



**HAL**  
open science

# Contribution à l'étude géothermique de l'hydrogéologie des glissements de terrain

Djafar Kimiagalam

► **To cite this version:**

Djafar Kimiagalam. Contribution à l'étude géothermique de l'hydrogéologie des glissements de terrain. Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1976. Français. NNT: . tel-00691102

**HAL Id: tel-00691102**

**<https://theses.hal.science/tel-00691102>**

Submitted on 25 Apr 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE  
DE GRENOBLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR INGENIEUR

par

Djafar KIMIAGALAM

Ingénieur Géologue de la Faculté Technique de TENERAN

Ingénieur Géologue Géophysicien de l'I.F.P.

CONTRIBUTION A L'ETUDE GEOTHERMIQUE  
DE L'HYDROGEOLOGIE—DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Soutenu le 28 Juin 1976 devant la Commission d'Examen

Messieurs

<b>R. BARBIER</b>	Professeur	Président
<b>J. BIAREZ</b>	Professeur	Rapporteur
<b>R. MICHEL</b>	Professeur	} Examineurs
<b>CH. AZIMI</b>	Ingénieur ph. D.	

GRENOBLE

N° d'Ordre :

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE  
DE GRENOBLE

pour obtenir

**LE GRADE DE DOCTEUR INGENIEUR**

par

**Djafar KIMIAGALAM**

Ingénieur Géologue de la Faculté Technique de TEHERAN

Ingénieur Géologue Géophysicien de l'I.F.P.

CONTRIBUTION A L'ETUDE GEOTHERMIQUE  
DE L'HYDROGEOLOGIE-DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Soutenu le 28 Juin 1976 devant la Commission d'Examen

Messieurs

<b>R. BARBIER</b>	Professeur	Président
<b>J. BIAREZ</b>	Professeur	Rapporteur
<b>R. MICHEL</b>	Professeur	} Examineurs
<b>CH. AZIMI</b>	Ingénieur ph. D.	

**GRENOBLE**

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE  
ET MEDICALE DE GRENOBLE

Monsieur Michel SOUTIF : Président  
Monsieur Gabriel CAU : Vice-président

MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE L'U.S.M.G.

PROFESSEURS TITULAIRES

MM. ANGLES D'AURIAC Paul	Mécanique des fluides
ARNAUD Paul	Chimie
AUBERT Guy	Physique
AYANT Yves	Physique approfondie
Mme BARBIER Marie-Jeanne	Electrochimie
MM. BARBIER Jean-Claude	Physique expérimentale
BARBIER Reynold	Géologie appliquée
BARJON Robert	Physique nucléaire
BARNOUD Fernand	Biosynthèse de la cellulose
BARRA Jean-René	Statistiques
BARRIE Joseph	Clinique chirurgicale
BEAUDOING André	Clinique de Pédiatrie et Puériculture
BERNARD Alain	Mathématiques Pures
Mme BERTRANDIAS Françoise	Mathématiques Pures
MM. BERTRANDIAS Jean-Paul	Mathématiques Pures
BEZES Henri	Pathologie chirurgicale
BLAMBERT Maurice	Mathématiques Pures
BOLLIET Louis	Informatique (IUT B)
BONNET Georges	Electrotechnique
BONNET Jean-Louis	Clinique ophtalmologique
BONNET-EYMARD Joseph	Clinique gastro-entérologique
Mme BONNIER Marie-Jeanne	Chimie Générale
BOUCHERLE André	Chimie et Toxicologie
BOUCHEZ Robert	Physique nucléaire
BOUSSARD Jean-Claude	Mathématiques appliquées
BRAVARD Yves	Géographie
CABANEL Guy	Clinique rhumatologique et hydrologique
CALAS François	Anatomie
CARLIER Georges	Biologie végétale
CARRAZ Gilbert	Biologie animale et pharmacodynamie
CAU Gabriel	Médecine légale et Toxicologie
CAUQUIS Georges	Chimie organique
CHABAUTY Claude	Mathématiques Pures
CHARACHON Robert	Clinique Oto-Rhino-Laryngologique
CHATEAU Robert	Clinique de Neurologie
CHIBON Pierre	Biologie animale
COEUR André	Pharmacie chimique et chimie analytique
CONTAMIN Robert	Clinique gynécologique
COUDERC Pierre	Anatomie pathologique
CRAYA Antoine	Mécanique
Mme DEBELMAS Anne-Marie	Matière médicale
MM. DEBELMAS Jacques	Géologie générale
DEGRANGE Charles	Zoologie
DELORMAS Pierre	Pneumo-Phtisiologie
DEPORTES Charles	Chimie minérale
DESRE Pierre	Métallurgie

MM. TRAYNARD Philippe Chimie générale  
 VILLANT François Zoologie  
 VALENTIN Jacques Physique Nucléaire  
 VAUQUOIS Bernard Calcul électronique  
 Mme VERAIN Alice Pharmacie galénique  
 MM. VERAIN André Physique  
 VEYRET Paul Géographie  
 VIGNAIS Pierre Biochimie médicale  
 YOCCOZ Jean Physique nucléaire théorique

PROFESSEURS ASSOCIES

MM. CLARK Gilbert Spectrométrie Physique  
 CRABBE Pierre CERMO  
 ENGLMAN Robert Spectrométrie Physique  
 HOLTZBERG Frédéric Basses Températures  
 ROST Ernest Sciences Nucléaires

PROFESSEURS SANS CHAIRE

Mlle AGNIUS-DELORE Claudine Physique pharmaceutique  
 ALARY Josette Chimie analytique  
 MM. AMBROISE-THOMAS Pierre Parasitologie  
 BELORIZKY Elie Physique  
 BENZAKEN Clause Mathématiques Appliquées  
 BIAREZ Jean-Pierre Mécanique  
 BILLET Jean Géographie  
 BOUCHET Yves Anatomie  
 BRUGEL Lucien Energétique (IUT A)  
 BUISSON René Physique (IUT A)  
 CONTE René Physique (IUT A)  
 DEPASSEL Roger Mécanique des fluides  
 GAUTHIER Yves Sciences Biologiques  
 GAUTRON René Chimie  
 GIDON Paul Géologie et Minéralogie  
 GLENAT René Chimie organique  
 GROULADE Joseph Biochimie médicale  
 HACHUES Gérard Calcul numérique  
 HOLLARD Daniel Hématologie  
 HUGONOT Robert Hygiène et Médecine Préventive  
 IDELMAN Simon Physiologie animale  
 JOLY Jean-René Mathématiques Pures  
 JULLIEN Pierre Mathématiques appliquées  
 Mme KAHANE Josette Physique  
 MM. KUHN Gérard Physique (IUT A)  
 LE ROY Philippe Mécanique (IUT A)  
 LUU DUC Cuong Chimie organique  
 MAYNARD Roger Physique du solide  
 PELMONT Jean Biochimie  
 PERRILLUX Jean-Jacques Géologie et Minéralogie  
 PFISTER Jean-Claude Physique du Solide  
 Mlle PIERY Yvette Physiologie animale  
 MM. RAYNAUD Hervé M.I.A.G.  
 REBECQ Jacques Biologie (CUS)  
 REVOL Michel Urologie  
 REYMOND Jean-Charles Chirurgie générale  
 RICHARD Lucien Biologie végétale  
 Mme RINAUDO Marguerite Chimie macromoléculaire

MM. ROBERT André Chimie papetière  
 SARRAZIN Roger Anatomie et chirurgie  
 SARROT-REYNAULD Jean Géologie  
 SIROT Louis Chirurgie générale  
 Mme SOUTIF Jeanne Physique générale  
 MM. STREGLITZ Paul Anesthésiologie  
 VIALON Pierre Géologie  
 VAN CUTSEM Bernard Mathématiques Appliquées

MAITRES DE CONFERENCES ET MAITRES DE CONFERENCES AGREGES

MM. AMBLARD Pierre Dermatologie  
 ARMAND Gilbert Géographie  
 ARMAND Yves Chimie (IUT A)  
 BACHELOT Yvan Endocrinologie  
 BARGE Michel Neuro chirurgie  
 BARJOLLE Michel M.I.A.G.  
 BEGUIN Claude Chimie organique  
 Mme BERIEL Hélène Pharmacodynamie  
 MM. BOST Michel Pédiatrie  
 BOUCHAREL Jacques Psychiatrie adultes  
 Mme BOUCHE Liane Mathématiques (CUS)  
 MM. BRODEAU François Mathématiques (IUT B)  
 BUTEL Jean Orthopédie  
 CHAMBAZ Edmond Biochimie médicale  
 CHAMPETIER Jean Anatomie et organogénèse  
 CHARDON Michel Géographie  
 CHERADAME Hervé Chimie papetière  
 CHLAVERINA Jean Biologie appliquée (EFP)  
 COHEN-ABDAD Jean-Pierre Spectrométrie physique  
 COLOMB Maurice Biochimie médicale  
 CONTAMIN Charles Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire  
 CORDONNIER Daniel Néphrologie  
 COULOMB Max Radiologie  
 CROUZET Guy Radiologie  
 CYROT Michel Physique du Solide  
 DELOBEL Claude M.I.A.G.  
 DENIS Bernard Cardiologie  
 DOUCE Roland Physiologie végétale  
 DUSSAUD René Mathématiques (CUS)  
 Mme ETERRADOSSI Jacqueline Physiologie  
 MM. FAURE Jacques Médecine légale  
 FAURE Gilbert Urologie  
 FONTAINE Jean-Marc Mathématiques Pures  
 GAUTIER Robert Chirurgie générale  
 GENSAC Pierre Botanique  
 GIDON Maurice Géologie  
 GROS Yves Physique (IUT A)  
 GUITTON Jacques Chimie  
 HICTER Pierre Chimie  
 IVANES Marcel Electricité  
 JALBERT Pierre Histologie  
 KOLODIE Lucien Hématologie  
 KRAKOWIAK Sacha Mathématiques appliquées  
 LE NOC Pierre Bactériologie-virologie  
 LEROY Philippe IUT A  
 MACHE Régis Physiologie végétale  
 MAGNIN Robert Hygiène et Médecine préventive  
 MALLION Jean-Michel Médecine du travail

MM. DESSAUX Georges	Physiologie animale
DODU Jacques	Mécanique appliquée (IUT A)
DOLIQUE Jean-Michel	Physique des plasmas
DREYFUS Bernard	Thermodynamique
DUCROS Pierre	Cristallographie
DUGOIS Pierre	Clinique de Dermatologie et Syphiligraphie
GAGNAIRE Didier	Chimie physique
GALLISSOT François	Mathématiques Pures
GALVANI Octave	Mathématiques Pures
GASTINEL Noël	Analyse numérique
GAVEND Michel	Pharmacologie
GEINDRE Michel	Electroradiologie
GERBER Robert	Mathématiques Pures
GERMAIN Jean-Pierre	Mécanique
GIRAUD Pierre	Géologie
JANIN Bernard	Géographie
KAHANE André	Physique générale
KLEIN Joseph	Mathématiques Pures
KOSZUL Jean-Louis	Mathématiques Pures
KRAVTCHENKO Julien	Mécanique
KUNTZMANN Jean	Mathématiques Appliquées
LACAZE Albert	Thermodynamique
LACHARME Jean	Biologie végétale
Mme LAJZEROWICZ Janine	Physique
M. LAJZEROWICZ Joseph	Physique
LATREILLE René	Chirurgie générale
LATURAZE Jean	Biochimie pharmaceutique
LAURENT Pierre	Mathématiques Appliquées
LEDRU Jean	Clinique médicale B
LLIBOUTRY Louis	Géophysique
LOISEAUX Pierre	Sciences Nucléaires
LONGUEUE Jean-Pierre	Physique nucléaire
LOUP Jean	Géographie
Melle LUTZ Elisabeth	Mathématiques Pures
MALGRANGE Bernard	Mathématiques Pures
BOUTET DE MONVEL Louis	Mathématiques Pures
MALINAS Yves	Clinique obstétricale
MARTIN-NOEL Pierre	Séméiologie médicale
MAZARE Yves	Clinique médicale A
MICHEL Robert	Minéralogie et Pétrographie
MICOUD Max	Clinique maladies infectieuses
MOURIQUAND Claude	Histologie
MOUSSA André	Chimie nucléaire
MULLER Jean-Michel	Thérapeutique (néphrologie)
NEEL Louis	Physique du Solide
OZENDA Paul	Botanique
PAYAN Jean-Jacques	Mathématiques Pures
PEBAY-PEVROULA Jean-Claude	Physique
RASSAT André	Chimie systématique
RENARD Michel	Thermodynamique
RINALDI Renaud	Physique
DE ROUGEMONT Jacques	Neuro-chirurgie
SEIGNEURIN Raymond	Microbiologie et Hygiène
SENGEL Philippe	Zoologie
SIBILLE Robert	Construction mécanique (IUT A)
SOUTIF Michel	Physique générale
TANCHE Maurice	Physiologie

MM. MARECHAL Jean	Mécanique (IUT A)
MARTIN-BOUYER Michel	Chimie (CUS)
MICHOULIER Jean	Physique (IUT A)
Mme MINIER Colette	Physique (IUT A)
MM. NEGRE Robert	Mécanique (IUT A)
NEMOZ Alain	Thermodynamique
NOUGARET Marcel	Automatique (IUT A)
PARAMELLE Bernard	Pneumologie
PECCOUD François	Analyse (IUT B)
PEFFEN René	Métallurgie (IUT A)
PERRET Jean	Neurologie
PERRIER Guy	Géophysique - Glaciologie
PHELIP Xavier	Rhumatologie
RACHAIL Michel	Médecine interne
RACINET Claude	Gynécologie et obstétrique
RAMBAUD André	Hygiène et Hydrologie
RAMBAUD Pierre	Pédiatrie
Mme RENAUDET Jacqueline	Bactériologie
MM. ROBERT Jean-Bernard	Chimie-Physique
ROMIER Guy	Mathématiques (IUT B)
SHOM Jean-Claude	Chimie générale
STOEHNER Pierre	Anatomie pathologique
VROUSOS Constantin	Radiologie

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

M. COLE Antony	Sciences Nucléaires
----------------	---------------------

CHARGE DE FONCTIONS DE MAITRES DE CONFERENCES

M. JUNIEN-LAVILLAVROY Paul	O.R.L.
----------------------------	--------

Fait à SAINT MARTIN D'HERES, DECEMBRE 1975.

A V A N T - P R O P O S

Je voudrais tout d'abord exprimer ma profonde reconnaissance au Ministère des Affaires Etrangères du Gouvernement Français. La bourse qui m'a été accordée m'a permis de réaliser le présent travail.

Je remercie Monsieur Reza ASSEFI, Directeur du Service National Géologique d'Iran, d'avoir bien voulu m'accorder ce séjour en France pour la préparation de ma thèse.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur R. BARBIER qui me fait l'honneur de superviser cette thèse. J'exprime aussi mes remerciements les plus sincères à Monsieur le Professeur J. BIAREZ qui m'a accueilli au Laboratoire de Géotechnique et assuré la direction de mes travaux. Je remercie Monsieur le Professeur R. MICHEL qui a bien voulu faire partie du Jury.

Je remercie Monsieur C. AZIMI pour les conseils qu'il m'a prodigués sur le terrain et au laboratoire. Ma reconnaissance va également à Messieurs P. DESVARREUX et J.L. TANE qui m'ont aidé tout particulièrement pour les corrections de ce texte. Je remercie également le personnel du Laboratoire de Géotechnique, surtout Monsieur L. KIRCHER pour les services qu'il m'a rendus pour les travaux de Laboratoire et Madame J. LAURENT, Secrétaire du Laboratoire de Géotechnique, pour la réalisation matérielle de cette thèse.

