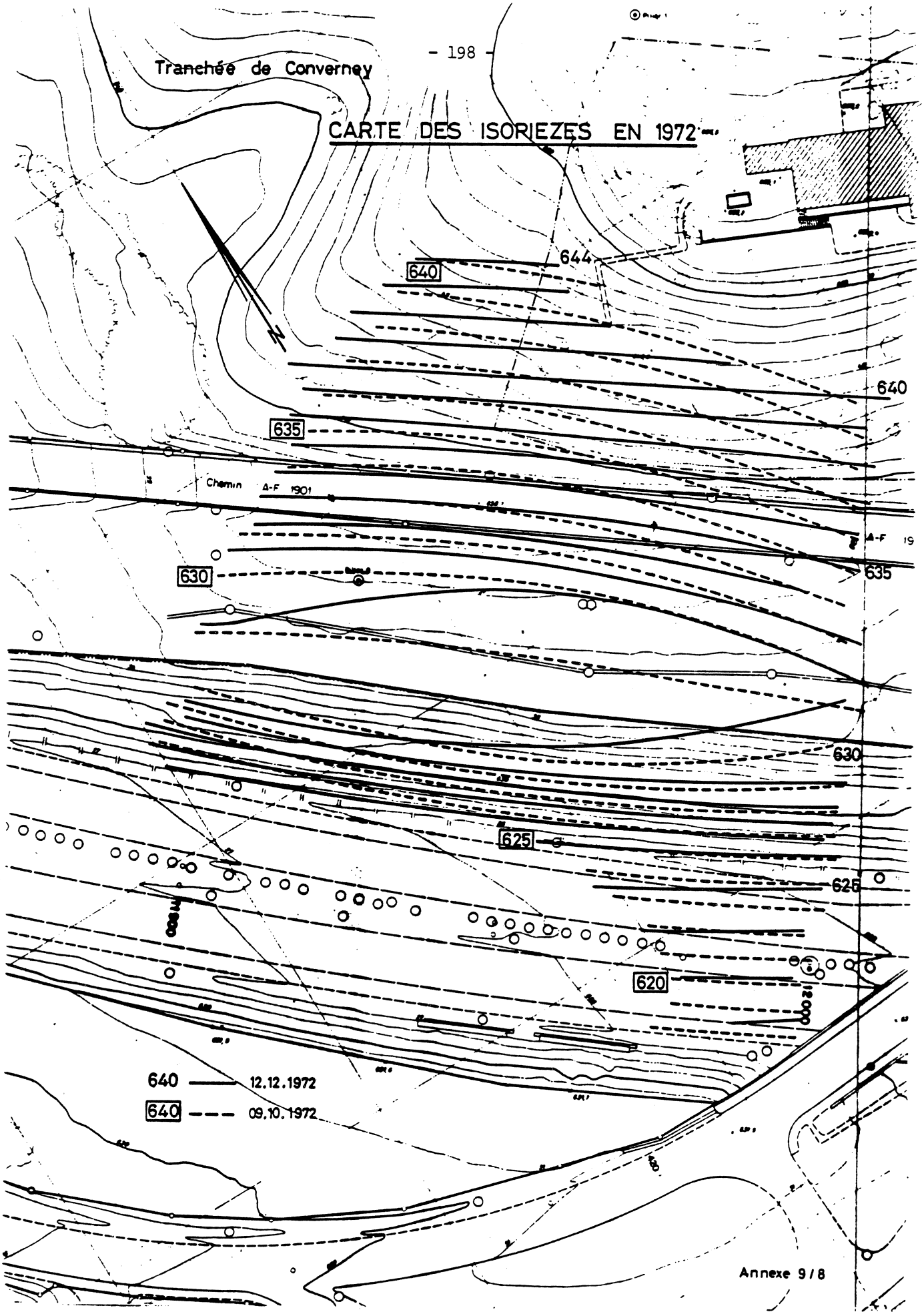

TRANCHEE DE CONVERNEY
EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE
(mm) Pluviométrie (PULLY)
(tot. mensuels)
200
100
moyenne
626.23 (209 C)
625.71 (210 C)
625.19 (210 A)
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
624.00
623.00
622.00
621.00
LU 210 A
LU 209 C
LU 210 C
625.37 (210 B)
LU 210 B
625.00
624.00
623.00
622.00

Tranchée de Converney

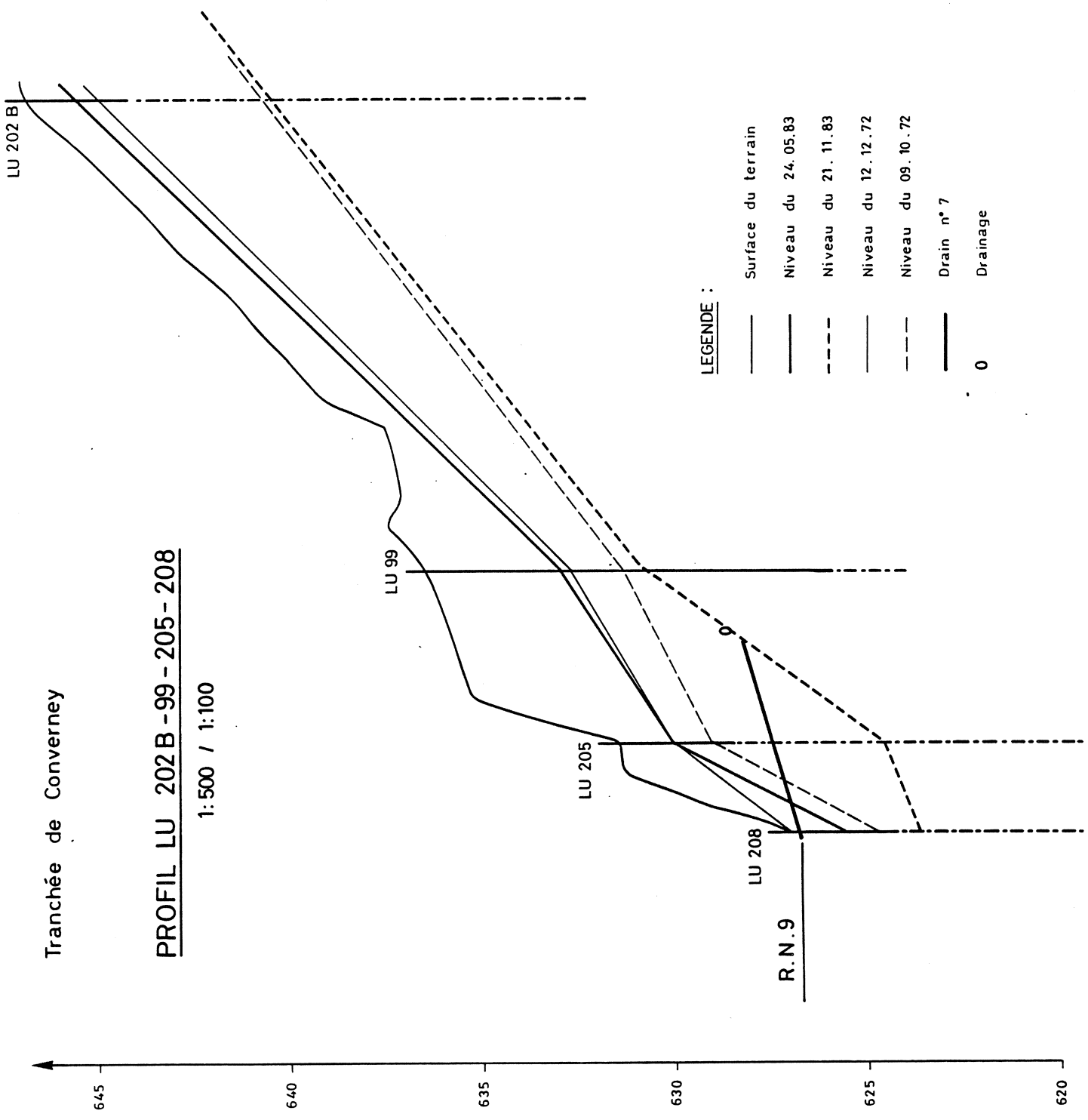
CARTE DES ISOPIEZES EN 1983



Annexe 9/7


Tranchée de Converney
CARTE DES ISORIEZES EN 1972
N
644
640
640
635
Chemin A-F 1901
A-F 19
630
635
630
625
625
620
640 12.12.1972
640 09.10.1972

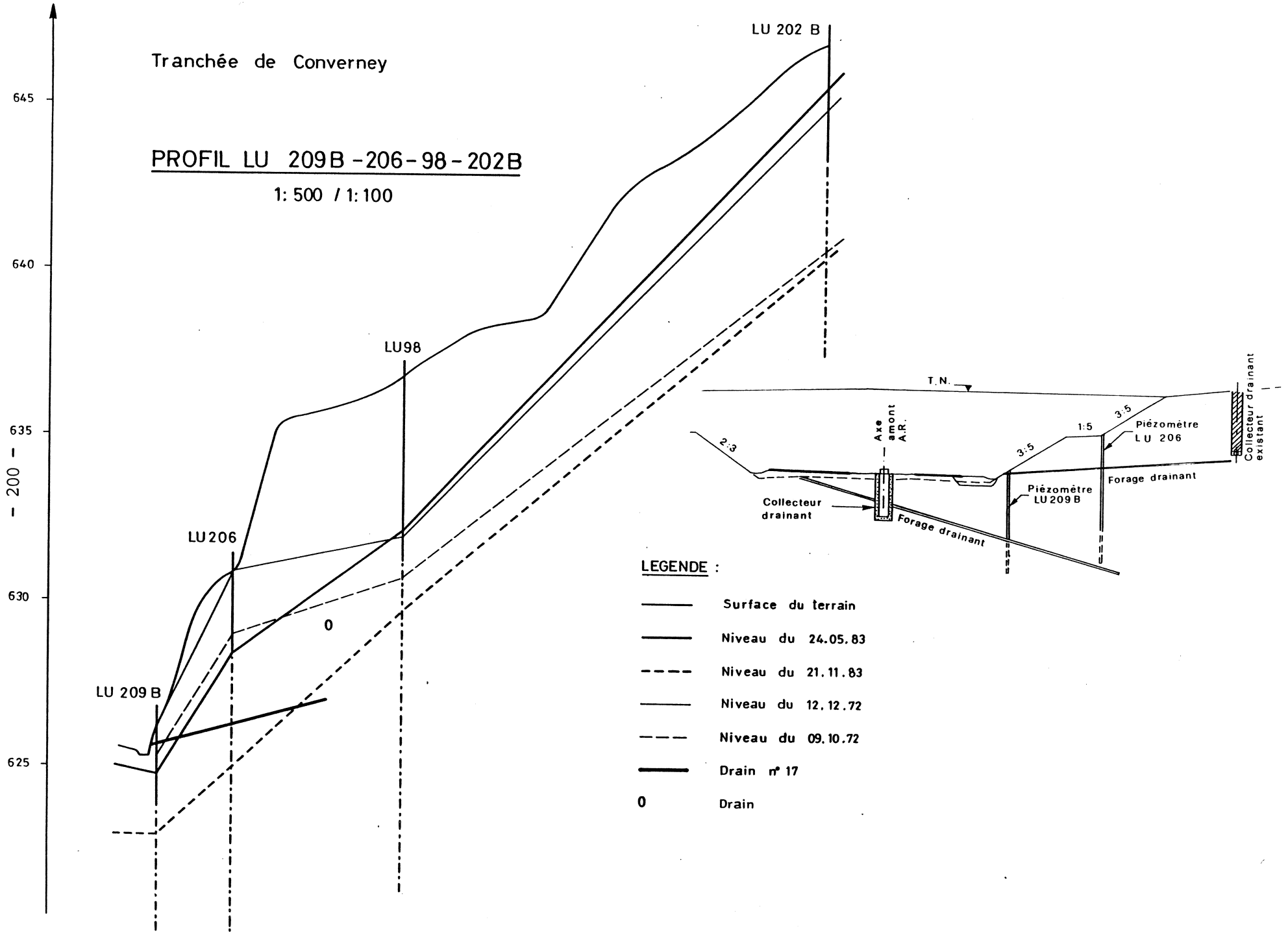
Annexe 9/8

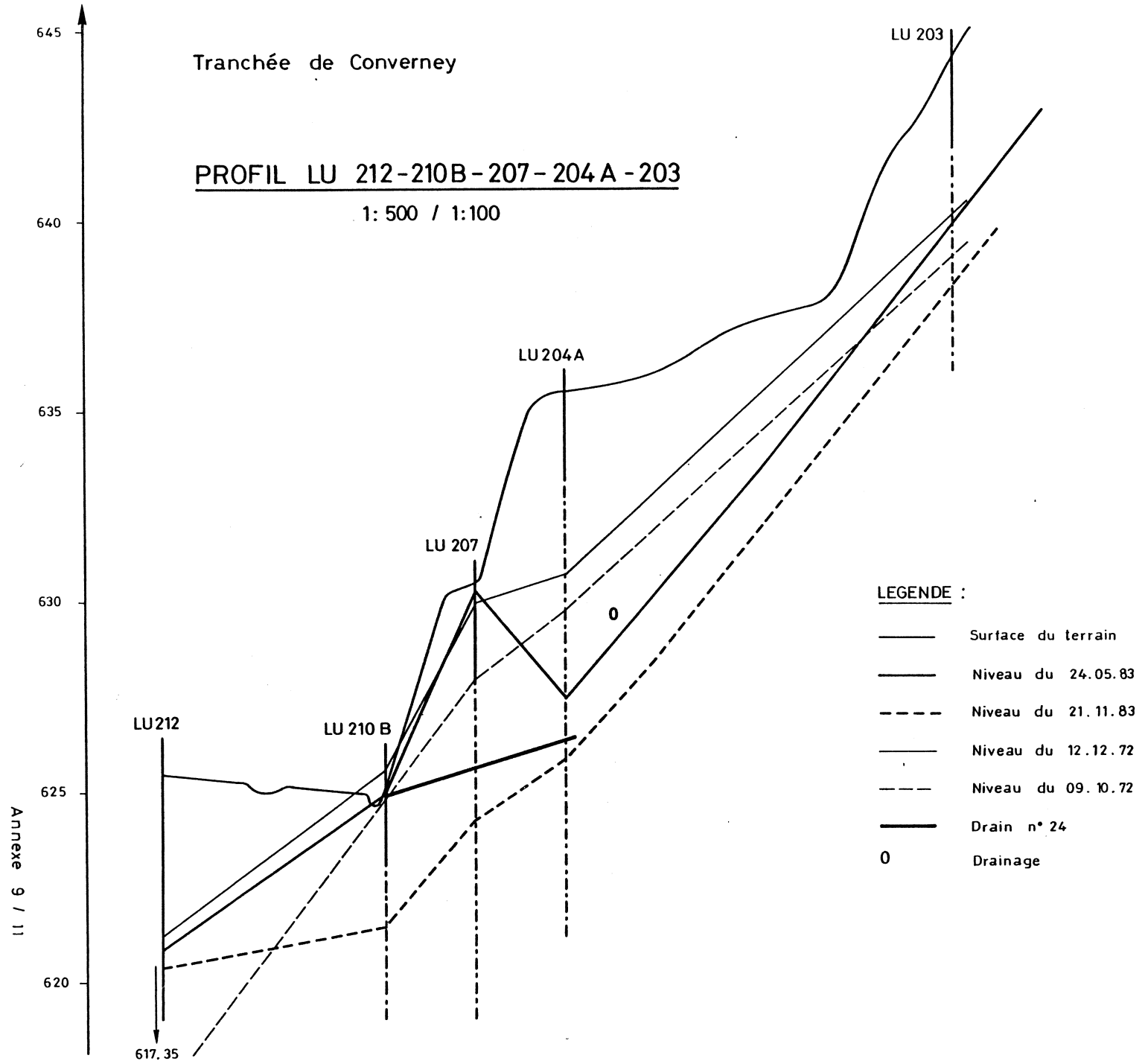

Tranchée de Converney
PROFIL LU 202 B - 99 - 205 - 208
1:500 / 1:100
LU 202 B
LU 99
LU 205
LU 208
R.N.9
LEGENDE :
Surface du terrain
Niveau du 24.05.83
Niveau du 21.11.83
Niveau du 12.12.72
Niveau du 09.10.72
Drain n° 7
Drainage
645
640
635
630
625
620

Tranchée de Converney

PROFIL LU 209B-206-98-202B

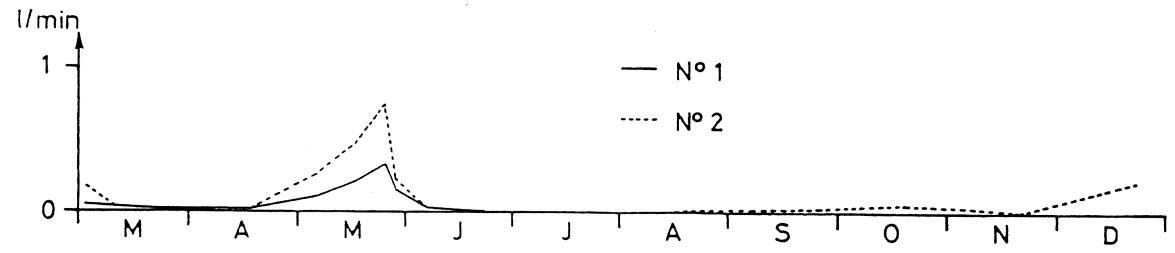
1: 500 / 1: 100

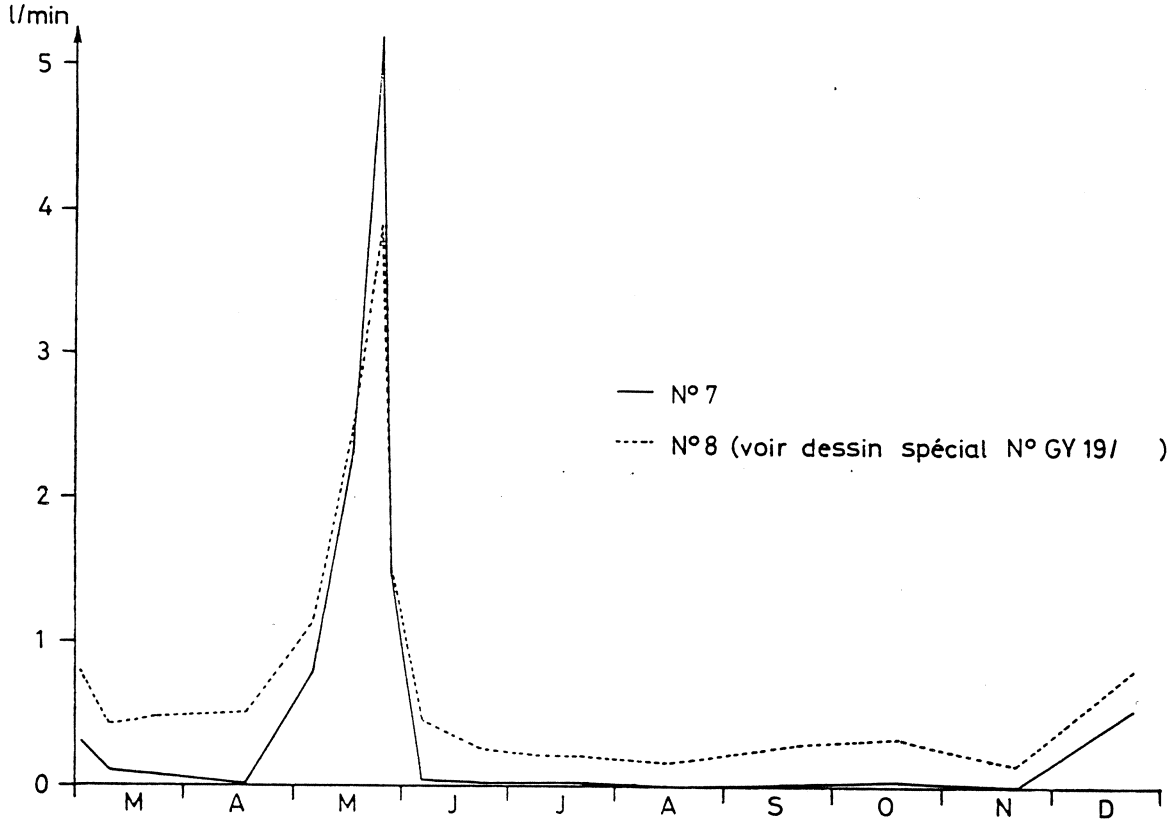


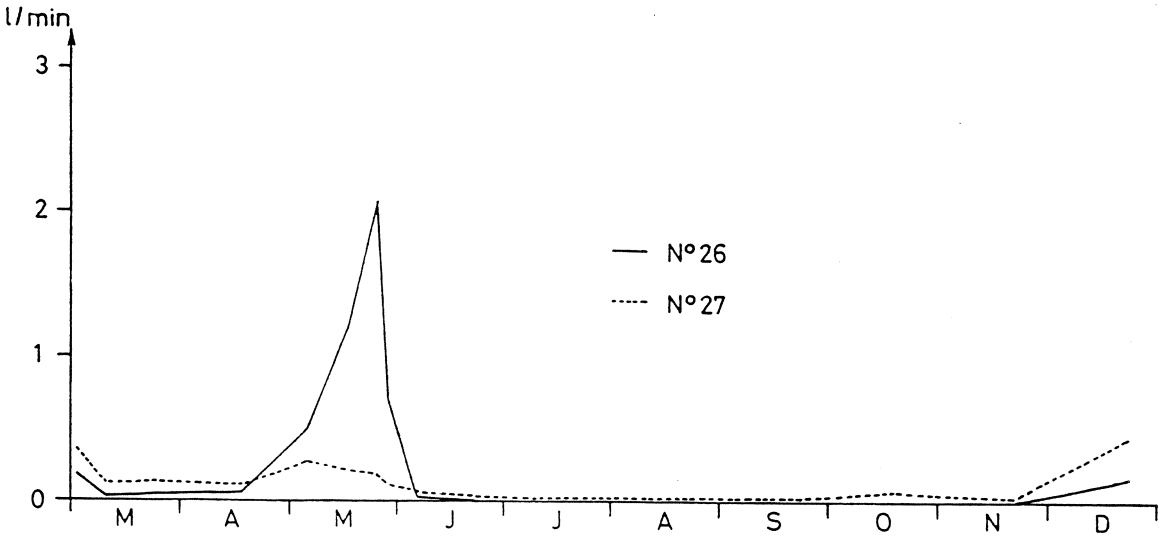

Tranchée de Converney
PROFIL LU 212-210B-207-204A-203
1: 500 / 1:100
645
640
635
630
625
620
617.35
LU 212
LU 210 B
LU 207
LU 204A
LU 203
0
LEGENDE :
Surface du terrain
Niveau du 24.05.83
Niveau du 21.11.83
Niveau du 12.12.72
Niveau du 09.10.72
Drain n° 24
0 Drainage

Annexe 9 / 11

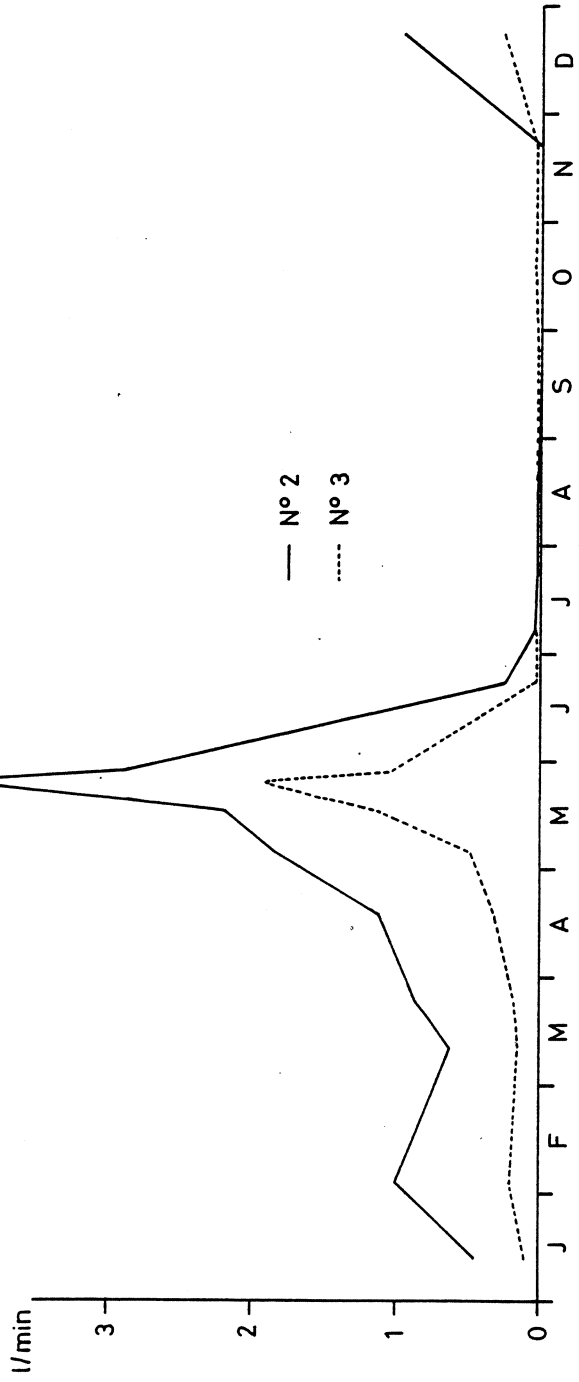
DEBITS DES DRAINAGES DU BORD AMONT DE L'A.R. EN 1983

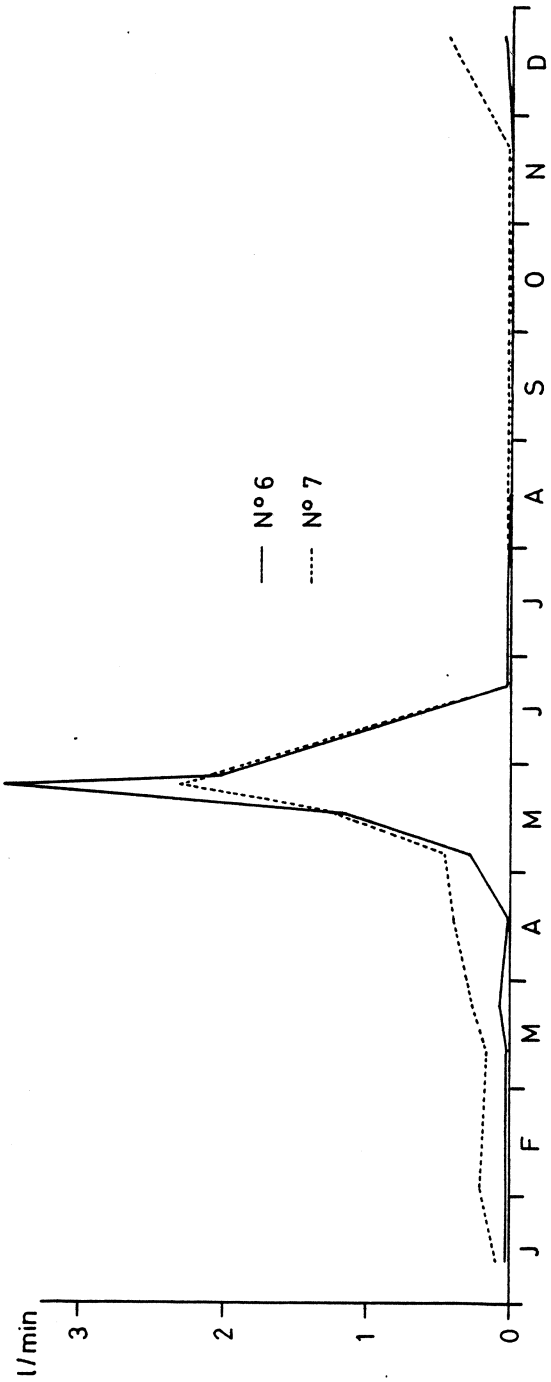




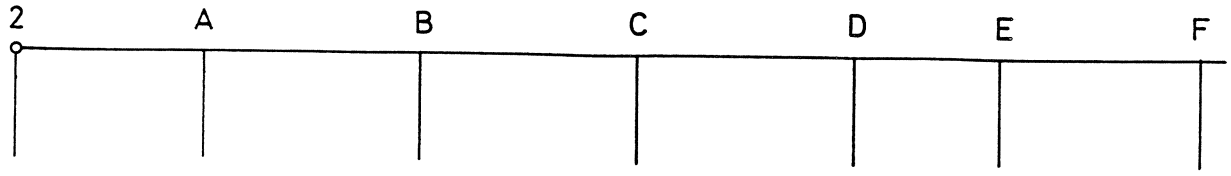


DEBITS DES DRAINAGES AU LONG DU CHEMIN A.F. EN 1983

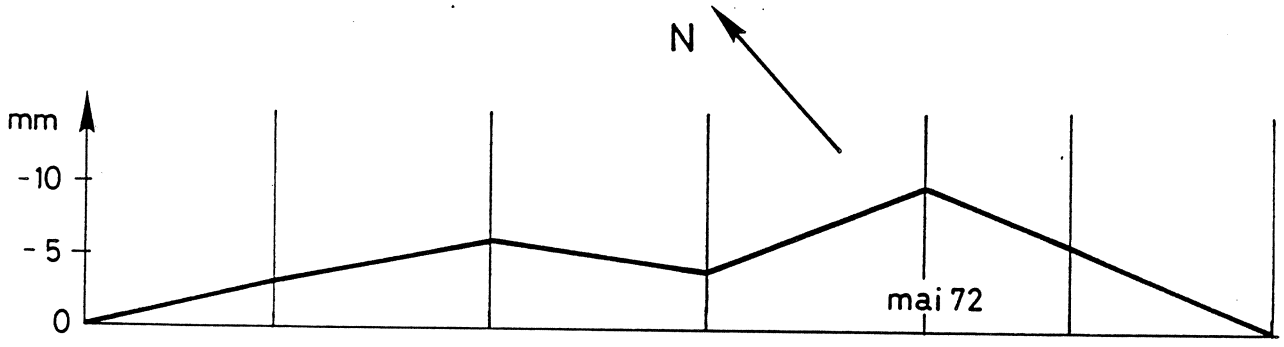




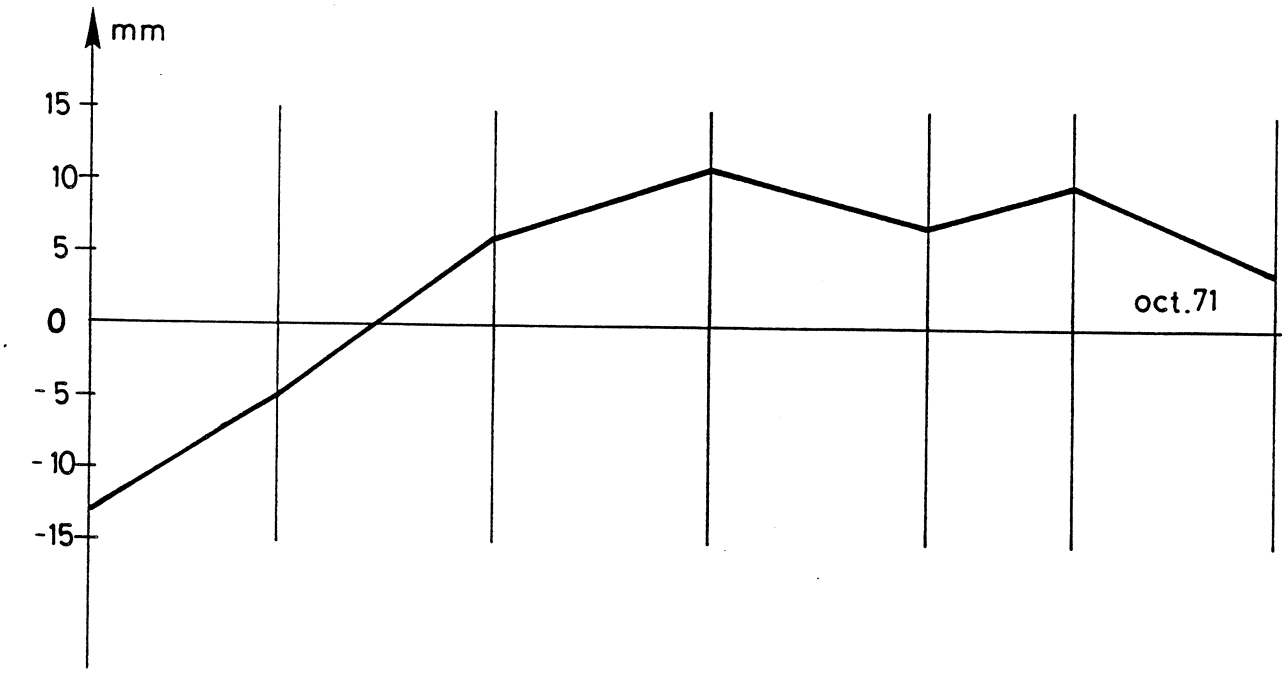
Base 2



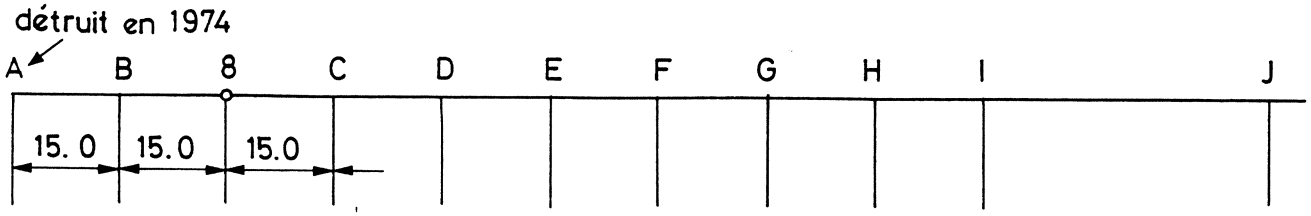
Déplacements horizontaux entre le 30/5/71 et le 23/12/82