S O M M A I R E

	Pages
<u>INTRODUCTION</u> .....	1
<u>PREMIERE PARTIE</u>	
<u>CHAPITRE I - TEMPERATURE DU SOL</u> .....	5
1 - SOURCE EXTERNE .....	7
1.1 - Radiation solaire .....	7
1.2 - Coefficient de transparence .....	7
1.3 - Quantité de chaleur parvenant au sol et tempé- rature du sol .....	9
1.4 - Hypothèse fondamentale de Fourier .....	14
1.5 - Propagation de la chaleur dans le sol .....	15
1.6 - Variations journalières et annuelles .....	18
2 - SOURCE INTERNE .....	
2.1 - Chaleur venant de l'intérieur de la terre .....	23
3 - SOURCES SECONDAIRES .....	25
4 - FACTEURS INFLUENCANT LA TEMPERATURE DU SOL .....	30
4.1 - Influence de l'altitude et de la latitude ...	30
4.2 - Influence de la couverture .....	32
4.2.1 - Influence de la végétation et de la forêt	32
4.2.2. - Influence de la neige .....	33
4.2.3. - Influence du gel .....	33
4.3 - Influence de la pluie et du vent .....	34
4.4 - Influence de l'exposition .....	36
4.5 - Influence de la nature du sol .....	38
4.5.1 - Etat physique du sol .....	38
4.5.2. - Etat chimique du sol .....	39
4.5.3. - Influence de la teneur en eau .....	45
4.6 - Influence de la variation locale de composition du sol .....	46
5 - CONCLUSIONS .....	47
<u>CHAPITRE II - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE</u> .....	50
1 - PRINCIPALES CAUSES DES MOUVEMENTS DE TERRAINS .....	52
1.1 - Modification des forces de volume .....	52
1.2 - Modification des relations exprimant les proprié- tés mécaniques du sol .....	53
1.2.1 - Modifications dues au comportement fragi- le des matériaux .....	53
1.2.2 - Modifications dues au gel et au dégel .....	53



1.2.3 - Modifications dues au changement de teneur en eau .....	53
1.2.4 - Modifications dues à l'altération des matériaux .....	53
1.3 - Modifications des conditions aux limites .....	54
1.3.1 - Le sol .....	54
1.3.2 - L'eau .....	54
2 - POSSIBILITES D'EXISTENCE DE CHENAUX SOUS LES GLISSEMENTS DE TERRAINS .....	54
3 - METHODE DES TRACEURS .....	57
4 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE .....	59
4.1 - Echange thermique entre les eaux et le sol .....	59
4.2 - Période de travail .....	61
4.3 - Mesure de la température sur le terrain .....	65
4.4 - Appareil de mesure .....	66
5 - LES CORRECTIONS .....	66
5.1 - Correction de l'influence de la variation journalière de température .....	68
5.2 - Correction de la variation de la composition du sol .....	68
5.3 - Correction due aux variations de couvertures superficielles .....	69
5.4 - Correction due à la décomposition des matériaux radio-actifs .....	69
6 - PRESENTATION DES RESULTATS .....	71
7 - CONCLUSIONS .....	71
<u>CHAPITRE III - ETUDE DES CHAMPS THERMIQUES</u> .....	72
1 - CHAMP STATIONNAIRE A DEUX OU TROIS DIMENSIONS .....	73
1.1 - Equation différentielle de Laplace .....	73
1.1.1 - Régissant les isothermes .....	73
1.1.2 - Régissant les lignes de flux .....	75
1.1.3 - Liaison entre la variante U et le flux $\phi$ .....	75
2 - METHODE ANALYTIQUE .....	77
2.1 - Champ créé par deux sources linéaires conjuguées à flux opposés (source et puits) .....	77
3 - DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE AUTOUR D'UN CHENAL SOUTERRAIN .....	79
4 - INTERPRETATION DES RESULTATS THERMIQUES .....	82
5 - TRAVAUX SUR MODELE PAR ANALOGIE ELECTRIQUE .....	86
5.1 - Champ créé autour d'un cylindre .....	89
5.2 - Champ créé autour de différentes plaques .....	91
6 - ANNEXE .....	98

.../...

## DEUXIEME PARTIE

EXEMPLES D'APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

<u>EXEMPLE I</u> .....	103
INTRODUCTION .....	105
1 - RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES .....	106
2 - OBSERVATIONS GEOLOGIQUES GENERALES .....	106
3 - LIMITES DU GLISSEMENT EN SURFACE .....	107
4 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE .....	108
4.1 - Sources et suintements .....	108
4.2 - Application sur le terrain et résultats obtenus .....	109
4.3 - Interprétation qualitative .....	109
4.4 - Interprétation quantitative .....	110
5 - POSITION DU SUBSTRATUM D'APRES LES METHODES SISMIQUE ET ELECTRIQUE .....	113
6 - RESULTATS DE LA METHODE SISMIQUE .....	113
7 - RESULTATS DE LA METHODE ELECTRIQUE .....	114
8 - NATURE DES TERRAINS DE COUVERTURE .....	115
9 - CONCLUSIONS .....	116
<u>EXEMPLE II</u> .....	125
INTRODUCTION .....	127
1 - GEOLOGIE GENERALE .....	127
2 - HYDROLOGIE .....	129
3 - RECONNAISSANCES EFFECTUEES .....	129
4 - APPLICATION DES METHODES SISMIQUE ET DE RESISTIVITE .....	130
5 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE .....	133
5.1 - Interprétation qualitative .....	134
5.2 - Interprétation quantitative .....	134
6 - CONCLUSIONS .....	135
<u>EXEMPLE III</u> .....	143
INTRODUCTION .....	145
1 - RESULTATS DES OBSERVATIONS SUR LE TERRAIN .....	145
2 - RESULTATS ET INTERPRETATION DES ESSAIS GEOPHYSIQUES .....	147
2.1 - Résultats des sondages sismiques .....	147
2.2 - Résultats des sondages électriques .....	149
3 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE .....	152
3.1 - Hydrogéologie .....	152
3.2 - Résultats des mesures thermiques .....	152
3.3 - Interprétation qualitative .....	153
3.4 - Interprétation quantitative .....	153
4 - CONCLUSIONS .....	155

	Pages
<u>EXEMPLE IV</u> .....	165
INTRODUCTION .....	167
1 - PRINCIPALES OBSERVATIONS GEOLOGIQUES .....	167
2 - RESULTATS DES RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES .....	168
2.1 - Prospection électrique .....	168
2.2 - Prospection sismique .....	169
3 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE .....	171
3.1 - Hydrogéologie .....	171
3.2 - Application sur le terrain et résultats obtenus .....	171
4 - CONCLUSIONS .....	173
<u>EXEMPLE V</u> .....	183
INTRODUCTION .....	185
1 - GEOLOGIE DU SITE D'APRES UN SONDAGE MECANIQUE .....	186
2 - RESULTATS DES RECONNAISSANCES SISMIQUES .....	187
2.1 - Profils sismiques .....	187
2.2 - Profils et sondages électriques .....	188
3 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE .....	188
3.1 - Interprétation qualitative .....	188
3.2 - Interprétation quantitative .....	188
4 - CONCLUSIONS .....	190
REMARQUES SUR LES EXEMPLES .....	201
CONCLUSIONS GENERALES .....	203

I N T R O D U C T I O N

L'existence des anomalies thermiques au-dessus de structures géologiques est un sujet très discuté. Dès 1927, l'AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE avait mis au point un programme de mesures de la température dans 400 puits pour avoir des renseignements géologiques. HEALD (1929), dans une étude sur la région du centre de l'Oklahoma, a obtenu un résultat positif sur la relation entre les structures géologiques et le champ thermique. En 1934, VAN ORSTRAND a observé des changements de la température au-dessus des structures géologiques (dômes de sel, failles, etc.). Après quelques années, cet auteur (1940) a montré la relation entre la température et les structures géologiques de la région de GREEK OIL FIELD. De nombreuses publications ont ensuite confirmé cette relation.

Mais après les résultats obtenus par la méthode sismique pour la connaissance et la mise en évidence des structures géologiques, la méthode thermique a été moins employée. Quelques années plus tard, cette méthode a toutefois été utilisée dans les mesures de température à faible profondeur. Nous avons utilisé cette méthode dans le but de trouver un moyen très simple pour distinguer les axes et les localisations des circulations d'eau telles qu'elles existent dans les pentes ainsi que sous les éboulis et les glissements. Nous avons essayé de présenter une méthode d'interprétation simple et pratique pour l'évaluation des profondeurs de ces circulations d'eau. Actuellement, on peut étudier les champs thermiques créés autour des circulations d'eau de toutes formes et calculer tous les facteurs nécessaires par la méthode des éléments finis et au moyen des ordinateurs.

Néanmoins, en considérant la précision des problèmes posés et de plus en étudiant l'influence des différents facteurs sur la température du sol (et par conséquent sur l'interprétation quantitative), il nous a semblé logique de rechercher un moyen de calcul assez simple pour l'estimation de la profondeur d'écoulement des circulations d'eau sous les pentes.

Cette thèse, réalisée au Laboratoire de Géotechnique, a pour but de présenter la méthode thermique et ses applications pour les reconnaissances hydrogéologiques des glissements de terrains. Elle comprend deux parties.

La première partie est consacrée aux généralités sur la méthode thermique et comprend trois chapitres.

Le chapitre I concerne l'étude de la température du sol ; nous avons étudié les différentes sources de l'énergie parvenant aux couches superficielles, les ondes thermiques, la propagation de la chaleur dans le sol, les variations journalières de température, les variations annuelles, etc. Enfin, nous avons donné des renseignements sur les différents facteurs ayant une influence sur la température des couches superficielles.

Dans le chapitre II, après une brève étude sur le rôle de l'eau dans les glissements de terrains, nous avons étudié l'existence des chenaux sous les zones glissées, puis nous avons étudié l'application de la méthode des traceurs pour connaître ces chenaux. Enfin, nous avons étudié la méthode thermique, son application sur le terrain, les périodes favorables au travail, les corrections nécessaires sur les mesures et la présentation des résultats.

Le chapitre III est consacré à l'étude des champs thermiques. Après avoir donné les généralités sur le champ thermique, nous avons étudié la distribution de la température autour d'un chenal de forme cylindrique et d'un chenal en forme de plaque et nous avons indiqué des méthodes d'interprétation quantitative.

Dans la deuxième partie, nous avons donné 6 exemples de l'application de la méthode thermique. Dans ces exemples cette méthode est appliquée conjointement avec les méthodes de résistivité et sismique. Ces exemples montrent donc l'application des trois méthodes géophysiques pour la reconnaissance des mouvements de terrains.

## PREMIERE PARTIE

CHAPITRE I : TEMPERATURE DU SOL

CHAPITRE II :: APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

CHAPITRE III : ETUDE DES CHAMPS THERMIQUES

CHAPITRE I

1 - SOURCE EXTERNE

2 - SOURCE INTERNE

3 - SOURCES SECONDAIRES

4 - FACTEURS INFLUENCANT LA TEMPERATURE DU SOL

5 - CONCLUSIONS

## TEMPERATURE DU SOL

### 1 - SOURCE EXTERNE

#### 1.1 - Radiation solaire

La température de la surface même du sol est déterminée par les échanges de chaleur qui se forment entre l'air et le sol que nous pouvons schématiser de la manière suivante : Pendant le jour, le sol s'échauffe sous l'action de la radiation solaire, une partie seulement de l'énergie calorifique parvenue au sol est absorbée par celui-ci ; l'autre est réfléchi. D'autre part, le sol rayonne constamment vers l'atmosphère une quantité importante de chaleur ; c'est à son contact que les couches d'air voisines s'échauffent. La nuit, les pertes l'emportent sur les gains et le sol se refroidit progressivement (Fig. 1).

Echauffement et refroidissement sont d'ailleurs d'autant plus intenses que l'atmosphère est plus transparente, la vapeur d'eau jouant ici le rôle principal. L'échauffement est en outre fonction de la hauteur du soleil (obliquité des rayons).

L'absorption par l'atmosphère de l'énergie rayonnée augmente géométriquement quand la masse d'atmosphère traversée croît en progression arithmétique. De même, toutes les conditions étant égales, la quantité de radiation reçue par un sol est proportionnelle au sinus de l'inclinaison des rayons solaires sur la surface.

#### 1.2 - Coefficient de transparence

Etant donné une certaine épaisseur d'un milieu partiellement absorbant, il y a lieu de considérer, pour chaque radiation simple qui le traverse, un facteur de transmission ou coefficient de transparence, rapport entre l'intensité incidente et l'intensité après traversée du milieu. Un coefficient de transparence égal à 1 indique une transparence complète, tandis que la valeur zéro correspond à l'opacité complète. Pour l'atmosphère ce coefficient dépasse rarement 0,8 ; il peut descendre à 0,6, mais

.../...

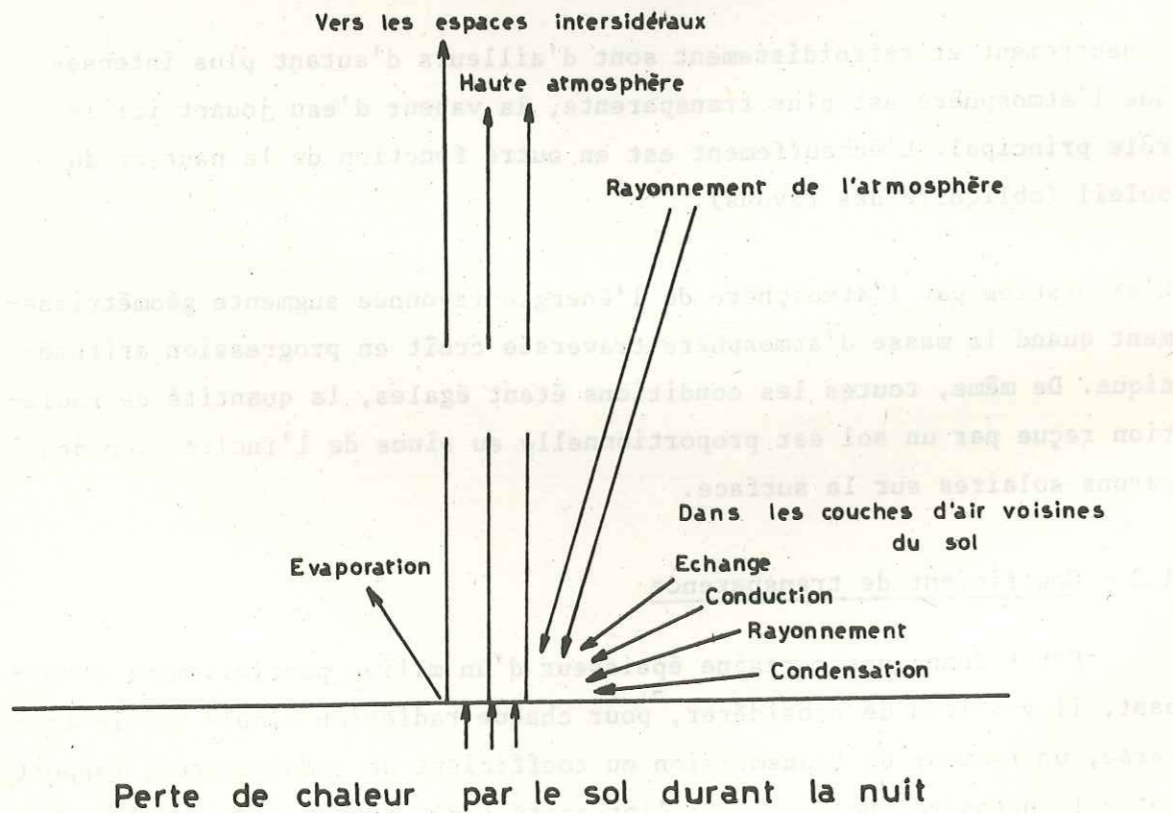
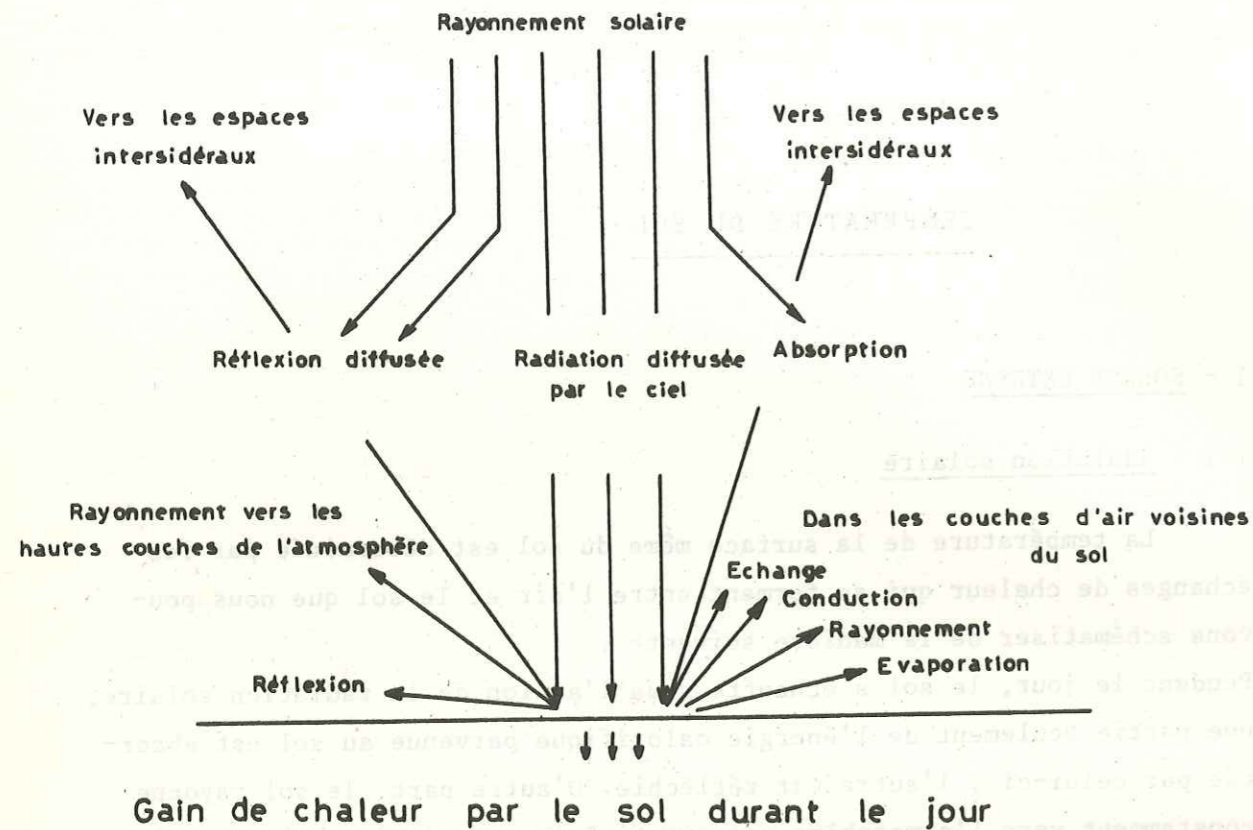


Fig. 1

peut varier dans une même contrée selon la saison, l'altitude et le phénomène d'absorption.

Les diverses causes d'absorption sont :

- . l'existence de différents gaz dans l'atmosphère et de la vapeur d'eau,
- . la diffusion qui est un phénomène qui se produit toutes les fois que la lumière se propage à travers un milieu contenant en suspension des particules matérielles.

C'est au printemps, à l'époque où l'atmosphère est la moins chargée en vapeur d'eau et où le soleil est déjà assez haut au-dessus de l'horizon, que le coefficient de transparence atteint ses plus hautes valeurs.

Il augmente avec l'altitude du fait de la diminution de la quantité de vapeur contenue dans l'atmosphère, ce que montre le Tableau n° 1.

Heures	DAVOS (1600 m)		TANUS (1800 m)		PARIS (Parc St-Maur)	
	Déc.	Juin	Déc.	Juin	Déc.	Juin
6		1,13		0,93		0,47
12	1,25	1,45	1,27	1,31	1,06	1,31
18		1,05		0,77		0,55

Tableau n° 1 - Rayonnement solaire parvenant au sol en cal/cm<sup>2</sup>.mn

### 1.3 - Quantité de chaleur parvenant au sol et température du sol

L'étude comparée des quantités de chaleur moyennes mensuelles parvenant au sol et des variations de température est particulièrement suggestive. Considérons les valeurs de ces deux éléments pour le Parc St-Maur (près de Paris).

L'échauffement de l'air au voisinage du sol étant fonction de celui du sol, on a pris comme terme de comparaison non pas la température du sol mais celle de l'air. Afin de tenir compte des variations de la hauteur du soleil dont dépendent les quantités de chaleur reçues par le sol, on a établi les courbes de variations non pas en fonction des mois mais par rapport à la durée moyenne du jour de chaque mois. Comme on pouvait s'y attendre (Fig. 2) les quantités de chaleur reçues au cours d'une journée pour une durée du jour donnée sont identiques ; il y a une correspondance

.../...

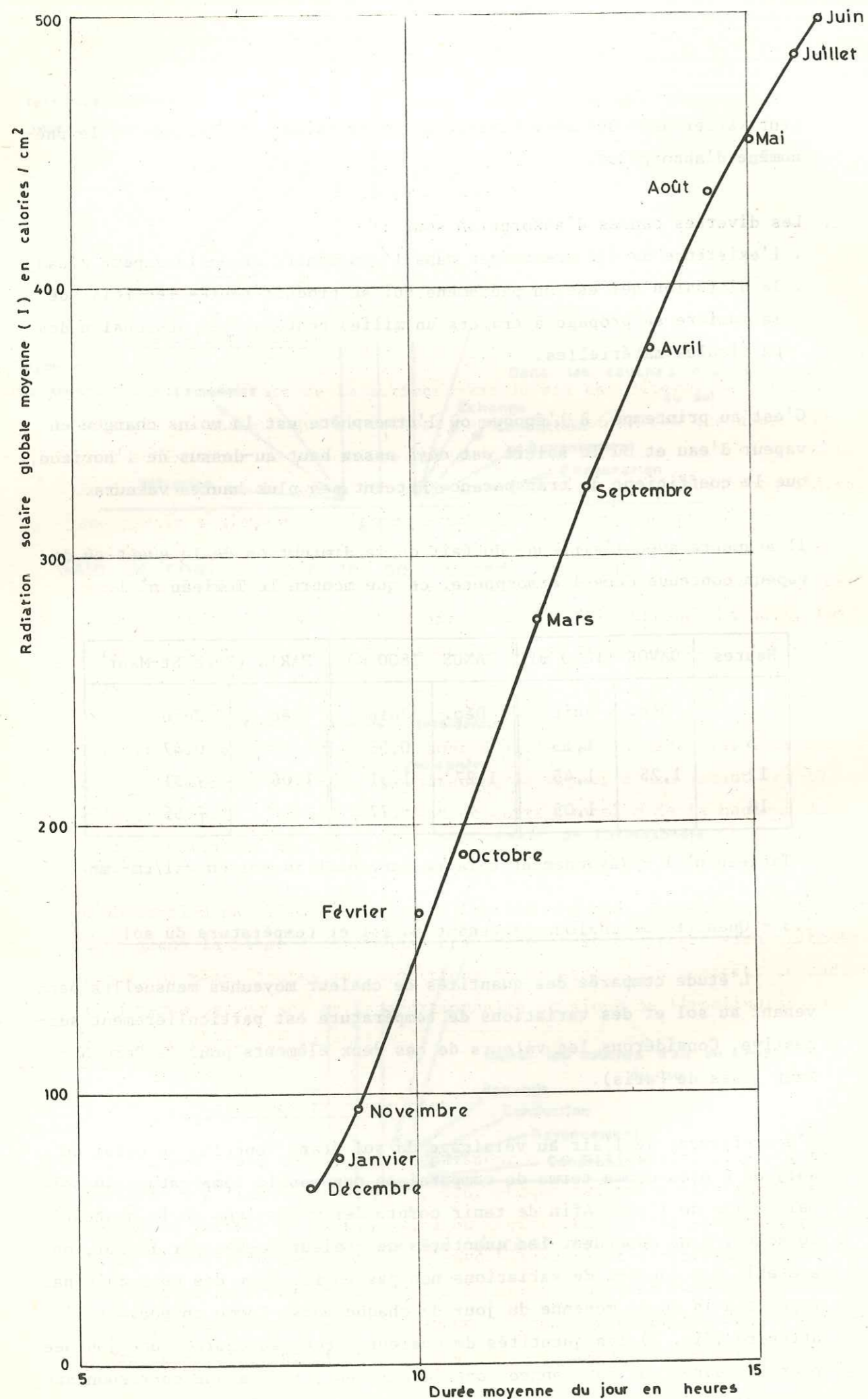


Fig. 2 - Radiation solaire globale au parc Saint Maur à PARIS

très satisfaisante entre différents mois analogues (Mars-Septembre, Août-Avril), compte tenu de la différence de la durée du jour. Le minimum de la radiation solaire s'observe au solstice d'hiver et le maximum au solstice d'été.

La Figure 3, par contre, est toute différente. La température de Septembre est très supérieure à celle du mois analogue correspondant. On obtient ainsi, sinon une mesure, du moins une image donnant une idée de l'augmentation progressive de ce qu'on pourrait appeler le potentiel thermique de la terre.

Température et radiation solaire varient dans le même sens avec toutefois un léger décalage, le minimum de température ne se produisant qu'en Janvier-Février, et le maximum en Juillet-Août. Mais leurs variations ne sont pas proportionnelles comme en témoigne l'examen du rapport  $I/\theta$ . En effet, la température  $\theta$ , qui caractérise un certain état thermique du sol, est le résultat de deux actions principales qui s'opposent, l'une due à la radiation solaire elle-même (apport de calories), l'autre au rayonnement nocturne (pertes de calories). Dans ces conditions, théoriquement, le rapport  $I/\theta$  devrait être maximum en Juin-Juillet, c'est-à-dire à l'époque des solstices correspondant aux durées minimum du rayonnement nocturne. Pratiquement, le maximum s'observe en Février et le minimum en Novembre. Le décalage du maximum s'explique facilement par le fait que l'apport de calories au moment du solstice d'hiver étant faible et le rayonnement nocturne intense, le sol n'arrive à son zéro thermique qu'en Janvier-Février ; l'écart entre  $I$  et  $\theta$  est donc maximum à cette époque. Très rapidement, l'apport de calories augmente et la durée du rayonnement nocturne diminuant, cet écart tend à se combler et le rapport  $I/\theta$  diminue. A partir de Juin, le rapport  $I/\theta$  continue à décroître jusqu'en Novembre. A ce moment, le rayonnement nocturne l'emporte, l'apport journalier de calories est de plus en plus faible, le sol continue à se refroidir alors que, dès Décembre,  $I$  commence à croître ; il en résulte une variation inverse du rapport  $I/\theta$  comme le montre le Tableau n°2.

D'après la Figure 4 on devra finalement distinguer deux phases dans la variation de température des couches superficielles du sol :

- . phase chaude où le gradient de température est orienté de haut en bas,
- . phase froide où le gradient de température est dirigé de bas en haut.

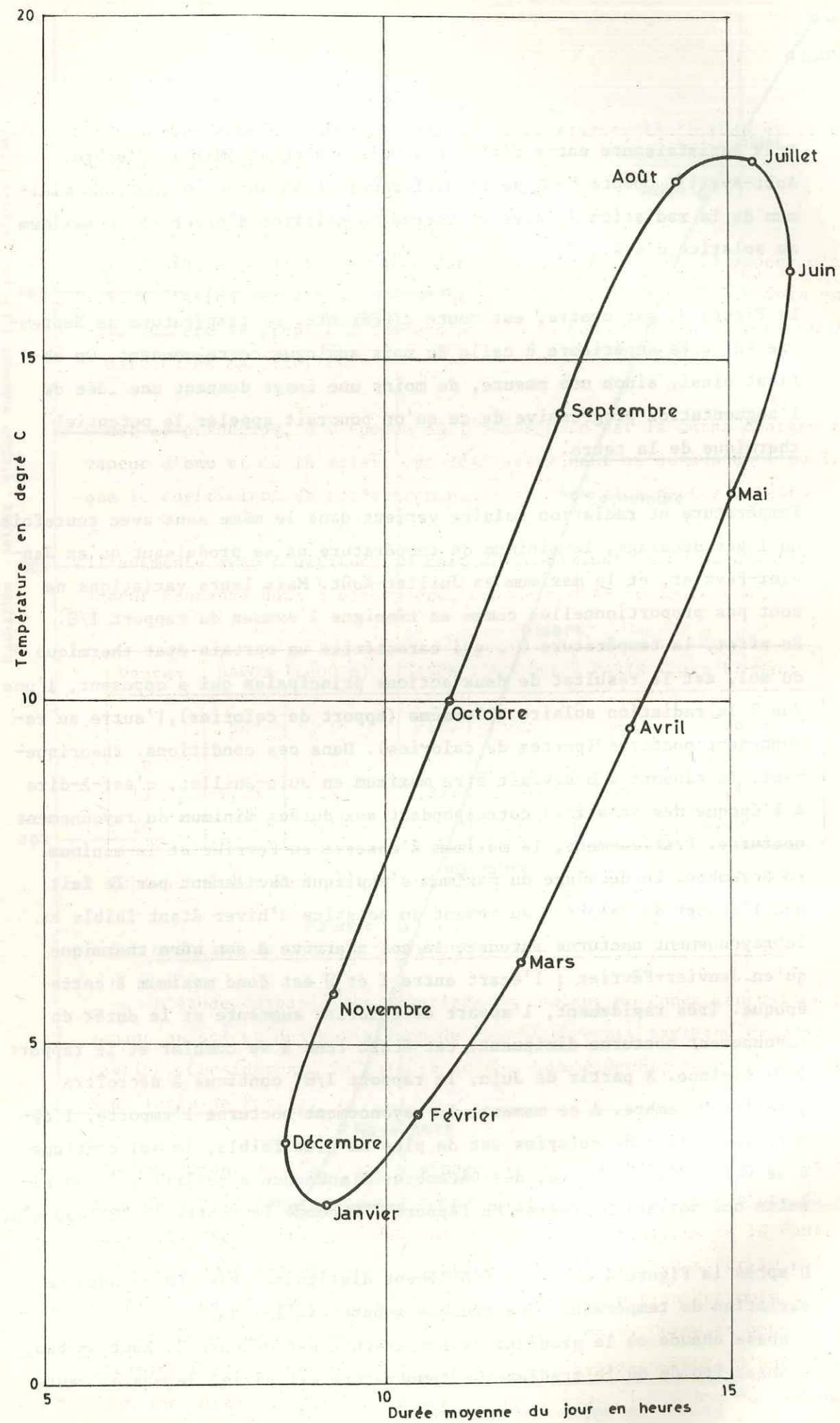


Fig. 3 - Température moyenne au parc Saint Maur à PARIS

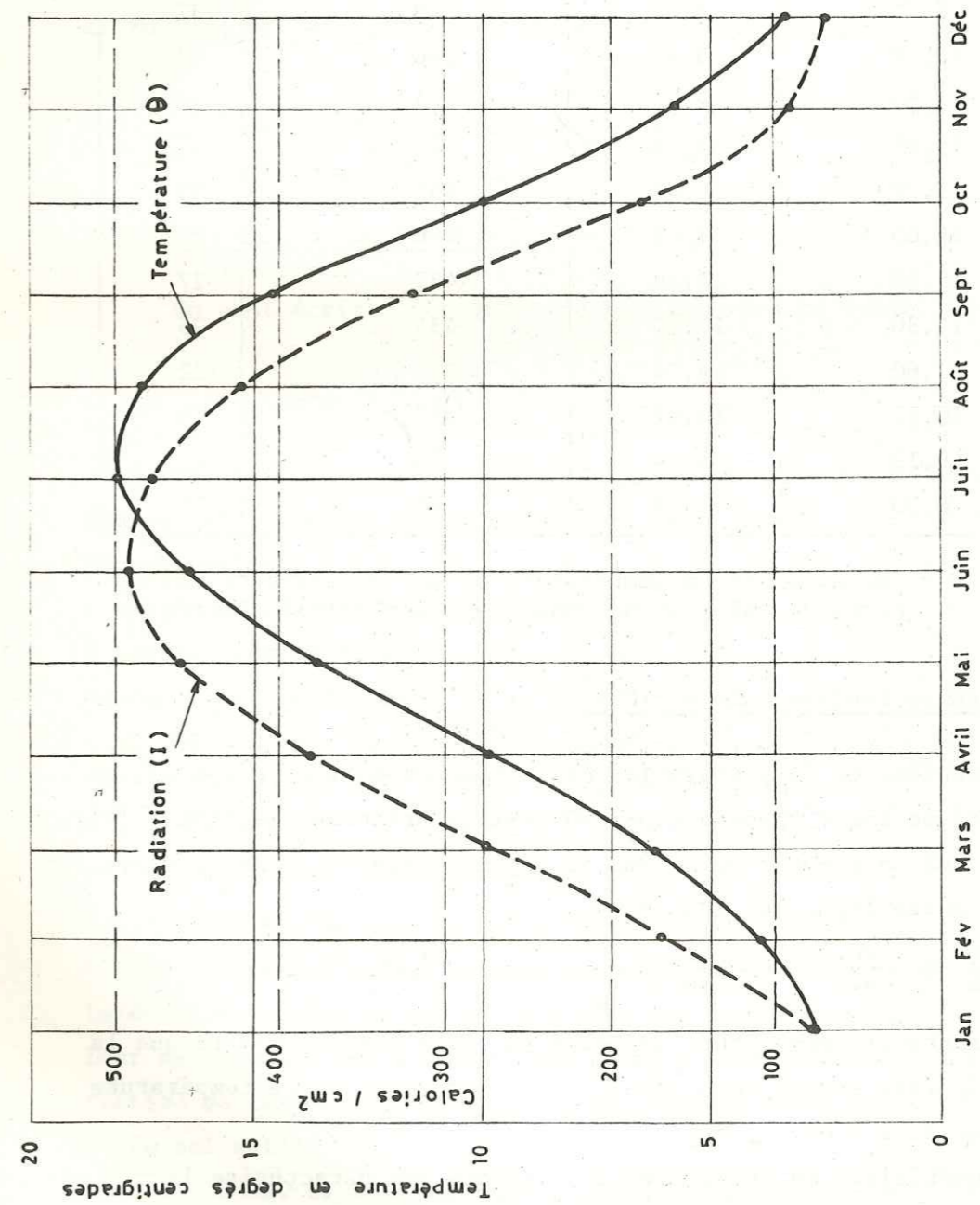


Fig. 4 - Variations comparées de la radiation solaire et de la température au cours de l'année



Les inversions de phase se produisent à l'époque des équinoxes.

Mois	Durée moyenne du jour (h)	Température moyenne en °C (θ)	Quantité de chaleur (I) en cal/cm <sup>2</sup> surface horizontale	R = I/θ
Janvier	8,75	2,64	79	37
Février	10,10	3,83	166	47
Mars	11,85	6,25	274	46
Avril	13,65	9,56	374	37
Mai	15,20	13,43	455	35
Juin	16,05	16,45	496	30
Juillet	15,65	18,16	487	27
Août	14,30	17,70	434	25
Septembre	12,60	14,73	324	22
Octobre	10,77	10,01	187	19
Novembre	9,13	5,84	94	16
Décembre	8,30	3,37	68	25

Tableau n° 2 - Variation de la température du sol par rapport aux apports de calories au cours de l'année 1937 (Paris)

1.4 - Hypothèse fondamentale de FOURIER

Le problème de la propagation de la chaleur dans un corps solide a été traité de façon théorique par FOURIER. Considérant le flux (Fig. 5) pénétrant dans un élément de volume en régime permanent dans la direction tangente à cette ligne de flux, on a :

$$\varphi = \frac{d\theta}{ds} = \frac{dQ}{ds \cdot t} = - \lambda \frac{d\theta}{dn}$$

où θ représente la température au temps t; cette formule montre que la variation de flux est proportionnelle à la variation de la température dans la même direction.

λ est le coefficient de conductivité thermique qui caractérise le milieu considéré. Il faut indiquer le signe (-) parce que φ est positif dans le sens de l'écoulement où dn est pris positivement, mais dθ est négatif.

.../...