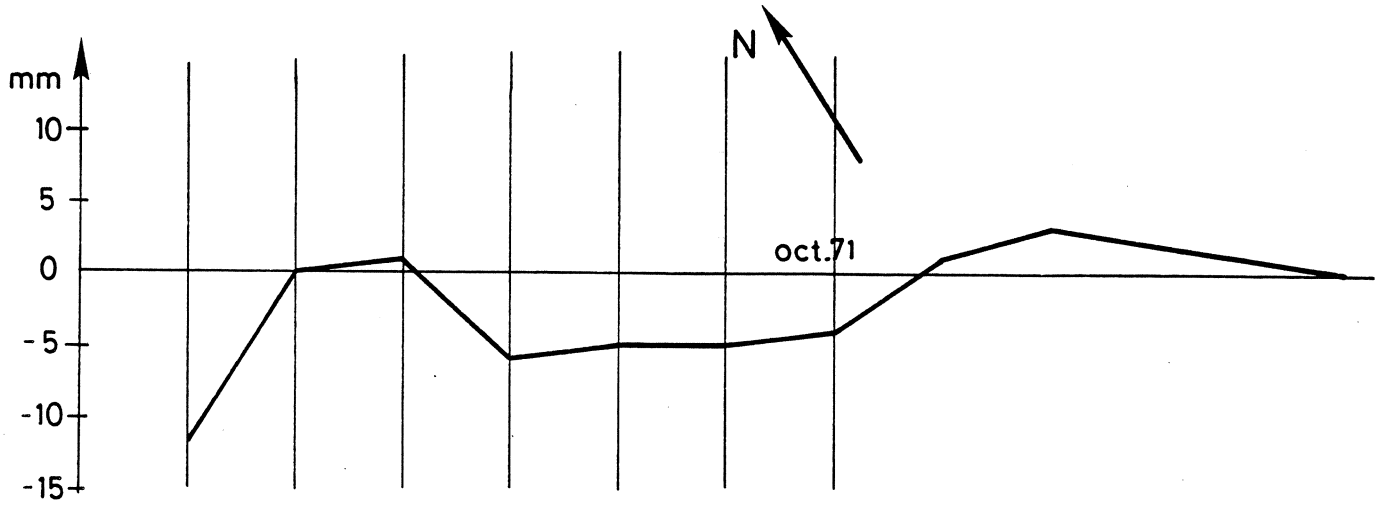
Déplacements verticaux entre octobre 71 et décembre 82



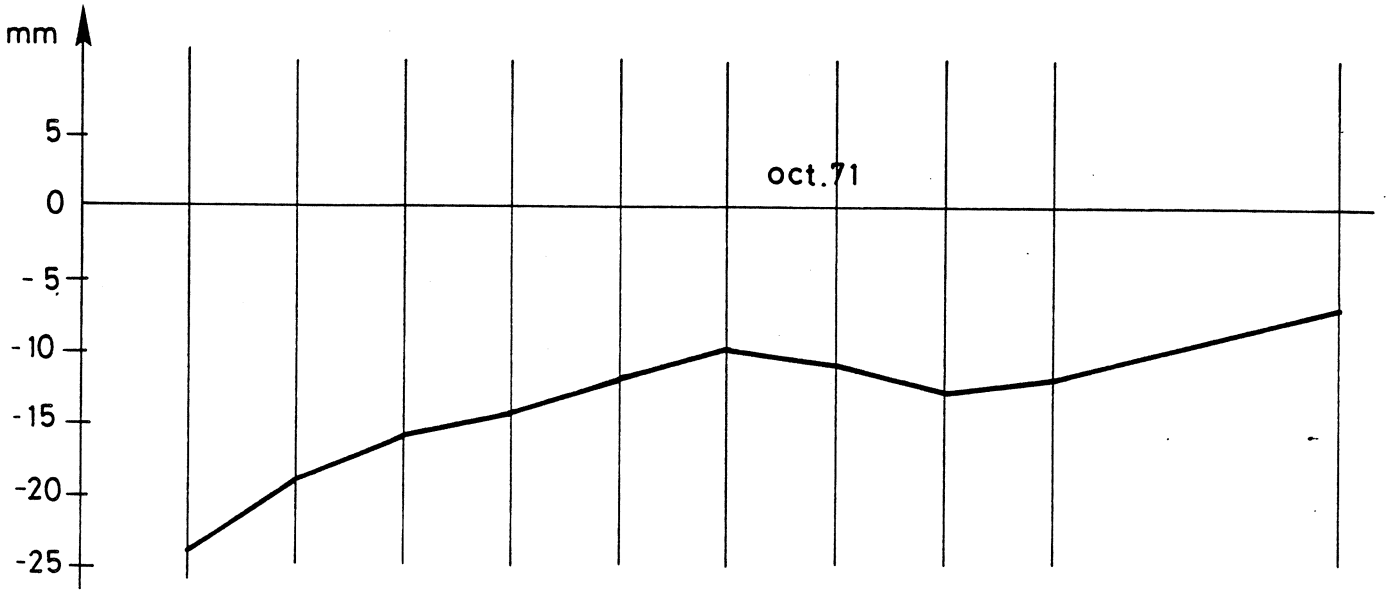
Base 8



Déplacements horizontaux entre le 12/10/71 et le 23/12/82



Déplacements verticaux entre octobre 71 et décembre 82



3.10 LES MURS DU LANCIAU

J.-C. OTT S.A.
Ingénieurs civils
Laboratoire de géotechnique

8, chemin des Deux-Communes
1226 THÔNEX-GENÈVE
✆ (022) 48 64 72 / 48 66 72

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

(cf. annexe 1)

2.1. Mesures topographiques

Le système de contrôle géométrique était constitué par un réseau de polygonation avec repères en tête du mur, installé lors de la construction (1972) sur 5 profils équidistants d'environ 36 mètres. Les repères sont placés dans un plan contenant 1 pieu et 3 tirants étagés.

2.2. Inclinomètres mobiles à niveau type "HUGGENBERGER"

Ce dispositif comprend 5 bases fixes posées en tête du mur. Il permet de mesurer l'inclinaison en surface au moyen du clinomètre "HUGGENBERGER" du type utilisé pour les barrages. Il est en place depuis la construction du mur en 1972.

2.3. Inclinomètres

Trois forages tubés ont été équipés en 1982 de tubes inclinométriques. Ils sont situés sur les profils 41 (km 17,263), 59 (km 17,336) et 68 (km 17,372).
La profondeur des inclinomètres est de respectivement:

no 41	30 mètres
no 59	29,90 mètres
no 68	25,35 mètres

2.4. Tirants passifs pour mesure du fluage

Huit ans après la mise en place des dispositifs de mesure de la construction, les déplacements du sommet du mur avaient dépassé 35 mm. au profil 59 km 17,336 et 25 mm. au profil 41 km 17,263.

Dès lors la question se posait de savoir quelles pouvaient être les surtensions induites dans les tirants des profils les plus déformés. Il s'agissait donc de tirer au clair si les mouvements de fluage observés en surface intéressaient seulement les couches superficielles du coteau en-dessus des scellements des tirants placés dans la molasse, ou au contraire si le fluage se situait en profondeur en-dessous de la zone de scellement des tirants. Dans cette dernière hypothèse les tirants ne devaient donc pas subir des surtensions excessives.

Malheureusement les têtes noyées des tirants actifs ne permettaient pas un contrôle direct de la tension. Par ailleurs aucun des tirants n'était équipé d'une jauge dynamométrique.

C'est pourquoi,un dispositif de tirants passifs élaboré par le bureau OTT S.A. a été installé pour localiser les mouvements de fluage.

Ce dispositif, mis en place pour la première fois au Lanciau est constitué par un faisceau de torons disposé dans un forage oblique et dont les scellements sont étagés respectivement à 10, 20, 30 et 40 mètres.

Chaque scellement est pourvu d'un tube d'injection séparé. Les torons gainés et graissés coulissent à travers les zones injectées.

Chaque toron est mis en tension à 10 t. puis relâché pour contrôler la tenue du scellement, la réversibilité des mouvements et la répression des frottements résiduels.

La protection des tirants passifs est la même que celle des tirants actifs usuels.

La tête du tirant passif est protégée par un capot amovible (annexe 2)

Le déplacement éventuel d'une zone de scellement se traduit par une modification de la distance entre la tête d'appui et l'extrémité du toron qui coulisse librement dans la plaque d'appui.

On mesure la distance entre la plaque d'appui et l'extrémité du toron libre.

Les profils 41, 59 et 68 ont été équipés dès 1982 d'un tirant passif de 4 torons libres.

3. RESULTATS DES MESURES

3.1. Mesures topographiques

Ces mesures ont été réalisées dès l'achèvement de l'ouvrage, en 1972.

Les relevés topographiques ont cessé en 1982, car ils exigeaient la mise en place d'un nouveau réseau de polygonation.

L'annexe 3 montre les déplacements successifs du couronnement du mur.

La vitesse moyenne de fluage superficiel après la construction est comprise entre 1,5 et 2,6 mm/an.

3.2. Mesures des variations angulaires au droit des têtes des pieux

Mesurées dans 2 directions X (parallèle)et Y (transversale) à partir du 17 mars 1972 dès l'achèvement du couronnement et avant la mise en tension des tirants ces variations sont reportées sur le graphique de l'annexe 4. Ce graphique indique les variations dans le plan transversal.

Les mesures dans le plan Y qui ne sont pas représentées ici ont servi à définir l'orientation du plan de rotation pricipal et l'angle de rotation réel.

Les rotations croissantes correspondent à une inclinaison vers l'amont de la tête des pieux.

Les séries de mesures 1 à 6 ont été relevées pendant la construction.

3.3. Inclinomètres

Les déformées des forages de contrôle complémentaires au droit des profils 41, 59 et 68 ont été établies à partir du 21 avril 1982 soit 10 années après la construction. Elles sont illustrées aux diagrammes annexes 5, 6 et 7. Le diagramme dans le plan parallèle au mur fait ressortir des mouvements alternés assez surprenants, tantôt vers Lausanne, tantôt vers Villeneuve.

Les mesures n'ont plus été possibles du fait des déformations subies par les tubes dès fin 1982 pour le profil 59 et avril 1983 pour le profil 41.

3.4. Mesures des tirants passifs

Ces mesures commencées le 21 avril 1982 consistent à noter la distance entre l'extrémité des tirants passifs et la plaque de base à la crête du mur.

Les longueurs libres des torons étaient les suivantes:

	Toron 1	Toron 2	Toron 3	Toron 4
Profil 41 m.	9,65	18,96	29,69	37,38
Profil 59 m.	9,46	18,55	29,27	39,44
Profil 68 m.	9,88	18,87	25,46	38,08

L'évolution dans le temps, est donnée par le graphique annexe 8.

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

4.1. Mesures des variations angulaires au droit des têtes des pieux

Ces mesures ont permis de vérifier l'inclinaison de l'ouvrage.

La plupart des mouvements sont synchrones. L'amplitude des variations postérieures à la construction a atteint en 1985 l'amplitude des variations pendant la construction.

L'amplitude des variations pendant la période 1982-1984 met en évidence la tendance générale à un accroissement de l'inclinaison vers l'amont.

La mesure de la variation de l'inclinaison de l'ouvrage a donné la possibilité de tracer sa déformée et, par comparaison avec les mesures initiales, d'apprécier l'influence du fluage du sol sur le pieu.

La fiabilité de l'appareillage et la solidité des bases permettent de poursuivre les mesures.

4.2. Mesures inclinométriques

Ces mesures ont montré que les mouvements dans le plan parallèle au mur ne sont pas négligeables.

On note dans tous les forages d'inclinométrie, d'importants mouvements longitudinaux de va et vient parallèles au mur, mouvements qui se reflètent également dans la composante - x - des mesures de rotation en tête du mur.

Tout se passe comme si la poussée s'exerçait déviée vers Villeneuve en coïncidence avec le plongement des couches jusqu'au moment où une diminution saisonnière de la poussée autorisait un rappel des tirants dans la direction normale au mur.

Ce phénomène est probablement la conséquence des rugosités du parement arrière crénelé par le saillant des fûts des pieux combiné avec des variations de poussées.

4.3. Mesures par tirants passifs

Ce dispositif a permis d'établir une relation entre les mouvements des tirants passifs et les déformations de l'ouvrage.

Les mesures sur les tirants passifs, rapprochées des résultats obtenus par l'ensemble de l'appareillage mis en place ont conduit à divers calculs:

- détermination de la direction moyenne de rotation maximum et de son intensité mesurée en tête de mur.

- détermination du mouvement de translation (composante horizontale) en fonction des mouvements des tirants passifs les plus profonds à 40 m. La relation générale établie pour une inclinaison quelconque des tirants passifs se trouve à l'annexe 9. Le calcul est résumé au tableau I ci-après et sur le graphique annexe 9.

- détermination de la relation entre les allongements spécifiques dans la direction des tirants passifs et les allongements correspondants dans les tirants actifs. Ce calcul basé sur des relations géométriques conduit à un facteur de corélation k. Le résultat du calcul donnant l'allongement spécifique annuel pour la période 1981-1983 figure également au tableau I.

La durée de vie d'un tirant a également été calculée en se basant sur l'allongement spécifique ε compris entre 6‰ et 10‰ c'est-à-dire l'allongement correspondant respectivement à la mise en charge et l'allongement à la limite d'élasticité. Le calcul figure au tableau I.

A l'exception du premier cité, les calculs ci-dessus sont basés sur l'hypothèse que le fluage est parallèle à la pente moyenne du coteau. En d'autres termes, contrairement à la neige, on a admis que le fluage ne modifie pas l'indice de vide du sol et par suite l'épaisseur de la couche en mouvement.

De ces divers calculs ressortent les constatations suivantes:

- la direction moyenne du fluage durant la période 72-84 est biaise par rapport au plan du mur.

- le diagramme des vitesses superficielles moyennes obtenu au moyen des mesures topographiques durant la période 73-82 concorde bien avec le diagramme des vitesses superficielles (composante horizontale) obtenu au moyen des tirants passifs pour une autre période (82-84).

La déformée d'une verticale dans l'axe des pieux a été dessinée en projetant les déplacements Δx obtenus à diverses profondeurs au moyen de la relation mentionnée ci-dessus pour la période 82-84.

On a remarqué que ces déformées sont différentes dans le profil du pieu 41 traversant une épaisse couche de moraine et les profils 59 et 68 dans la molasse. Dans ces deux profils-là, le fluage du sol intéresse surtout les couches profondes en-dessous des scellements des tirants.

Ceci illustre le fait qu'il n'est pas possible, au moyen des seules mesures topographiques, de déterminer les sollicitations complémentaires soit dans les tirants, soit dans les pieux placés dans une zone en fluage.

Les déformées obtenues lors de la construction dans le forage spécial près du pieu 41 donnaient également des mouvements superficiels importants. Là, il y a lieu de tenir compte de la tranche de terrain comprise entre le forage d'inclinométrie et le parement amont du mur. Celle-ci se comprime lorsque la poussée se développe. Il eut été préférable de placer les forages inclinométriques dans le béton des pieux.

Les déformées des pieux (annexe 10) obtenues au moyen de tirants passifs permettent de tracer les angles de rotation à l'extrémité supérieure. On constate que ces angles coïncident avec les angles tirés des mesures directes (annexe 4).

Une instrumentation complémentaire a été mise en place en 1982 pour déceler le fluage du sol à diverses profondeurs.

Ce dispositif comporte:

. 3 nouveaux forages d'inclinométrie dans le sol, les anciens n'étant plus opérationnels;

. des tirants passifs non tendus pour mesurer avec précision l'évolution de l'allongement des tirants anciens tendus.

Ce dernier dispositif absolument nouveau a été testé. Il a très bien fonctionné. Il a permis de tracer la déformée des pieux sous l'effet du fluage postérieur à la construction et de calculer la vitesse de fluage superficielle.

C'est grâce à ces méthodes de mesures différentes et surabondantes permettant des recoupements, que l'interprétation des observations a pu être faite. Il a été possible de comprendre comment le mur pieux tirants est sollicité par des poussées qui évoluent dans le temps.

A défaut de recoupements et de corrélation entre les diverses séries de mesures, l'interprétation eut souffert de lacunes.

6. CONCLUSIONS

Les mesures réalisées sur le mur du Lanciau ont révélé un comportement du sol tout à fait particulier en ce qui concerne la dynamique des mouvements.

Le fluage consiste, à longue échéance, en un mouvement continu très lent d'une masse qui coïncide à la fois avec le sillon d'érosion de la molasse et avec l'axe du premier glissement de la voie CFF.

La vitesse de fluage superficielle est lente: de l'ordre de 1 à 2 mm. par année.

A longue échéance, cette vitesse change peu dans le même profil.

L'épaisseur de la tranche intéressée dépasse 25 m. au centre d'un large front d'environ 150 m. correspondant en grande partie à la zone haute du mur.

La trajectoire n'est pas normale au mur. Elle est oblique. Cette déviation provient très vraisemblablement du plongement des bancs vers Villeneuve.

En profondeur, au cours du temps, le mouvement s'active, tantôt sur un plan, tantôt sur l'autre. Des variations de vitesse sont perceptibles avec les mesures fines (inclinomètre Huggenberger).

L'interaction de la poussée avec la surface arrière, crénelée par les fûts, provoque des mouvements de rappel parallèle au mur. Ils sont tout à fait perceptibles avec les mesures à l'inclinomètre "Huggenberger" placé sur la tête des pieux. Ils apparaissent aussi dans les mesures topographiques. Ces mouvements sont le plus souvent synchrones dans les divers profils.

D'une façon générale, malgré le fluage du coteau, ou plutôt à cause de sa vitesse très faible, aucun désordre visible n'apparaît dans le mur, ni fissuration, ni déformation de la chaussée.

De tous les tirants, ceux du profil 41 sont les plus sollicités par des efforts complémentaires.

Compte tenu de la vitesse moyenne de fluage les "durées de vie" des tirants ont été recalculées par extrapolation sur la période 1982-1984.

Par durée de vie, on entend le nombre d'années au bout desquelles la limite d'élasticité de l'acier est atteinte après la mise en tension (1973).

La vie la plus courte serait de 60 à 80 ans au profil 41, supérieure à 200 ans dans tous les autres profils.

En ce qui concerne l'avenir, il n'est pas exclu que la vitesse de fluage diminue, comme durant la période 1978-1979, ou s'arrête, toutes les résistances n'ayant pas encore été mobilisées dans cet ouvrage hyperstatique.

J.C. OTT S.A.
BUREAU D'INGENIEURS CIVILS
et laboratoire de géotechnique

Genève, septembre 1989
FF/ar-368

CALCUL DES MOUVEMENTS HORIZONTAUX Δx DU MUR ET DUREE DE VIE DES TIRANTS ACTIFS

Tableau I

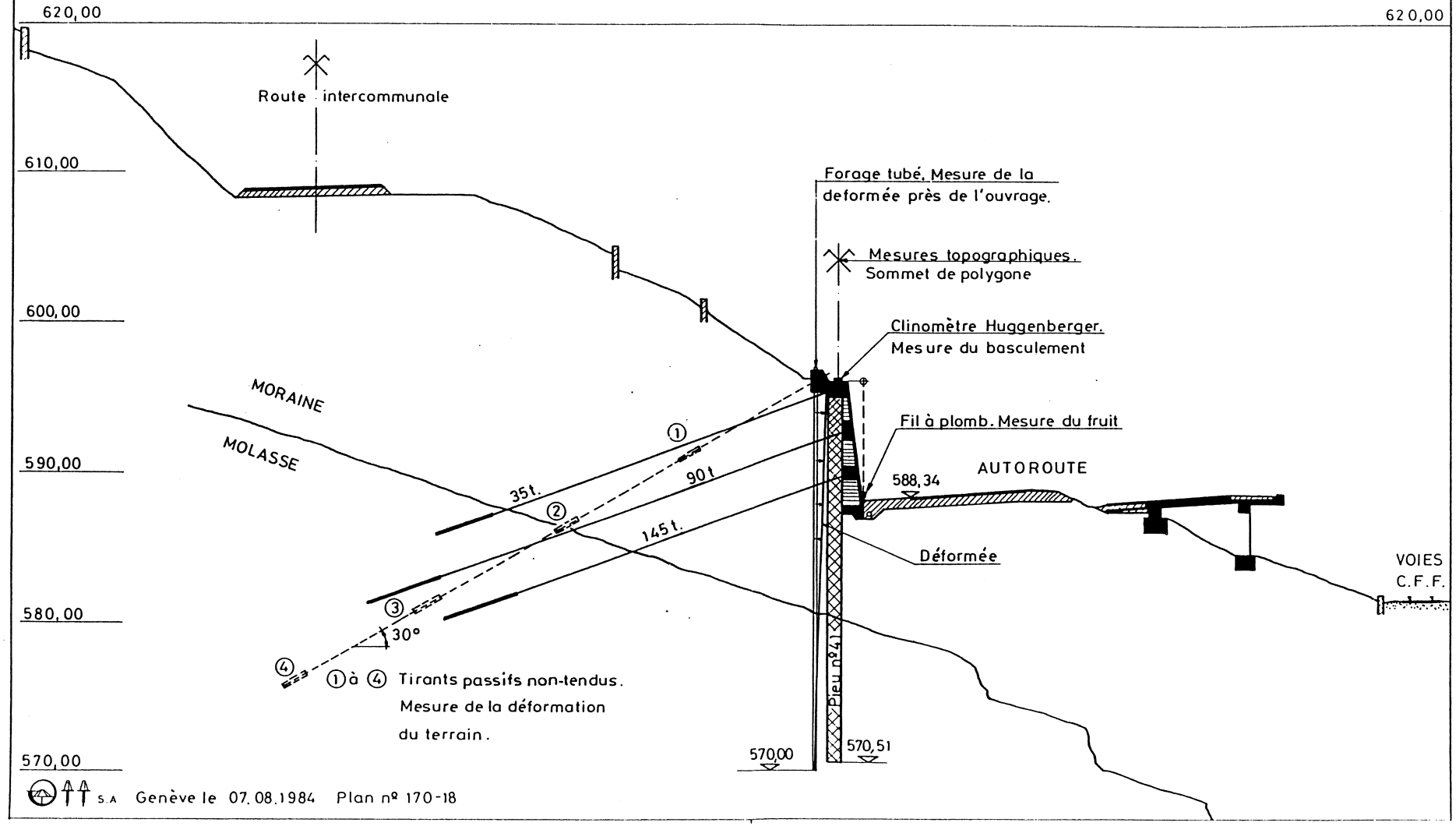
Tirants passifs - mesures 21.4.82 au 2.8.84 -					Tirants actifs correspondants			
No	Δ L mm. en 27,5 mois	L m.	$\Delta \varepsilon_p$ /an	Δx 27½ mois mm.	$\Delta \varepsilon_a$/an = $\Delta \varepsilon_p$ x K	tirant No	Tension V° t.	dès 1973 T année
41/1	-1,3	9,65	----	-1.59	----			
2	+2,7	18,96	6,2 x 10^{-5}	+3.31	6.2 x 10^{-5}	41/a 41/b	35 90	64 64
3	+3,2	29,69	4,85 x "	+4.05	4.9 x "	41/c	145	82
4	+3,3	37,38	8,83 x "	+4.05	---			
59/1	-0,3	9,46	----	-0.44	---			
2	+0,7	18,55	1,66 x "	+0.86	1.7 x "	59/a 59/b	35 90	240 240
3	+0,9	29,27	1,35 x "	+1.10	1.4 x "	59/c	145	296
4	+3,9	39,44	4,35 x "	+4.78	---			
68/1	-0,7	9,88	----	+0.86	---			
2	0	18,87		0	0 x "	68/a 68/b	35 90	∞
3	+0,4	25,46	0,69 x "	+0.49	0.69 x "	68/c	145	580
4	+1,9	38,08	2,19 x "	+2.33	---			
Δx = 1,46		Δ L mm			$T = \frac{4 \times 10^{-3}}{\Delta \varepsilon \text{ /an}}$			

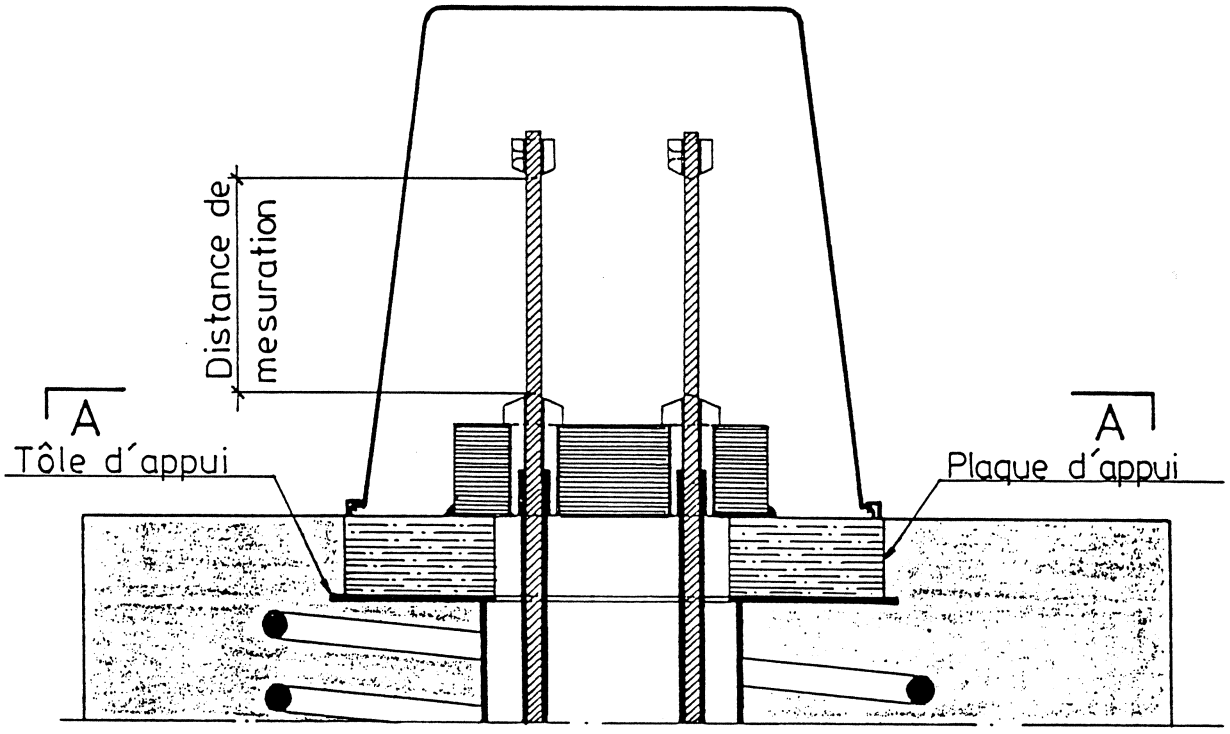
MUR PIEUX-TIRANTS DU LANCIAU

INSTRUMENTATION TYPE DU MUR

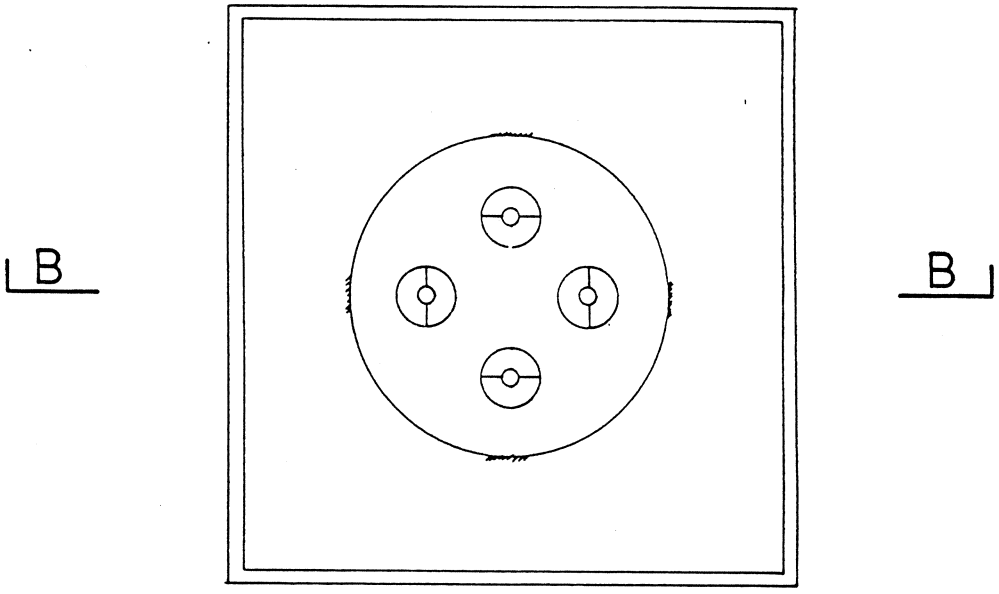
(PIEU Nº 41 PROFIL K.M 17,263)