Dans la direction OX faisant un angle α avec la ligne de flux, on a :

$$\varphi_{(x)} = \varphi \cos \alpha = - \lambda \frac{d\theta}{dn} \cos \alpha = - \lambda \frac{d\theta}{dx} \quad \text{car} \quad \frac{dn}{\cos \alpha} = dx$$

Cette relation présentée sous forme d'hypothèse de FOURIER a donné lieu à de multiples démonstrations. Elle est vérifiée par des expériences et applications dans le domaine courant. Lorsque Q varie avec t, la relation de FOURIER prend la forme générale suivante :

$$\frac{d^2Q}{ds \cdot dt} = - \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

1.5 - Propagation de la chaleur dans le sol

On peut écrire l'équation de FOURIER sous la forme suivante :

$$\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

où θ représente la température au temps t en un point situé à la profondeur z au-dessous de la surface plane et indéfinie qui constitue la surface chauffée.

c est la chaleur spécifique du sol

ρ est la densité du sol

On écrit de préférence :

$$m \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

où  $m = \frac{\lambda}{\rho c}$

m est le coefficient de diffusivité.

L'équation peut s'intégrer dans certains cas particuliers ; un des plus intéressants parce qu'il se rapproche des conditions naturelles où la chaleur est fournie par la radiation solaire, consiste à supposer que la variation de température est périodique simple, si la température à la surface du sol est :

$$\theta(z, t) = A \sin \frac{2\pi t}{T}$$

La température à la profondeur z est :

$$\theta(z, t) = A e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{mT}}} \sin \left( 2 \frac{\pi t}{T} - z\sqrt{\frac{\pi}{mT}} \right) \quad (1) \quad \text{(voir annexe)}$$

.../...

où A est l'amplitude de la température en surface

$A e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{mT}}}$  est l'amplitude de la température à la profondeur z

z est la profondeur

m est le coefficient de diffusivité

T est la période

t est le temps

La Figure 6 donne la répartition de la température dans le sol à un instant  $t_0$  et à un instant  $t_1$  ultérieur. La courbe représentative se déplace vers la droite en se déformant, les maxima et minima de température se déplaçant sur les deux exponentielles d'équation :

$$\Theta = \pm A_1 e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{mT}}}$$

Si nous mettons la formule (1) sous la forme :

$$\Theta = A_1 e^{-\frac{z}{\sqrt{\frac{mT}{\pi}}}} \sin \frac{2\pi}{T} \left[ t - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{\pi m}} z \right]$$

nous mettons en évidence la constante d'espace  $\sqrt{\frac{mT}{\pi}}$  qui caractérise l'affaiblissement exponentiel des amplitudes avec la distance ; et la vitesse de phase  $V = 2 \sqrt{\frac{m\pi}{T}}$  qui est la vitesse de déplacement vers la droite des points tels que  $A_0$ .

Une onde sinusoïdale de courte période progresse rapidement mais est très vite amortie, tandis qu'une onde de grande période progressera lentement mais sera moins rapidement amortie.

D'autre part, vitesse de phase et constante d'espace sont proportionnelles à la racine carrée de la diffusivité.

Remarquons encore que le déphasage entre la perturbation sur la face  $z = 0$  est la perturbation à l'intérieur du sol, soit  $\sqrt{\frac{\pi}{mT}}$  peut être égal à  $\pi$  au point correspondant d'abscisse

$$z_i = \sqrt{\pi m T}$$

Ce point porte le nom de point d'inversion. Lorsque la température est maximum sur  $z = 0$ , elle est minimum au point d'inversion.

.../...

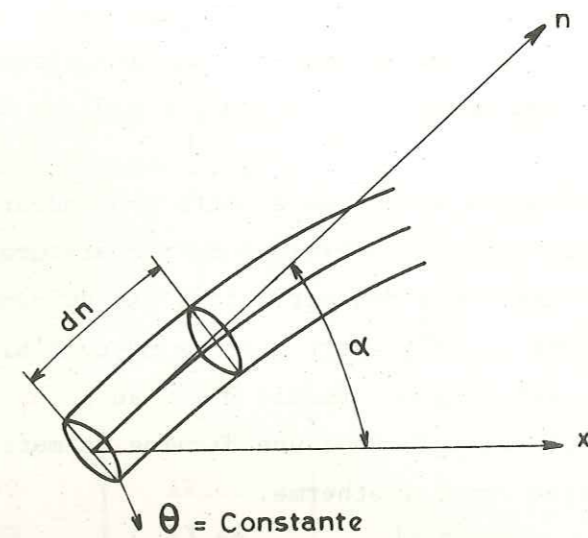


Fig. 5

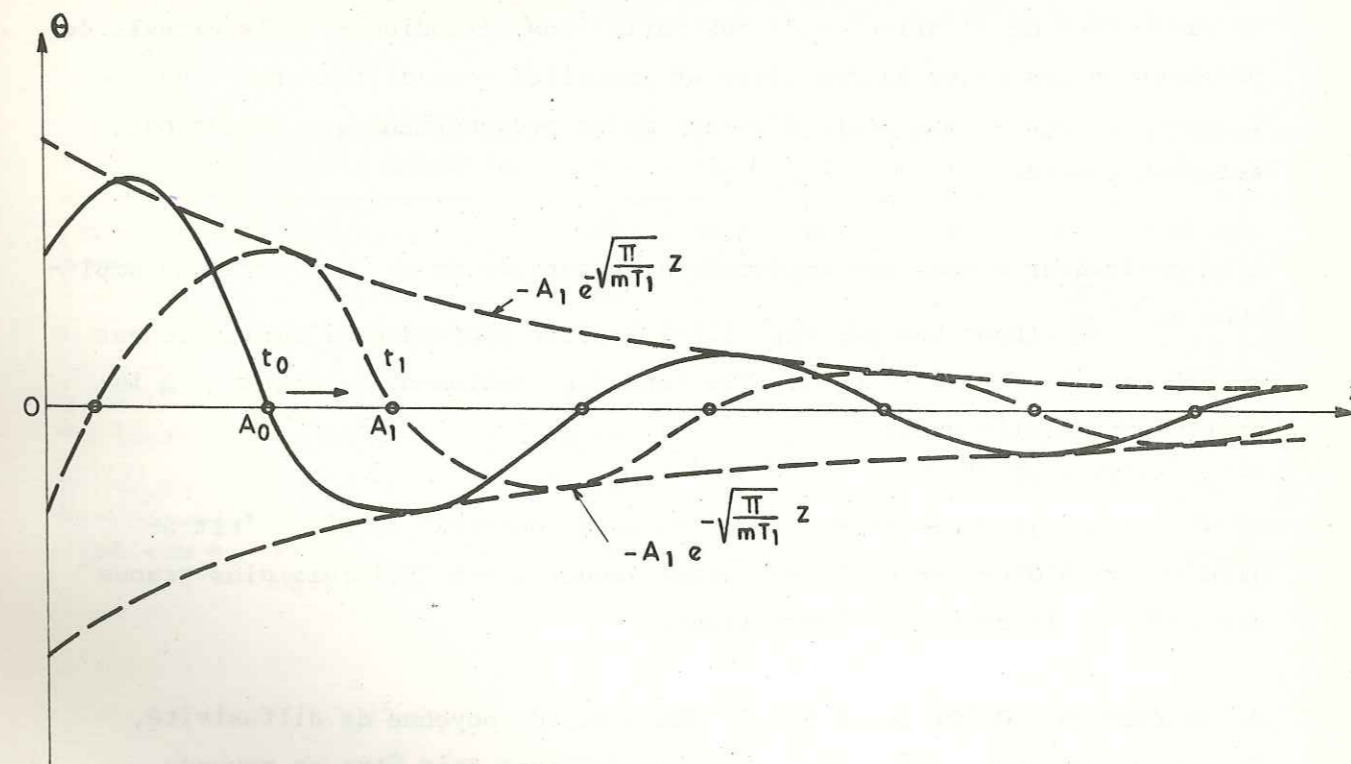


Fig. 6 - Répartition de la température dans le sol à un instant  $t_0$  et à un instant  $t_1$  ultérieur

Si l'on admet en première approximation que les variations annuelles de température peuvent être représentées par une loi sinusoïdale, le point d'inversion pour un sol moyen doit se trouver environ à 10 m de profondeur.

Des relevés de température effectués à cette profondeur ont effectivement mis en évidence l'existence d'un minimum de température en été et d'un maximum en hiver. L'amplitude des variations est évidemment très réduite. Si l'on admet un écart de 25°C entre minimum moyen d'hiver et maximum moyen d'été à la surface, cet écart se réduit à 1°C au point d'inversion. On comprend ainsi qu'une cave placée à une dizaine de mètres de profondeur puisse être considérée comme isotherme.

1.6 - Variations journalières et annuelles

La température du sol subit deux variations :

une variation journalière et une variation annuelle.

La profondeur de l'influence de ces variations périodiques et la vitesse de propagation des ondes journalières et annuelles sont différentes l'une de l'autre et cela se manifeste d'autant moins profondément que la période est plus courte.

A la profondeur  $z$  pour une amplitude  $A$  en surface du sol, on aura une amplitude  $Ae^{-z\sqrt{\frac{\pi}{mT}}}$  (pour une période  $T$ ). Si à cette profondeur l'amplitude est négligeable pour la période  $T$ , elle sera donc également négligeable à la profondeur  $z'$  telle que :

$$z/z' = \sqrt{T/T'}$$

et si  $T = 365$  jours et  $T' = 1$  jour, on aura donc  $z/z' = 19,1$ , c'est-à-dire que la profondeur de la variation annuelle est 19,1 fois plus grande que celle de la variation journalière.

Si on admet  $m = 0,004$  unité C.G.S. comme valeur moyenne de diffusivité, la vitesse de propagation des ondes journalières doit être en moyenne 66 cm/j et celle des ondes annuelles 3,6 cm/j. Pour avoir une idée sur les zones profondes dans lesquelles les variations journalières et annuelles sont moins sensibles (égales à 0,1°C et 0,01°C) nous donnons dans les tableaux 3, 4, 5 et 6, pour différentes amplitudes  $A$ , les profondeurs où les variations annuelles et journalières ne dépassent plus 0,1°C ou 0,01°C.

.../...

Les tableaux n° 7, 8 et 9 montrent la variation de la température à différentes profondeurs à Saint-Geoirs, près de Grenoble. Enfin, les figures 7, 8, 9, 10, 11 et 12 donnent quelques exemples de variation et de distribution de la température dans le sol.

Sol forêt	Sol ordinaire	Sol sableux	Sol en friche	Calcaire	Granite	A (°C)
m = 0,003	m = 0,004	m = 0,005	m = 0,006	m = 0,01	m = 0,02	
7,98	9,24	10,31	11,42	14,64	20,93	10
9,16	10,63	11,89	13,14	16,86	24,08	20
9,89	11,46	12,81	14,13	18,14	25,93	30
10,50	12,03	13,44	14,85	19,06	27,23	40
10,69	12,49	13,69	15,41	19,67	28,24	50

Tableau 3 - Profondeurs correspondant à une variation annuelle de température de 0,1°C (m : unité C.G.S.)

Sol forêt	Sol ordinaire	Sol sableux	Sol en friche	Calcaire	Granite	A (°C)
m = 0,003	m = 0,004	m = 0,005	m = 0,006	m = 0,01	m = 0,02	
11,97	13,86	15,46	17,13	21,96	31,39	10
13,74	15,94	17,83	19,71	25,29	36,12	20
14,83	17,19	19,21	21,19	27,21	38,89	30
15,75	18,04	20,16	22,27	28,50	40,84	40
16,03	18,73	20,94	23,11	29,50	42,36	50

Tableau 4 - Profondeurs correspondant à une variation annuelle de température de 0,01°C (m : unité C.G.S.)

.../...

Sol forêt	Sol ordinaire	Sol sableux	Sol en friche	Calcaire	Granite	A (°C)
m = 0,003	m = 0,004	m = 0,005	m = 0,006	m = 0,01	m = 0,02	
41,80cm	48,40cm	54,00cm	59,00cm	76,70	109,60cm	10
48,00	55,70	62,30	68,80	88,30	126,10	20
51,80	60,00	67,10	74,00	95,00	135,80	30
55,00	63,00	70,40	77,80	99,80	142,60	40
46,00	65,40	73,11	80,70	103,00	147,90	50

Tableau 5 - Profondeurs correspondant à une variation journalière de température de 0,1°C (m : unité C.G.S.)

Sol forêt	Sol ordinaire	Sol sableux	Sol en friche	Calcaire	Granite	A (°C)
m = 0,003	m = 0,004	m = 0,005	m = 0,006	m = 0,01	m = 0,02	
62,7 cm	72,6 cm	81,0 cm	89,7 cm	115,0 cm	164,4 cm	10
72,0	83,5	93,4	103,2	132,45	189,1	20
77,7	90,0	100,6	111,0	142,5	203,7	30
82,5	94,5	105,6	116,7	149,7	213,9	40
84,0	98,1	109,6	121,0	154,5	221,8	50

Tableau 6 - Profondeurs correspondant à une variation journalière de température de 0,01°C (m : unité C.G.S.)

.../...

Mois	Profondeur 10 cm			Profondeur 20 cm	Profondeur 50 cm
	6 h	12 h	18 h	12 h	12 h
Janvier	2,47	2,65	3,05	3,08	3,37
Février	3,68	4,12	4,87	4,13	4,36
Mars	6,01	7,00	8,35	6,75	6,94
Avril	9,80	9,93	10,76	9,84	10,01
Mai	12,44	14,03	15,16	13,38	13,19
Juin	16,13	17,90	18,85	17,16	17,15
Juillet	18,25	20,68	21,95	19,60	19,57
Août	17,58	19,85	21,13	19,05	19,34
Septembre	13,31	14,82	15,76	14,84	15,76
Octobre	10,23	11,26	11,96	11,40	12,21
Novembre	7,16	7,56	7,96	8,00	8,88
Décembre	2,54	2,75	2,89	3,34	4,20

Tableau 7 - Température moyenne en °C - Année 1972

Mois	Profondeur 10 cm			Profondeur 20 cm	Profondeur 50 cm
	6 h	12 h	18 h	12 h	12 h
Janvier	0,75	0,86	0,96	1,38	2,24
Février	1,54	1,83	2,26	2,12	2,83
Mars	3,41	4,20	5,28	4,02	4,58
Avril	6,43	8,05	9,04	7,37	7,71
Mai	13,72	15,75	16,74	14,54	14,16
Juin	17,01	19,16	20,13	18,08	17,83
Juillet	19,44	21,79	23,11	20,65	20,56
Août	20,16	22,20	23,53	21,31	21,36
Septembre	16,77	19,62	20,63	18,32	18,66
Octobre	9,92	11,55	12,05	11,29	12,36
Novembre	5,27	6,37	6,82	6,46	7,75
Décembre	2,48	2,79	3,02	3,14	4,13

Tableau 8 - Température moyenne en °C - Année 1973

VARIATION de la TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE  
à DIFFERENTES PROFONDEURS à St-GEOIRS (près de Grenoble)  
en 1972 et 1973.

Mois	Profondeur 10 cm			Profondeur 20 cm		Profondeur 50 cm		Profondeur 100 cm	
	6 h	12 h	18 h	12 h		12 h		12 h	
Janvier	3,91	4,66	5,33	4,55		5,05		-	
Février	4,09	4,61	5,30	4,81		5,44		-	
Mars	5,61	7,36	8,51	6,45		6,52		6,52	
Avril	8,72	11,73	12,44	10,39		10,51		10,08	
Mai	11,69	14,70	14,87	12,87		12,33		11,33	
Juin	15,59	17,36	18,27	16,66		16,32		14,92	
Juillet	17,79	19,34	20,47	18,78		18,44		16,99	
Août	18,30	20,00	21,21	19,46		19,34		18,18	
Septembre	14,90	16,02	16,69	15,92		16,41		16,47	
Octobre	7,71	8,38	8,83	8,82		10,01		11,70	
Novembre	6,13	6,58	6,98	6,82		7,57		9,01	
Décembre	4,52	4,89	5,45	5,14		6,00		7,49	

Tableau 9 - Variation de la température moyenne mensuelle à différentes profondeurs à St-Geoirs (près de Grenoble). Température moyenne en °C (Année 1974).