Echelle : 1:250





COUPE B-B



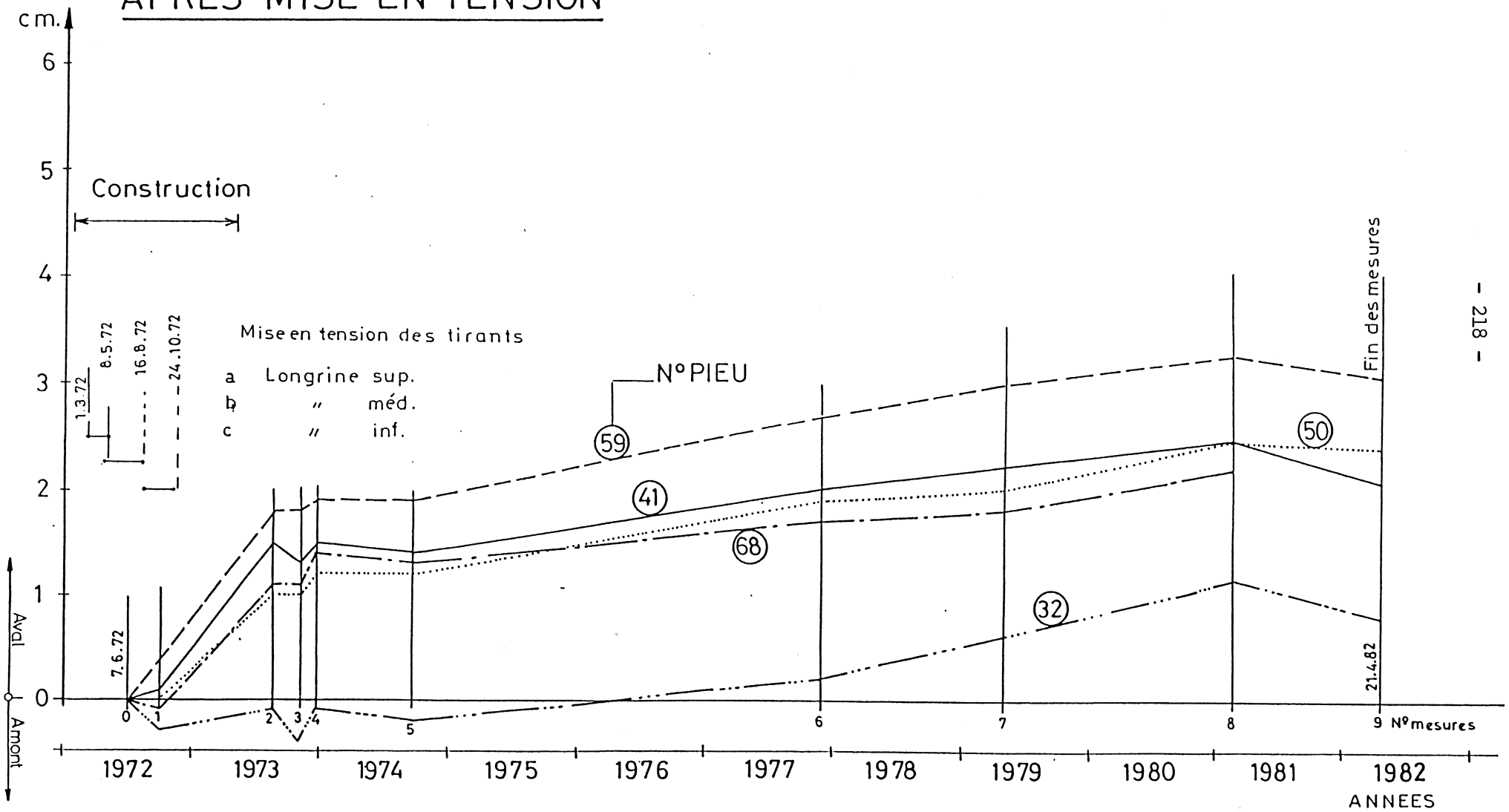
Vue en plan A-A

Dispositif de mesure	Genève le 4.10.80		170-15

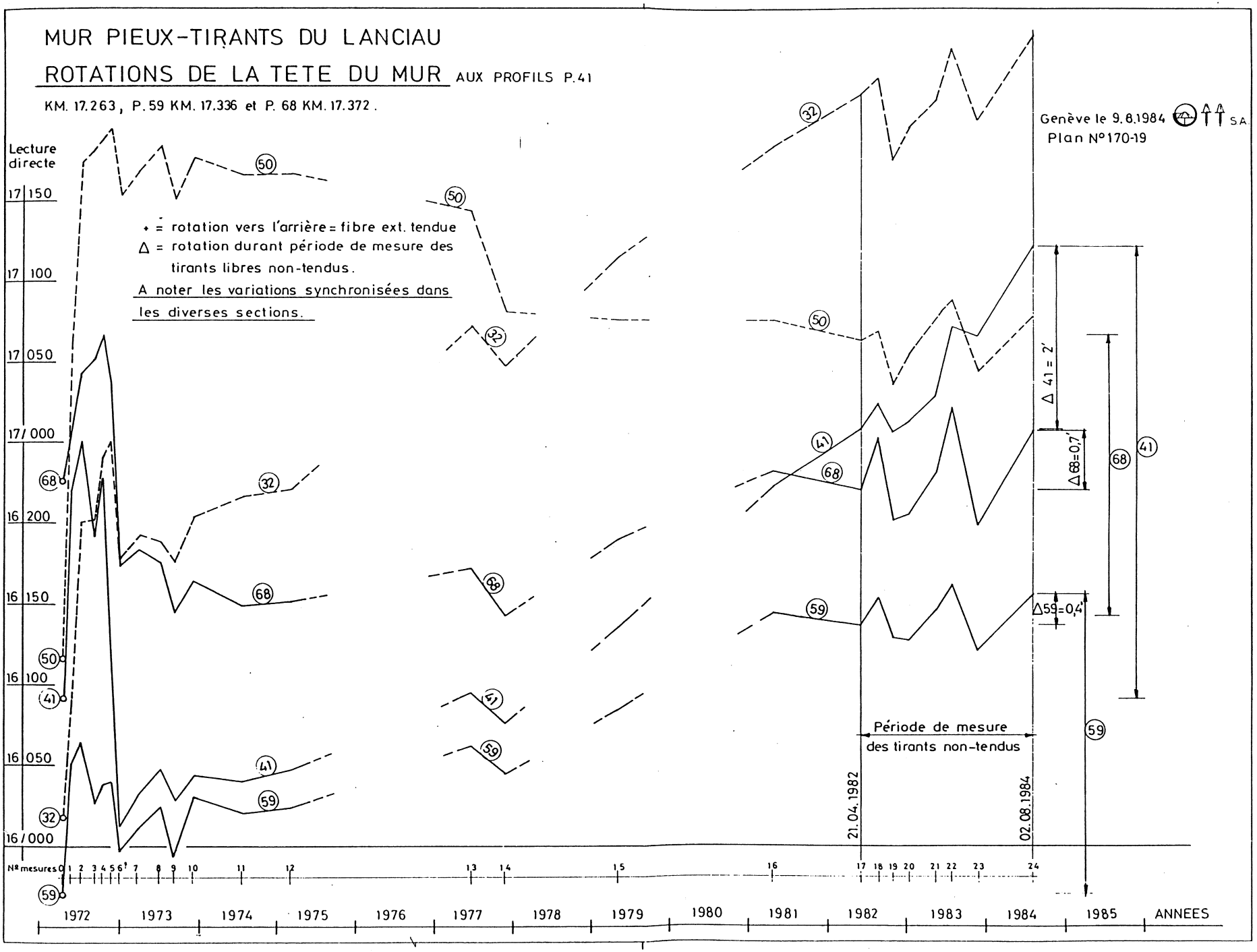
MUR PIEUX TIRANTS DU LANCIAU

Genève, le 03.04.1985

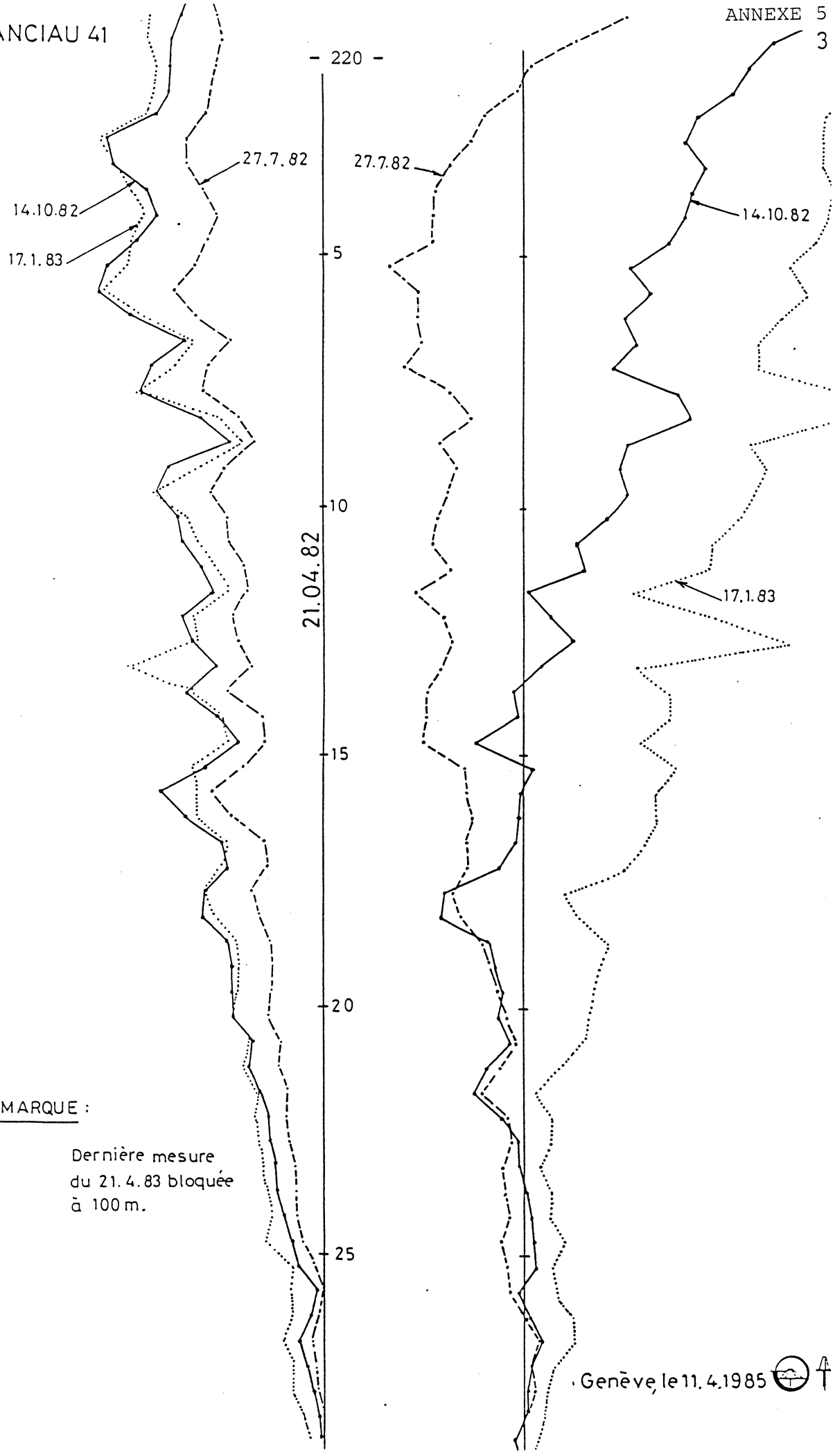
DEPLACEMENTS des POINTS DE POLYGONE APRES MISE EN TENSION



ANNEXE 3


MUR PIEUX-TIRANTS DU LANCIAU
ROTATIONS DE LA TETE DU MUR AUX PROFILS P.41
KM. 17.263, P.59 KM. 17.336 et P. 68 KM. 17.372.
Genève le 9.8.1984
Plan N°170-19
S.A.
Lecture directe
17 150
17 100
17 050
17 000
16 200
16 150
16 100
16 050
16 000
+ = rotation vers l'arrière = fibre ext. tendue
Δ = rotation durant période de mesure des tirants libres non-tendus.
A noter les variations synchronisées dans les diverses sections.
Δ 41 = 2'
Δ 68 = 0,7'
Δ 59 = 0,4'
Période de mesure des tirants non-tendus
21.04.1982
02.08.1984
N° mesures
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
ANNEES

LANCIAU 41

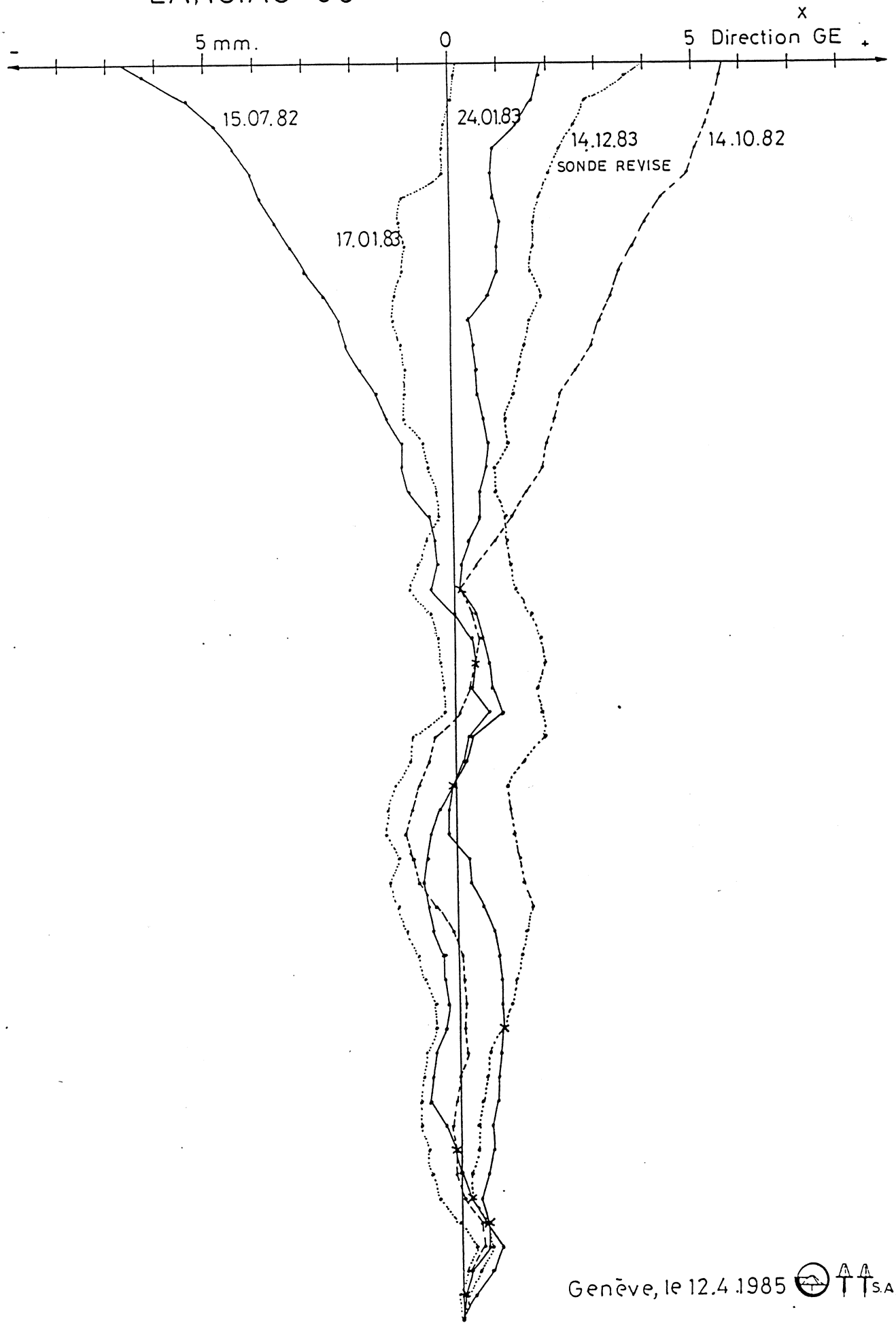


REMARQUE :

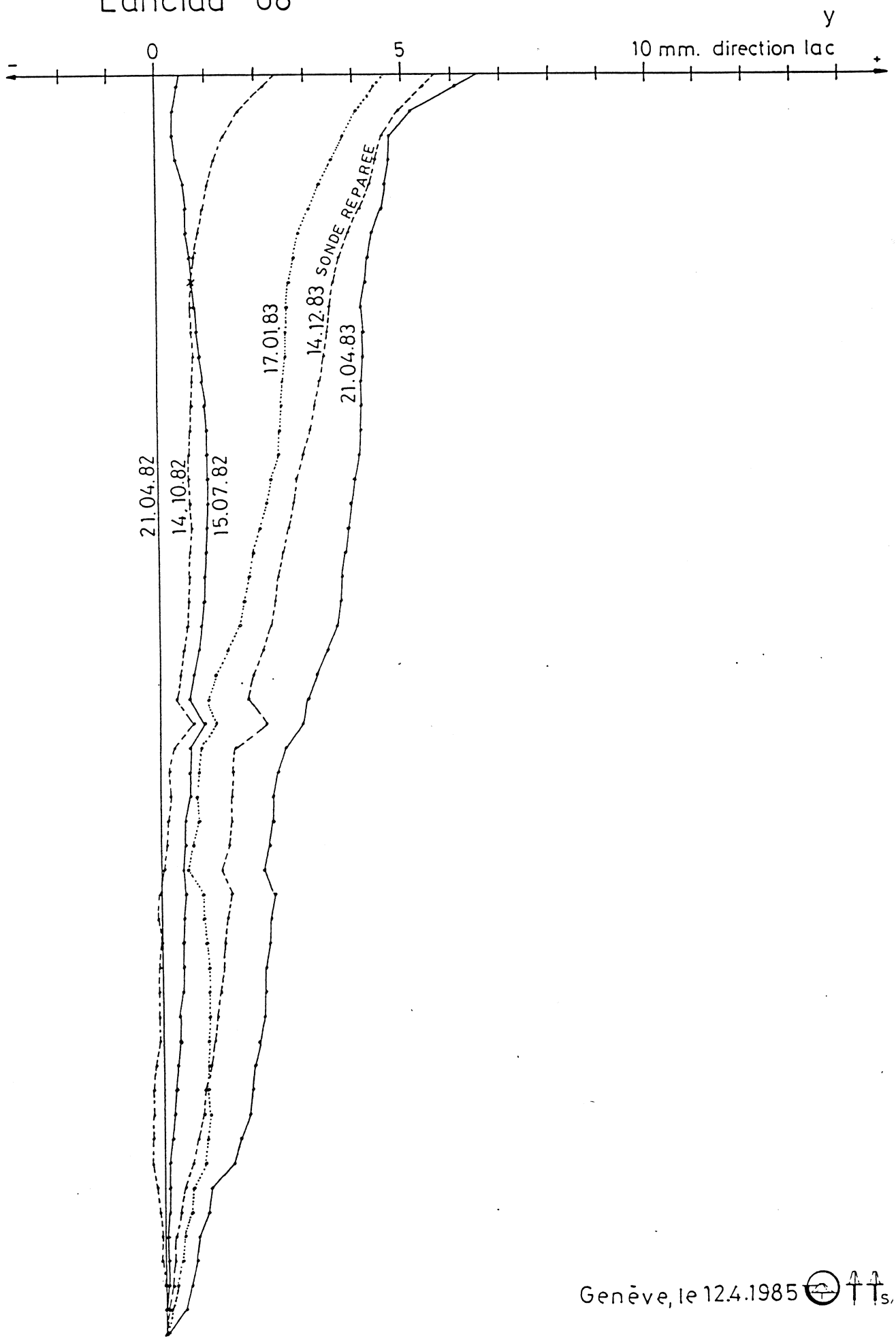
Dernière mesure du 21.4.83 bloquée à 100 m.

Genève, le 11.4.1985

LANCIAU 68

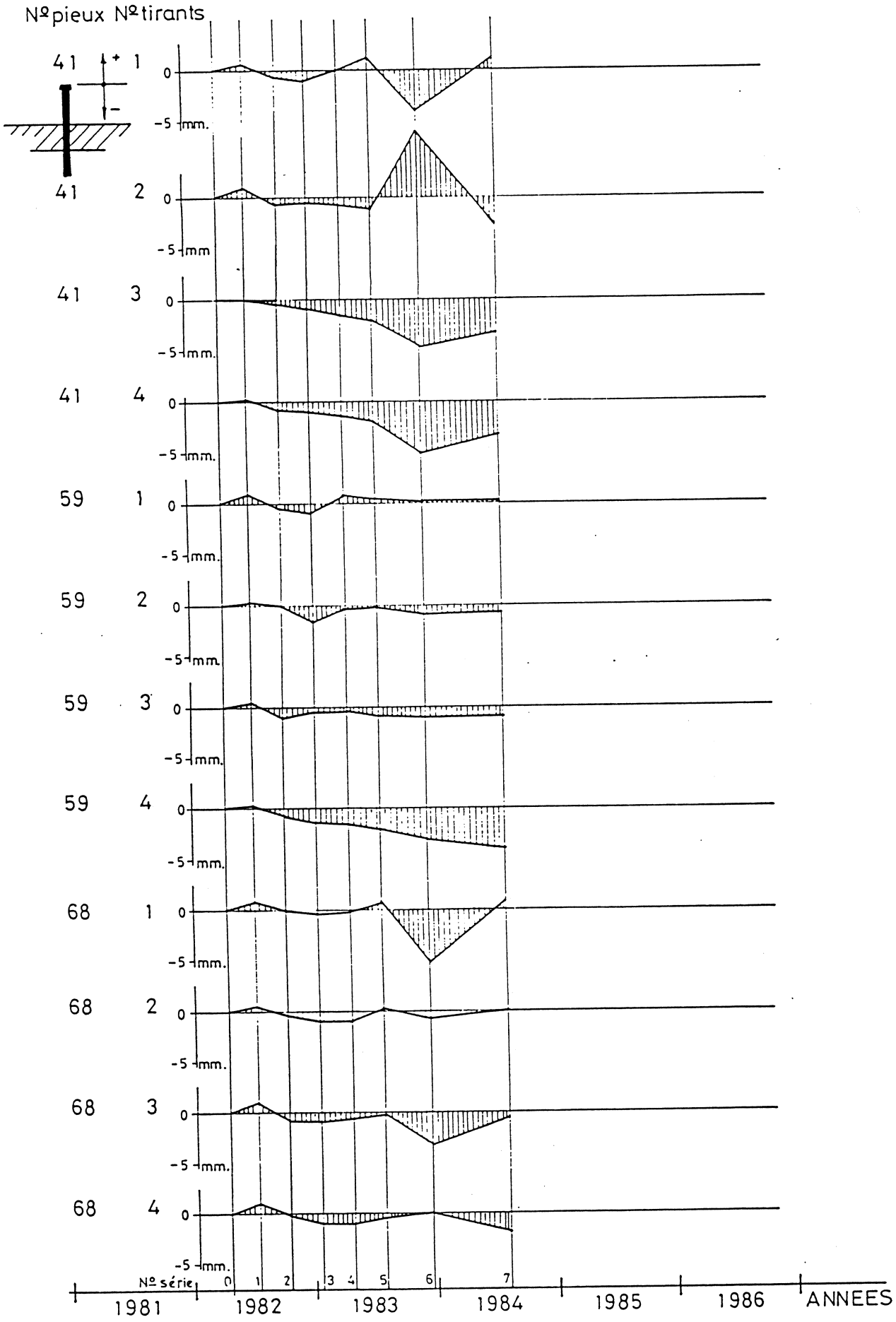


Genève, le 12.4.1985 S.A.



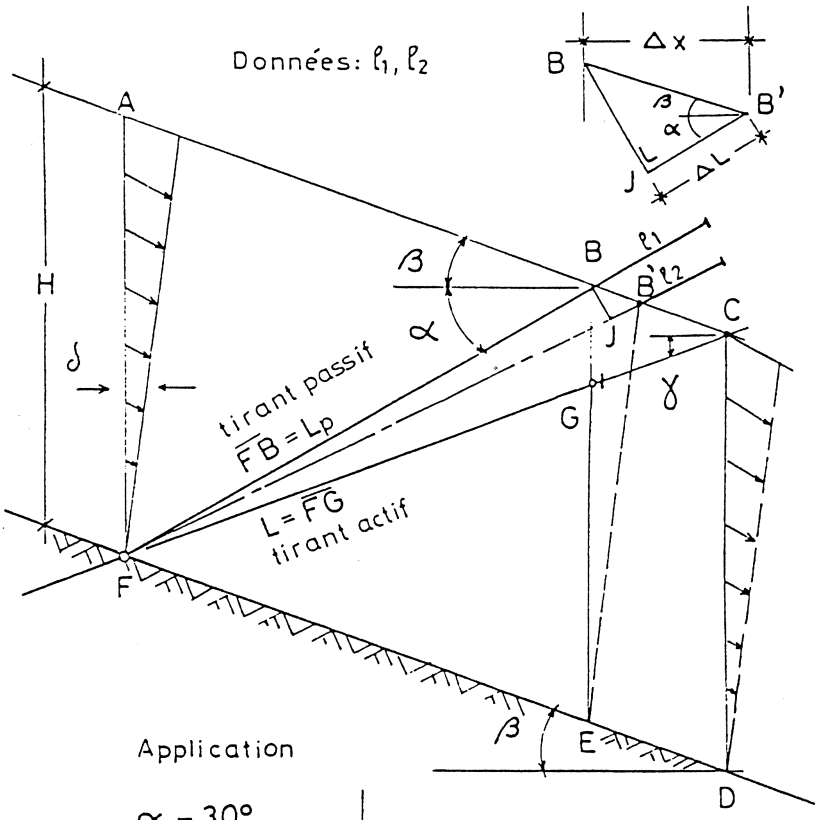
Genève, le 12.4.1985

MUR PIEUX-TIRANTS DU LANCIAU_MOUVEMENTS DES TETES DE TIRANTS NON-TENDUS PAR RAPPORT A LA PLAQUE DE BASE



J-C OTT sa Plan nº 170-21 Genève le 10.08.1984

FLUAGE PARALLELE A LA SURFACE



Application

$\alpha = 30°$

$\beta = 20°$

$\Delta x = 1{,}46 \ (\ell_2 - \ell_1)$

Tirant passif

$$\Delta x = \Delta L_p \cdot \frac{\cos\beta}{\cos(\beta+\alpha)}$$

$\Delta L_p = \ell_2 - \ell_1$

sur FB.

$$\varepsilon_{sol} = \frac{\Delta L}{L_p}$$

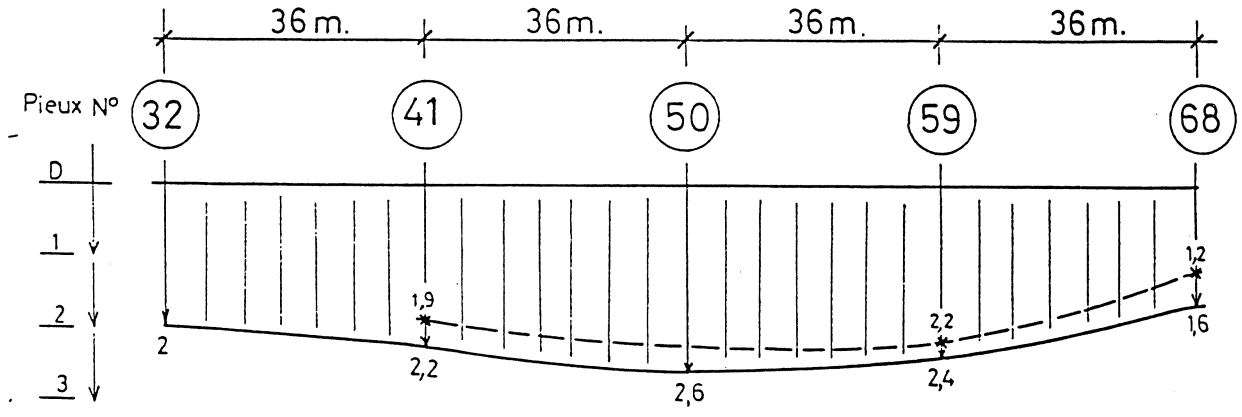
Tirant actif

sur FC

$$\Delta L_a = \Delta x \ \frac{\cos(\beta+\gamma)}{\cos\beta}$$

$$= \Delta L_p \ \frac{\cos(\beta+\gamma)}{\cos(\beta+\alpha)}$$

$$\Delta \varepsilon_{tirant} = \frac{\Delta L_p}{\overline{FC}} \ \frac{\cos(\beta+\gamma)}{\cos(\beta+\alpha)}$$



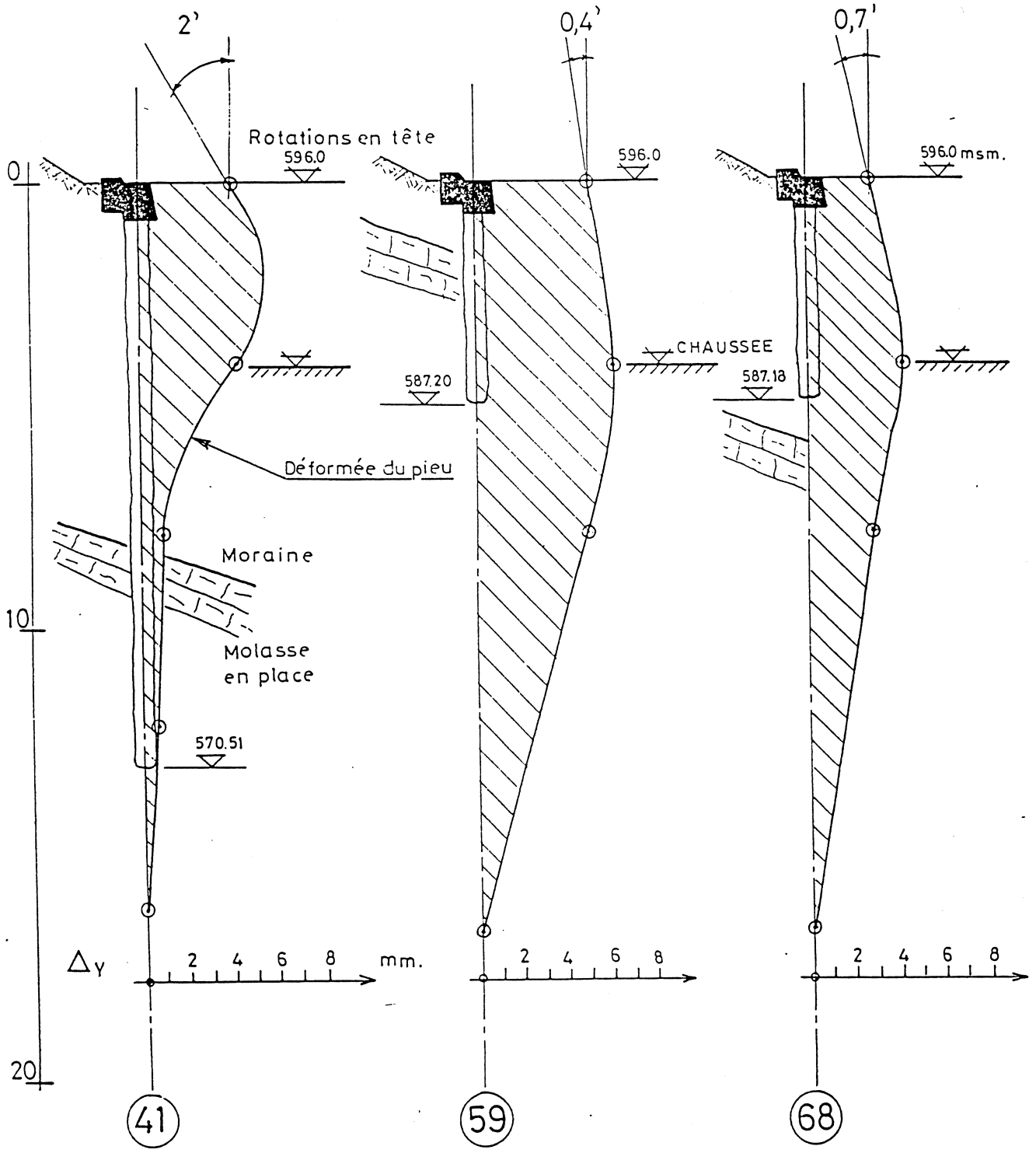
Δx mm/an

——— Mesure topographique

*– – – – – par tirants "passifs"

Genève, le 17.4.1985 OTT S.A.

DEFORMATION DU SOL DANS L'AXE DES PIEUX-PERIODE du 21.4.82 au 2.8.84 (28 mois)



N.B. Fluage admis // à surface de la molasse - Selon mesure des tirants passifs.

Genève, le 12.4.1985

3.11 VIADUCS DU CHENE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N1 (Lausanne-Yverdon) Section 140 km : 85.810-86.193

Passage de la RC 289 et de la ligne CFF Lausanne-Yverdon par deux viaducs parallèles séparés, fondés sur pieux.

Auteur du projet	Bonnard et Gardel, Lausane
Dossier géologique	J. Norbert, Lausanne et LEGEP
Dossier géotechnique	Colombi, Schmutz, Dorthe, Epalinges
Construction	1979

L'ouvrage est composé de deux ponts indépendants, sans joint sur toute sa longueur (moyenne 370 m); le tablier de 13.23 m de largeur, en béton, repose sur deux poutres en I en acier (construction mixte). La portée max. entre travées (12 travées par pont) est de 32.75 m.

Les piles en béton armé reposent sur des socles ou des entretoises coiffant les pieux.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

L'ouvrage se situe à la limite de la zone morainique du Mormont et de la Plaine de l'Orbe.

La molasse (marne et grès) se rencontre à des profondeurs variant entre 10 et 18 m. Elle est recouverte de moraine, subdivisée en deux couches : **la moraine saine,** compacte, dont l'épaisseur varie entre 0 et 10 m, et **la moraine altérée** de même composition granulométrique que la moraine saine sous-jacente mais moins résistante et altérée chimiquement par oxydation des matières fines. L'épaisseur varie de 0.5 à 5 m, cette moraine altérée allant jusqu'à la molasse côté Yverdon (pas de moraine saine). La couche **d'alluvions fines** provenant

du remplissage de la Plaine de l'Orbe se subdivise en deux : des sables plus ou moins graveleux dont l'épaisseur ne dépasse pas 2.5 m, rencontrés dans le zone centrale, et des argiles limoneuses varvées (limon argileux) avec beaucoup de matières organiques (par place couches franchement tourbeuses) sur une épaisseur atteignant 8 m. Enfin **la couche de couverture** est constituée de terre végétale et de limon argileux; elle est très compressible et varie entre 1 et 3 m d'épaisseur.

1.3 Problèmes de fondations

La qualité médiocre des terrains alluvionnaires ne permet pas d'envisager des fondations superficielles, sauf dans la partie Sud de l'ouvrage. Le maître de l'oeuvre a retenu la solution des pieux forés de grand diamètre pour tout l'ouvrage, y compris les culées.

Caractéristiques des pieux :

Type : foré et moulé dans le sol, en béton
Diamètre : 125 cm
Capacité portante : (P) 420 t
PC 460 t
Essai de charge horizontale
Longueur min. imposée : 7.00 m
Longueur max. atteinte : 13.30 m
Total : 52 pieux

En plus des charges verticales, les pieux doivent reprendre les efforts horizontaux dus aux culées et, dans le cas des culées côté Yverdon, les frottements négatifs occasionnés par le tassement du remblai d'accès d'une hauteur de 8.0 m, mis en place sur un sol très déformable.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

Les repères, utilisés pour le nivellement, sont des chevilles scellées sur chacune des piles et des culées. En tout, ce ne sont pas moins de 52 points qui sont pris en considération lors de chaque campagne de nivellement (voir annexe 11/1).

3. RESULTATS DES MESURES

La première de ces campagnes eut lieu en novembre 1977 pour le viaduc S-W (ou viaduc gauche) et en août 1978 pour le pont N-E (ou viaduc droit).

Le viaduc S-W a été nivelé 5 fois jusqu'à l'ultime mesure de juin 1982, alors que celui situé au N-E ne fut nivelé que trois fois jusqu'à cette même date. Ces différentes mesures sont reportées sur les pages suivantes.

Les tasssements ont été reportés graphiquement sur les annexes 11/2 et 3.

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

Hormis l'évolution en parallèle des tassements sur les quatres axes longitudinaux, on remarque :

- une diminution de la vitesse des tassements en fonction du temps;
- une diminution de l'importance des tassements en allant de l'extérieur du viaduc gauche à l'extérieur du viaduc droit;
- une évolution différente des tassements, au droit de la culée côté Yverdon, de celle du reste des ouvrages.

Les vitesses moyennes des tassements décroissent fortement avec le temps, comme le montre le tableau I ci-dessous :

Tableau I

Période / Axe longitudinal	1ère mesure au 02.08.78 mm/an	02.08.78 au 15.05.79 mm/an	15.05.79 au 06.06.82 mm/an
Viaduc gauche ext.	13.8	19.6	1.2
Viaduc gauche int.	14.2	7.6	0.8
Viaduc droit int.	-	10.1	0.8
Viaduc droit ext.	-	8.7	0.7

Cette diminution est aussi valable au droit des culées; cependant, il faut remarquer que, lors de la dernière période, les vitesses de tassements sont trois fois supérieurs aux vitesses relevées sur les viaducs (cf. tableau II).

Tableau II

Période / Axe longitudinal	1ère mesure au 02.08.78 mm/an	02.08.78 au 15.05.79 mm/an	15.05.79 au 06.06.82 mm/an
Repère No 25	14.4	13.3	3.2
Repère No 26	19.2	14.7	2.9
Repère No 75	-	16.0	2.6
Repère No 76	-	14.7	2.6

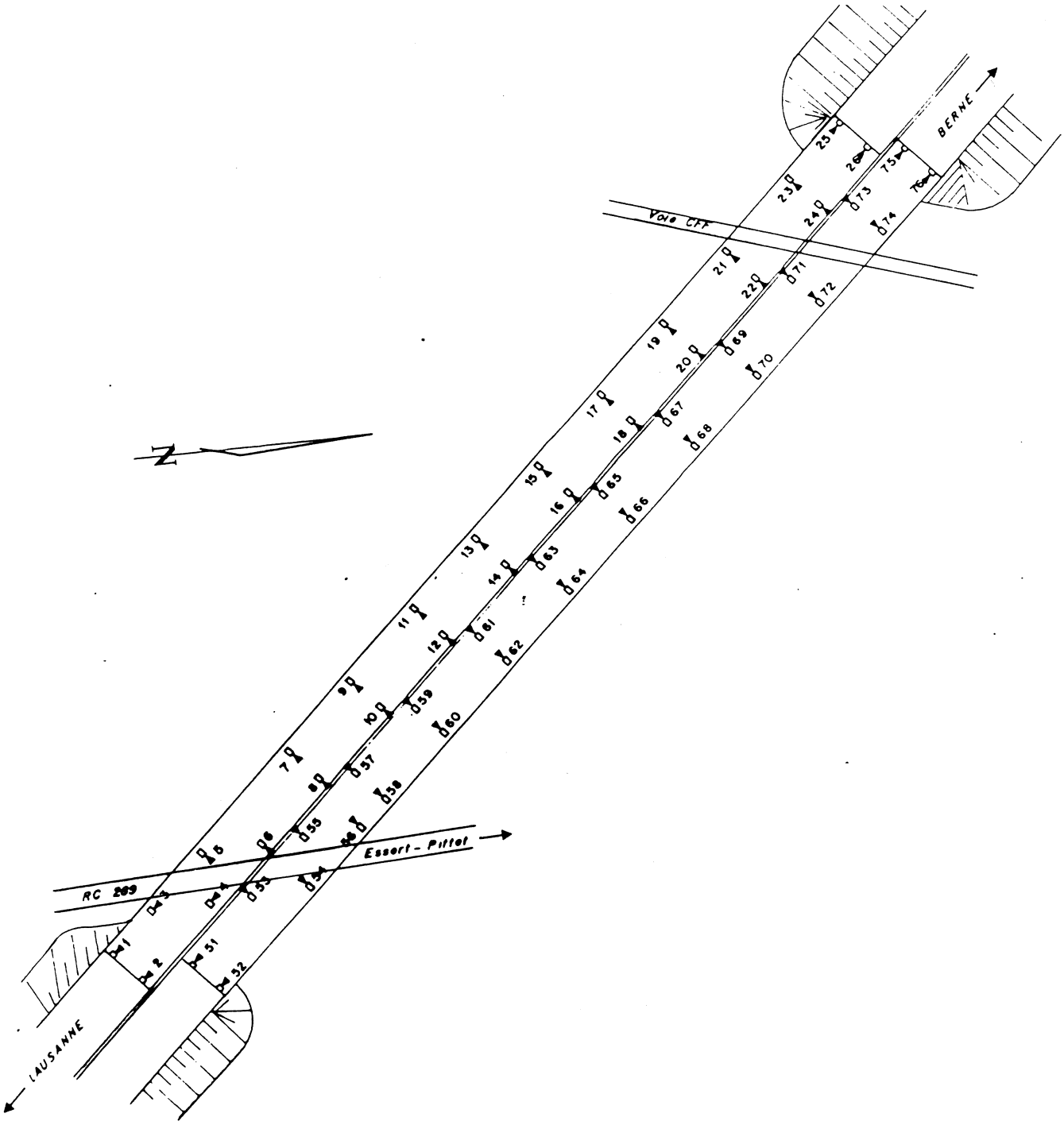
5. PROPOSITION DE PROSPECTIONS ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

Le dispositif de mesure actuel paraît suffisant pour permettre un suivi des tassements avec une fréquence de deux à trois ans.

6. CONCLUSIONS

Bien que l'ouvrage présente des mouvements, ces derniers montrent une diminution sensible à chaque nouvelle campagne de mesures. le comportement des fondations de cet ouvrage est satisfaisant et ne comporte aucune surprise.

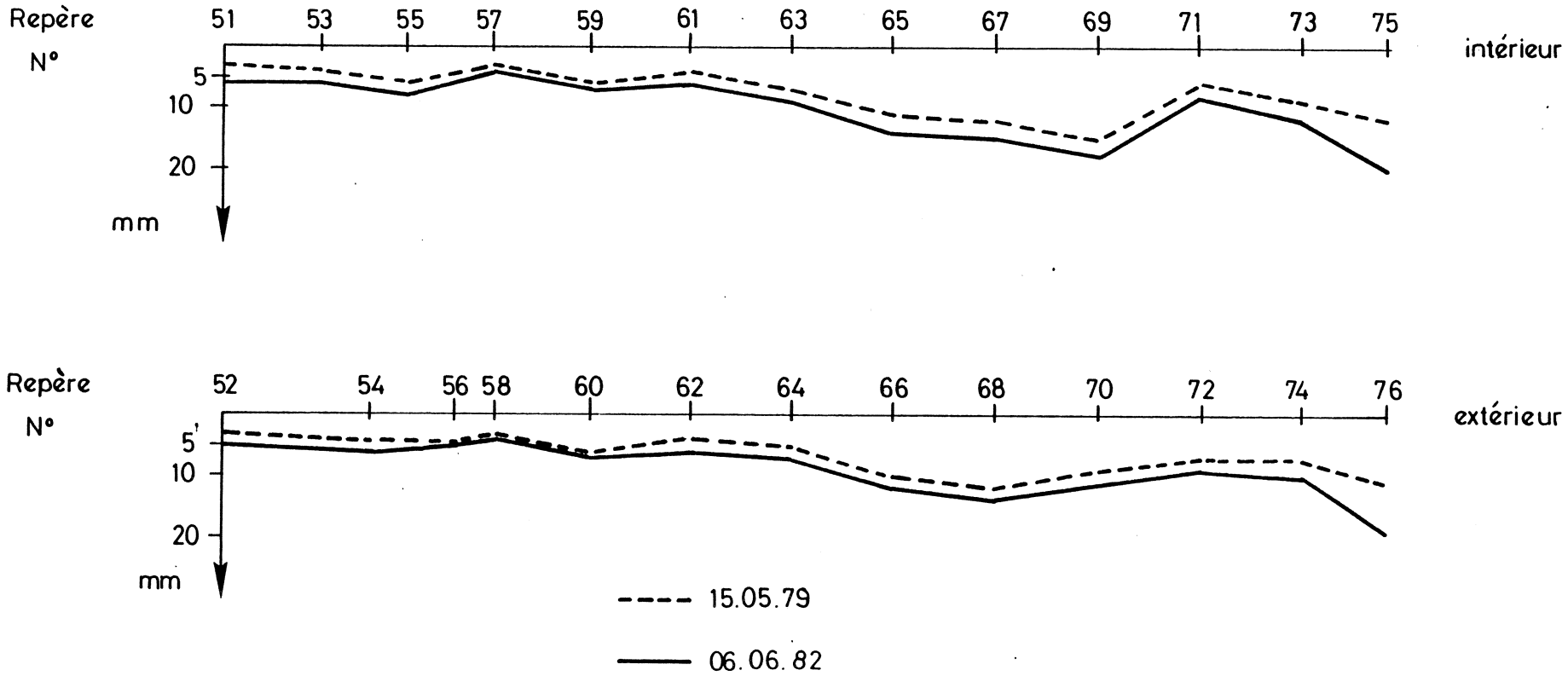
SITUATION DES REPERES



Viaducs du Chêne

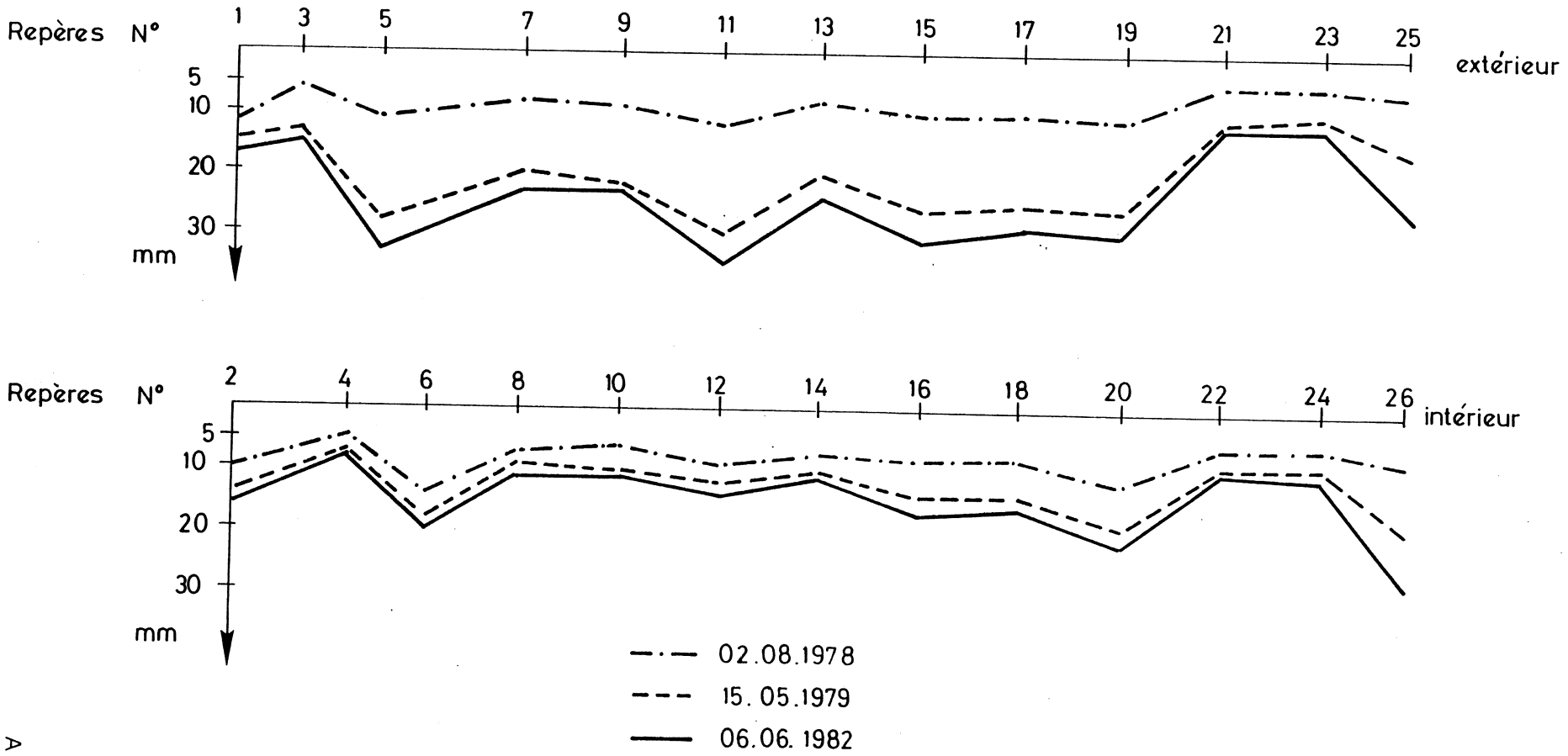
Tassments viaduc droit

(mesures initiales du 02.08.78)



Viaducs du Chêne

Tassements viaduc gauche
(mesures initiales du 03.11.77 et mars 1978)



3.12 VIADUCS D'EPENDES

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N1 (Lausanne-Yverdon) | Section 144 | km : 91.087-91.692

Passage de la ligne CFF Lausanne-Yverdon par deux viaducs parallèles séparés, fondés sur pieux.

Auteur du projet	Perret-Gentil, Rey, Yverdon
Dossier géotechnique	LEGEP, Lausanne
Construction	1979

Deux ponts séparés, d'une longueur de 605 m, avec tabliers de 13.04 m, de largeur en béton coulé sur place, sur prédalles nervurées préfabriquées. Celles-ci reposent sur deux poutres longitudinales préfabriquées précontraintes. Les 2 ^{s} 20 travées de 31.0 m de chaque côté du passage de la ligne CFF (portée max. 38.6 m), sont supportées par deux piles circulaires en béton armé qui s'appuient sur une entretoise coiffant deux pieux de gros diamètre.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

L'ouvrage se situe entièrement dans la Plaine de l'Orbe. Aucune couche rocheuse ou morainique n'a été rencontrée jusqu'à la profondeur max. de 40 m atteinte par certains sondages.

Après une première couche d'environ 3 m de limon argileux de surface, avec matières organiques, nous trouvons des limons crayeux, craies lacustres et tourbe sur une épaisseur d'environ 5 m. Entre 8 et 15 à 20 m de profndeur, les couches de limon sont d'abord sableuses sur environ 3 à 7 m pour ensuite devenir argileuses. Ces couches de qualité très médiocre recouvrent une épaisse couche de sable fin, peu limoneux. Sous ces derniers des limons argileux ont été rencontrés dans quelques sondages.

La nappe phréatique est très proche du niveau du terrain; il n'est pas rare de trouver les alentours du site partiellement submergés.

1.3 Problèmes de fondations

Devant les médiocres caractéristiques géotechniques du sous-sol, les projeteurs n'ont pas eu d'autres alternatives que de fonder l'ouvrage sur pieux. La présence des talus de la ligne CFF et des remblais d'accès aux viaducs, déjà en construction a éliminé l'option de pieux battus, ne laissant que la solution des pieux forés travaillant en frottement latéral et en pointe dans les sables fins rencontrés au-dessous de 15 à 20 m.

Caractéristiques des pieux :

- Type : foré sous bentonite et moulé dans le sol, en béton
- Particularité : tubé sur toute la longueur
- Diamètres : 100 cm
- Capacité portante : 430 t
- Essai : sur pieu équivalent ø 80 essayé à 600 t
- Longueur max. : 34.80 m
- Longueur min. : 25.50 m
- Total : 93 pieux

Les culées sont également fondées sur des pieux identiques à ceux des piles : outre les efforts verticaux, ces pieux sont soumis aux efforts horizontaux dus aux pressions des terres sur les culées et aux frottements négatifs occasionnés par le tassement des remblais d'accès, assis sur des sols très déformables.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

Les repères, utilisés pour le nivellement, sont des chevilles scellées sur chacune des piles et des culées. 78 points sont ainsi pris en considération lors de chaque campagne de nivellement (voir annexe 12/1).

3. RESULTATS DES MESURES

La première de ces campagnes eut lieu en juin 1978 pour le viaduc gauche et entre novembre 1978 et janvier 1979 pour le viaduc droit.

Le viaduc gauche a été nivelé entièrement cinq fois jusqu'à l'ultime mesure de mars 1982, alors que celui de droite ne fut nivelé que quatre fois jusqu'à cette même date. Ces différentes mesures sont reportées sur les pages suivantes.

Les tassements ont été reportés graphiquement sur les annexes 12/2 et 3.

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

Hormis l'évolution en parallèle des tassements sur les quatres axes longitudinaux des viaducs, on remarque :

- une évoltuion différente de ceux-ci, au droit des culées côté Lausanne, de celle du reste de l'ouvrage;
- une évolution différente des tassements à l'extérieur de l'ouvrage gauche;
- une diminution générale de l'importance des tassements en fonction du temps.

Les vitesses moyennes des tassements décroissent régulièrement avec le temps, comme l'indique le tableau I ci-après. Les tassements annuels actuels sont, comme on le remarque, encore assez prononcés.

Tableau I

Axe longitudinal \ Période	1ère mesure au 10.11.78 mm/an	10.11.78 au 13.06.79 mm/an	13.06.79 à mars 82 mm/an
Viaduc gauche ext.	17.2	6.9	5.5
Viaduc gauche int.	20.1	7.0	2.6
Viaduc droit int.	-	11.3	3.7
Viaduc droit ext.	-	12.0	3.6

Cette diminution se constate également au droit des culées. Cependant, les tassements mesurés y sont supérieurs à ceux observés au droit des piles (cf. tableau II).

Tableau II

Repères \ Période	1ère mesure au 10.11.78 mm/an	10.11.78 au 13.06.79 mm/an	13.06.79 à mars 82 mm/an
1	21	10.3	8.9
2	19.2	10.3	12.0
52	-	12.0	12.6
39	24.0	6.9	4.9
40	14.4	8.6	4.9
90	-	12.0	4.4

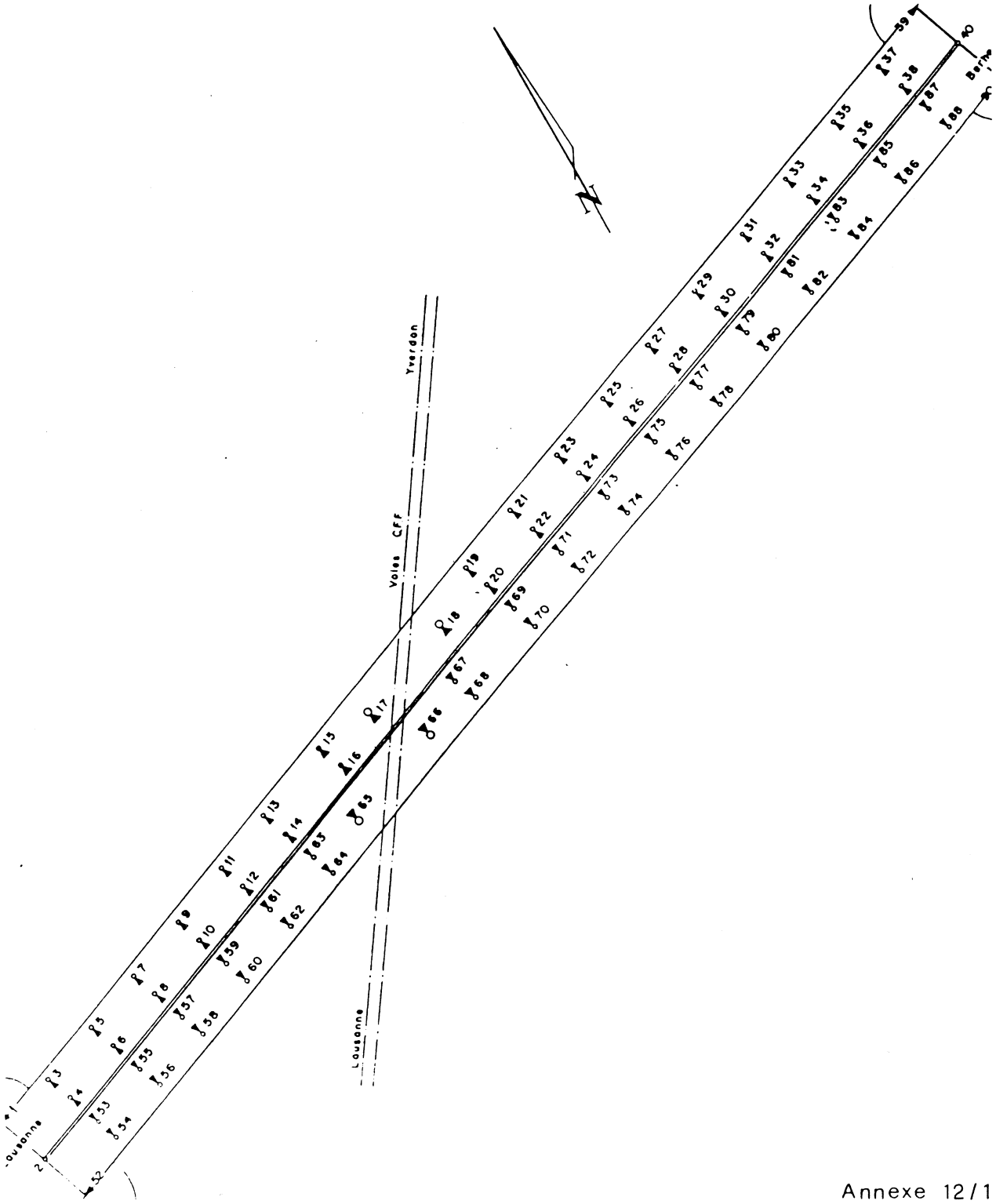
5. PROPOSITION DE PROSPECTIONS ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

Le dispositif de mesure actuel paraît suffisant pour permettre un suivi des tassements avec une fréquence de deux à trois ans.

6. CONCLUSIONS

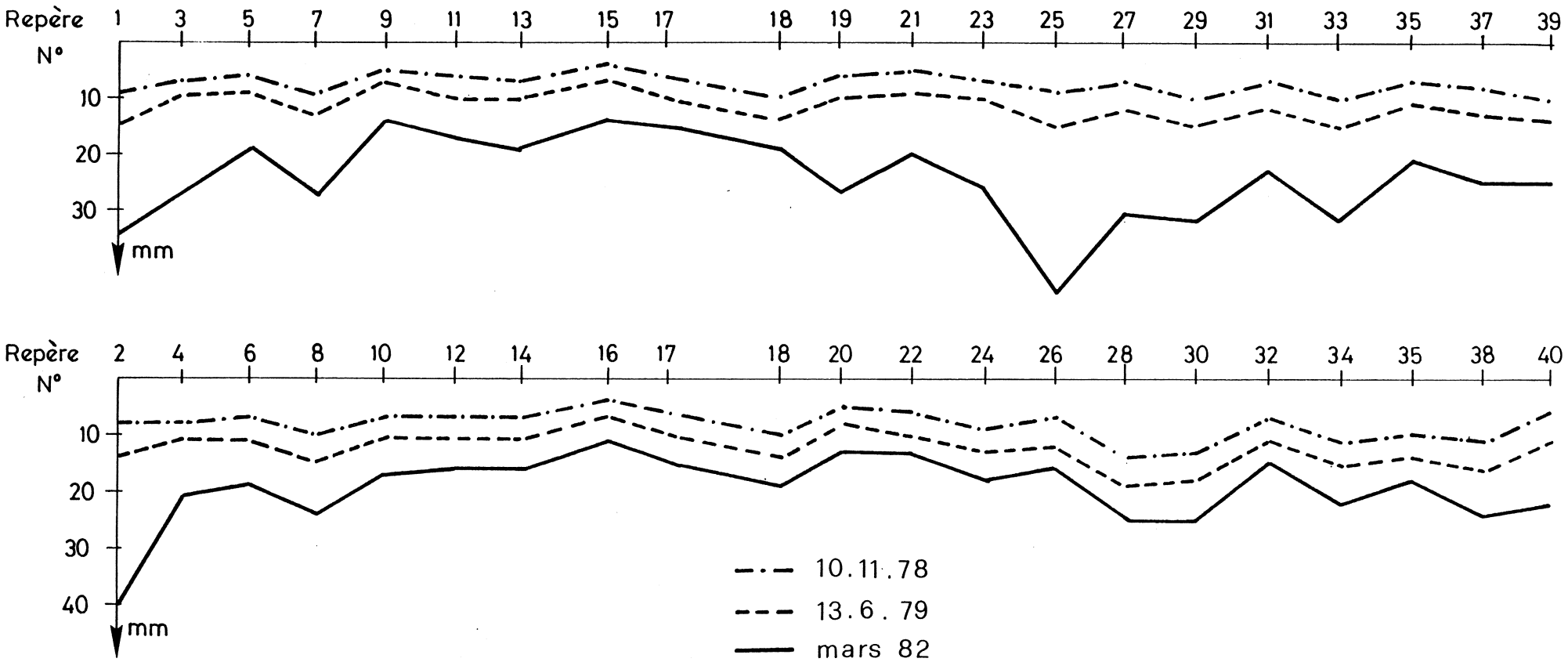
Bien que l'ouvrage présente des mouvements, ces derniers montrent une diminution sensible d'année en année. On peut admettre que le comportement des fondations de ce pont est satisfaisant.

SITUATION DES REPERES



Viaducs d'Ependes

Tassements viaduc gauche
(mesures initiales du 02.06.78 et 26.07.78)

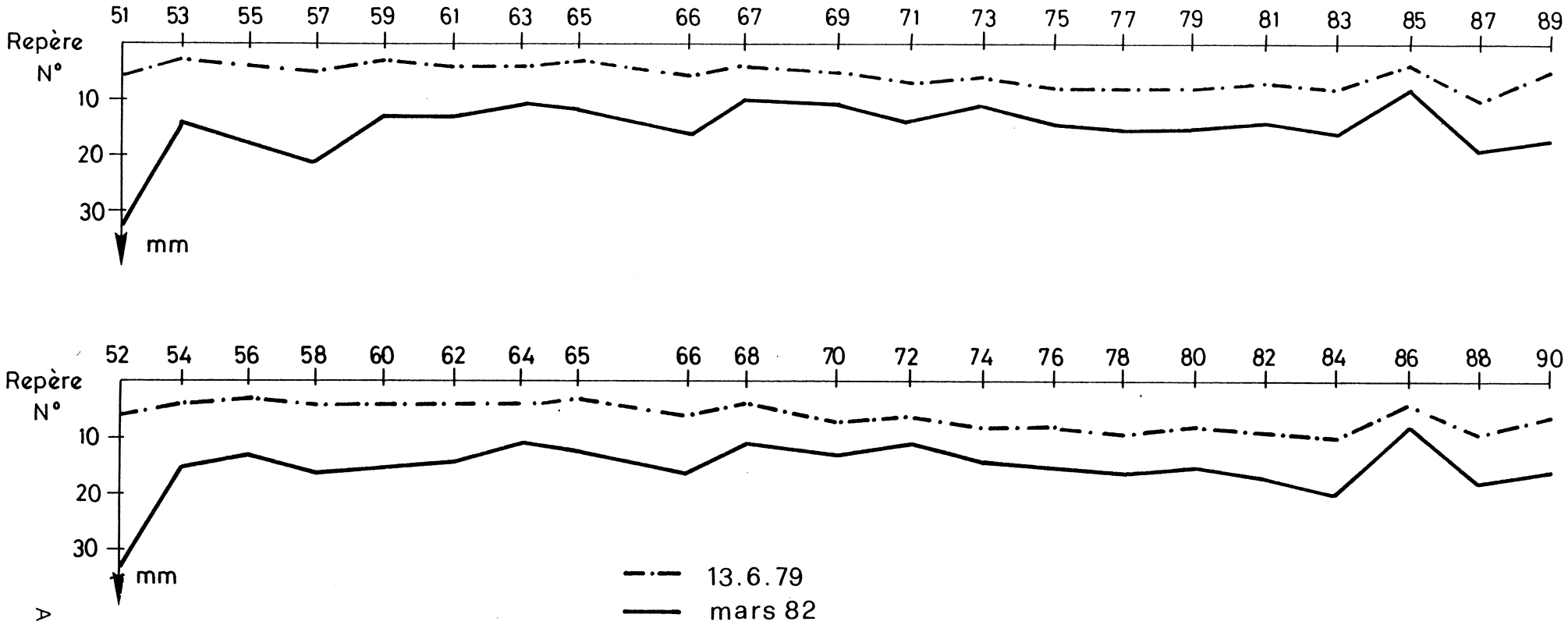


Annexe 12 / 2

Viaducs d'Ependes

Tassements viaduc droit

(mesures initiales de nov 78 à janvier 79)



Annexe 12/3

3.13 VIADUCS D'YVERDON

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description de l'ouvrage

Route nationale N5 Sections 501, 502 et 503 km : 1.260-4.415
(Autoroute Yverdon-Neuchâtel)

Traversée en viaduc de toute la Plaine d'Yverdon, zone géotechniquement très défavorable, par un pont sur pieux flottants.

Auteur du projet	Perret-Gentil et Rey,Girard et Janin
Dossier géologique	J. Norbert, Lausanne
Dossier géotechnique	H.B. de Cérenville, Lausanne
Construction	1979-1982

Cet ouvrage, long de 3'155 m et large d'environ 23 m, est divisé en cinq tronçons séparés par des joints de dilatation. Deux piles circulaires, coiffées d'une entretoise coulée sur place, supportent chacune des 96 travées de la superstructure composée d'éléments préfabriqués en béton précontraint. Chaque pile est solidaire d'un socle octogonal ou hexagonal qui relie un groupe de six à huit pieux; le nombre et le type de pieux dépendent des conditions géotechniques qui varient le long du tracé de l'ouvrage.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

Le profil en long géotechnique de la Plaine de l'Orbe à l'axe du tracé est constitué de couches d'épaisseur variable de matériel sédimentaire, grossier à très fin, souvent organique.

On distingue deux zones à caractère fortement différencié :

- De la culée côté Lausanne au canal Occidental, des terrains très fins de très faible compacité, craies, sables limoneux ou limons argileux avec des matières organiques en quantité parfois considérable jusqu'à une profondeur de 8.0 m. La compacité augmente en profondeur pour être qualifiée de moyenne dès 10.0 m.

- Du canal Occidental à la culée côté Neuchâtel, une couche d'environ 6.0 m de tourbes, limons organiques ou argileux, craies, suivie de graviers limono-argileux, avec plus en profondeur (au-delà de 30 m) des sables limono-argileux; si la compacité des couches supérieures fines est très faible, celle du gravier est par contre élevée, qualifiée de bonne à très bonne.

  Le niveau de la nappe phréatique fluctue selon les conditions météorologiques mais reste souvent très proche du niveau du sol.

1.3 Problèmes de fondations

Vu les qualités médiocres des couches allant jusqu'à 6 à 8 m de profondeur suivant les régions, les projeteurs n'ont pas eu d'autres alternatives que de prévoir des fondations profondes sous forme de pieux.

Le rapport géotechnique subdivise le tracé en cinq tronçons en recommandant le ou les types de pieux adaptés aux conditions particulières du sous-sol.

La solution définitive a retenu trois types de pieux dont la répartition est réalisée comme suit :

a) de la culée côté Lausanne au profil 22 + profil 29, y compris la culée	Pieux battus, préfabriqués, injectés sur toute la longueur type LS Diamètres : béton 50 cm avec injection env. 75 cm Capacité portante : (P) 136 t (C+P) 160 t Charge d'essai : 240 t et 280 t Prof. max. atteinte : 22.0 m Nombre de pieux : 324 Longueur totale : 5'009 m

b) du profil 23 jusque et y compris la culée côté Neuchâtel sans le passage du canal d'Entreroches	Pieux battu, moulés dans le sols, non-injectés, avec vulve type Zeiss 1 Diamètre : fût : 50 cm bulbe à la base 85 cm Capacité portante : (P) 110 t (C+P) 140 t Charge d'essai : 210 t et 300 t Prof. max. atteinte : 22.0 m Nombre de pieux : 1'033 Longueur totale : env. 15 km
c) le passage du canal d'Entreroches	Pieux forés sous bentonite et moulés dans le sol Chemise permanente sur les 8 premiers mètres Diamètre : 150 cm partie inférieure non chemisée 140 cm partie supérieure chemisée Capacité portante : 1'200 t Pas d'essai de charge Nombre de pieux : 8 Prof. max. atteinte : 40.5 m Longueur totale : 252 m

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

2.1 Nivellement

Les repères, utilisés pour le nivellement, sont des chevilles scellées sur chacune des piles et des culées. 210 points sont ainsi pris en considération lors de chaque campagne de nivellement (voir annexe 13/1)

3. RESULTATS DES MESURES

La première campagne partielle de mesures eut lieu le 8 octobre 1979, à partir de la culée côte Berne (points 831 à 964). Les autres mesures initiales ont été faites au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Le dernier nivellement initial a été exécuté le 20 janvier 1982 (points 1 à 102). Tous les points ont été nivellés en octobre 1982.