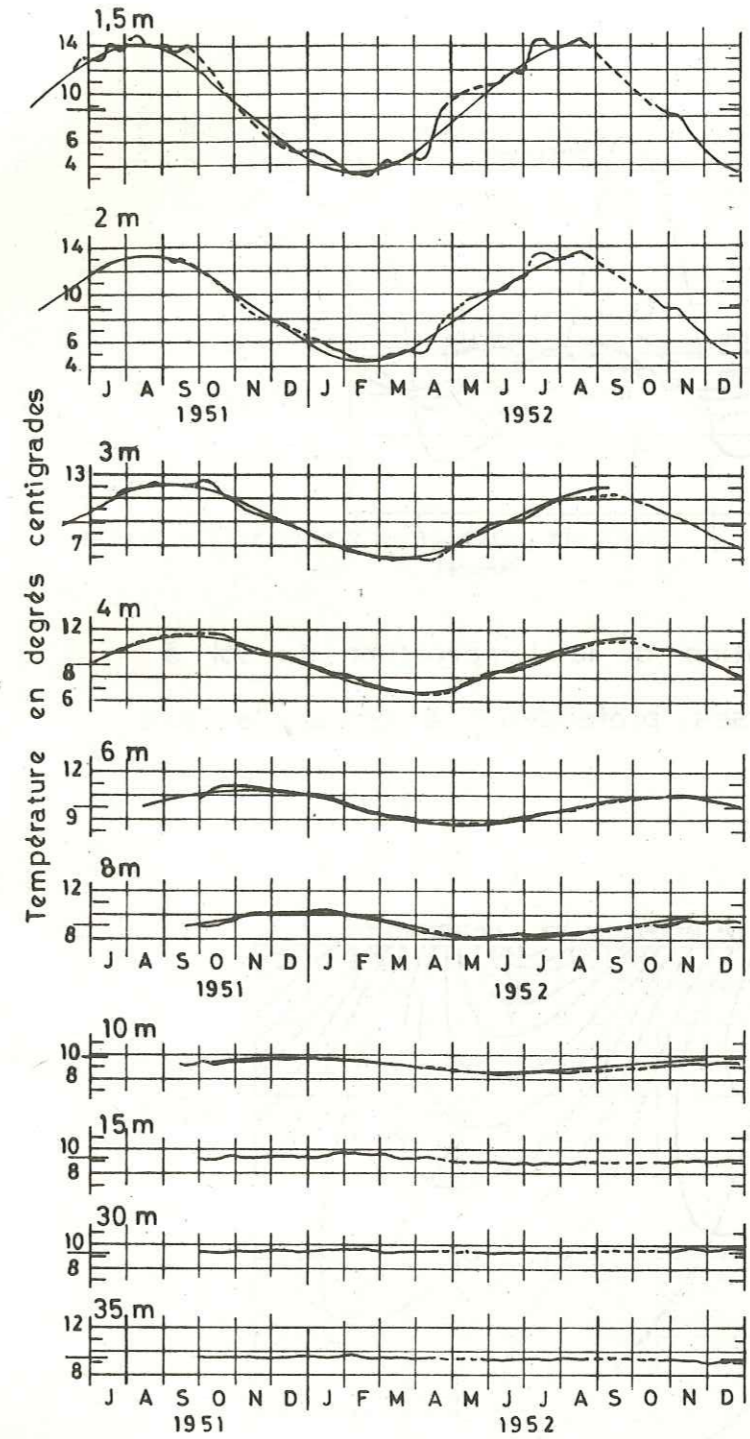


Fig. 7 - Variation annuelle de la température du sol à différentes profondeurs

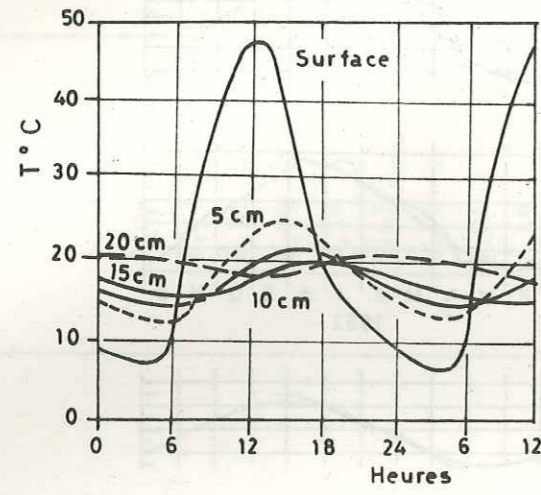


Fig. 8 - Variation de la température du sol à diverses profondeurs à Ghiza, le Caire

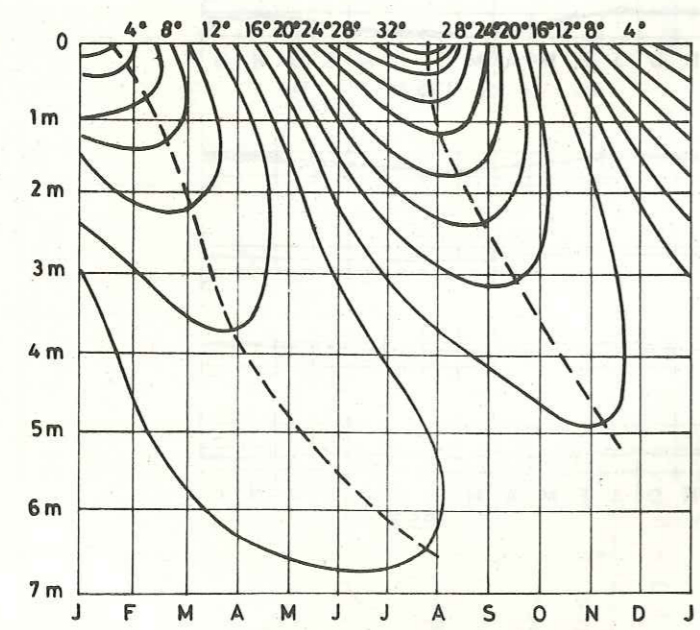


Fig. 9 - Isothermes de la température du sol à Tiflis

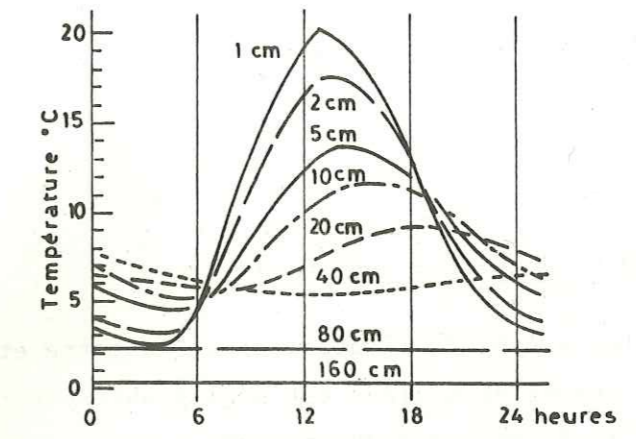


Fig. 10 - Variation journalière de la température d'un sol sableux

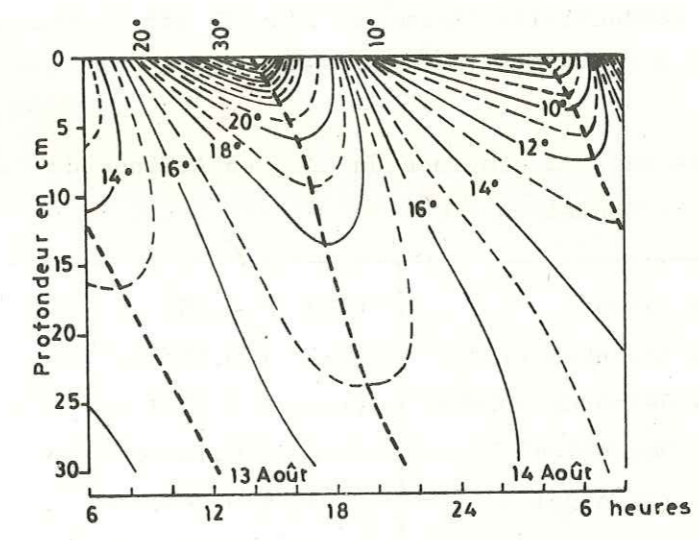


Fig. 11 - Isotherme du sol durant un jour d'été en Finlande

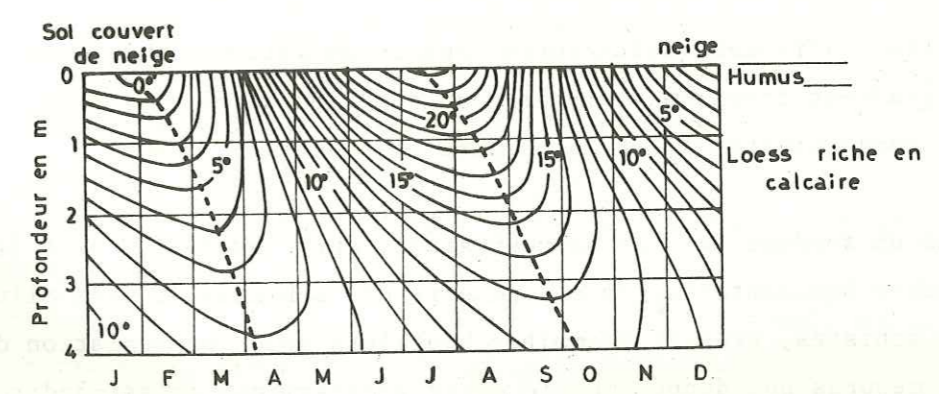


Fig. 12 - Isotherme de la moyenne annuelle de la température du sol à Vienne (Institut Central)

2 - SOURCE INTERNE

2.1 - Chaleur venant de l'intérieur de la terre

C'est un flux venant de l'intérieur de la terre et arrivant à la surface du sol. Cet apport de chaleur est négligeable par rapport au flux de chaleur solaire. Il dépend de deux facteurs : le gradient thermique et la conductivité thermique du sol.

Le gradient thermique (G) de la terre est environ 3°C/100 m ; en prenant une moyenne de conductivité thermique pour le sol on peut calculer le flux, on estime ce flux  $1,3 \pm 0,5 \cdot 10^{-6}$  cal/cm<sup>2</sup>.s

BULLARD a trouvé dans la province du CAP, en Afrique du Sud, les valeurs indiquées dans le Tableau n° 10.

Puits Jacob	$(0,95 \pm 0,15) \cdot 10^{-6}$ unité C.G.S.
Puits Doornboutrier	$(0,97 \pm 0,05) \cdot 10^{-6}$
Puits Gerbardmimbern	$(1,23 \pm 0,025) \cdot 10^{-6}$
Puits Doornkloof	$(1,20 \pm 0,10) \cdot 10^{-6}$
Puits Reefnigel	$(1,52 \pm 0,044) \cdot 10^{-6}$
Moyenne	$(1,16 \pm 0,009) \cdot 10^{-6}$

Tableau n° 10 - Flux terrestre mesuré dans différents puits au CAP

Ce flux varie dans différentes régions du fait des variations de G et λ.

Le gradient thermique lui-même est fonction de λ. Pour deux régions ayant des conductivités λ<sub>1</sub> et λ<sub>2</sub> on aura :  $\frac{G_1}{G_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$

Dans un sondage fait au Pas-de-Calais, après avoir traversé la craie en couches horizontales, on a rencontré des schistes et grès Siluriens, puis des schistes, grès et psammites houillers avec intercalation de charbon. Les mesures ont donné pour le degré géothermique (c'est-à-dire la distance nécessaire pour une augmentation de 1°C) dans la craie 29 à 37 m, dans le schiste 50 à 61 m et dans le schiste houiller 28 à 40 m.

.../...

Le degré géothermique dépend aussi des facteurs inhérents à la surface même de la terre qui modifient les échanges de température et par conséquent le flux venant de l'intérieur. J. KOENIGSBERGER et M. MUHLBERGER ont montré qu'au voisinage d'une masse d'eau importante le degré géothermique est sensiblement plus grand qu'ailleurs.

Les circulations d'eaux changent les isothermes, l'eau froide les rapproche, l'eau chaude au contraire les écarte, et par conséquent, le degré et le flux terrestre se trouvent modifiés.

De toutes manières, pour de nombreux auteurs, le degré géothermique est de 33 m en dehors de toute cause pouvant produire un changement (relief, masse d'eau, etc.)

Pour différentes conditions, on admet les valeurs suivantes :

- 34 m pour les couches horizontales,
- 34-39 m pour les couches très humides
- 34-39 m pour les couches très redressées

Les changements de conductivité du terrain d'un point à l'autre, dûs à leur composition physico-chimique, pourront eux-mêmes faire varier la densité de flux. Par exemple sa valeur maximum est  $1,75 \cdot 10^{-6}$  unité C.G.S. sur les dômes de sel dont le coefficient de conductivité est 0,0075 unité C.G.S.

L'influence de ce flux interne par rapport à celle du flux reçu du soleil sur la température des couches superficielles est plus faible. Pour avoir une idée de cette influence, nous pouvons écrire les relations suivantes :

- $\theta_2 - \theta_1 = q/e$  où
- $\theta_1$  = température moyenne à la surface du sol et dans l'air sans tenir compte du courant de chaleur naturel
- $\theta_2$  = température moyenne à la surface du sol en tenant compte du courant de chaleur naturel
- e = coefficient d'échange de la surface. Donc s'il y a un flux venant de l'intérieur, la température du sol près de la surface est supérieure à celle de l'air

Si la détermination de la température n'est pas faite en surface mais à une profondeur z, on applique l'équation de FOURIER  $\phi = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z}$  et si la chaleur passe verticalement jusqu'à la surface de la terre, on aura :

$q = \lambda \frac{\theta_3 - \theta_2}{z}$

.../...

où  $\theta_3$  = température à la profondeur z  
 $\theta_2$  = température à la surface du sol

En combinant les deux relations, on aura :

$$\theta_3 = \theta_1 + \frac{q}{e} \left( 1 + \frac{ez}{\lambda} \right)$$

En considérant  $\lambda = 0,004$  unité C.G.S.  $q = 1,6 \cdot 10^{-6}$  C.G.S.  $z = 100$  cm  
et  $e = 2 \cdot 10^{-4}$  C.G.S., on aura :

$$\theta_3 - \theta_1 = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dans ce calcul, nous avons considéré certaines valeurs constantes telle que le coefficient d'échange de surface et la conductivité thermique des roches. Mais elles subissent des changements locaux et temporaires et si nous considérons toutes les conditions limites pour une profondeur de 1,5 m avec un flux de chaleur interne de  $1,75 \cdot 10^{-6}$  C.G.S., on aura une augmentation de température de  $0,1^\circ\text{C}$  à cette profondeur par rapport à celle qu'on aurait si on n'en tenait pas compte.

### 3 - SOURCES SECONDAIRES

D'autres sources de chaleur en provenance du sol sont dues à des actions physico-chimiques. La quantité de chaleur dégagée par ces phénomènes est négligeable et d'ailleurs dans certains cas ils ont un effet inverse tel que le dessèchement du sol ou l'évaporation de l'eau qui absorbent la chaleur.

De toutes façons, au point de vue de notre travail, ces sources ne sont pas importantes, mais pour avoir une idée générale les concernant nous citons brièvement leurs origines :

- . sources de chaleur dues à des phénomènes réversibles ; par exemple imbibition des colloïdes ou des matériaux finement dispersés tels que l'argile,
- . sources de chaleur dues à l'humidification : elles sont d'autant plus importantes que les particules sont plus fines,
- . sources de chaleur dues à un phénomène chimique dans les zones d'oxydation et cimentations des minerais,
- . sources de chaleur dues à la combustion lente des matières organiques,
- . sources de chaleur dues à l'oxydation des matières carbonnées telle que lignite, charbon, pétrole, etc.

.../...

### 4 - FACTEURS INFLUENÇANT LA TEMPERATURE DU SOL

La température du sol est le résultat obtenu par la somme des courants externe et interne. Nous avons noté que la surface de la terre se réchauffe pendant la journée et la chaleur se dirige vers l'atmosphère et vers les couches superficielles.

L'énergie absorbée par le sol dépend de différents facteurs. La variation de ces facteurs aura une influence sur la température du sol et leur liste est la suivante :

- . altitude et latitude,
- . couverture (végétation, neige, gel),
- . pluie et vent
- . exposition,
- . nature du sol
- . variation locale de composition du sol.

Nous allons étudier ces facteurs et leurs influences sur la variation de la température du sol en profondeur.

#### 4.1 - Influence de l'altitude et de la latitude

La température du sol suit les variations de celle de l'air au voisinage du sol. La température de l'atmosphère diminue graduellement en fonction de l'altitude (environ  $0,56^\circ\text{C}/100$  m d'élévation) et, par conséquent, la température moyenne annuelle du sol doit suivre une diminution au moins analogue.

D'après MEZGER la décroissance de la température du sol à 1,20 m de profondeur entre 0 et 700 m d'altitude, pour une différence de 100 m, se fera selon une progression géométrique  $0,44 \cdot 1,07^{\text{He}-1}$  ( $^\circ\text{C}/100$  m).

He étant l'altitude exprimée en hectomètres et ayant pour origine 700 m.

Au-dessus de 700 m la température décroît régulièrement de  $0,44^\circ\text{C}/100$  m. Le tableau n° 11 nous donne les températures à la latitude  $48^\circ\text{N}$

.../...



0 m	11,9°C	700 m	8,1°C
100 m	11,3°C	800 m	7,6°C
200 m	10,7°C	900 m	7,2°C
300 m	10,1°C	1000 m	6,8°C
400 m	9,5°C	1500 m	4,6°C
500 m	9,0°C	2000 m	2,4°C
600 m	8,5°C	2500 m	0,3°C

Tableau 11 - Variation de la température en fonction de l'altitude

Cependant, à une même altitude, la température du sol pourrait s'écarter de  $\pm 0,4^\circ\text{C}$  de ces valeurs (pour les autres latitudes, selon MEZGER, il y aura lieu d'ajouter ou de retrancher  $0,6^\circ\text{C}$  par degré de latitude).

Le tableau 12 donne la température du sol en fonction de l'altitude en Suisse :

Altitude (m)	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700
Température (°C)	9,0	7,8	6,5	5,3	4,0	2,7	1,3	0,0

Tableau 12 - Variation de la température en fonction de l'altitude (Suisse)

On constate donc que la diminution de la température par hectomètre n'est que de  $0,43$  à  $0,44^\circ\text{C}$ . Elle est donc moindre que celle de l'air :  $0,56^\circ\text{C}$ . La différence de la température entre le sol et l'air libre est au niveau de la mer de  $1^\circ\text{C}$  à  $2^\circ\text{C}$  sous les climats très humides,  $1,4$  à  $1,8^\circ\text{C}$  sous les climats très secs et désertiques.

A des altitudes plus élevées, dans les Alpes Occidentales, l'excès de la température moyenne du sol (des versants N à pente inférieure à  $20^\circ$ ) sur la température moyenne de l'air est d'environ  $1$  à  $3^\circ\text{C}$  (voir Tableau 13).

.../...