Toutes ces mesures sont reportées sur les annexes 13/2 à 13/6.

Une vue d'ensemble des tassements totaux est donnée à l'annexe 13/7

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

Hormis l'évolution en parallèle de ces tassements sur les deux axes longitudinaux nivelés, on observe :

- une diminution de l'importance des tassements en fonction du temps,
- des tassements importants au droit de la culée côté Lausanne.

5. PROPOSITION DE PROSPECTIONS ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

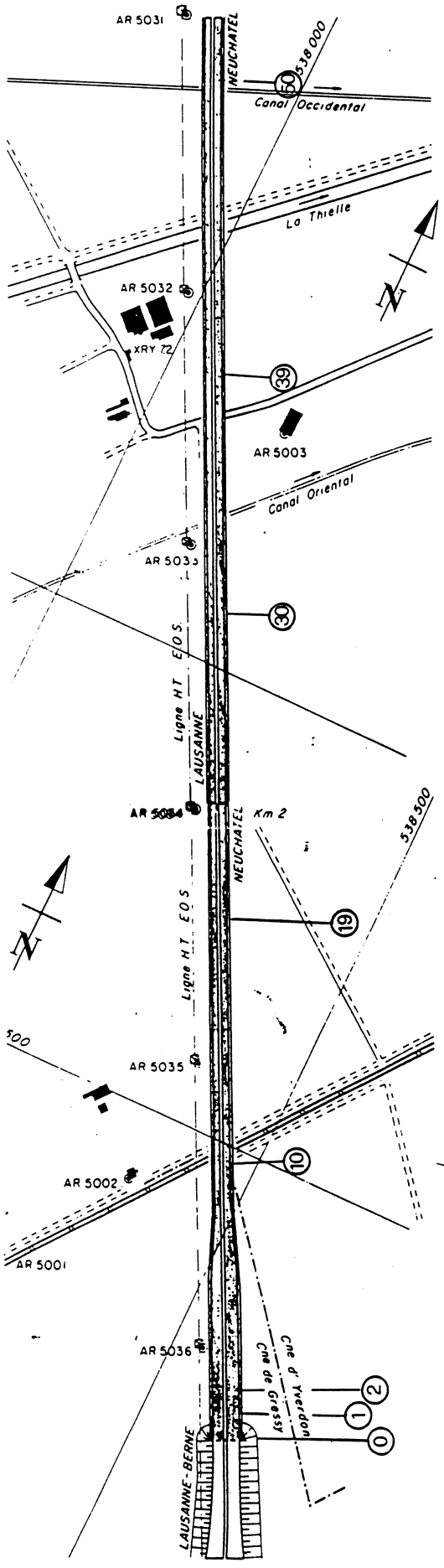
Le dispositif de mesure actuel paraît suffisant pour permettre un suivi des tassements avec une fréquence de deux à trois ans.

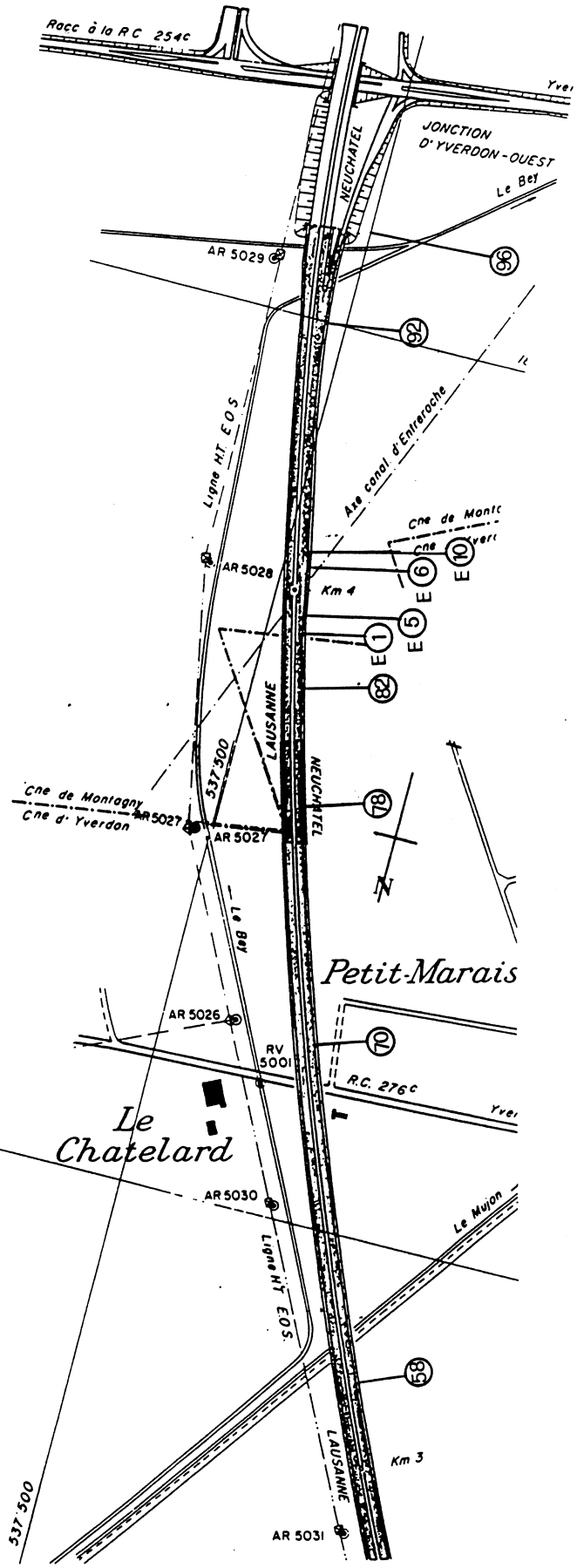
Aucune prospection ou essais complémentaires ne sont donc nécessaires.

6. CONCLUSIONS

Les tassements mesurés étaient prévus; ils diminuent sensiblement à chaque nouvelle campagne de mesures. Le comportement des fondations de cet ouvrage est satisfaisant.

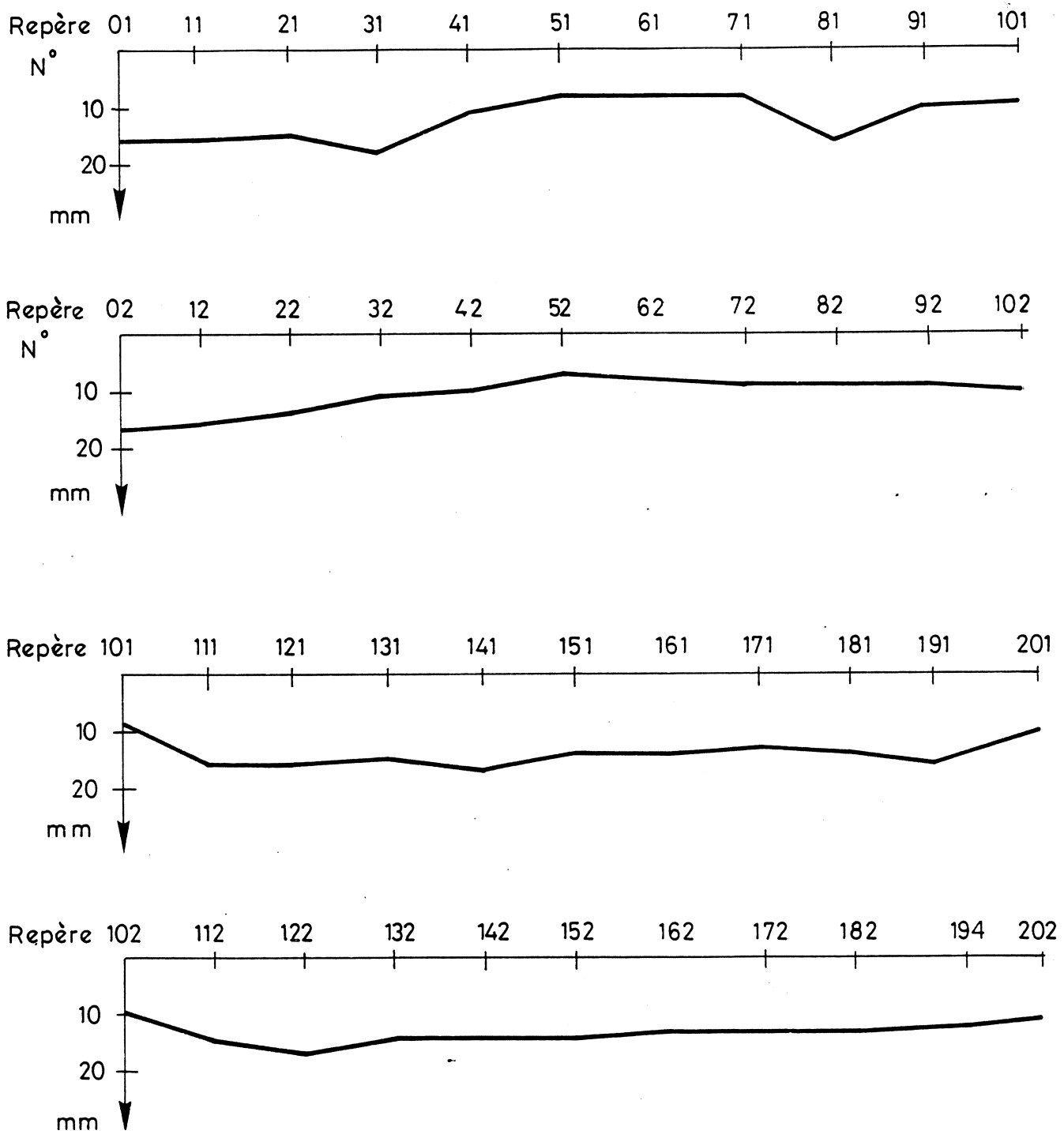
SITUATION DES REPERES





Viaducs d'Yverdon

Tassements de Cullée 0
à pile 20
(mesures initiales de 20/01/82
et septembre 81)



mesures d'octobre 1982

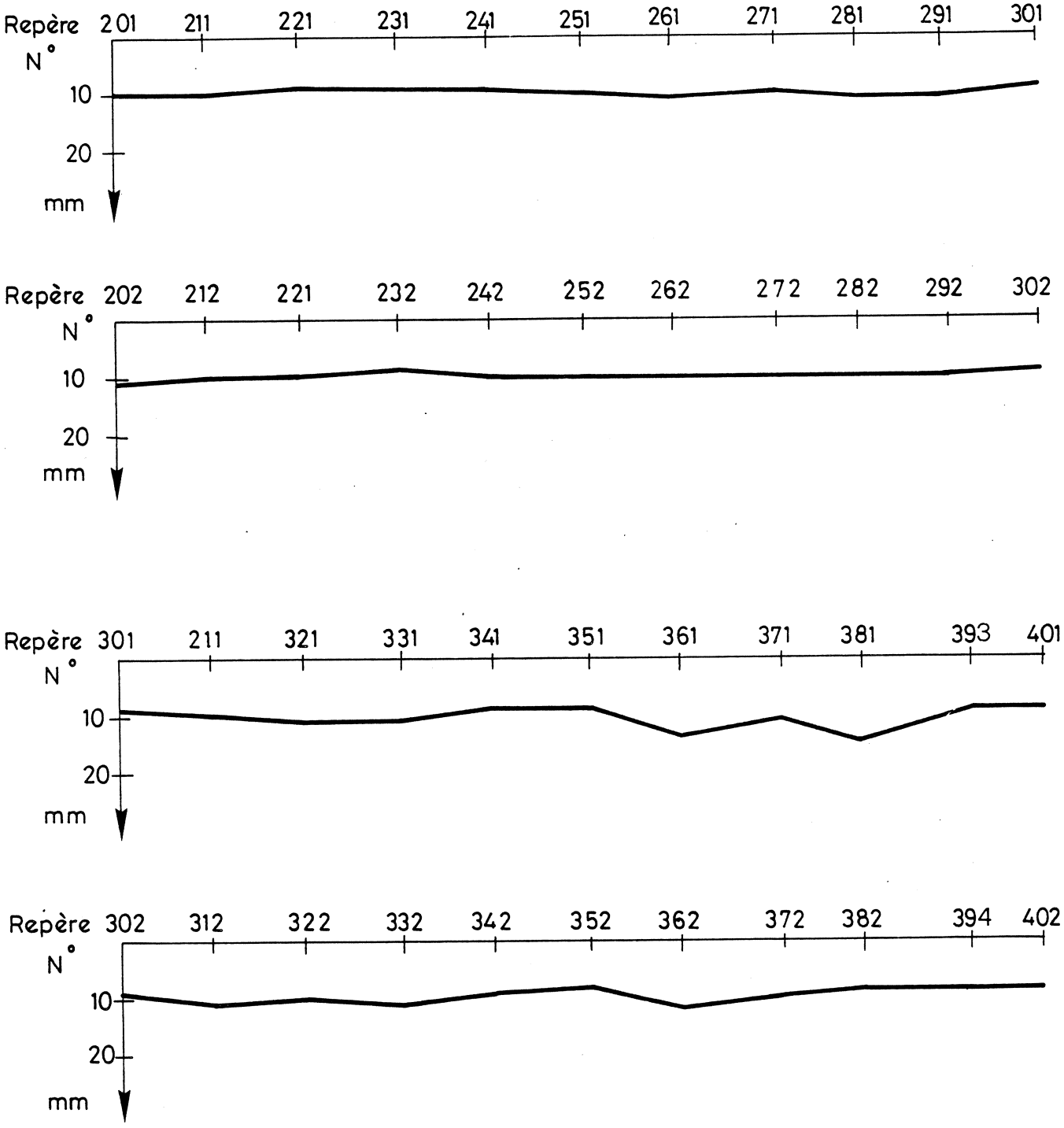
Annexe 13/2

Viaducs d'Yverdon

Tassements de pile

20 à 40

(mesures initiales de sept. 1981)

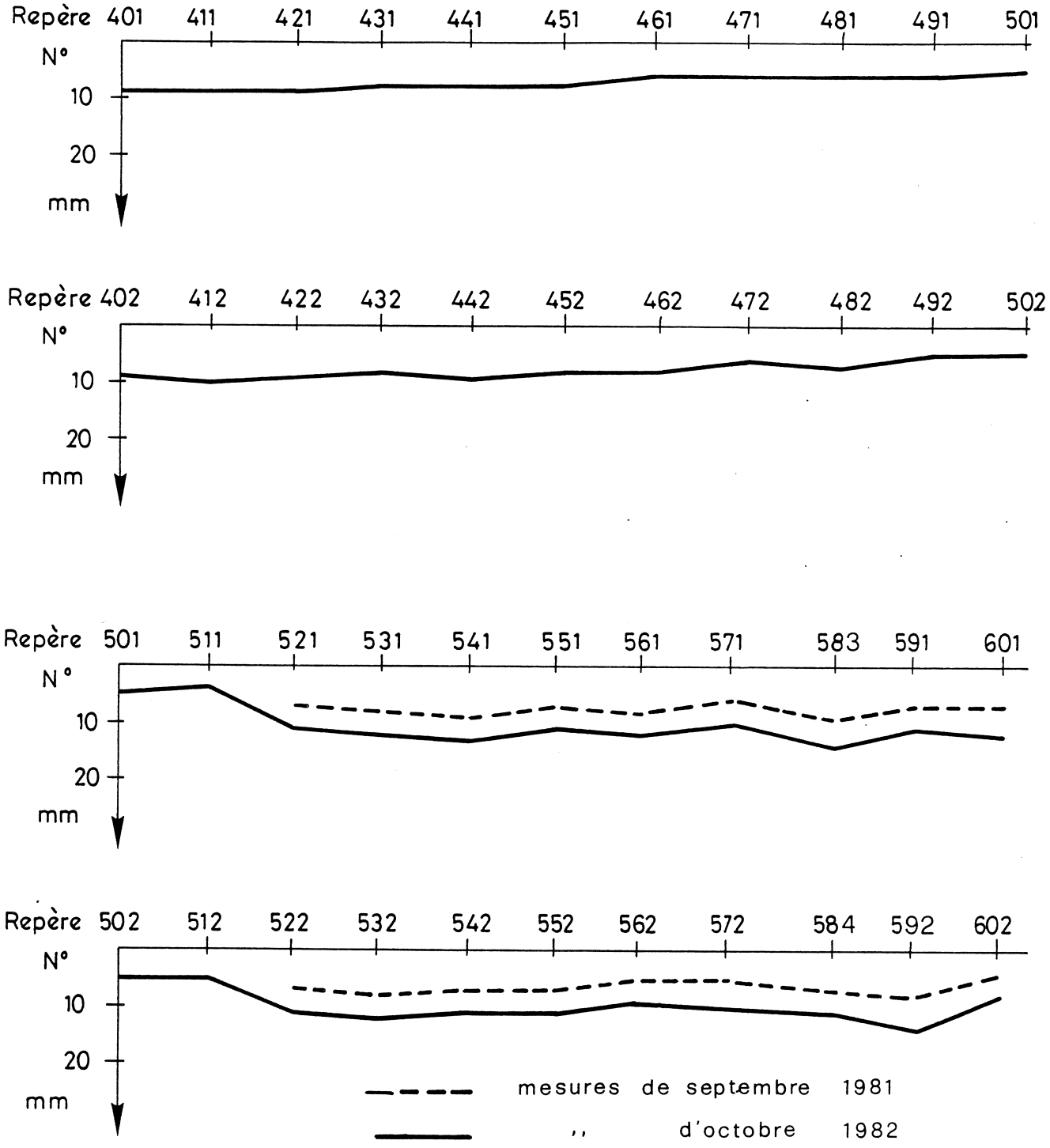


mesures d'octobre 1982

Annexe 13/3

Viaducs d'Yverdon

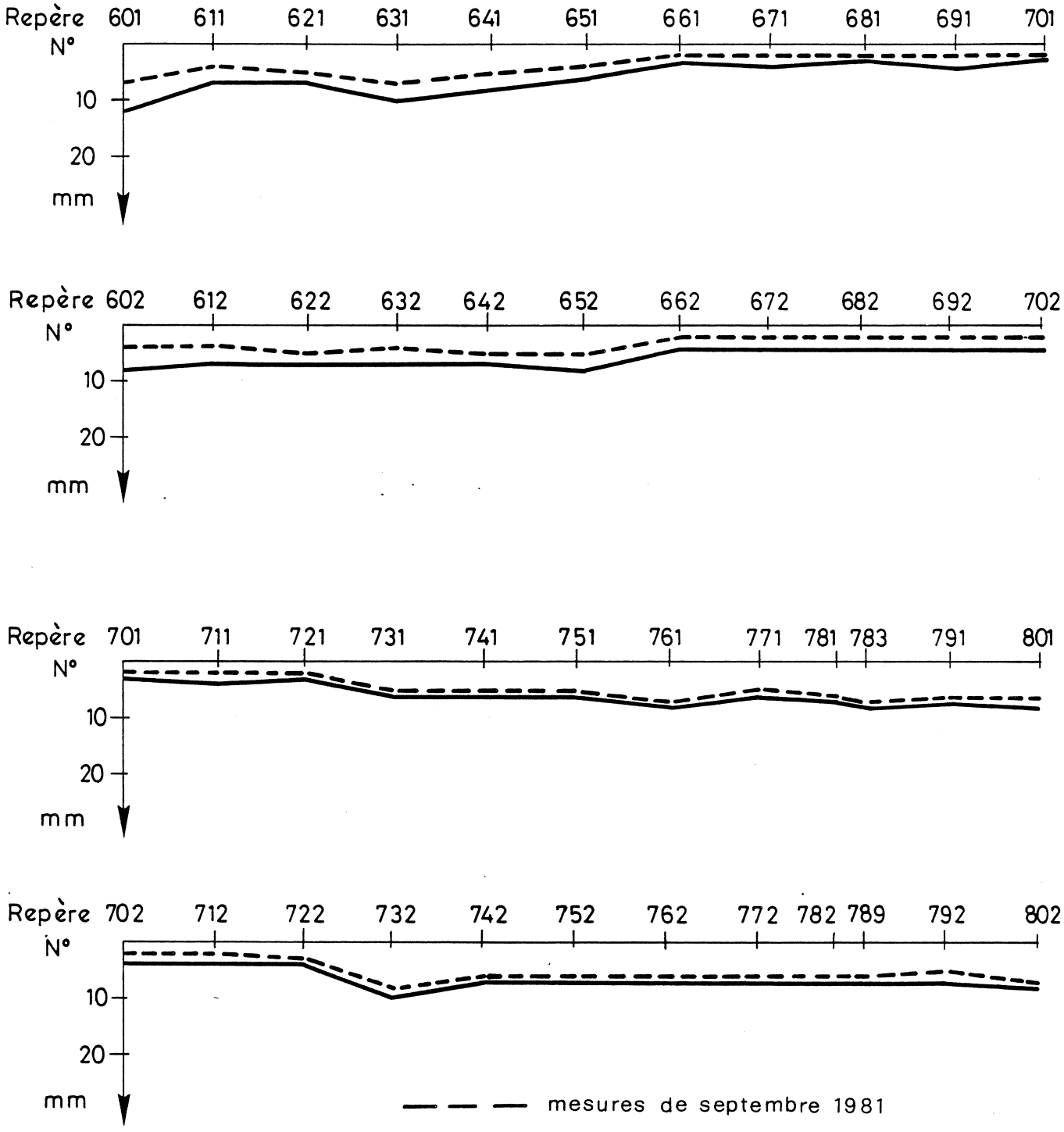
Tassements de pile
40 à 60
(mesures initiales du 28.08.80
et de sept. 1981)



Annexe 13/4

Viaducs d'Yverdon

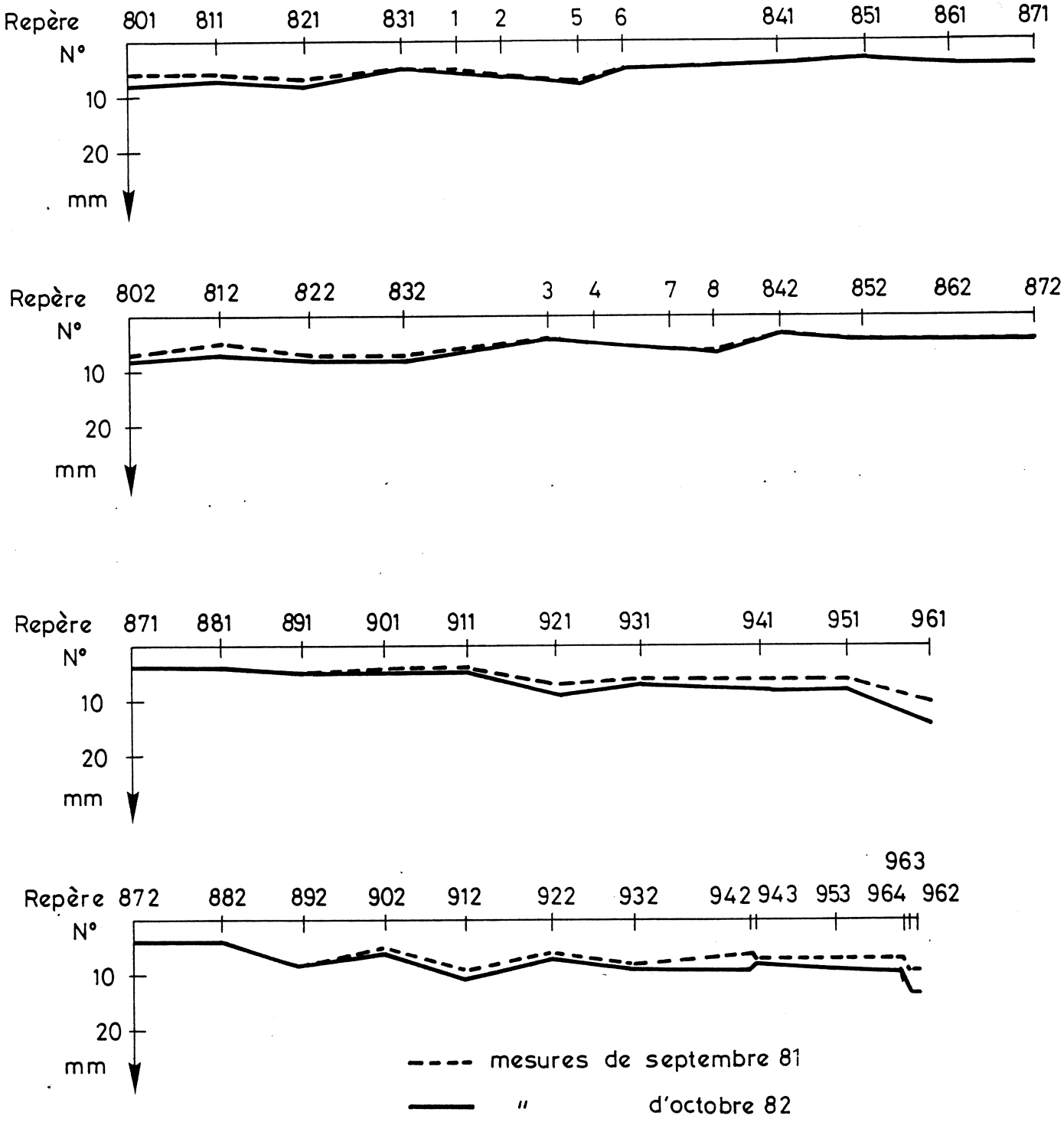
Tassements de pile
60 à 80
(mesures initiales du 28.08.80
et du 09.05.80)



Annexe 13/5

Viaducs d'Yverdon

Tassements de pile 80 à Culée 960
(mesures initiales du 08.10.79 du 02.11.79 et du 09.05.80)

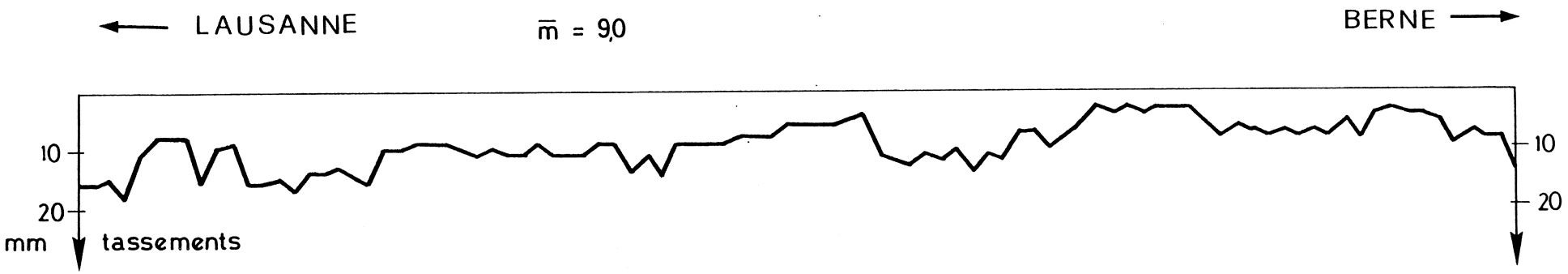


Annexe 13/6

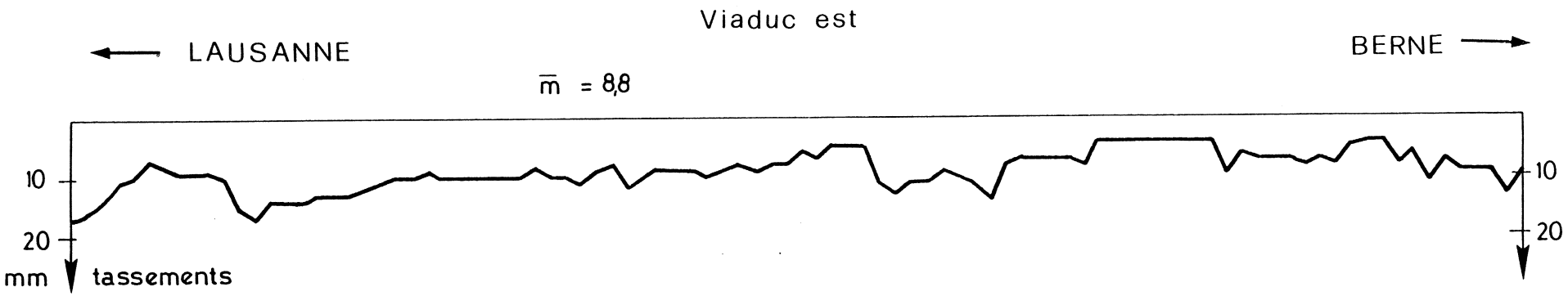
Viaducs d'Yverdon

Tassements totaux mesurés en oct. 82

Viaduc ouest



Viaduc est



Annexe 13/7

3.14 VIADUCS DE LA PLAINE DU RHONE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N9 Sections 922B km : 38.890-40'100

Passage en viaduc d'une zone géotechniquement très défavorable par deux ouvrages parallèles séparés, fondés sur pieux flottants.

Auteur du projet	Entreprise Losinger SA et Bur. d'Ing. Bernardi, Zurich
Dossier géologique	J. Norbert, Lausanne
Dossier géotechnique	LEGEP, Lausanne
Construction	1970

L'ouvrage, composé de deux ponts indépendants dont les tabliers ont chacun 31.20 m de largeur, est divisé en trois tronçons d'environ 400 m séparés par des joints de dilatation (longueur totale 1170 m).

Chacune des 2 × 38 piles repose sur une semelle rectangulaire monolithiquement liée aux six pieux qui reportent les charges en profondeur, à l'exception des trois premières paires de piles côté Lausanne qui sont fondées superficiellement. Aux joints de dilatation, les piles sont doubles mais reposent sur une même semelle fondée sur six pieux.

Les culées s'appuient sur des fondations superficielles.

L'ouvrage est constituté par des éléments préfabriqués en béton armé et partiellement précontraint. Les poutres longitudinales, entretoises et dalles sont simplement appuyées durant la construction et, après bétonnage sur place des joints, forment une superstructure monolithique allant jusqu'à 447 m de longueur.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

De nombreux sondages, atteignant des profondeurs allant jusqu'à 50 m le long du tracé des viaducs n'ont pas révélé de couche susceptible d'être porteuse des fondations des piles.

En général, le sous-sol est composé de couches de limon sableux et sable limoneux, devenant plus argileux en profondeur avec des résidus tourbeux dans les couches superficielles. Ces matériaux fins sont à l'état meuble, voire très meuble, sans augmentation sensible de leur compacité avec la profondeur.

La zone "culée côté Lausanne" diffère du reste du profil par le fait qu'un matériau sablo-graveleux compact, provenant du cône de déjection de la Tinière, recouvre les couches sous-jacentes de même qualité que celles rencontrées sur le reste du tracé.

La nappe phréatique est très élevée dans la région de l'ouvrage et il n'est pas rare que son niveau affleure le sol ou même que ce dernier soit submergé après de fortes pluies. Les matériaux fins sont de ce fait saturés.

1.3 Problèmes de fondations

Les conditions géotechniques très défavorables rencontrées sur tout le tracé des viaducs, sur une profondeur importante, ont contraint les projeteurs à opter pour des fondations sur pieux flottants; comme la résistance à la pénétration n'augmente pas avec la profondeur, le pieu à injection type LS adopté pour cet ouvrage a permis d'atteindre les forces portantes nécessaires, tout en gardant les profondeurs dans des limites économiquement acceptables.

Caractéristiques des pieux :

Type : injections LS : pieu battu en béton moulé dans le sol avec injections périphériques

Diamètre : 50 cm béton vibré et armé
70 cm avec injections

Capacité portante : 125 t
Charge d'essai : 300 t
Prof. max. atteinte : 27.0 m
Longueur totale des pieux : 8360 m
Pénétration : jusqu'à 60 cm pour les derniers 10 coups

Les trois premières paires de piles côté Lausanne sont fondées sur fondations superficielles, les pieux n'étant pas nécessaires dans la zone compacte du cône de déjection de la Tinière.

Les culées sont également fondées superficiellement.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE

Chaque pile des viaducs est équipée de deux repères. Les contrôles se font par nivellement de ces repères. Ces différents points de mesures, au total 80, sont reportés sur l'annexe 14/1.

3. RESULTATS DES MESURES

De nombreuses campagnes de nivellement ont été effectuées dès le début de la construction de l'ouvrage. Pour calculer les vitesses de tassement, nous avons pris en considération cinq périodes comprises entre 1970 et 1983 et six tronçons répartis le long de l'ouvrage.

Le tableau suivant donne pour les vitesses de tassement calculés, les valeurs extrêmes et la valeur moyenne, entre parenthèses.