Altitude (m)	300	1000	1500	2000	2500
Excès (°C)	+0,8	+1,1	+1,8	+2,3	+3,0

Tableau 13 - Excès de la température moyenne du sol par rapport à celle de l'air pour différentes altitudes dans les Alpes Occidentales

4.2 - Influence de la couverture

4.2.1 - Influence de la végétation et de la forêt

L'influence de la couverture se traduit pas une modération de la température du sol. En hiver, la végétation forme une couverture isolante et par conséquent les maxima et minima de température sont moins éloignées. En saison chaude, la couverture empêche l'évaporation des eaux des couches superficielles du sol et modère la variation d'humidité du sol, ce qui influence directement la conductivité thermique du sol.

Des expériences faites à Rothamsted ont montré des différences de températures ( $-4^\circ\text{C}$  à  $10\text{ cm}$ ,  $-1,7^\circ\text{C}$  à  $20\text{ cm}$ ,  $-1,1^\circ\text{C}$  à  $30\text{ cm}$  de profondeur) entre un sol couvert d'herbe et un sol nu, en été le sol nu étant plus chaud. En hiver, les différences pouvaient atteindre  $+0,6^\circ\text{C}$  à  $10\text{ cm}$  et  $0,5^\circ\text{C}$  à  $20\text{ cm}$  de profondeur, le sol nu étant plus froid.

Il en est de même pour les forêts. Les tableaux 14 et 15 montrent les différences de température du sol entre secteurs en friche et secteurs boisés :

Profondeur (m)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0,01	-0,33	-0,12	0,46	2,00	3,21	3,78	3,44	2,61	1,62	0,68	0,04	-0,18
0,30	-0,36	-0,23	0,04	1,20	2,29	2,69	2,58	1,99	1,14	0,36	-0,19	-0,29
0,60	-0,39	-0,24	-0,03	1,13	2,50	3,03	2,99	2,51	1,69	0,66	-0,09	-0,36
1,20	-0,27	-0,21	-0,09	0,68	1,84	2,56	2,83	2,60	2,02	1,08	0,27	-0,11

Tableau 14 - Températures du sol en friche plus froides ou plus chaudes que les secteurs boisés d'épineux, à EBERSWALD (Allemagne)

.../...

Profondeur (m)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0,01	-0,43	-0,20	0,20	1,33	3,12	4,50	4,27	3,15	1,83	0,50	-0,37	-0,53
0,30	-0,47	-0,33	-0,13	0,62	1,80	2,95	3,00	2,23	1,33	0,35	-0,35	-0,52
0,60	-0,37	-0,32	-0,13	0,57	1,73	2,87	3,18	2,73	1,82	0,77	-0,12	-0,38
1,20	-0,10	-0,08	-0,03	0,32	1,13	2,10	2,67	2,62	2,17	1,40	0,53	0,10

Tableau 15 - Températures du sol en friche plus froides ou plus chaudes que celles des secteurs boisés de hêtres, à MARIENTHAL (Allemagne)

D'une manière générale, la température moyenne annuelle du sol en secteur boisé est plus basse que celle des secteurs en friche, ce que montre le Tableau 16 :

Profondeur (m)	Pin	Epicéa	Hêtre	Forêt	Epineux
0,01	1,39	1,47	1,45	1,45	1,43
0,30	0,64	1,17	0,88	0,91	0,94
0,60	0,88	1,31	1,03	1,08	1,12
0,90	0,92	1,26	1,04	1,08	1,11
1,20	0,96	1,21	1,07	1,09	1,10

Tableau 16 - Différences de températures moyennes annuelles entre sol couvert de friches et sol boisé (le sol en friche étant plus chaud).

#### 4.2.2. - Influence de la neige

La neige forme une couverture isolante et en principe aucune quantité de chaleur n'est échangée avec l'extérieur. Sa conductivité calorifique et thermique varie évidemment avec le degré de tassement. La diffusivité de la neige froide n'est que 0,0003 unité C.G.S. La transmission des radiations solaires se fait directement à travers la neige, de telle sorte que l'on relève encore une onde thermique dans le sol.

#### 4.2.3. - Influence du gel

Supposons que la température de l'air soit en baisse et atteigne zéro sans que ce fait soit précédé ou accompagné d'une chute de neige. Le gel se transmet de plus en plus lentement à l'intérieur du sol et en même

.../...

temps les tranches supérieures congelées servent d'écran aux variations de température de surface. Le bloc ainsi formé doit posséder un coefficient de diffusivité presque nul ; on a constaté que sa valeur est de l'ordre de 0,001 unité C.G.S.

Dans la zone congelée la température n'est pas uniforme. L'uniformité ne s'établit qu'au dégel qui commence par le bas, puis peu après par le haut de telle façon que la tranche gelée conserve un coefficient de diffusivité presque toujours nul.

#### 4.3 - Influence de la pluie et du vent

L'influence de la pluie ne doit être bien marquée que pendant un temps très court, elle ne doit pas être ressentie très profondément, et a probablement deux actions directes :

- 1°) Apporter ou soustraire des quantités de chaleur. La différence de température entre le sol et la pluie varie suivant l'heure de la journée, l'état du ciel et la saison. Ainsi, une pluie d'orage, survenant après une chaude journée, arrivera sur un sol dont la température est élevée par rapport à celle de la pluie, tandis qu'avec une pluie ayant lieu par une journée entièrement couverte, la différence de température sera minime, par contre une pluie survenant le matin après une nuit claire, pourra tomber sur un sol ayant une température beaucoup plus basse que la sienne.
- 2°) Modifier la nature du terrain, donc la valeur de la conductivité thermique du sol. En outre, en renouvelant l'humidité du sol au niveau qu'elle atteint, elle agit sur la circulation de la vapeur et sur ses conséquences. La Figure 13 montre la variation de diffusivité après une pluie.

Les observations de CAMBA sur la température de sol à PAVIE montrent que l'influence des pluies est absolument nulle sur les valeurs moyennes mensuelles de la température du sol à partir d'une profondeur de 1 m. D'après le même auteur, les pluies d'été ne déterminent généralement un refroidissement sensible que jusqu'à la profondeur de 50 cm.

Le vent lui-même peut agir sur la température du sol, non pas tant par sa propre température, elle-même fonction de la très faible valeur de la chaleur spécifique de l'air, que par son action d'évaporation amenant un refroidissement qui peut atteindre 2 à 3°C

.../...

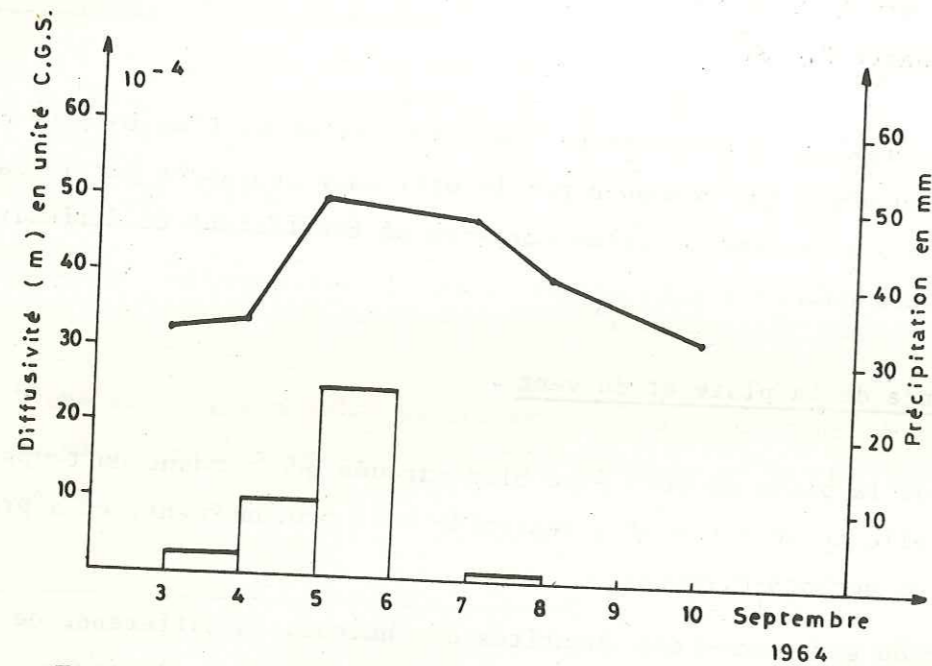


Fig. 13 - Variation du coefficient de diffusivité (m) en fonction des précipitations

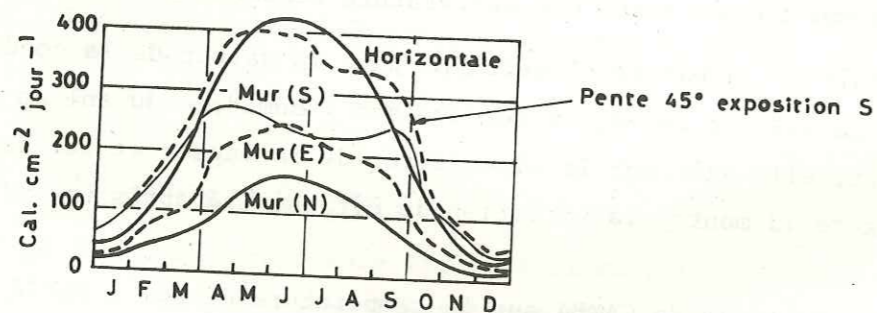


Fig. 14 - Flux reçu du soleil par différentes surfaces horizontales, à 45° et par des murs verticaux

#### 4.4 - Influence de l'exposition

A première vue, l'exposition a une importance évidente au cours de la journée, car lorsque le soleil monte à l'horizon il exerce une influence sur le sol, laquelle dépend de l'orientation de la surface topographique. Le sol exposé perpendiculairement aux rayons du soleil reçoit une densité de flux  $D$  qui est maximum, et au contraire un sol incliné de  $\alpha$  degré par rapport aux rayons solaires reçoit une densité de flux  $D = D_{max} \cdot \sin \alpha$ .

Les facteurs influençant les radiations qu'un sol reçoit du soleil sont : la hauteur du soleil, la durée de l'ensoleillement, la pente et la direction du relief, la latitude, etc.

Le Tableau 17 nous donne le flux de chaleur reçu du soleil par un sol exposé sous différentes directions et pentes (10 et 20°), à VIENNE pendant les années 1930-1932, d'après ASCHEDLER (voir page 36).

La Figure 14 montre le flux reçu du soleil par une surface horizontale, par une surface inclinée à 45° exposée au Sud, et par 3 murs verticaux d'orientations différentes. En mesurant la température du sol dans les différentes conditions citées ci-dessus, on aura une variation de la température.

Le Tableau 18 nous montre la température mesurée aux sites de INNTHAL à l'altitude de 600 m et GSCHNITZ à l'altitude de 1300 m pour une profondeur de 80 cm et pour différentes orientations.

.../...

	J	F	M	A	M	J	J	J	A	S	O	N	D	Total. en cal/cm <sup>2</sup> .j
Pente 10°														
N	52	116	298	510	690	774	827	703	462	205	58	31	4724	
N.E (N.W)	66	133	319	528	696	784	847	728	486	226	69	45	4928	
E (W)	104	178	375	577	731	812	877	778	555	281	102	74	5448	
S.E (S.W)	142	218	426	620	764	836	908	828	612	341	137	106	5938	
S	158	238	446	636	773	841	925	852	650	372	155	125	6171	
Pente 20°														
N	4	52	204	417	611	702	744	596	342	114	7	0	3793	
N.E (N.W.)	36	92	256	462	633	725	774	644	402	165	41	21	4215	
E (W)	104	178	366	559	705	778	841	752	540	279	102	74	5274	
S.E (S.W.)	175	253	466	646	764	825	909	846	649	382	165	134	6214	
S	203	289	501	677	790	846	927	884	723	442	193	160	6638	

Tableau 17 - Flux reçu du soleil sur des plans inclinés à 0, 10 et 20° et ayant différentes orientations en cal/cm<sup>2</sup>.j

Exposition	INNTHAL (600 m)			GSCHNITZHAL (1300 m)		
	Hiver (°C)	Eté (°C)	Année (°C)	Hiver (°C)	Eté (°C)	Année (°C)
N	4,2	15,3	9,5	0,6	11,2	5,1
N.E	4,4	17,0	10,6	0,9	11,6	5,5
E	4,0	18,6	11,3	0,4	12,6	5,9
S.E	5,1	19,7	12,6	1,5	13,4	7,5
S	5,3	19,3	12,7	2,4	13,4	7,8
S.W	6,6	18,3	12,6	3,1	12,9	7,8
W	5,5	18,5	12,2	2,6	12,6	7,4
N.W	4,3	16,0	10,2	2,0	11,9	6,5
Moyenne	5,0	17,8	11,5	1,7	12,5	6,7
Amplitude	2,6	4,4	3,2	2,7	2,2	2,2

Tableau 18 - Température du sol mesurée en été et en hiver à 80 cm de profondeur pour différentes expositions, dans deux régions.

En étudiant ce tableau, on peut déduire qu'en hiver l'exposition E correspond au minimum et l'exposition S.W au maximum de température, la différence étant de 2,6°C et 2,7°C. En été ce sont les exposition N et S qui présentent respectivement le maximum et le minimum de température et la différence est de 4,4°C et 2,2°C pour chacune des deux régions.

Il est bien évident qu'à la surface du sol les différences sont plus grandes et de plus la morphologie du relief peut théoriquement avoir une influence car les formes convexes auront tendance à se refroidir plus rapidement que les formes concaves.

#### 4.5 - Influence de la nature du sol

Les conditions d'échauffement et de refroidissement d'un sol donné dépendent de sa structure et de sa composition minéralogique, c'est-à-dire de son état physique et chimique. Nous allons étudier brièvement ces deux facteurs et verrons en outre l'influence de la teneur en eau.

##### 4.5.1 - Etat physique du sol

Plus un sol ou une roche est compact, plus il y a de contacts entre les matériaux qui le composent et, par conséquent, la conductivité et la

diffusivité sont grandes. Les observations de Th. HOMEN montrent que les variations de température se transmettent d'autant plus profondément que le sol est plus compact. Pour le granite, la variation journalière de température est encore sensible à plus de 130 cm, tandis que dans un sol en friche dont le coefficient de conductivité est faible, elle tend à disparaître vers 35 m. Les observations de W. SCHMITDT montrent que l'influence de l'activité humaine (changement de son état physique) ne porte que sur les couches superficielles. C'est en surface que l'on doit observer les plus grandes différences de température ; un sol travaillé a une capacité calorifique plus faible que s'il est tassé et s'échauffera plus fortement ; de même, il se refroidira plus vite. Les figures 15, 16 et 17 nous donnent une idée de l'influence de l'utilisation du sol par l'homme sur la variation de la température.

#### 4.5.2. - Etat chimique du sol

La couleur d'un sol, qui dépend de sa composition minéralogique, joue un rôle notable dans l'absorption de l'énergie solaire. Les expériences de A.D. HALL ont montré qu'à 15 cm de profondeur, par une journée ensoleillée d'Avril, la température d'un sol couvert de suie pouvait dépasser de 1,4°C la température du sol témoin. Nous avons mesuré cette différence entre un sol couvert par la végétation et un sol couvert par des cendres de végétation (brûlés) et nous avons trouvé 1,6°C à 10 cm de profondeur pour une journée ensoleillée (Mai 1975) au Chatelard, dans les Bauges.

Le pouvoir d'absorption est d'autant plus faible (toutes autres conditions étant égales par ailleurs) que le pouvoir réfléchissant est plus grand. Le Tableau 19, établi par ANGSTROM, nous montre la proportion d'énergie lumineuse incidente réfléchie (l'albedo) par des sols de couleurs différentes et se présentant sous deux états, respectivement sec et humide.

.../...