TABLEAU 1

Repère	1ère période 7.70-4.71 [mm•an^{-1}]	2e période 4.71-3.73 [mm•an^{-1}]	3e période 3.73-5.75 [mm•an^{-1}]	4e période 5.75-5.77 [mm•an^{-1}]	5e période 5.77-11.83 [mm•an^{-1}]
101-108	8.0-26.4 (15.3)	0.5-6.3 (3.8)	0.5-1.4 (0.6)	0.0-2.5 (0.9)	0.6-1.5 (1.2)
201-208	9.3-34.7 (18.3)	1.6-7.3 (4.2)	0.0-1.8 (1.0)	0.0-2.0 (0.8)	0.6-2.0 (1.3)
109-113	12.0-18.7 (14.8)	3.7-4.7 (4.4)	0.9-1.8 (1.4)	1.5-2.0 (1.6)	1.4-1.7 (1.6)
209-213	12.0-17.3 (14.3)	3.7-5.2 (4.2)	0.8-1.8 (1.5)	1.0-1.5 (1.5)	1.2-1.5 (1.4)
114-120	10.7-14.7 (13.2)	3.1-4.2 (3.3)	0.9-1.8 (1.1)	0.5-2.0 (1.2)	1.5-2.0 (1.7)
214-220	10.7-16.0 (13.5)	2.6-4.7 (3.4)	0.9-1.8 (1.4)	0.5-2.0 (1.3)	1.7-1.8 (1.8)
121-128	10.7-16.0 (12.3)	2.6-3.7 (3.0)	0.5-1.4 (0.9)	0.5-1.5 (1.0)	1.7-4.0 (2.7)
221-128	10.7-16.0 (12.8)	1.6-3.7 (2.8)	0.9-1.8 (1.2)	0.5-1.5 (0.8)	1.8-3.4 (2.7)
129-134	10.7-20.0 (15.1)	1.6-3.1 (2.2)	0.5-2.3 (1.3)	0.5-2.0 (0.9)	2.8-3.2 (3.0)
229-234	9.3-18.7 (14.1)	1.6-2.6 (1.9)	0.5-1.8 (1.5)	0.0-1.5 (0.9)	2.6-3.1 (2.9)
135-139	14.7-21.3 (17.9)	2.6-6.8 (3.8)	0.9-2.8 (1.8)	1.5-3.0 (2.2)	2.5-3.7 (3.0)
235-239	17.3-20.0 (17.1)	2.1-5.2 (3.3)	0.9-2.3 (1.6)	1.5-3.0 (1.9)	2.2-3.2 (2.8)

Les annexes 14/2 et 14/3 donnent une représentation graphique des vitesses moyennes pour chaque tronçon et chaque période.

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

En examinant les valeurs du tableau 1 et les dessins des annexes 14/2 et 3, on remarque :

- une diminution rapide de la vitesse de tassement au cours des trois premières périodes
- un palier où cette vitesse est minimum : 3ème et éventuellement 4ème période
- une augmentation de cette vitesse lors de la 5ème période d'observation.

Cette augmentation intervient à l'intérieur d'une période de 78 mois pendant lesquels aucun nivellement n'a été effectué. De ce fait, on ne peut donc pas connaître précisément l'époque à laquelle ces mouvements se sont accélérés. Ce que l'on sait, par contre, c'est qu'ils ont eu lieu entre mai 1977 et novembre 1983.

Entre mai 1981 et juin 1982, des travaux de remblayage ont été effectués sous les viaducs, sur toute leur longueur, par le syndicat des AF26. Ces travaux et la construction de chemins bétonnés sont certainement la cause de l'augmentation des tassements enregistrés.

5. PROPOSITION DE PROSPECTIONS ET ESSAIS COMPLEMENTAIRES

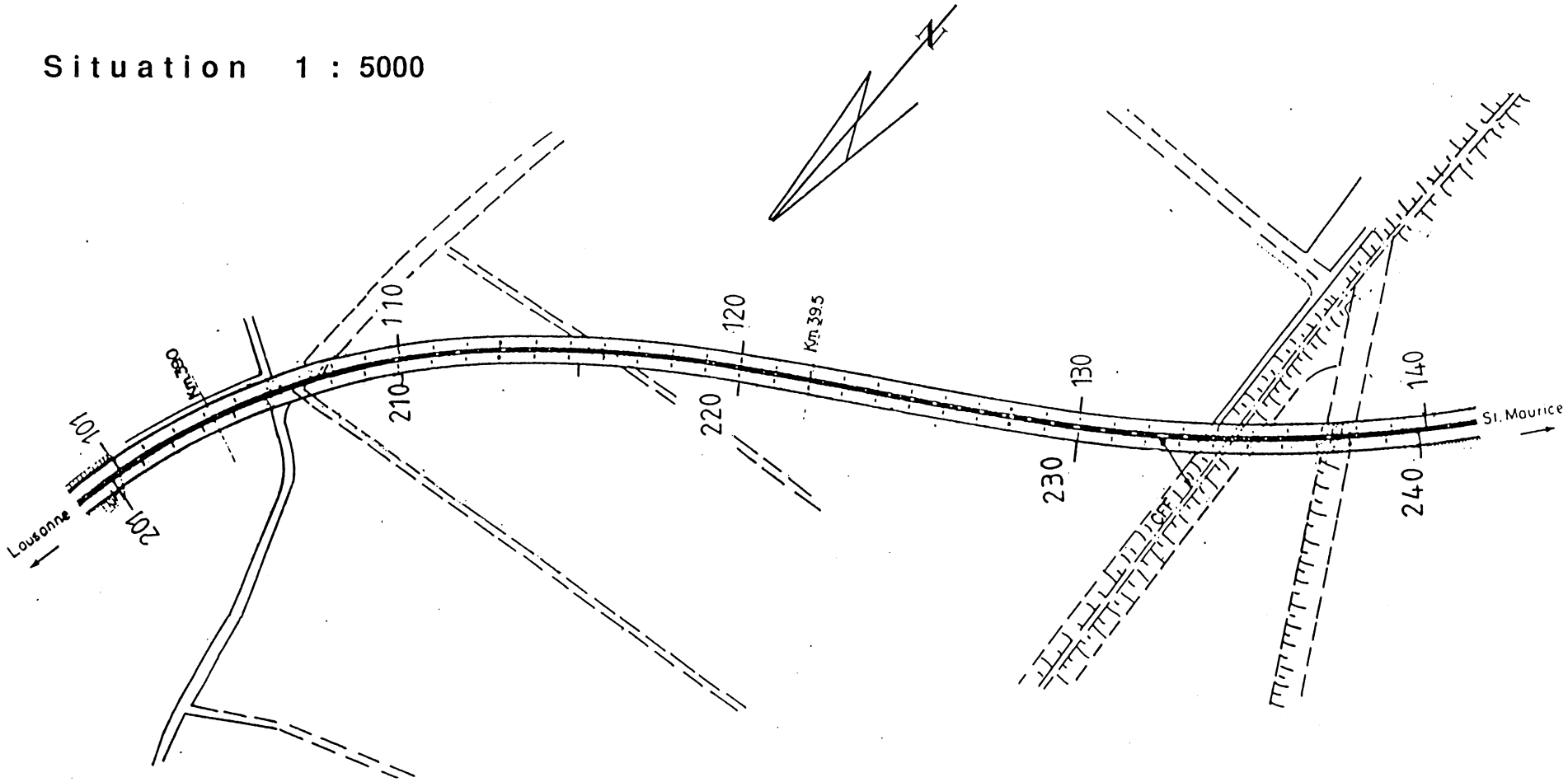
Le dispositif de mesure actuel paraît suffisant pour permettre un suivi des tassements avec une fréquence de quatre à cinq ans.

6. CONCLUSIONS

Comme prévu, l'ouvrage présente des tassements qui diminuent considérablement avec le temps. Le comportement des fondations de cet ouvrage est tout à fait satisfaisant.

VIADUC DE LA PLAINE DU RHONE

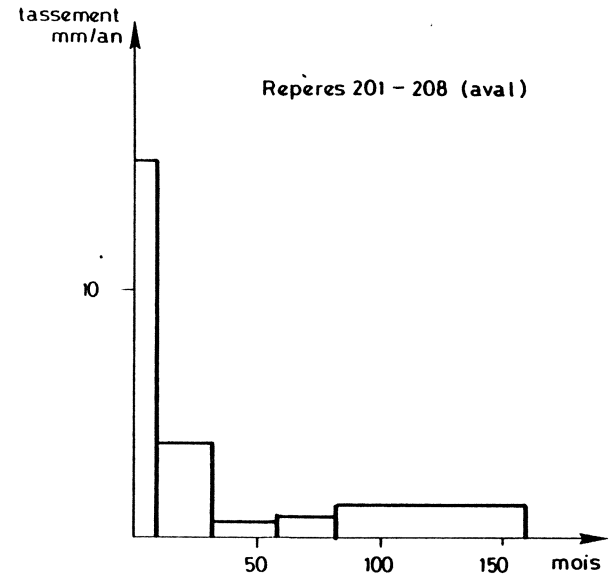
Situation 1 : 5000

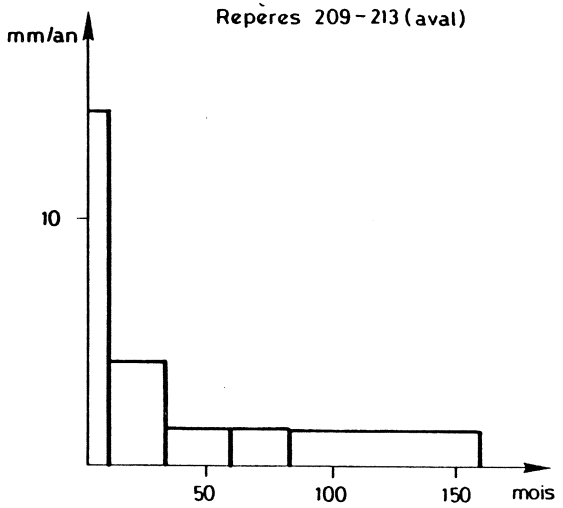


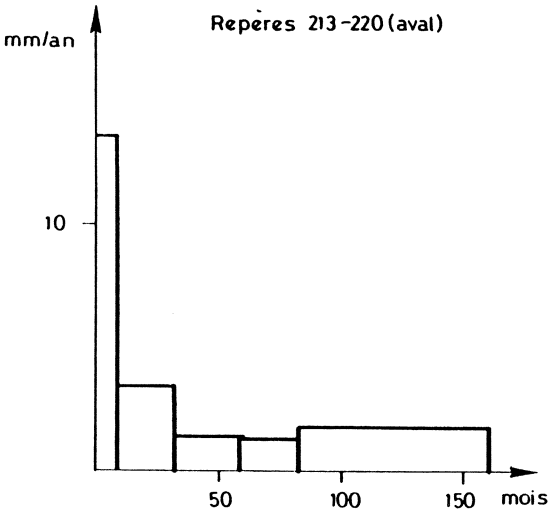
Annexe 14/1

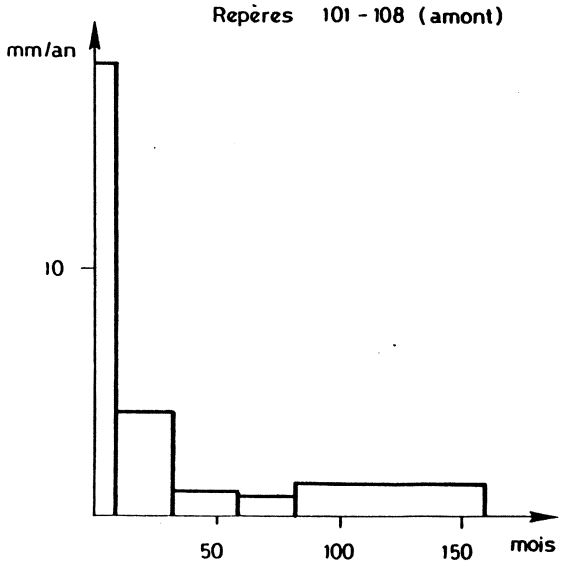
Viaduc de la plaine Rhône

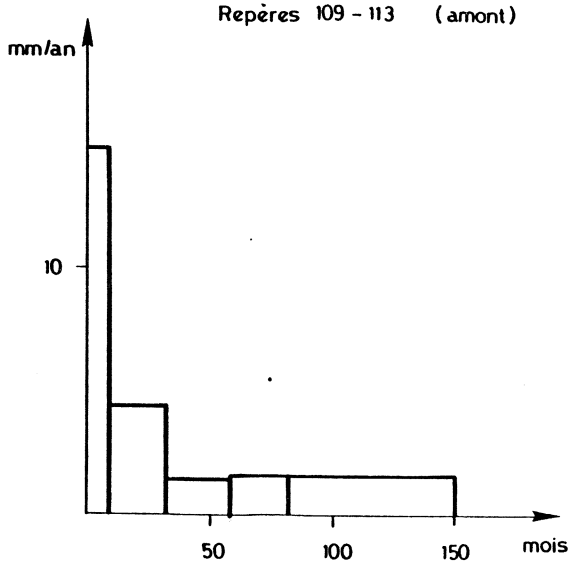
Evolution de la topographie

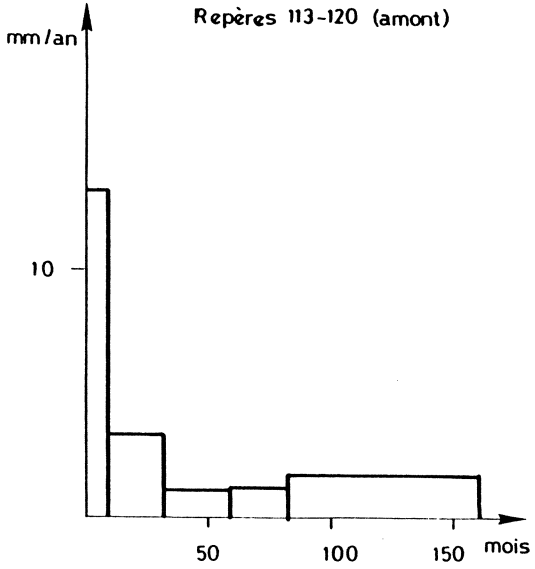






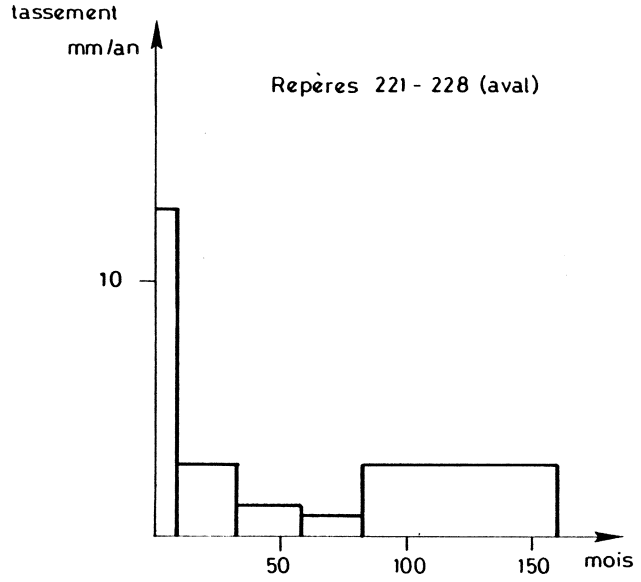


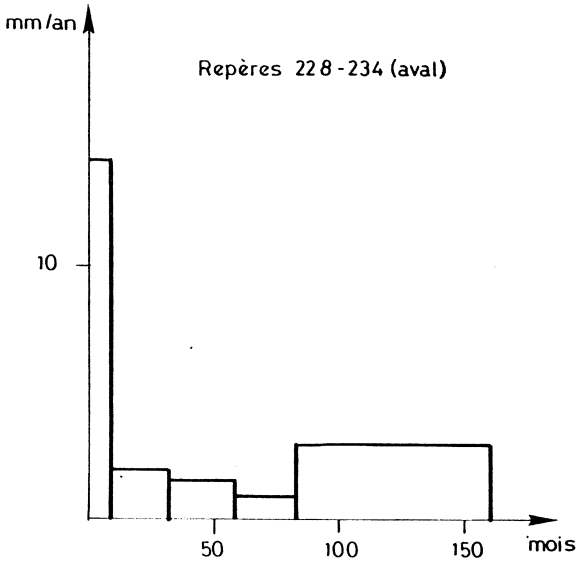


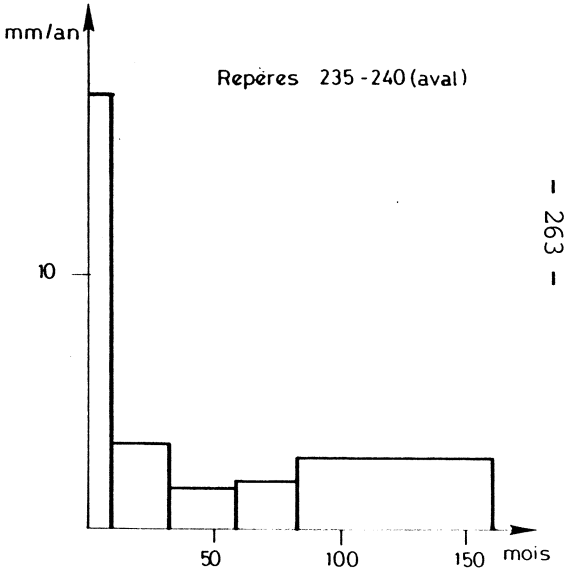


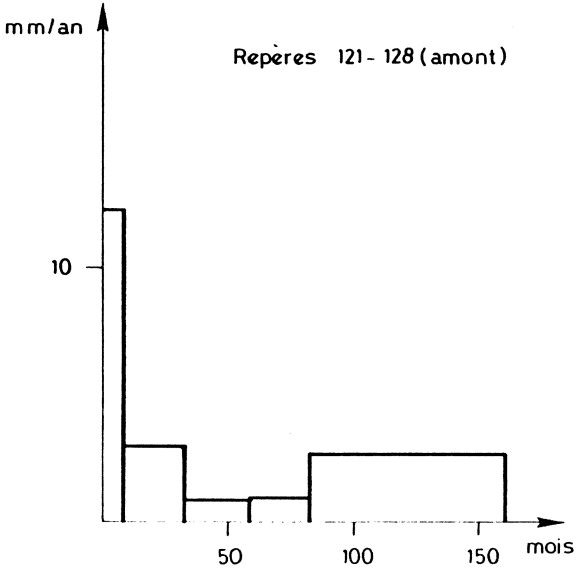
Viaducs de la plaine du Rhône

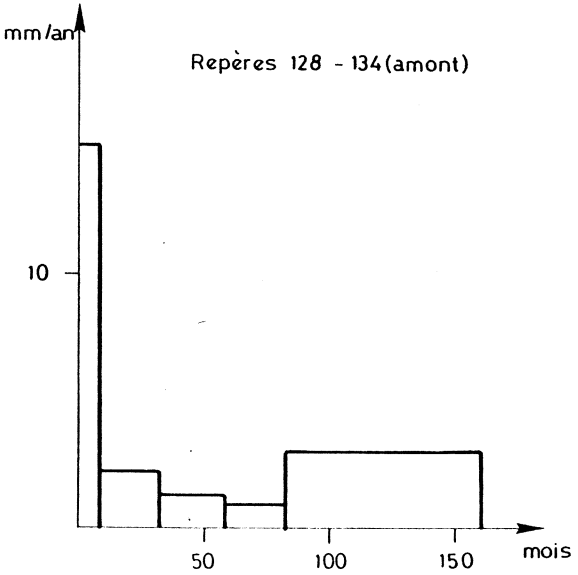
Evolution de la topographie

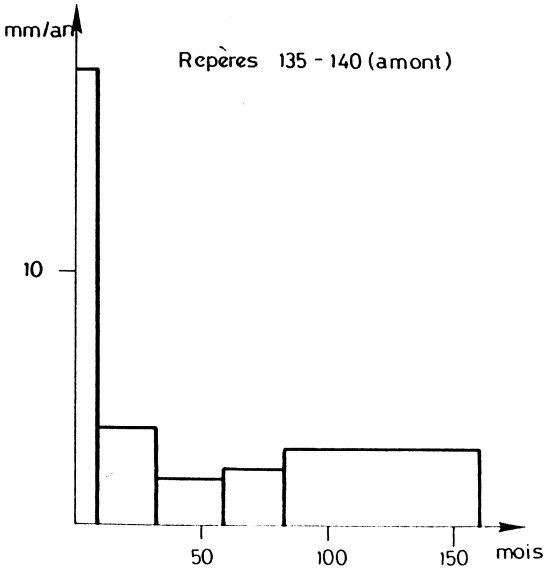












3.15 LES REMBLAIS DE LA PLAINE DU RHONE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N9 Sections 923 à 927 km : 40.0-47.0

Passage en remblais sur les sols tourbeux de la Plaine du Rhône de Villeneuve à Aigle.

Auteur du projet	Bureau de construction des autoroutes
Dossier géotechnique	LEGEP, H.B. de Cérenville, Lausanne
Construction	1968-1975

Entre Villeneuve et Aigle, l'autoroute est fondée sur des alluvions compressibles. Les sols d'assise comprennent, en surface, une couche de tourbe dont l'épaisseur varie de 1 à 5 m. De tels matériaux apparaissent à nouveau en profondeur. L'accès aux ouvrages d'art a nécessité la construction de remblais de 7 à 8 m de hauteur. L'autoroute elle-même est réalisée par un remblai de 1 à 4 m de hauteur.

Pour résoudre les problèmes de déformations et garantir un bon comportement de cette construction la méthode du préchargement a été utilisée avec succès. Un remblai d'essai et des études préliminaires ont permis de définir les conditions les meilleures pour cette réalisation.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

L'auge glaciaire de la basse vallée du Rhône est remplie de sédiments quaternaires sur une épaisseur estimée à 300 ou 400 m. Ceux-ci sont assez bien connus sur une épaisseur de 15 à 20 m. Ils sont composés d'une couche de gravier d'origine fluviatile, d'une dizaine de mètres d'épaisseur, surmontée de dépôts lacustres limoneux et organiques. A la base des graviers les sédiments lacustres apparaissent à nouveau par endroit.

Du point de vue géotechnique la couche superficielle est formée de limons argileux tourbeux, de tourbes, de sables fins limoneux. Ce sont de mauvais sols de fondations car très compressibles ($_1$ = 10-17 kN_vm^{-2}; w = 50 à 500 %); ils sont présents jusqu'à une profondeur de 5 m et recouvrent des graviers et sables, parfois fins et limoneux. Cette dernière couche est peu compressible; elle renferme, en profondeur, des poches de tourbes et limons analogues à ceux existants en surface.

Le niveau supérieur de la nappe phréatique homogène se trouve à environ 2 m sous la surface du sol.

1.3 Problèmes d'instabilité

L'édification des remblais de la Plaine du Rhône, sur un sol tourbeux, a posé d'une part le problème de la stabilité de la fondation et d'autre part celui des déformations de la construction.

En présence de sols tourbeux, sans craie lacustre ni argile molle, le problème de la stabilité ne devient aigu que pour les remblais de grande hauteur. Elle peut, dans ces cas, être compromise par la surpression interstitielle qui ne manquera pas de se développer dans les tourbes. Ce risque est accru lorsque le site montre une disymétrie. Il est cependant aisé de contrôler ces pressions par un rythme de remblayage approprié.

Le tassement des tourbes sous l'effet du poids des remblais provoque, selon la hauteur du remblai, deux effets différents :

- lorsque la hauteur du remblai est supérieure à 3 m, la rigidité acquise par l'épaisseur atténue les tassements différentiels; les déformations ne sont sensibles qu'au voisinage des ouvrages d'art
- lorsque la hauteur du remblai est inférieure à 3 m, celui-ci, peu rigide, se déforme localement en fonction de la nature du sous-sol. Ces déformations différentielles sont sensibles à la surface de la route et s'accroissent encore avec le temps.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE ET MESURES

2.1 Mesures topographiques

Le nivellement effectué régulièrement par le BAR s'étend sur tout le tronçon qui nous intéresse, c'est-à-dire du km 40.700 au km 47.300 de l'autoroute.

Les points nivellés sont des chevilles scellées dans des socles en béton, placées tous les 150 m dans la borne centrale de l'autoroute. Les zones stables auxquelles ce nivellement a été rattaché sont :

- les rochers à l'amont de la cimenterie de Roche
- la colline de "La George" près de Versvey
- les rochers "Grandes Tanières" à Yvorne
- les rochers à la sortie d'Aigle
- la colline de St-Triphon
- la colline de l'Arzilier à St-Maurice.

2.2 Tassomètres

La situation des 13 tassomètres mis en place entre 1972 et 1973 sur ce tronçon est reportée sur l'annexe 15/1.

3. RESULTATS DES MESURES

3.1. Mesures topographiques

Le nivellement initial a été réalisé en mai 1974; dès lors, six nivellements furent exécutés jusqu'en été 1984.

Les vitesses annuelles de tassement ont été calculées pour trois périodes et sont reportées dans le tableau I.

Tableau I

Repère No	Section No	1ère période V.74 - IV.76 mm/an	2e période IV.76 - X.79 mm/an	3e période X.79 - VI.84 mm/an	
40 700			5.4		
850			6.6		
41 000			5.5		
150		2.1	4.3		
300	923	3.1	4.6		
450		2.6	1.1		
600		2.6	1.4		
750		4.2	1.4		
900		5.7	2.0		
42 050		3.7	2.0	0.4	
200		5.2	3.1	1.7	
350		6.3	4.0	2.1	
500		8.4	3.7	2.1	
650	924	1.6	2.0	1.1	
800		4.7	2.3	1.1	
950		8.4	3.4	1.9	
43 100		6.3	3.1	1.7	
250		13.6	6.3	3.0	
400		6.8	5.1	2.1	
550		11.6	6.0	2.8	
700	925	5.7	4.3	1.9	
850		2.1	1.4	1.3	
44 000		**28.7**	**15.7**	**7.3**	
150		**7.3**	**6.0**	**3.4**	
300		**13.0**	**9.4**	**4.1**	Groupe B
450		**8.4**	**6.3**	**3.6**	
600		**12.0**	**8.0**	**4.5**	
750		2.6	1.4	1.1	
900		2.1	1.7	1.1	
45 050		0.5	2.0	0.4	
200	926	2.1	1.7	1.1	
350		6.3	2.6	1.9	
500		1.0	1.4	1.1	
650		2.1	1.1	1.1	
800		1.0	1.1	0.9	
950		3.1	2.3	1.3	
46 100		2.6	2.6	1.1	
250		3.7	0.9	0.2	
400		2.6	1.1	0.6	
550	927	11.0	2.9	1.3	
700		**27.7**	**8.0**	**3.9**	
850		**58.4**	**16.9**	**7.1**	
47 000		**52.2**	**24.6**	**10.7**	
150		**31.3**	**18.9**	**10.9**	Groupe C
300		**73.0**	**24.3**	**9.9**	
450	928	9.4	1.7	1.7	
:					
:					
:					
Moyennes groupe A		4.7	2.9	1.4	
Moyennes groupe B		13.9	9.1	4.6	
Moyennes groupe C		48.5	18.5	8.5	

3.2. Tassomètres

Dans les premiers temps de leur mise en service, des mesures fréquentes furent effectuées pour permettre de décider quand les surcharges pouvaient être enlevées. Par la suite, la durée entre deux mesures a été espacée.

Le tableau II donne les vitesses annuelles de tassement calculées pour quatre périodes; les trois dernières correspondent à celles du tableau I.

Tableau II

Profil km	1ère période 72 et 73 - V.74 mm/an	2e période .V.74 - II.76 mm/an	3e période III.76 - II.79 mm/an	4e période II.79 - IX.84 mm/an
42 860	23.7	1.6	2.1	-
42 920	179.6	10.4	-	-
43 880	104.6	13.0	-	-
44 100	154.8	24.0	10.9	-
44 300	117.3	8.3	13.1	-
44 400	148.7	-	-	-
44 510	106.3	11.0	10.9	-
45 500	32.3	1.6	0	0
45 800	12.5	1.2	0	0
chemin 2702	107.8	14.6	9.5	2.5
chemin 2703	200.4	36.0	10.6	-
chemin 2704	445.0	101.7	25.4	-
jonct. Aigle	320.0	-	-	-

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

4.1. Mesures topographiques

L'examen du tableau I permet de séparer en trois groupes bien distincts tous les points nivellés. Les moyennes de chaque groupe sont reportées en bas du tableau. Ceux-ci sont :

- Un groupe B homogène dans l'espace, puisque les valeurs (élevées) des tassements sont concentrées entre les km 44.000 et 44.600.

- Un groupe C, également homogène dans l'espace, puisque les valeurs (très élevées) des tassements sont regroupés entre les km 46.700 et 47.300.

- Un groupe A, dans lequel toutes les autres valeurs (moyennes) des tassements sont regroupées.

Pour tous les groupes, les tassements mesurés s'atténuent d'année en année :

- pour le groupe A, ils varient entre 0.5 et 3.0 mm par an pour la dernière période de mesures, ils sont au total de 10 à 60 mm depuis la fin des travaux

- pour le groupe B, ils se situent entre 3.5 et 7.5 mm par an pour la dernière période de mesures, ils sont au total compris entre 50 et 145 mm depuis la fin des travaux

- pour le groupe C, ils varient entre 4.0 et 11.0 mm par an pour la dernière période de mesures. Au total, ils sont de 100 à 270 mm depuis la fin des travaux.

Ces différentes vitesses de tassements peuvent être expliquées de la manière suivante :

- A l'aplomb du remblai, entre les km 43.850 et 44.750, se trouve une lentille de tourbe (voir profil géotechnique annexe 15/1). Les tassements importants qu'on mesure dans le groupe B lui sont dus.

- Entre les km 46.450 et 47.450, les remblais atteignent une hauteur de 7 à 8 m. Comme seule une couche de tourbe de 2 m d'épaisseur avait été détectée à 15 m de profondeur, les remblais de ce tronçon n'avaient pas été préalablement chargés. C'est dans cette zone, où le préchargement a été négligé que se sont produits les tassements importants du groupe C.

Cependant, les vitesses des tassements diminuent à chaque période de mesures comme nous le montre le dessin (annexe 15/2) sur lequel est reportée pour chaque période et chaque groupe la vitesse annuelle moyenne des tassements.

4.2. Tassomètres

L'examen du tableau II permet de faire les remarques suivantes :

- Durant la première période de mesures, soit dès leur mise en service jusqu'à la fin des travaux, les tassomètres donnent des valeurs de tassements très importantes. Ce qui est logique, puisque c'est au cours de cette période que les remblais et leurs surcharges ont été exécutés.

- En comparant les valeurs du tableau I avec celles du tableau II, on constate une très bonne concordance entre les vitesses de tassement pour la période comprise entre les mois de mars 1974 et avril 1976, principalement pour le groupe B.

5. PROPOSITIONS DE PROSPECTIONS ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

La pose de tassomètres avant la mise en place des remblais permet de contrôler la vitesse de consolidation des sols compressibles et de fixer judicieusement la date à laquelle les surcharges peuvent être enlevées.

Les mesures faites avec les tassomètres après la fin des travaux permettent de raccorder les valeurs obtenues par nivellement à celles exécutées dès le début des travaux.

Le tassomètre a donc sa raison d'être principalement au début des travaux, avant que les chevilles de nivellement puissent être mises en place.

La double disposition est suffisante pour contrôler le comportement des remblais. Aucune prospection ou essais complémentaires ne sont donc nécessaire.

6. CONCLUSIONS

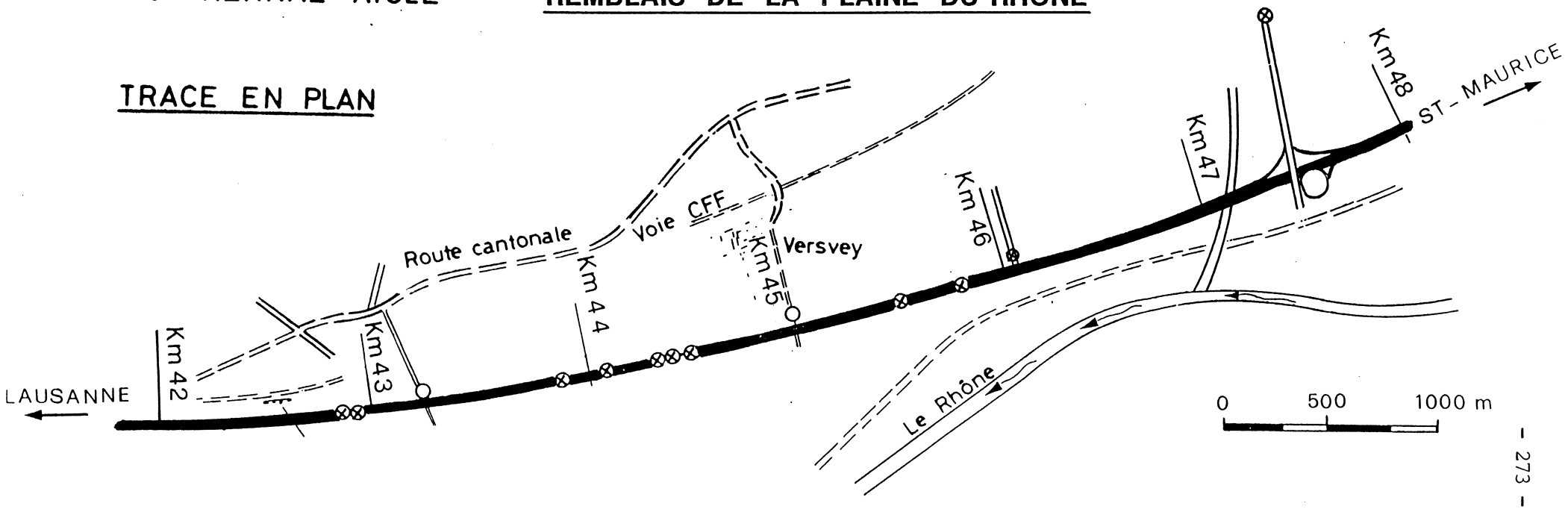
La méthode de construction a conduit à une uniformisation des tassements le long de ce tronçon et par conséquent à une bonne viabilité de la chaussée.

Le comportement des remblais est tout à fait satisfaisant.

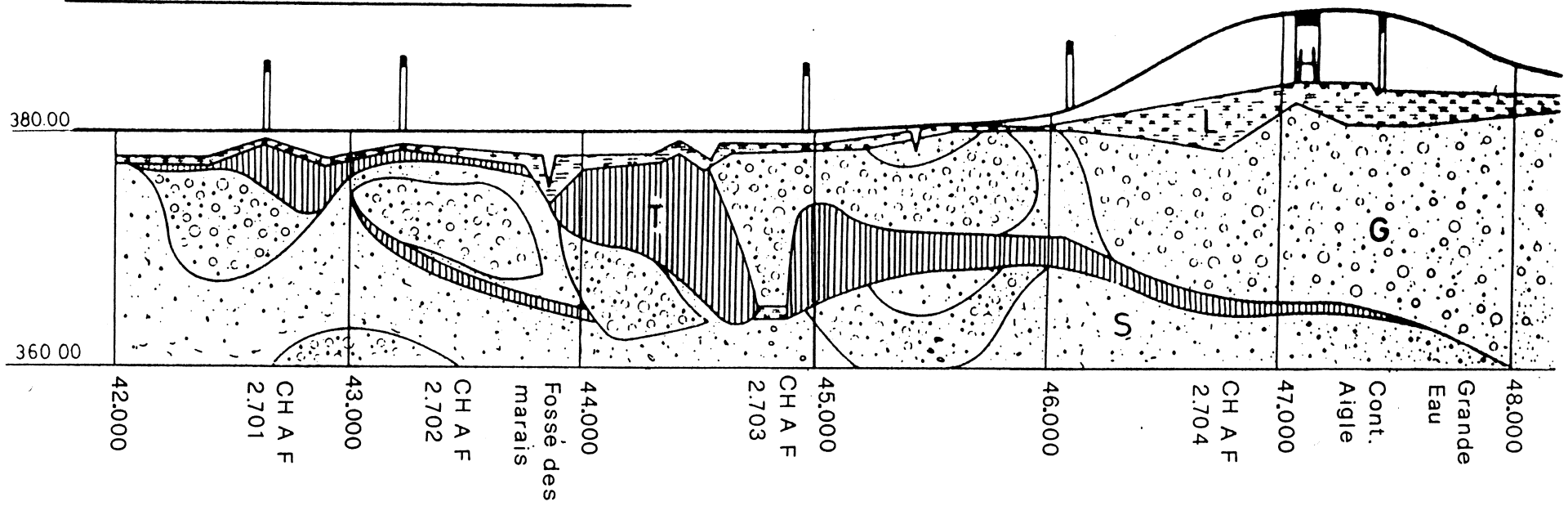
N9 - RENNAZ AIGLE

REMBLAIS DE LA PLAINE DU RHONE

TRACE EN PLAN



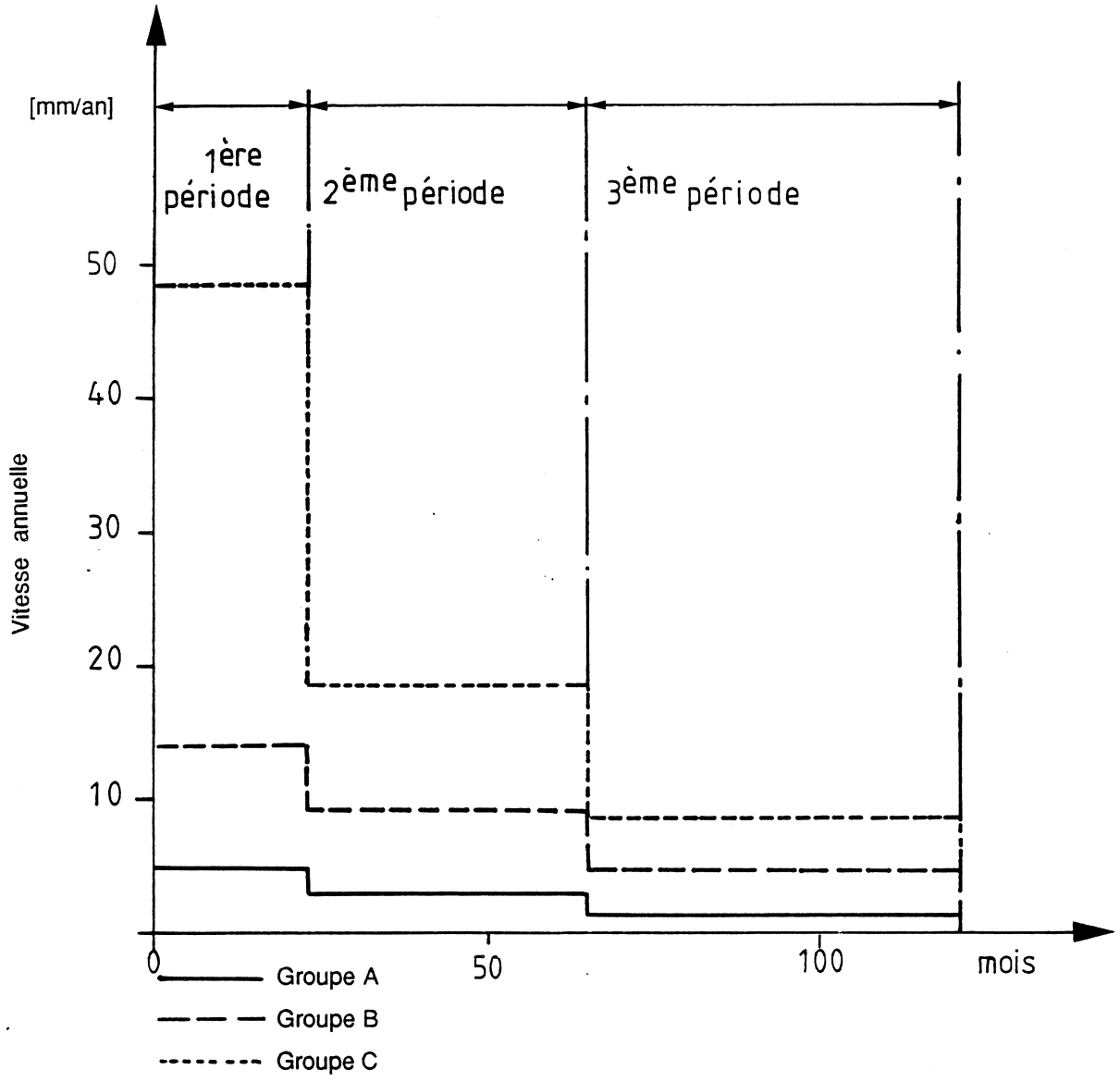
PROFIL EN LONG GEOTECHNIQUE



Annexe 15/1

Remblais Plaine du Rhône

VITESSE DES TASSEMENTS



3.16 LES REMBLAIS DE LA PLAINE DE L'ORBE

1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'OUVRAGE

1.1 Description des ouvrages

Route nationale N1 Sections 142-144 km : 87.600-91.700

Passage de l'autoroute à travers la Plaine de l'Orbe.

Auteur du projet	Bureau de Construction des Autoroutes
Dossier géotechnique	LEGEP, Lausanne
Construction	1978-1981

Le passage de l'autoroute à travers la Plaine de l'Orbe se fait sur un remblai dont le hauteur normale n'excède pas 2.5 m. Les remlais d'accès aux ouvrages d'art s'élèvent, par contre, jusqu'à 8 ou 9 m de hauteur. Le sous-sol est constitué d'une alternance de tourbes, craies lacustres, limons et sables argileux jusqu'à des profondeurs de 10 à 25 m.

La méthode du préchargement a été utilisée pour faire face aux problèmes de tassement.

1.2 Géologie, géotechnique, hydrologie

Le creusement du fond rocheux de la Plaine de l'Orbe date probablement de l'époque interglaciaire Mindel-Riss. Depuis cette époque la dépression a été peu à peu comblée, au gré des glaciations successives, par des apports de moraines, de dépôts fluvo-glaciaires et d'alluvions. Ces couches, de peut-être 100 m d'épaisseur, sont recouvertes de sédiments post würmiens, qui forment la plaine actuelle, sur 15 à 30 m d'épaisseur.

Ces dernières formations sont réparties irrégulièrement. Elles comprennent :

- les graviers et sables plus ou moins limoneux déposés par les rivières
- la craie lacustre qui surmonte en général les limons lacustres en couches peu épaisses
- la tourbe, parfois affleurante, parfois recouverte par les limons de ruisellement, présente sur plusieurs mètres d'épaisseur.

Sur le tracé de l'autoroute, le long du canal oriental la prospection géotechnique a mis à jour les couches suivantes :

- 3 à 4 m de tourbe fortement compressible ($_1$ = 9.7-15.0 kN_vm^{-2} w = 100-600 %)
- 2 à 4 m de limons crayeux également compressibles et peu résistants au cisaillement ($_1$ = 14-18 kN_vm^{-2} w = 38-95%)
- des sables fins limoneux de caractéristiques moyennes
- des sables moyens à fins de bonne portance
- des limons argileux intercalés dans les couches de sables, de caractéristiques moyennes également.

Ces trois dernières formations, aux épaisseurs variables, se retrouvent entre 6 et 20.0 m de profondeur.

Le niveau de la nappe phréatique varie entre 1 m de profondeur et la surface du terrain naturel.

1.3 Problèmes d'instabilité

La stabilité des remblais de l'autoroute pouvait être compromise par la présence de tourbe et de craie lacustre.

Les tourbes sont surtout génératrices de tassements importants qui se manifestent essentiellement au droit des constructions. L'apparition de pressions intersititielles élevées peut compromettre l'équilibre du talus. Ces problèmes ont été maîtrisés en effectuant un préchargement, à un rythme assez lent pour éviter une augmentation exagérée des pressions de l'eau.

Les craies lacustres peu consolidées sont également déformables et instables en présence de sous-pressions et de vibrations. Elles diffèrent des tourbes par leur aptitude à se déformer latéralement. Dans le cas de l'autoroute, le risque d'instabilité était aggravé par la présence, à proximité, du canal Oriental.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF DE CONTROLE ET MESURES

2.1 Inclinomètre

17 inclinomètres ont été posés entre 1976 et 1983, dont 3 pour le centre d'entretien d'Yverdon. Sur ce nombre, huit sont encore en fonction. Les inclinomètres situés le long de l'autoroute sont reportés sur le plan de situation (voir annexe 16/1).

L'inclinomètre IPo a été posé en décembre 1981. L'annexe 16/2 et 16/3 donnent la coupe verticale du sondage exécuté pour la mise en place de cet inclinomètre avec la nomenclature des couches rencontrées.

2.2 Tassomètres

15 tassomètres ont été mis en place sur ce tronçon le long de l'autoroute et pour trois passages supérieurs. Leur situation est donnée dans le tableau des résultats de mesure. 4 tassomètres ont été mis en place pour le centre d'entretien d'Yverdon.

2.3 Mesures topographiques

Le nivellement de la plaine de l'Orbe s'étend du viaduc du Chêne vers Chavornay à la demi-jonction d'Yverdon Sud, soit sur un peu plus de 7 km. Les points nivelés sont des chevilles scellées dans des socles en béton, placés dans la berme centrale de l'autoroute tous les 150 m.

Entre Essert-Pittet et Ependes, à l'aval de la route cantonale, un pieu a été battu jusqu'à une profondeur d'environ 20 m. Un second pieu a été mis en place de la même manière au-dessous de Belmont sur Yverdon. Le nivellement général a été calculé et compensé entre ces deux pieux et deux repères fédéraux. Ces derniers se trouvent sur la colline de Suscévaz pour le premier et à l'Est de Chamblon au lieu dit "Les Uttins" pour le second.

Deux autres rattachement ont été faits, l'un à Chavornay, l'autre à Yverdon près de la fromagerie. Finalement, ce travail représente au total plus de 15 km, aller et retour, de nivellement de précision.

3. RESULTATS DES MESURES

3.1 Inclinomètres

Le tableau ci-dessous donne leur profondeur ainsi que les dates de la première et de la dernière mesure effectuées :

No inclinomètre	Profondeur	Mesure intitiale	Dernière mesure
EPYVOO	7.90	09.07.76	04.09.87
EPYVOU	9.80	28.02.79	04.09.87
EPYVNO	9.10	28.02.79	04.09.87
EPYVMI	4.90	28.02.79	04.09.87
EPYVSU	9.80	28.02.79	04.09.87
PYLEOS	21.30	09.04.81	04.09.87
CEYV1	11.00	20.06.79	23.06.81
CEYV2	11.00	20.06.79	26.08.80
CEYV3	10.40	20.06.79	26.08.80
P89520	12.80	08.05.78	07.01.81
CHENE1	9.80	23.06.76	04.09.87
EPLAFR	7.90	14.07.76	22.08.78
EPLALA	7.90	09.07.76	12.08.76
REESCA	7.90	01.07.76	04.11.77
REESAN	7.90	14.07.76	04.11.77
REESCH	7.90	01.07.76	04.11.77
IP01A3	11.60	15.03.83	04.09.87

La présence des cinq inclinomètres (série des EPYV..), au droit des remblais d'accès Est des viaducs d'Ependes, mérite des explications.

Au départ, seul un inclinomètre (EPYVOO) fut posé. Comme il présentait des mouvements à sa base (ancrage insuffisant), il fut décider de placer un nouvel inclinomètre plus profond. Par la même occasion on mit en place un inclinomètre au front du talus (EPYVOU) et un autre en face d'EPYVOO (EPYUSU).

Suite à des difficultés de mise en place, de l'inclinomètre EPYVMI, dues à des remontées de sable, un nouvel inclinomètre (EPYVNO) profond fut placé à côté d'EPYVOO.

D'une façon générales, à la mise en place des remblais, les mesures ont été effectuées environ tous les 10 jours. Puis au fur et à mesure que le temps passait et que les vitesses de déformations s'atténuaient, l'espacement entre les mesures s'est agrandi pour atteindre environ la demi-année.

3.2 Tassomètres

Le tableau ci-dessous indique pour chaque tassomètre la date de la première et de la dernière mesure effectuée, le tassement total mesuré et le nombre de jours entre ces deux dates.

Profil	1ère mesure	dernière mesure	tassement total cm	nombre jours
86'190	17.06.76	21.01.80	48.5	1'313
86'220	17.06.76	31.01.83	40.5	2'419
86'820	19.08.77	30.03.81	77.5	1'319
205	25.04.78	26.01.83	50.1	1'737
88'860	04.10.77	27.06.79	55.3	631
89'520	27.06.76	26.01.83	77.6	2'404
91'050	17.06.76	26.05.77	120.2	344
91'083	17.06.76	12.04.78	123.0	665
91'690	02.07.76	27.10.76	48.3	119
91'710	01.07.76	20.10.77	97.6	477
91'855	08.03.79	19.05.81	117.5	802
92'020	05.08.80	19.05.81	47.8	288
92'200	05.08.80	18.05.81	35.8	287
192	13.04.77	19.05.81	92.3	1'491
155	15.05.77	26.01.83	80.1	2'082
T2	19.08.79	07.10.80	2.7	415
T3	19.08.79	19.05.81	34.1	639
T4	19.08.79	19.05.81	38.9	639
T5	19.08.79	07.10.80	23.9	415

Les mesures ont été effectuées d'une manière générale toutes les semaines éventuellement tous les quinze jours au début de leur mise en fonction, et ceci pour une période comprise entre 6 et 10 mois. Cette première phase d'observation passée, la fréquence des mesures a diminué de façon continue jusqu'à atteindre une mesure par année.

3.3 Mesures topographiques

Le nivellement initial fut réalisé en juillet 1981, depuis lors, sept nivellements ont été exécutés jusqu'au printemps 1984.

4. COMMENTAIRES SUR LES MESURES

4.1 Evolution des mouvements observés grâce aux inclinomètres

Remblai de l'autoroute

Seuls deux inclinomètres sont encore en fonction en 1984 : CHENE1 et IP01A3 (Annexe 16/4 et 5).

Pour le premier, installé dès le début de la mise en place d'un remblai d'environ 8.50 m de hauteur maximum, il indique un déplacement horizontal total d'environ 60 mm. Ce mouvement s'est produit en trois phases successives :

- déplacement important (40 mm) pendant la première année de mise en service (1976-1977)
- diminution régulière des mouvements au cours des deux années suivantes
- stabilisation du phénomène, avec des mouvements de l'ordre de 1-2 mm par année.

Il est à noter qu'au droit de l'inclinomètre CHENE1, les terrains sous-jacents sont constitués de limons argileux, parfois sableux de compressibilité moyenne.

L'inclinomètre IP01A3 a été mis en place en 1981, c'est-à-dire bien après la réalisation du remblai, qui atteint à cet endroit une hauteur d'environ 2.5 m. Il n'indique que de très faibles déplacements horizontaux (environ 2 mm/an) en parfaite concordance avec le premier pour la même période de mesures. On peut donc supposer, que si des mouvements horizontaux importants se sont produits au droit de ce remblai, ils ont eu lieu au début de la mise en place de ce dernier.

Remblai des viaducs d'Ependes

Cinq inclinomètres fonctionnent encore en 1984 (Annexes 16/6 à 10) :

- Le plus ancien (EPYVOO) indique un déplacement horizontal total de 400 mm, dont 300 mm pour les 18 premiers mois de son fonctionnement. Actuellement, ces mouvements se sont stabilisés à environ 2 mm/an.

- Les quatres autres, installés à la même date après la construction des remblais, montrent des déplacements horizontaux totaux de 50 à 60 mm dont les 4/5 ont eu lieu dans les 36 premiers mois. Les 30 derniers mois d'observation présentent des déplacements de 4 à 5 mm/an.

Il faut, en outre, signaler les déplacements saccadés que présente EPYVOU. Ils s'expliquent par le passage répété d'engins de chantier, de dépôts de terre épisodiques, etc. qui eurent lieu lors du chantier des viaducs. Cependant, cet inclinomètre indique malgré tout une direction et un ordre de grandeur de déplacement tout à fait compatible avec les inclinomètres voisins.

3.2 Evolution de la topographie

Les tassements annuels ont été calculés pour deux périodes. Ils ont été reportés sur le tableau No 1. Ils représentent l'évolution de la topographie des remblais depuis leur construction jusqu'en 1984.

Au vu du tableau No 1, quelques remarques s'imposent :

- La première période montre de nombreuses valeurs négatives. Elles indiquent une remontée des points de repère par rapport au nivellement initial.

- La seconde période présente des tassements plus importants que ceux de la première période sur le tronçon d'autoroute Chavornay-Yverdon.

- Sur le tronçon 91'700-93'650, les tassements observés pendant la 1ère période sont légèrement supérieurs à ceux observés durant la seconde période. Ils sont comparables en intensité à ceux observés sur le tronçon 86'300 à 90'950 pendant la seconde période, c'est-à-dire de l'ordre de 12 à 15 mm par année.

  Ils s'expliquent par le fait que le remblai NE du viaduc d'Ependes n'a été mis en place que tardivement par rapport à celui du SW. Les tassements dus au poids propre du remblai se poursuivaient donc lors de la première période de mesures topographiques. Quant aux tassements relevés lors de la seconde période, ils sont principalement dus à la mise en service de l'autoroute à fin 1982.

  Dans le tableau No 1, cinq groupes ont été créés. Pour faire partie d'un goupe, un repère doit présenter une valeur semblable au repère contigu. Sur le tableau No 2 les caractéristiques suivantes de ces groupes sont reportées :

  - leur situation géographique
  - leurs moyennes de tassements annuels pour les deux périodes considérées
  - la hauteur des remblais, ainsi que l'épaisseur et la nature des sols compressibles au droit de ces groupes.

Tableau No 1

Repère No	1ère période 7.81 - 8.82 mm/an	2nde périodé 8.82 - 3.84 mm/an	
86'300	0.9	6.4	
450	10.2	17.6	A
600	1.8	13.4	
750	5.5	12.0	
900	-5.5	3.5	
87'050	-4.6	7.1	
200	-5.5	6.4	
350	-9.2	6.4	E
500	-6.5	11.3	
650	-4.6	9.9	
800	-3.7	6.4	
950	-0.9	13.4	
88'100	0	15.5	
250	0.9	11.3	
400	4.6	19.1	
550	3.7	16.2	
700	0.9	16.9	
850	3.7	23.3	
89'000	9.2	26.8	B
150	12.9	31.1	
300	3.7	21.2	
450	4.6	21.9	
600	17.5	37.4	
750	1.8	23.3	
900	11.1	24.0	
90'050	-5.5	5.6	
200	0	5.6	
350	-1.8	4.9	E
500	-5.5	5.6	
650	4.6	10.6	
800	7.4	9.9	C
950	30.5	31.1	
	$\bar{m}$ = 2.6	$\bar{m}$ = 14.8	

Repère No	1ère période 1ère mes.-9.82 mm/an	2nde période 9.82 - 4.84 mm/an	
91'700	26.4	20.7	D
850	76.8	50.7	
92'000	31.2	24.0	
150	12.0	14.7	
300	8.4	4.0	E
450	3.6	8.0	
600	1.2	6.0	
750	-12.0	2.7	
900	-2.4	2.0	
93'050	-1.2	2.7	
200	10.0	5.3	
350	20.0	10.7	
500	8.0	5.3	
650	6.0	6.7	
	$\bar{m}$ = 13.4	$\bar{m}$ = 11.7	

Tableau No 2

Groupe	Situation	Tassement annuel moyen mm/an 1ère période	Tassement annuel moyen mm/an 2nde période	Hauteur du remblai m	Epaisseur sols compressibles m	Nature des sols compresibles
A	86450-86750	5.8	14.3	2.5 - 6.0	2.0 - 3.0	tourbe
B	87950-89900	5.3	21.5	2.0 - 3.0	5.0 - 6.0	tourbe et limon argileux crayeux
C	90650-90950	14.3	17.2	1.0 - 5.5	3.0 - 4.0	limon argileux crayeux et tourbe
D	91700-92150	36.6	27.5	2.0 - 7.0	6.0 - 7.0	limon argileux crayeux et tourbe
E	le reste	-0.5	6.0	1.5 - 2.5	3.0 - 6.0	limon argileux crayeux et tourbe

Le groupe A présente des tassements annuels moyens, malgré l'épaisseur des remblais qui est assez importante. Ce fait est dû à une épaisseur des sols compressibles (en l'occurence de la tourbe) relativement faible.

Le groupe B montre des tassements annuels moyens à grands, alors que l'épaisseur du remblai n'est que très moyenne. Cela provient de l'épaisseur assez importante des couches de sols compressibles (composés de tourbe et de limon argileux crayeux).

Le groupe C présente des tassements annuels moyens, malgré une hauteur de remblai qui peut être assez importante par endroit. Ces tassements sont dus aux sols compressibles (limon argileux crayeux et tourbe) de moyenne épaisseur.

Le groupe D montre de grands tassements annuels en rapport avec des remblais de moyenne à grande épaisseur sur des couches de sols compressibles (limon argileux crayeux et tourbe) d'épaisseur importante.

Le groupe E présente de faibles tassements annuels. Les remblais de petite à moyenne épaisseur reposent sur des sols compressibles (limon argileux crayeux et tourbe) d'épaisseur très variable (entre 1.0 et 8.0 m).

Ces résultats sont tout à fait comparables à ceux observés grâce aux tassomètres, bien que ces derniers aient mesuré des tassements beaucoup plus importants, puisque posés avant la mise en place des remblais.

5. PROPOSITIONS DE PROSPECTIONS ET D'ESSAIS COMPLEMENTAIRES

Les types de mesures adoptées peuvent être considérées comme parfaitement justifiables et valables. Elles sont suffisantes pour le contrôle du bon comportement de l'ouvrage.

Aucune prospection complémentaire n'est nécessaire.

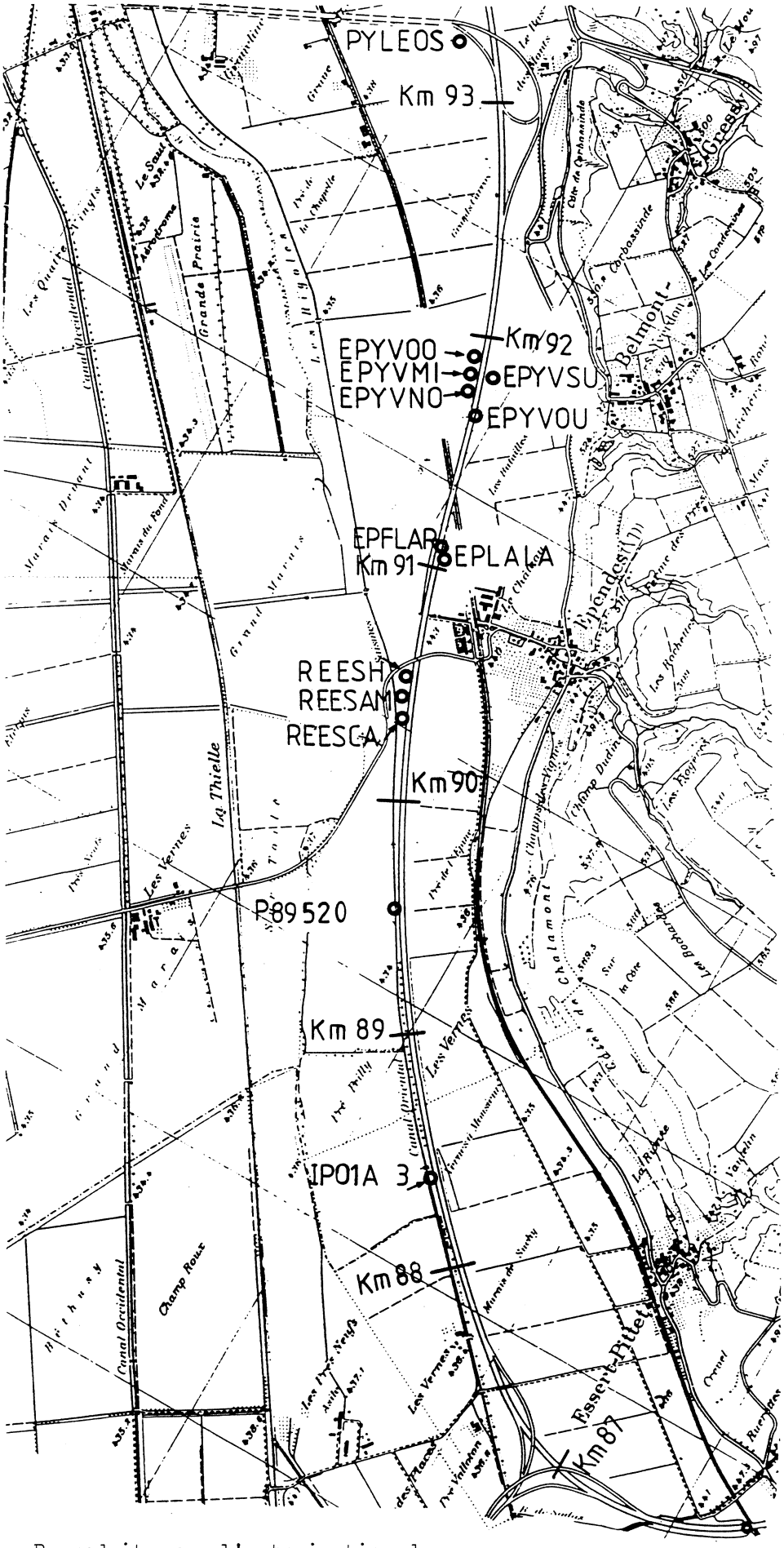
6. CONCLUSIONS

La méthode de construction a conduit à une uniformisation des tassements le long de ce tronçon et grâce à une exécution par étapes, aucune instabilité n'a été observée. Il en résulte une bonne viabilité de la chaussée.

Le comportement des remblais est tout à fait satisfaisant.