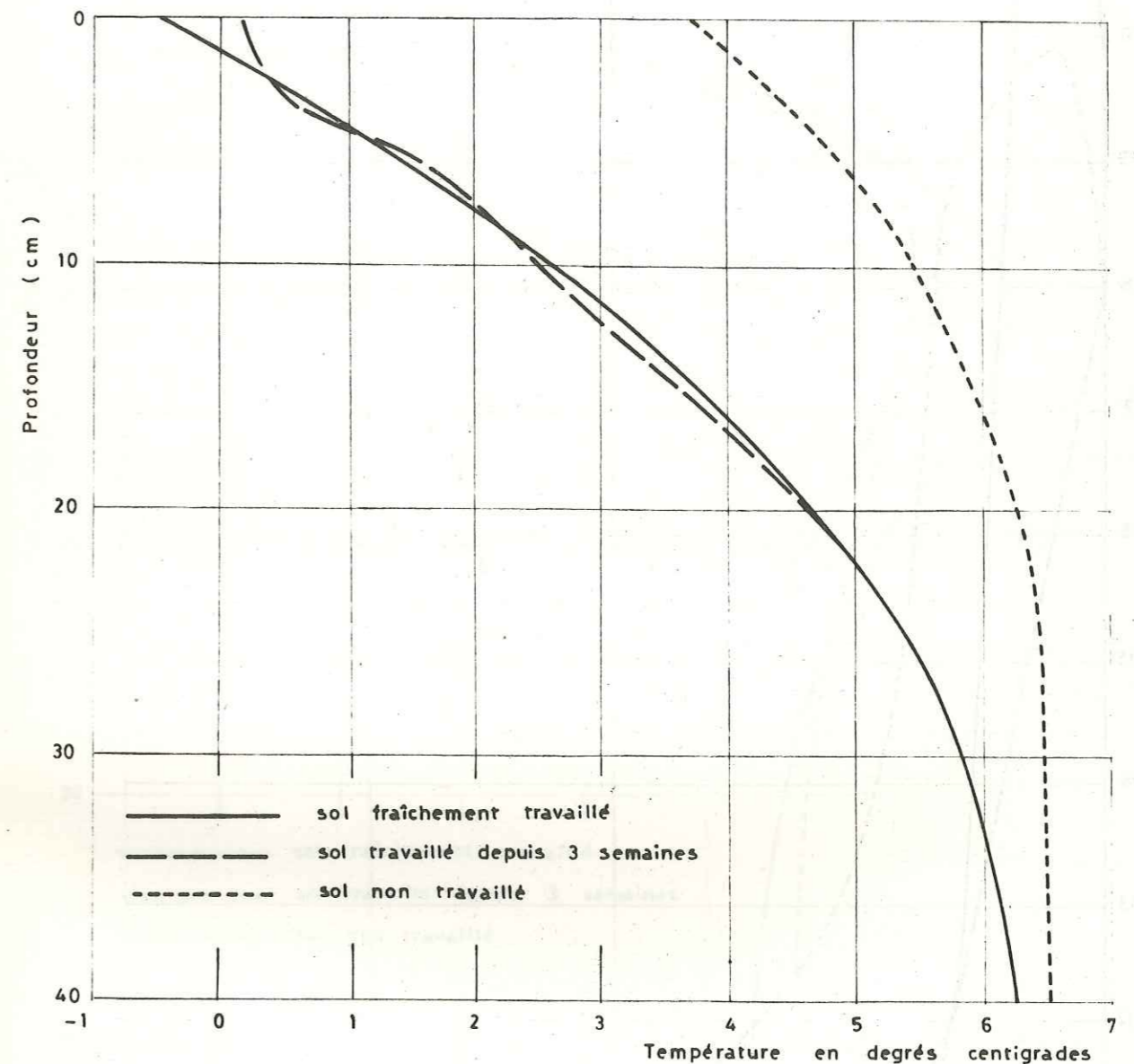


Fig. 15 - Influence du travail du sol sur la variation de la température en profondeur à 4 heures du matin

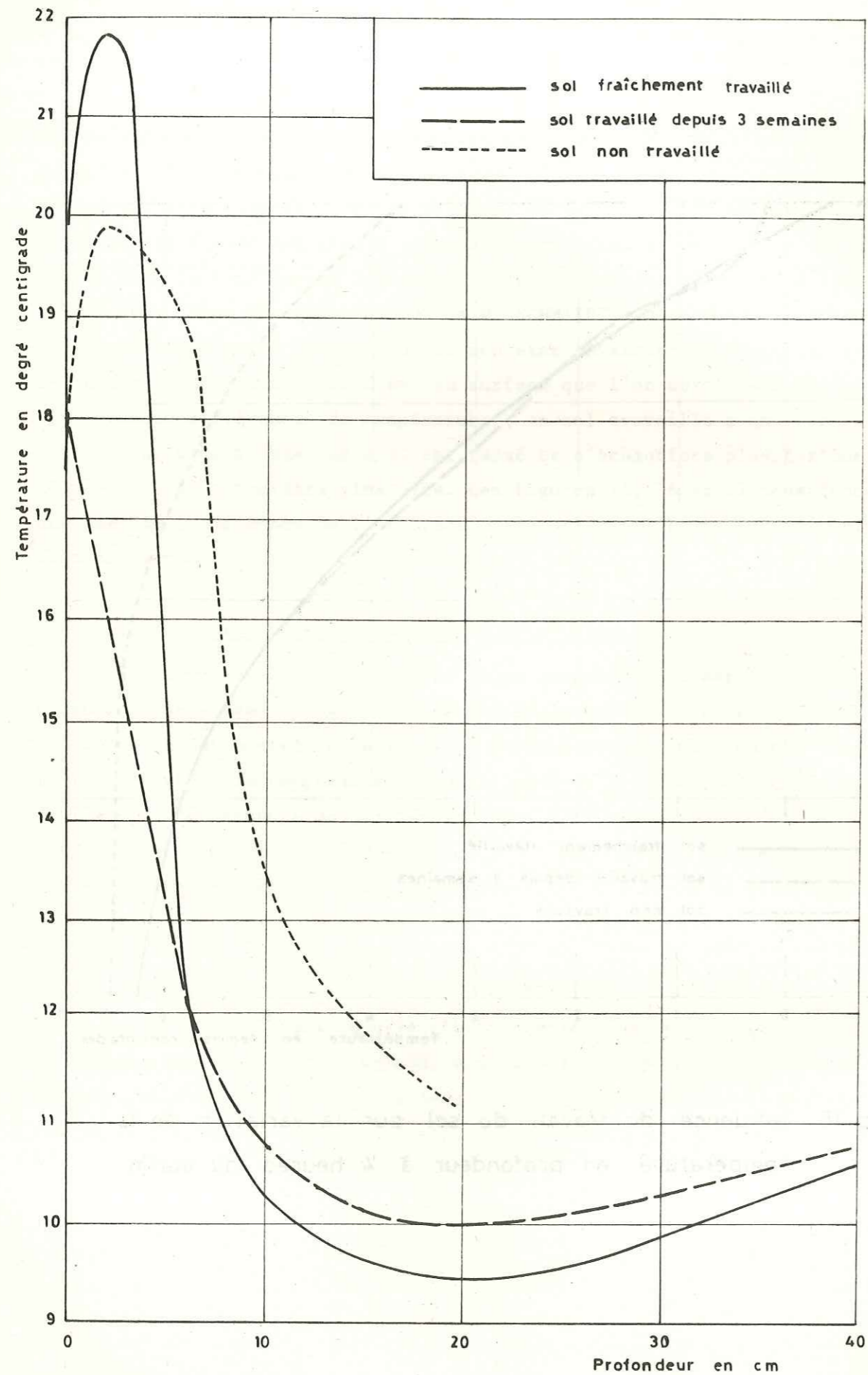


Fig. 16 - Influence du travail du sol sur la variation de la température en profondeur pendant midi

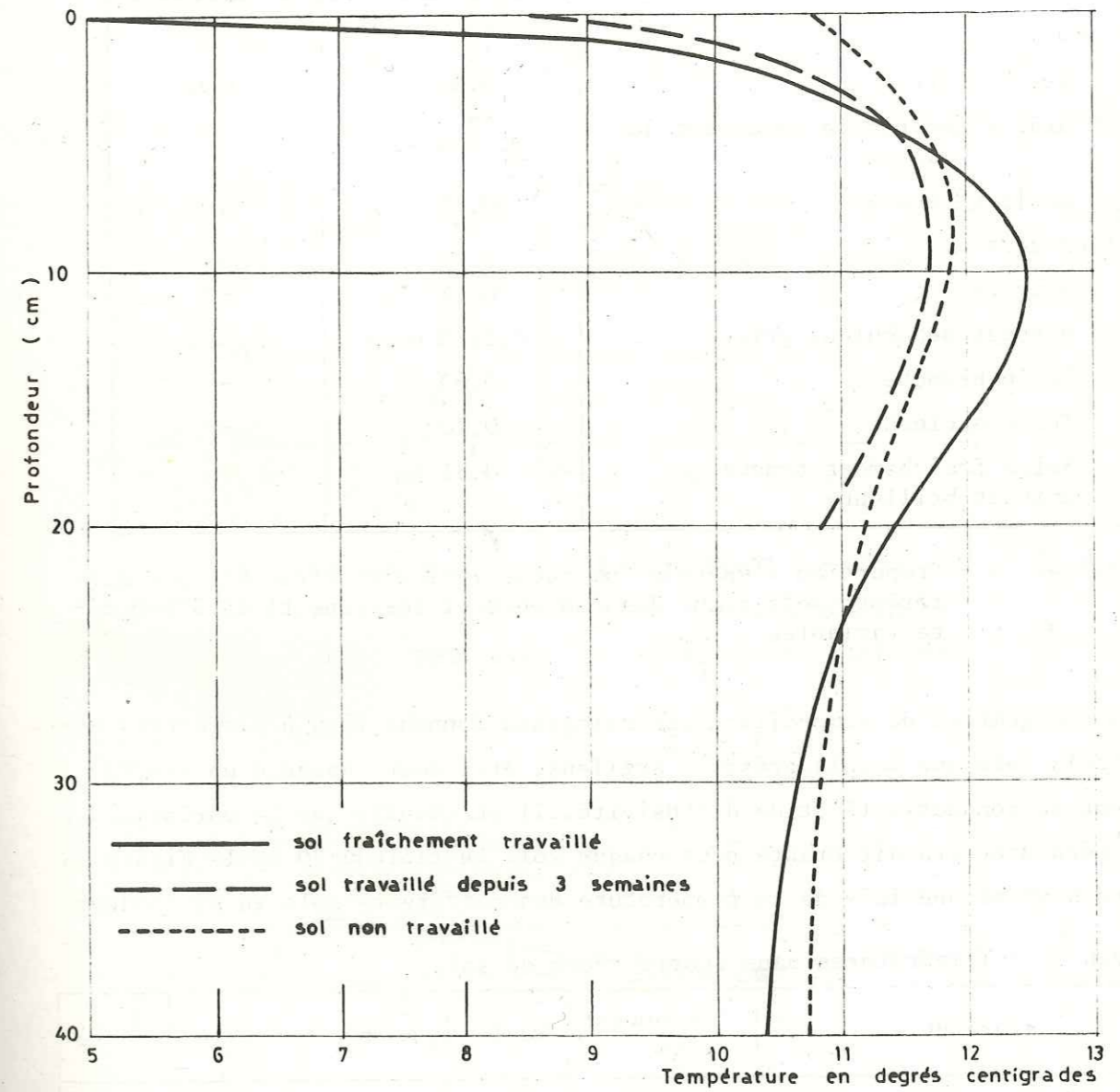


Fig. 17 - Influence du travail du sol sur la variation de la température en profondeur à 19 heures

Type de sol	Sol à l'état sec	Sol à l'état humide
Sol nu :		
Terre noire	0,14	0,08
Granit (en partie recouvert de lichen)	0,12 à 0,15	-
Sable gris	0,18	0,09
Sol couvert :		
Bruyère	0,18	-
Herbage de couleur grise	0,31 à 0,33	0,22
Toile blanche	0,63	-
Neige ancienne	0,70	-
Neige fraîchement tombée, unie et brillante	0,81	-

Tableau 19 - Proportion d'énergie lumineuse incidente réfléchiée par différents sols ayant des couleurs et des conditions d'humidité variables

Les changements de composition minéralogique donnent lieu à différents types de sols tels que : sols gréseux, argileux, etc. dont chacun a un coefficient de conductivité et de diffusivité. Il en résulte que la variation de température sera différente pour chaque sol. Le tableau 20 et la Figure 18 nous donnent une idée de la température des différents sols en profondeur.

Tableau 20 - Températures dans quatre types de sols

Nature du sol	Profondeur (cm)	Sable	Marne	Argile	Vase
Coefficient de diffusivité en unité C.G.S. $10^{-3}$	0 - 5	2,2	3,2	3,6	2,8
	5 - 30	4,4	2,8	2,6	1,1
Maximum de température en surface (en °C)		53,5	46,7	35,9	39,0
Minimum de température en surface (en °C)		13,5	13,1	14,4	15,8
Fluctuation journalière (en °C)	0	40,0	33,6	21,5	23,2
	5	19,4	18,5	13,7	13,9
	10	12,3	10,7	7,7	5,4
	30	1,6	0,7	0,6	0,3
Profondeur correspondant à une fluctuation journalière de 0,1°C en cm		57,0	47,0	47,0	40,0

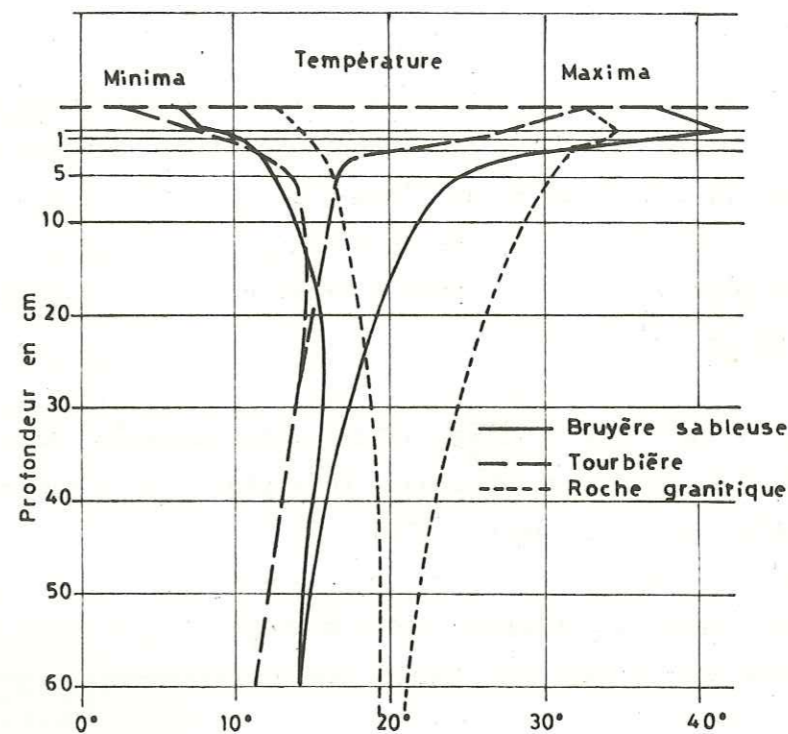


Fig. 18 - Variations de la température (minima et maxima) en fonction de la profondeur pour des sols de différentes natures

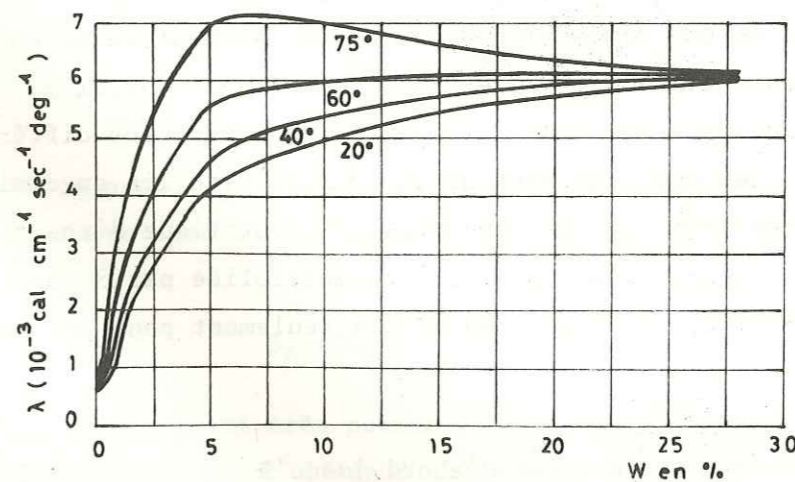


Fig. 19 - Influence de la teneur en eau sur  $\lambda$

4.5.3 - Influence de la teneur en eau

La teneur du sol en eau modifie également les coefficients de conductivité. Dans la majorité des sols, la chaleur spécifique est environ 0,2 cal/g°C, c'est-à-dire 1/5 de celle de l'eau. Il en résulte que plus un sol est chargé en eau, plus sa chaleur spécifique doit être grande et plus par conséquent un même apport ou un même retrait de calories apportera une moindre variation de température.

D'autre part, la conductivité calorifique des sols supposés compacts, absolument sans vides et secs, est environ 7 fois plus grande que celle de l'eau pour laquelle  $\lambda = 0,0014$  unité C.G.S.

Le Tableau 21 nous donne les chiffres dûs à MITSCHERLICH et calculés à partir des chaleurs spécifiques des différents constituants.

A l'état sec		50 % de saturation	Complètement saturé
Sol sableux	0,302	0,510	0,717
Sol argileux	0,240	0,532	0,823
Humus	0,148	0,525	0,902

Tableau 21 - Chaleur spécifique rapportée à l'unité de volume (MITCHERLICH) en Cal/cm<sup>3</sup>°C

Il résulte de tout cela qu'une adjonction d'eau au sol augmentera sa conductivité calorifique car malgré la faible conductivité de l'eau il y aura accroissement des surfaces de transfert de chaleur entre les différentes particules. Mais cet accroissement de la conductivité ira en diminuant si la teneur en eau augmente. La conductivité calorifique d'une roche d'abord sèche, puis imbibée d'eau pourra être multipliée par 8 pour un sable, 7 pour un limon, 2,4 pour un grès et 1,4 seulement pour une argile.

Quant à la diffusivité, elle croît aussi d'abord jusqu'à une certaine teneur en eau, mais diminuera ensuite en raison de la faible valeur de la chaleur spécifique de l'eau.

La Figure 19 nous montre la variation de la conductivité en fonction de la teneur en eau d'un sol sableux considéré à différentes températures.

4.6 - Influence de la variation locale de composition du sol

Un changement de la composition du sol entraîne une variation du coefficient de conductivité thermique, et si ce changement intervient à une échelle régionale, son influence se traduira également par une anomalie à l'échelle régionale.

On détermine le régime thermique stable à une profondeur z par la formule suivante :

$$q = -\lambda \frac{d\theta}{dz} = e (\theta_0 - \theta_a)$$

où  $\theta_a$  = température de l'atmosphère à la surface du sol

$\theta_0$  = température de la surface du sol

e = coefficient d'échange de la surface

L'équation montre que le changement de température à la surface de la terre, dû à la chaleur venant de l'intérieur, est proportionnel au flux de chaleur. Le tableau 22 nous donne les différentes valeurs de e selon la nature des milieux se trouvant en contact.