REMBLAIS DE LA PLAINE DE L'ORBE

SITUATION DES INCLINOMETRES



Chêne 1

Reproduit avec l'autorisation de
l'Office fédéral de topographie du 24.08.1990

Annexe 16/1

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IPo — FEUILLE N° 1

COORDONNEES Y 534'430 X 176'640 Z 435

DATE D'EXECUTION 7 décembre 1981 — PROFONDEUR 12.75 m

Méthode de forage ø mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage rotation à sec, carottier simple ø 146	100 %	1			Terre végétale, brune Limon terreux, argileux, brun, consist. moyenne Pénétromètre de poche : p = 1.2 kg/cm² Limon tourbeux, brun-noir avec petits morceaux de bois, tendre p = 0.3 - 0.5 kg/cm² Limon tourbeux, argileux, brun-noir, consistance moyenne p = 1.0 à 1.2 kg/cm²	Alluvions de la Plaine de l'Orbe		
		2			Tourbe brun-noir, légèrement décomposée			☒
		3						☒
		4			Tourbe noire, décomposée Craie lacustre, gris blanchâtre molle, avec débris de roseaux			☒
ø 131		5			Sable fin, limoneux, crayeux, avec des intercalations argileuses et débris organiques, gris Limon sableux, crayeux, avec des débris de roseaux, gris clair Craie lacustre gris blanchâtre, avec débris roseaux			☒
		6			Limon crayeux, avec beaucoup m.o., gris foncé Sable moyen à fin, gris, varvé de limon argileux, plus compact			
		7			Sable moyen, gris par places varvé de limon argileux, plus compact			
		8			Sable moyen à fin, limoneux, gris			
ø 116		9			Sable moyen à grossier, gris-beige, sans cohésion			
		10						

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE
ISRF - LABORATOIRES DE MECANIQUE DES SOLS ET DES ROCHES

SONDAGE N° IPo — FEUILLE N° 2

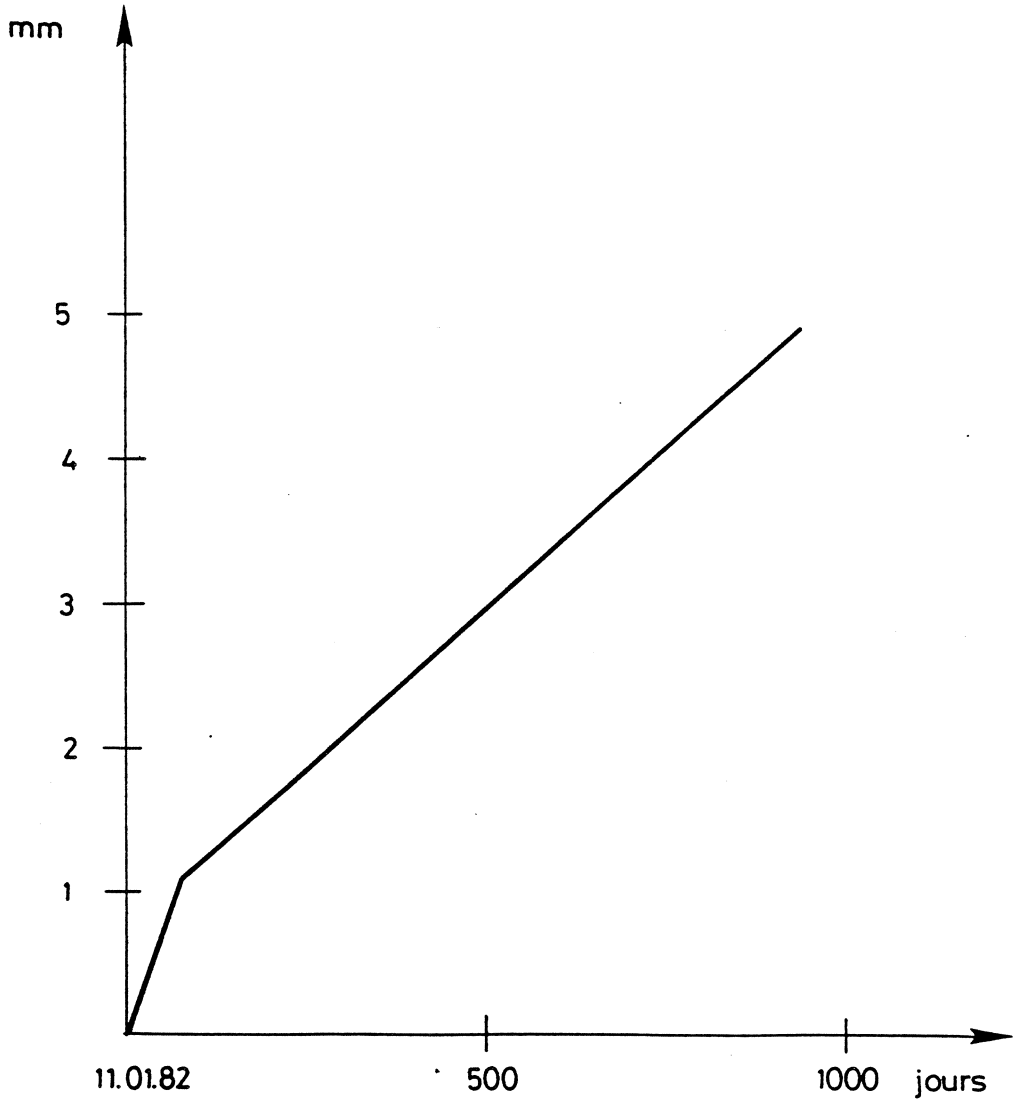
COORDONNEES Y 534'430 X 176'640 Z 435

DATE D'EXECUTION 7 décembre 1981 — PROFONDEUR 12.75 m

Méthode de forage ϕ mm	Récupération	Profondeur 1:50	Profil lithologique	Stabilité tectonique	Description géologique et géotechnique	Résumé	Eau Nappe Venue	Echantillon
Forage à sec, carottier simple ø101	100 %	11			Sable moyen à grossier, gris-beige, sans cohésion	Alluvions de la Plaine de l'Orbe		
		12			Sable moyen, limoneux, gris			
					Sable très limoneux, gris			
		13						

Ramblais de la plaine de l'Orbe

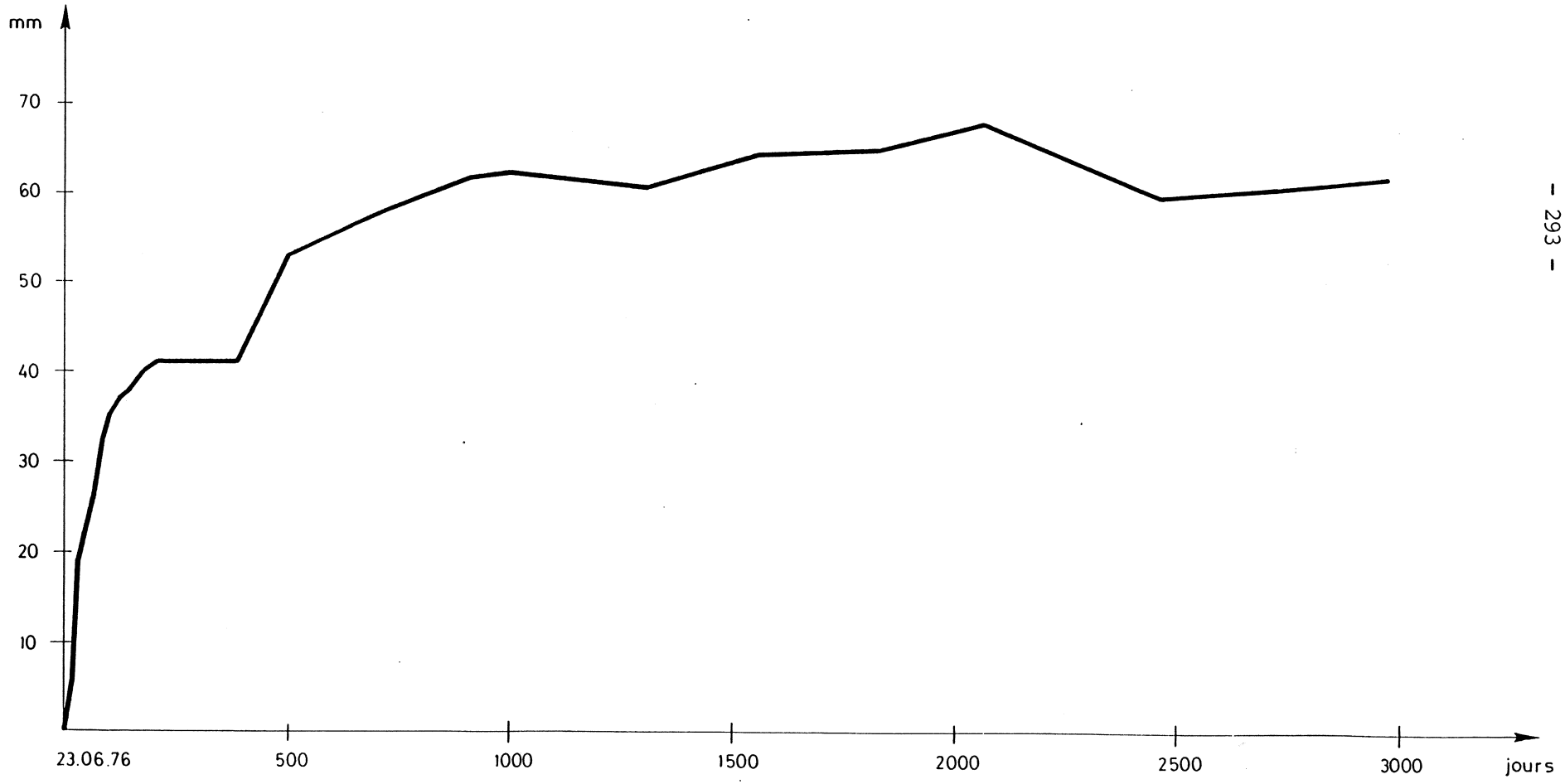
Déplacements mesurés
à 1.80 m sur l inclinomètre
IPO1A3



Annexe 16/4

Remblais de la plaine de l'Orbe

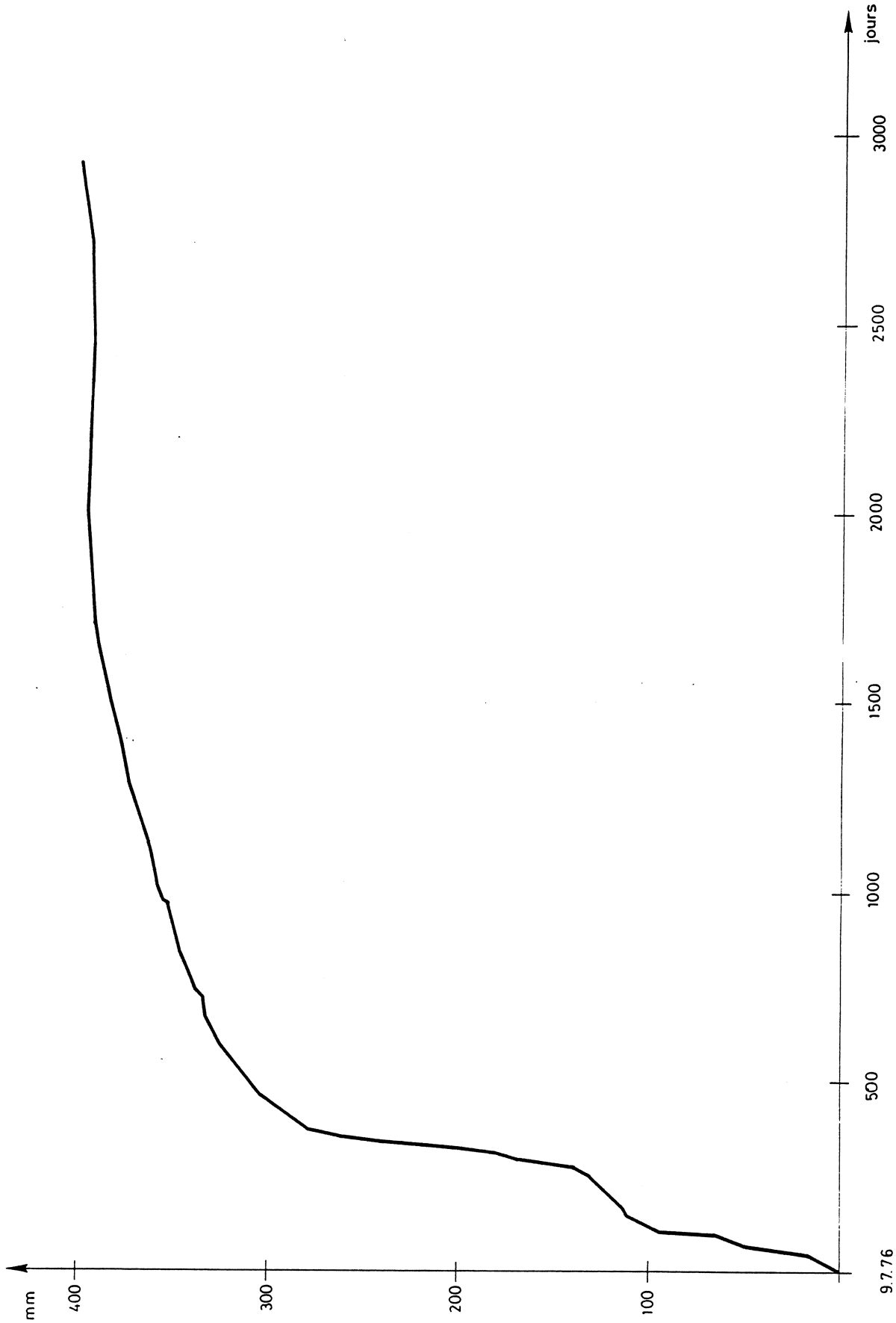
Déplacements mesurés à 3.00 m sur l'inclinomètre CHENE 1



Annexe 16/5

Remblais de la plaine de l'Orbe

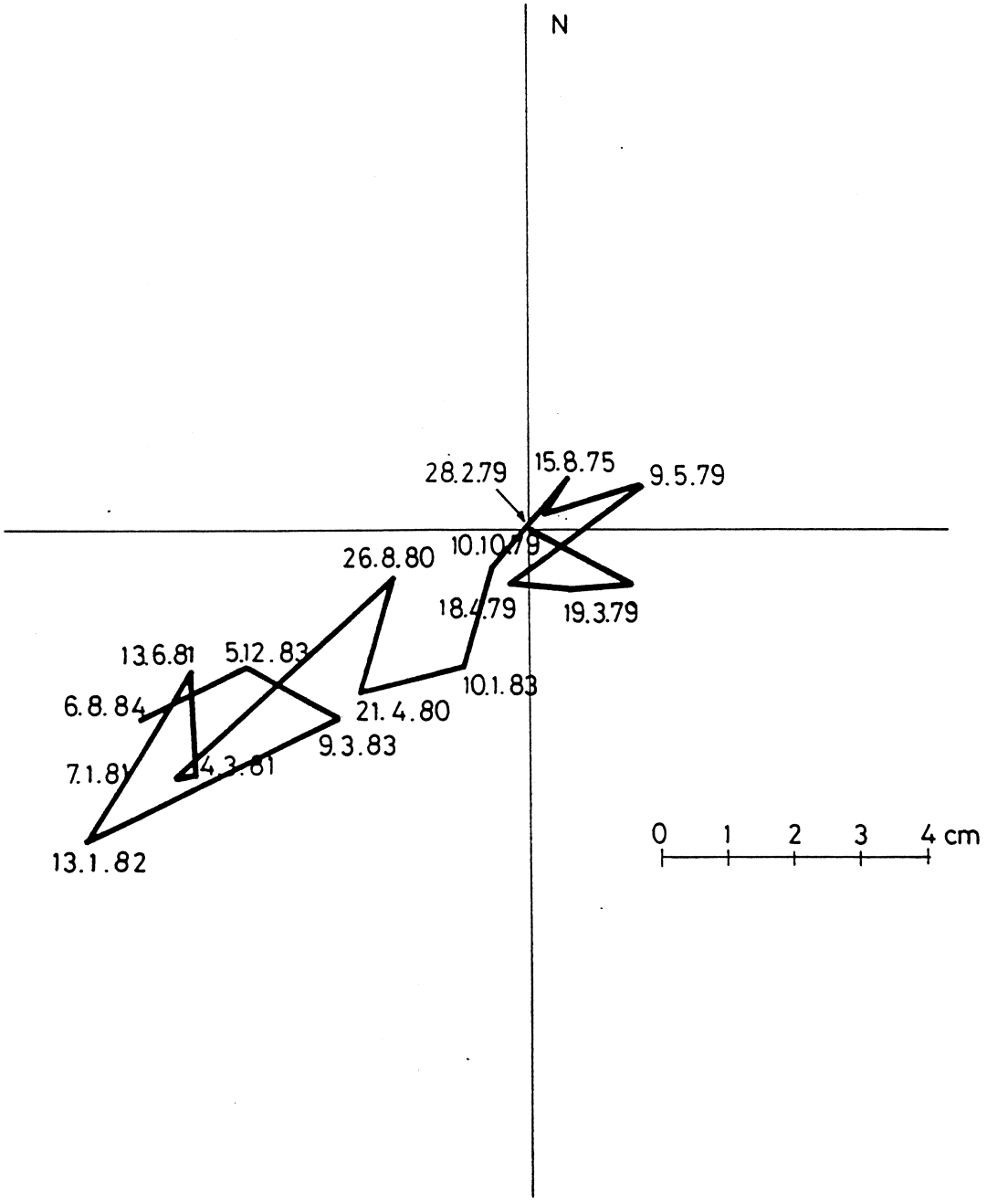
Déplacements mesurés a 240 sur l'inclinomètre EPYV00



Annexe 16/6

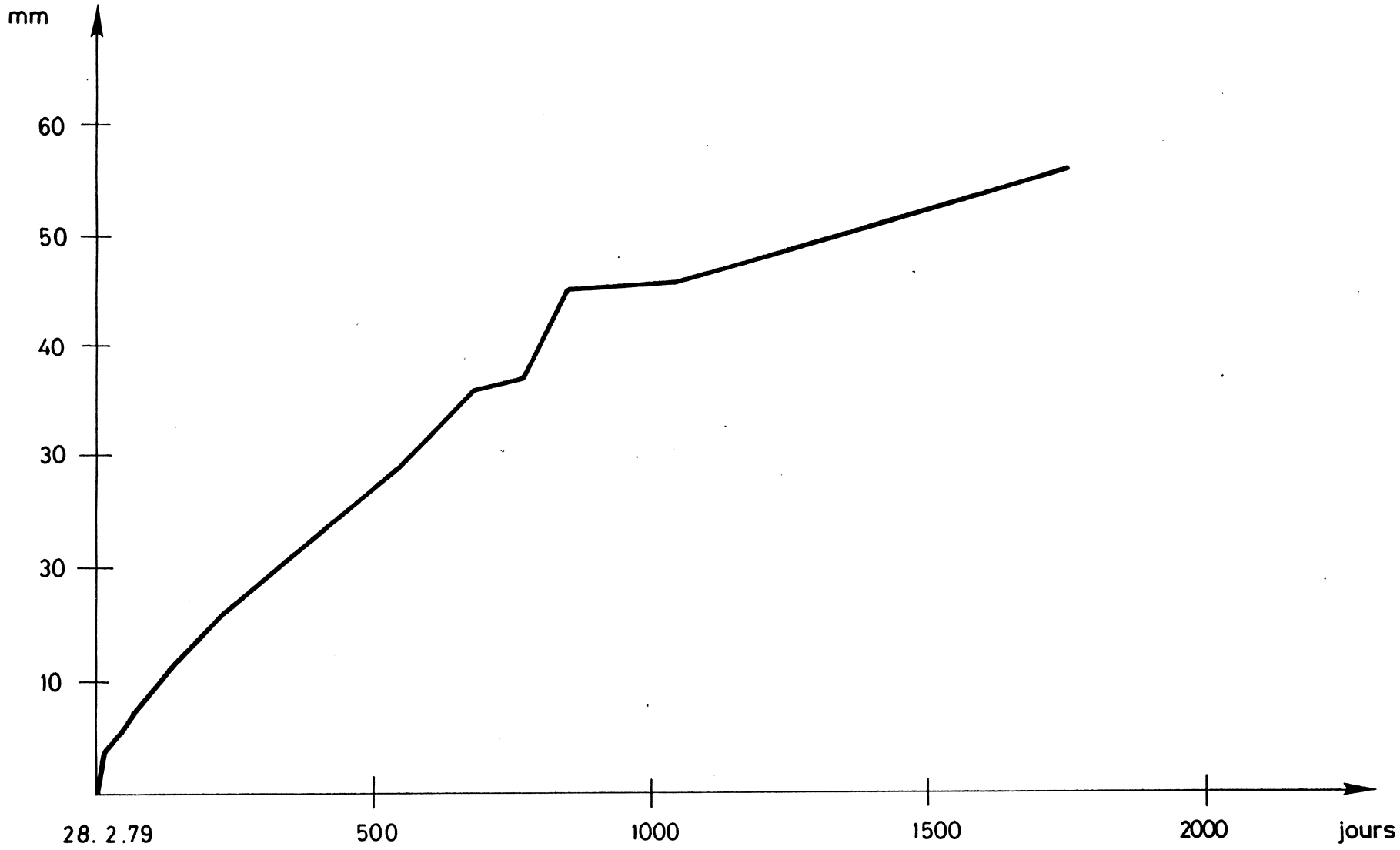
Remblais de la plaine de l'Orbe

Déplacements mesurés à 3.00 m sur l'inclinomètre EPYVOU



Remblais de la plaine de l'Orbe

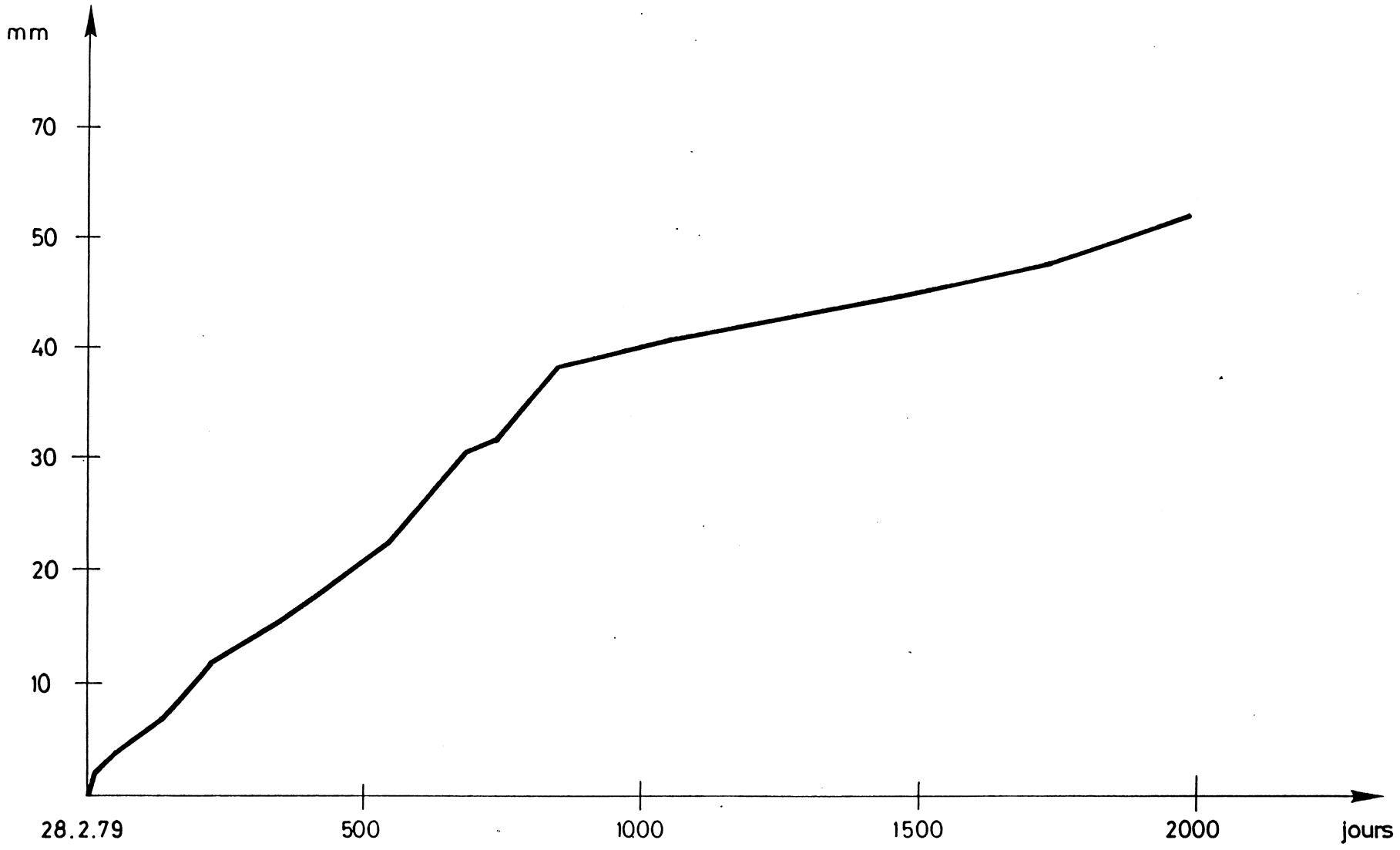
Déplacements mesurés à 1,80m sur l'inclinomètre EPYVNO

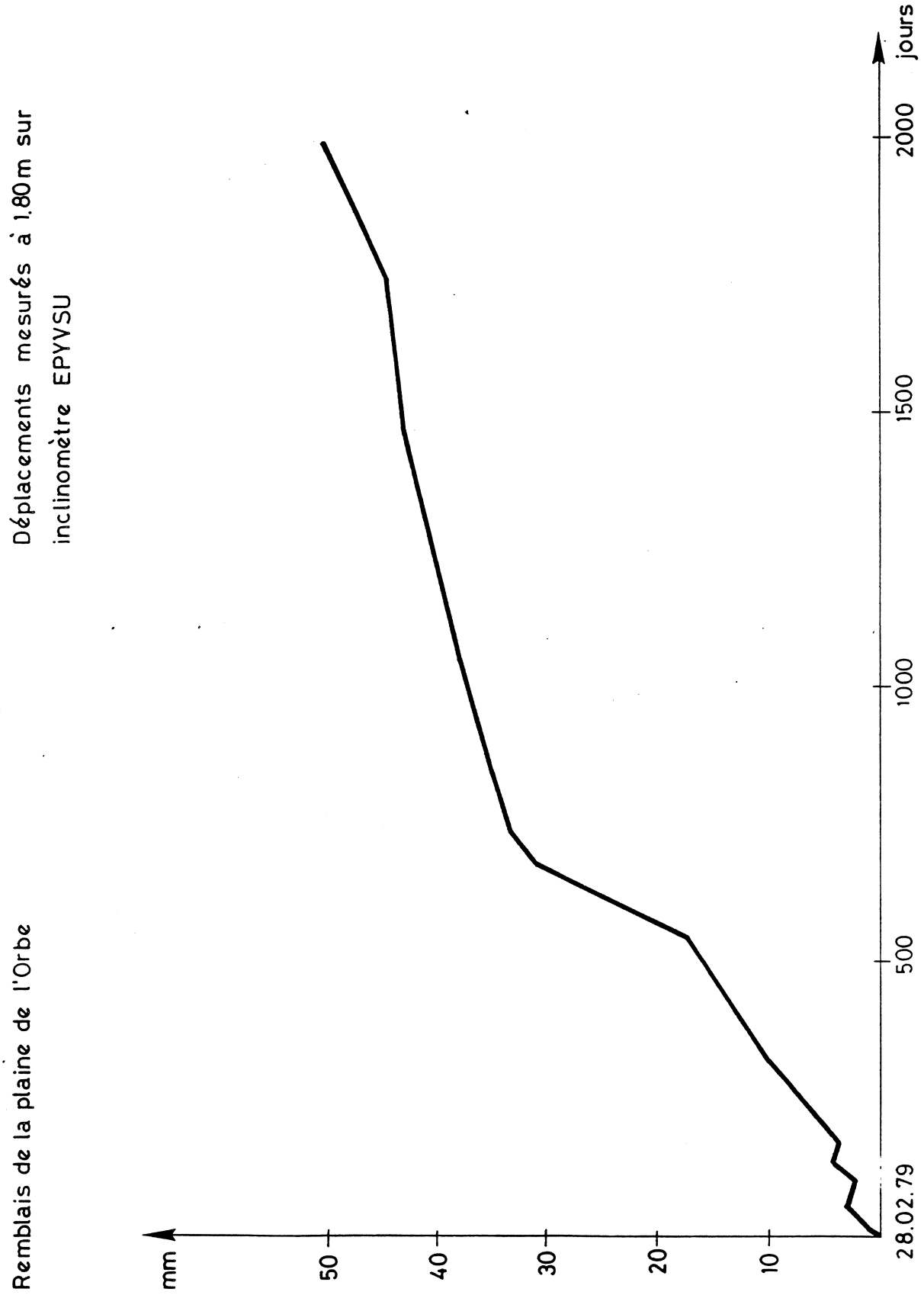


Annexe 16/8

Remblais de la plaine de l'Orbe

Déplacements mesurés à 1,80 sur l'inclinomètre
EPYVMI




Remblais de la plaine de l'Orbe
Déplacements mesurés à 1.80m sur
inclinomètre EPYVSU
mm
50
40
30
20
10
28.02.79
500
1000
1500
2000
jours

CONCLUSIONS

Les ouvrages choisis pour cette étude sont situés dans un rayon de moins de 40 km à partir de Lausanne. Ce choix a été motivé par le souci de limiter les frais de mesure et par le fait que les autoroutes N9, N12 et N1 présentent des ouvrages variés : ponts, soutènements, remblais, dans une topographie à fortes pentes ou dans des plaines à couches tourbeuses et fortement déformables.

La plupart de ces ouvrages se comportent bien. C'est dire que les mesures de déplacement ont confirmé leur immobilité. Néanmoins, dans certains cas, quelques soucis apparaissent et des problèmes intéressants pour notre étude se posent : ponts sur la Veveyse et la Veveyse de Fégire, Viaducs de Chillon et de la Paudèze, pont de la Cornallaz, remblai nord du Viaduc d'Ependes, soutènements du Lanciau.

Le cas des ponts de Cornallaz, que nous citons à titre d'exemple dans ces conclusions, a démontré qu'il ne suffit pas toujours de contrôler l'ouvrage lui-même, mais que le terrain environnant doit aussi être surveillé. En effet, à la Cornallaz, les observations faites jusqu'ici ont prouvé l'immobilité parfaite des piles et des revêtements des puits traversants le glissement et dans lesquels sont placés les appuis des ponts. Dans cette zone, le glissement est donc parfaitement stabilisé par le système de drainage. Par contre, l'inclinomètre implanté quelques centaines de mètres à l'amont des ponts a montré que la partie haute du glissement n'est pas stable. Il faut donc probablement s'attendre, le haut du glissement étant régulièrement surchargé par les produits d'érosion de la falaise de molassse qui le domine, à ce que peu à peu ce mouvement du haut s'étende vers le bas en direction des ouvrages. Le dispositif de contrôle doit permettre de connaître cette progression et d'alerter les responsables au moment voulu, qui ne se situera - espérons-le - que dans de nombreuses années.

Les systèmes de contrôle que nous avons utilisés sont au nombre de 12. Les techniques de mesures progressent rapidement. C'est dire que notre étude n'est pas exhaustive tant sur le plan des appareillages que sur celui des types d'ouvrages et des conditions géologiques ou géotechniques.

L'étude a montré qu'il est souvent insuffisant de se limiter à faire des contrôles à l'aide d'un seul système de mesures. Les contrôles topographiques par exemple, par nivellements ou par polygonales, sont couramment utilisés pour le contrôle du tablier des ponts. Pour de grands ouvrages, ces mesures ne concernent que des points très éloignés du niveau d'appui. De même, des contrôles de tirants d'ancrage par cales dynamométriques peuvent conduire à des conclusions erronnées quant au comportement d'un ouvrage. Il est donc recommandé de diversifier les types de mesure lors de la conception d'un système de contrôle.

La solution idéale consiste à prévoir le système de contrôle au moment de l'établissement du projet. C'est alors que se posent les problèmes à résoudre et que l'on sait ce qu'il faudra vérifier par la suite.

Il est important de rappeler que **l'interprétation des mesures** peut comporter des pièges. A cet égard, il faut mentionner essentiellement trois choses :

- Une faute de mesure peut être due au mauvais fonctionnement d'un appareil, sans que ce défaut soit évident pour l'observateur. Elle peut être due aussi au déplacement d'un point de référence considéré comme fixe. En principe, il est donc nécessaire de disposer de mesures surabondantes et, dans certains cas d'appareils nouveaux ou délicats, de placer deux appareils du même type se contrôlant mutuellement.

- L'ellipse d'erreur, ou la précision d'un appareillage de mesure, doit être connue. Il s'agit ici non pas de la précision indiquée par un fournisseur d'appareil, mais de celle d'un dispositif de mesure complet englobant les causes d'erreur dues aux conditions d'exécution du travail de mesure sur place. Cela ne peut être déterminé que par répétition d'un certain type de mesures dans un bref intervalle de temps. Il s'agit de tester la reproductibilité des mesures.

- Finalement, la question du critère d'alarme doit être étudiée avec soin. Il faut pouvoir dire quelles sont les valeurs des déplacements acceptables pour un ouvrage et quelle est l'évolution dans le temps des déplacements. Si l'on appelle vitesse de déplacement le rapport entre le déplacment mesuré entre deux séries de mesures et la durée qui sépare ces deux séries, il importe avant ou de savoir comment varie la vitesse au cours du temps; y a-t-il accélération ou ralentissement du mouvement ?

L'ensemble de ces objectifs constitue la base de la réflexion qui permettra de définir un système de contrôle d'ouvrage et le programme des mesures dans le temps. Les considérations économiques influencent naturellement aussi ce choix.

Quel est l'avenir ?
Quelle est la suite souhaitable à ces recherches ?

Nos études s'étant limitées à une région très restreinte, il nous a paru utile de connaître l'opinion des constructeurs routiers dans l'ensemble de la Suisse. Une enquête a donc été faite auprès des administrations cantonales. Les résultats principaux de cette enquête sont donnés dans l'encadré de la page suivante.

Le plus utile serait maintenant de poursuivre l'étude en constituant un groupe de travail intercantonal, auquel participerait naturellement un délégué de l'OFR, et dont le but serait d'étudier la possibilité de rédiger des recommandations et un cahier des charges types pour le contrôle du comportement des ouvrages routiers.

Principaux résultats de l'enquête auprès des départements des travaux publics des cantons suisses sur l'auscultation des ouvrages

- Sur 25 questionnaires envoyés, 18 réponses ont été reçues. Parmi elles, 75 % des cantons estiment que l'auscultation des ouvrages est une préoccupation importante. Les quatre cantons les plus engagés dans cette tâche, qui contrôlent plusieurs centaines d'ouvrages sont Zürich, St. Gall, Vaud et Genève.

- Au total, en Suisse, le nombre d'ouvrages contrôlés s'élève à:
  2820 ponts
  106 murs ancrés et non ancrés
  38 remblais importants
  14 tunnels

- 12 systèmes d'auscultation différents sont utilisés, le nivellement apparaît comme le moyen de contrôle le plus fréquemment utilisé.

- La fréquence des contrôles est très variable, suivant les ouvrages, leur type et leur âge, et suivant les cantons. Elle varie de une mesure par mois dans certains cas particuliers à une mesure tous les 10 ans.

La très grande majorité des cantons concernés estime que les ouvrages doivent être contrôlés. Il faut donc définir au mieux ce qu'il est raisonnable de faire et pour cela, une consultation aussi large que possible doit être mise sur pied. Le groupe de travail concluera peut-être que le travail à faire dépasse la capacité des administrations routières. On peut alors imaginer que l'administration confierait des mandat à des bureaux privés pour effectuer ces contrôles. Elle resterait néanmoins la responsable, réunirait les résultats des mesures, tirerait les conclusions et, si nécessaire, prendrait les décisons des travaux de confortement requis.

Nous sommes d'avis qu'actuellement, la maintenance des voies de circulation nécessite la définition d'une politique de contrôle des ouvrages. C'est ce que nous proposons de faire ces prochains temps, au moins en ce qui concerne les fondations.

*****

L'étude de détail et la rédaction du présent rapport ont été réalisées par M. J.-F. Mathier, géologue et M. J.-D. Berchten, ingénieur au Laboratoire de mécanique des sols et des roches de l'EPFL.

Les spécialistes responsables :

M. B. Graf	Prof. E. Recordon	Bureau J.-C. Ott
B A R	I S R F	F. Fiala
	Ed. Recordon	