Milieux se trouvant en contact	e (cal/cm <sup>2</sup> sec °C)	$\theta_0 - \theta_a$ (°C)
Sol normal - air	$27 \cdot 10^{-6} - 1,1 \cdot 10^{-3}$	0,05-0,0012
Sol accidenté - air	$3 \cdot 10^{-4}$	0,004
Sol - Eau	$7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$ très petit

Tableau 22 - Différentes valeurs de e selon les milieux

Si on prend  $\theta_a$  comme température à la surface du sol, la variation de température avec la profondeur (dans un sol contenant n couches horizontales) sera :

$$\theta_z = \theta_a + q/e + q \sum_1^n \frac{z_n}{\lambda_n}$$

La valeur  $\frac{q}{e}$  est très petite et par conséquent l'influence de ce terme sera négligeable en profondeur de sorte que la température en profondeur dépendra de q et  $\lambda$

Dans une région homogène du point de vue géologique, on aura un courant de chaleur q constant et le seul facteur influençant la température en profondeur (hormis les facteurs d'origine externe) sera  $\lambda$ .



Pour deux types de sols ayant des coefficients de conductivité  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ , on aura :

$$q = - \lambda_1 \frac{\Delta\theta_1}{\Delta z} = - \lambda_2 \frac{\Delta\theta_2}{\Delta z}$$

$\Delta\theta_1$  et  $\Delta\theta_2$  sont les variations de la température dans la direction z (verticale).

En mesurant la température pour une certaine profondeur z, on aura une différence de température latérale ( $\theta_{1,2}$ ) entre deux points telle que :

$$\theta_{1,2} = \Delta\theta_1 - \Delta\theta_2 = \frac{q\Delta z}{\lambda_2} \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)$$

On voit que le rapport  $\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$  détermine la magnitude de la fluctuation de la variation de température entre deux points latéraux.

On peut mettre à profit cette mesure de  $\theta_{1,2}$  pour établir une distinction entre les différents types de sols : argiles, graviers, sables, etc.

CARR (1966) a utilisé cette méthode pour distinguer les argiles des graviers et repérer les chenaux en Indiana.

CARWRIGHT (1968, BIRMAN (1969) et CSOKA (1968) ont utilisé cette méthode pour étudier les eaux souterraines.

Le Tableau I-23 nous donne les valeurs du coefficient de conductivité thermique de différentes roches, sols et autres matériaux.

### 5 - CONCLUSIONS

D'après ce que nous avons expliqué dans ce chapitre, on peut distinguer deux zones dans les couches superficielles :

. Une zone appelée hétérothermique dont la principale source de chaleur provient du soleil. Cette chaleur se propage dans le sol par les ondes thermiques journalières et annuelles. La température de ces couches superficielles est fonction de différents facteurs : altitude, latitude, couverture, pluie, exposition, nature du sol, etc. Nous venons d'étudier l'influence de chacun de ces facteurs sur la température du sol.

. Sous cette zone hétérothermique existe par contre une zone homothermique que traverse, non plus les ondes thermiques venues de l'extérieur, mais le flux incessant de chaleur parvenant de l'intérieur de la terre. Dans cette zone, les variations journalières et annuelles de température ne se font plus sentir et la température s'accroît avec la profondeur à rai-

.../...

son de 3°C par 100 mètres.

Dans la zone hétérothermique on distingue une zone hétérothermique journalière ne descendant guère au-dessous de 40 cm pour un sol ordinaire et 120 cm pour le granit, et une zone hétérothermique annuelle pouvant descendre jusqu'à 15 à 30 m de profondeur suivant le sol et le climat. Cette zone hétérothermique annuelle est appelée zone neutre dans laquelle la température moyenne est approximativement égale à la température moyenne de la surface du sol. Sa profondeur dépend de l'amplitude de la variation de la température et de la diffusivité thermique du sol.

Tableau 23 - Valeurs du coefficient de conductivité ( $\lambda$ ), de diffusivité (m) et de capacité calorifique ( $\gamma$ ) en unité C.G.S.

	$\lambda$	(m)	$\gamma = \rho c$
Granit	0,0030 - 0,0097	0,0190 - 0,0090	0,51 - 0,52
Obsidienne des Lipari	0,00192		
Porphyre des Lipari	0,0055 - 0,0080		
Andésite des Lipari	0,0030 - 0,0031		
Basalte des Lipari	0,0030 - 0,0070	0,0047	0,53
Lave	0,0020 - 0,0069		
Dunite	0,0040		
Gneiss	0,0043 - 0,008		
Schistes	0,0061 - 0,0069		
Ardoise	0,0081		
Schiste argileux	0,0019 - 0,0030		
Shale	0,00141		
Argile sèche	0,0025		
Argile humide	0,0035		
Argile et sable	0,0034		
Marne rouge	0,00525		
Marne grise	0,00221-0,00374		
Quartzite du Witwatersrand	0,0100 - 0,0192		
Grès	0,0024 - 0,006	0,139	0,46
Quartz (moyen)	0,00623		
Sable sec	0,0017		
Même sable humide	0,007		
Sable grossier sec	0,00047		
Même sable complètement saturé	0,0041		
Sable fin sec	0,00046		
Même sable complètement saturé	0,0039		
Sable fin, siliceux	0,0003 - 0,0013		
Sable	0,0006		
Limon sec	0,00033		
Même limon complètement saturé	0,0021		

	$\lambda$	(m)	$\gamma = \rho c$
Limon sableux	0,00045		
Même limon complètement saturé	0,0032		
Marbre	0,0012 - 0,0054		
Craie	0,0020 - 0,0022		
Dolomie	0,0109		
Gypse	0,0031		
Chlorure de Sodium à 30°	0,0075		
Houille	0,0003 - 0,0008		
Charbon à gaz	0,0085		
Asphalte	0,00144		
Paraffine	0,0006 - 0,00069		
Huile de Paraffine	0,00035		
Pétrole	0,00036		
Benzène à 20°C	0,000406		
Toluène à 20°C	0,000382		
Ether de pétrole à 20°C	0,000313		
Eau à 20°C	$(140 \pm 2)10^{-5}$		
Air	0,0000565		
Azote	0,000056		
Hydrogène	0,0004		
Hélium	0,00034		
Anhydride carbonique	0,000033		
Méthane	0,000064		
<u>SOLS</u>			
Sol sableux	0,0016	0,0052	0,31
Sol de forêt	0,00269 - 0,00521	0,00180 - 0,00723	0,342
Terrain en friche	0,00161	0,00628	0,378
Sol nu non travaillé	-	0,0037	

## CHAPITRE II

### APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

- 1 - PRINCIPALES CAUSES DES MOUVEMENTS DE TERRAIN
- 2 - POSSIBILITE D'EXISTENCE DE CHENAUx SOUS LES GLISSEMENTS DE TERRAIN
- 3 - METHODE DES TRACEURS
- 4 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE
- 5 - LES CORRECTIONS
- 6 - PRESENTATION DES RESULTATS
- 7 - CONCLUSIONS

APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

1 - PRINCIPALES CAUSES DES MOUVEMENTS DE TERRAINS

Les mouvements de terrains sont le résultat de la modification de l'équilibre d'une masse considérée. Les relations qu'on peut décrire sont les suivantes :

- . Entre les forces appliquées à des masses et les accélérations, il y a une relation qui s'exprime par la formule  $F = m\gamma$ , loi générale de l'équilibre, valable pour tous les corps.
- . Loi rhéologique ou loi du comportement mécanique du matériau. C'est une relation entre les contraintes  $\sigma$ , les déformations  $\epsilon$  et leurs dérivés par rapport au temps  $\sigma'$ ,  $\epsilon'$ . Cette relation exprime les propriétés mécaniques des matériaux, lesquelles font intervenir aussi les variations de la teneur en eau  $w$  et de la température.
- . Chaque masse est caractérisée par des conditions géométriques et hydrologiques sur son pourtour, ce sont les conditions aux limites qui forment l'ensemble des données relatives aux frontières du massif dont on étudie l'équilibre. On distingue les conditions aux limites des contraintes, les conditions aux limites géométriques et les conditions aux limites hydrauliques.

En général, les causes des mouvements de terrains peuvent se ramener aux trois suivantes :

- . modifications des forces de volume,
- . modifications des relations exprimant les propriétés mécaniques du sol,
- . modifications aux conditions des limites.

1.1 - Modifications des forces de volume

Elles sont essentiellement dues aux secousses sismiques qui donnent lieu à l'apparition d'une accélération supplémentaire, modifient l'équilibre en produisant une nouvelle répartition des contraintes dans toute la masse.

.../...

1.2 - Modifications des relations exprimant les propriétés mécaniques du sol

1.2.1 - Modifications dues au comportement fragile des matériaux

Pour définir les caractéristiques mécaniques des matériaux, on cherche en général à établir la loi reliant les contraintes appliquées aux déformations et à d'autres facteurs comme la température et la teneur en eau. Ces caractéristiques mécaniques dépendent du temps et des contraintes appliquées. En particulier, l'histoire des contraintes subies par le matériau a une influence sur sa fragilité. C'est-à-dire qu'un matériau ayant été soumis à des contraintes très supérieures à celles qu'il subit à l'heure actuelle présente une résistance de pic (pour une faible déformation) et une résistance de palier (pour des déformations plus importantes), cette dernière étant très inférieure à la résistance de pic. Dans ces matériaux dits fragiles, si les sollicitations dépassent, pour une zone, la résistance de pic, il y a rupture locale. Ceci entraîne une diminution locale de la résistance, donc un réarrangement des contraintes. Ce phénomène pouvant se propager, on obtient avec le temps une modification progressive des propriétés mécaniques moyennes du massif.

1.2.2 - Modifications dues au gel et au dégel

Du fait du gel et du dégel, il y a possibilité de modifications des propriétés mécaniques des matériaux en raison des déformations imposées par cette action physique.

1.2.3 - Modifications dues au changement de la teneur en eau

La variation de la teneur en eau donne lieu à une modification de la cohésion des argiles, laquelle augmente lorsque la teneur en eau diminue.

1.2.4 - Modifications dues à l'altération des matériaux

L'altération physico-chimique modifie les propriétés des matériaux, par exemple la transformation du granite par altération préférentielle le long des fissures : le massif devient peu à peu un ensemble de blocs séparés par des intervalles argileux.

.../...

1.3 - Modifications des conditions aux limites

C'est la cause qu'on rencontre le plus souvent dans la pratique. Nous examinons successivement les modifications des conditions aux limites effectuées sur le sol et sur l'eau.

1.3.1 - Le sol

a) Modifications de la forme

Le terrassement ou l'érosion en pied des talus provoque souvent des glissements.

b) Modifications des contraintes

C'est par exemple le fait d'une surcharge placée au sommet d'un talus sur une pente.

1.3.2 - L'eau

Toute nouvelle répartition des pressions interstitielles entraîne une modification de l'équilibre et c'est la cause principale dans deux cas sur trois environ bien qu'elle puisse être associée à d'autres causes moins importantes.

En pratique, toute modification de la perméabilité des écoulements naturels ou artificiels entraîne une nouvelle répartition des pressions interstitielles, donc modifie l'état d'équilibre. On donne deux exemples :

. Remblai sur une source

En mettant en place un remblai à matrice argileuse, on diminue la perméabilité au voisinage de la surface, donc la pression interstitielle augmente. En période de fortes pluies la pression peut être assez forte pour provoquer un glissement.

. Modification des écoulements naturels et artificiels

Tous les changements des écoulements naturels ou artificiels donnent lieu à variation de pression interstitielle.

2 - POSSIBILITE D'EXISTENCE DES CHENAUX SOUS LES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Nous avons expliqué brièvement les principales causes des mouvements de terrain. D'après les expériences, on constate que la plus importante de ces causes est la variation des pressions interstitielles. Les renseignements que

.../...

nous pouvons obtenir à propos des eaux dans la zone du glissement de terrain permettront de proposer des solutions pour éviter une aggravation du glissement ; c'est pourquoi l'hydrologie des glissements de terrains est une étude de première importance.

Les glissements de terrains se produisent généralement pendant les saisons de précipitations, en automne, et surtout au printemps quand les neiges fondent et quand les sources ont un débit maximum. Donc dans les zones propices aux glissements, si l'alimentation des nappes est au maximum, les probabilités de glissement sont très élevées.

Les eaux superficielles, l'eau de pluie, les sources, etc. s'infiltrant et s'écoulent dans les parties du sol ayant une perméabilité très élevée. La vitesse de l'eau dépend de la perméabilité du terrain.

On a mesuré cette vitesse par la méthode des traceurs dans différents glissements (Japon) et le tableau 24 nous donne une indication de cette vitesse.

Nom du glissement	Région	Vitesse en cm/sec	Coefficient de perméabilité en cm/s
Matsumoyama	Niigata	0,1 - 0,42	0,55 - 2,33
Miza	Toyama	0,63	4,85
Miza	Toyama	3,40	7,95
Kushibayashi	Shiga	0,2 - 2,20	1,25 - 13,75
Kamioogi	Shiga	0,01 - 1,0	0,09 - 8,77
Kamenose	Oosaka	0,1 - 0,18	0,13 - 0,24
Kamenose	Oosaka	0,26 - 2,64	0,28 - 2,82
Mikage	Hyogo	0,36 - 0,48	1,8 - 2,4
Mikage	Hyogo	1,16 - 2,08	8,79 - 15,76
Kebioka	Hyogo	0,43	1,95
Kebioka	Hyogo	0,17 - 0,62	0,31 - 1,15
Kita-SOO	Hyogo	0,01 - 0,04	0,03 - 0,13
Tando	Hyogo	0,19 - 0,3-1,9	1,90 - 3,00
Kusumaki	Kochi	0,22 - 0,28	0,37 - 0,48
Kawai	Kochi	0,39	0,33
Enkyogi	Kochi	0,11	0,22
Nishikawa	Kochi	0,33 - 0,92	0,42 - 1,15

Tableau 24

.../...

Si on calcule la perméabilité du terrain d'après cette vitesse, on déduira que le sol a une perméabilité très élevée, analogue à celle du sable ou du sable avec gravier. Le Tableau 25 nous donne les variations de perméabilité des différents types de sol

Perméabilité en cm/sec		10 <sup>2</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>0</sup>	10 <sup>1</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup>
Drainage		Bon			Faible				Indrainable			
Type de sol	Gravier propre	Sable propre, mélange de sable et gravier			Sable très fin, silt organique et inorganique, mélanges de sable silt et argile, argile stratifiée, sol imperméable modifié par l'altération et la végétation				Sol imperméable, argile homogène sous la zone altérée			

Tableau 25 - Caractéristiques de la perméabilité et du drainage des sols

L'étude de laboratoire sur les échantillons prélevés dans les puits faits dans le glissement de terrain montre une perméabilité inférieure à celle mesurée in situ. Si nous considérons la perméabilité mesurée au laboratoire, le drainage des eaux sous le glissement sera difficile. Au contraire, si nous considérons la perméabilité mesurée in situ, les eaux sous le glissement sont faciles à drainer. D'après les expériences faites sur différents glissements, on sait que le drainage des eaux des glissements est facile, ce qui confirme la perméabilité mesurée in situ. La valeur de la perméabilité mesurée in situ peut se confirmer par la remarque suivante : lors d'un essai de perméabilité au laboratoire, on impose un sens d'écoulement qui est en général le sens vertical. On mesure donc la perméabilité verticale. Or, l'expérience prouve que dans le terrain c'est la perméabilité horizontale qui est la plupart du temps la plus importante pour les conditions de drainage. Dans les mesures de perméabilité in situ, les résultats sont donc surtout influencés par la perméabilité horizontale.

Les eaux dans la zone du glissement coulent dans toutes les parties en mouvement mais surtout dans les endroits où la perméabilité est très élevée ; si le drainage a lieu dans ces endroits, celui-ci sera très efficace.

.../...

D'après les études faites sur la niche d'arrachement du glissement, on peut admettre qu'il y ait des endroits où la perméabilité est très élevée et où l'eau coule normalement. Il semble que ces parties se rejoignent en formant un réseau des chenaux sous le glissement ce qui est mis en évidence par la méthode des traceurs dont nous parlons au paragraphe suivant.

Dans certains cas, du fait de l'écoulement des eaux dans ces chenaux, la pression interstitielle de certaines parties augmente ; ce fait est dû à différentes causes :

- . remontée de la nappe sous ces canaux à cause de l'alimentation partielle,
- . construction d'un mur artificiel dans le cours du chenal (ceci peut arriver pendant la construction d'une route),
- . remplissage des pores dans une partie du chenal par l'argile apportée par l'eau,
- . coupure brusque dans le cours du chenal.

Avec l'augmentation de la pression interstitielle, la résistance diminue et un petit glissement peut se produire et ceci modifie les conditions limites et peut donner lieu à un important glissement de terrain (Fig. 20 a, b). Pour mettre en évidence et pour connaître les chenaux souterrains, on utilise la méthode des traceurs dont nous parlons ci-dessous.

### 3 - METHODE DES TRACEURS

Cette méthode est basée sur l'utilisation des traceurs comme les matériaux fluorescents ou les sols. On met les traceurs dans un puits et on analyse les eaux des puits qui se trouvent en aval.

Pour bien expliquer la méthode, nous donnons un exemple très simple. Prenons un petit glissement où l'on a trois puits B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> et une source S (Fig. 21 a). On met le traceur dans le puits B<sub>1</sub>. Supposons que l'on trouve ses indices dans les puits B<sub>2</sub> et B<sub>3</sub> et non dans la source S. Au point de vue interprétation, on pense qu'il existe un chenal entre B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> et B<sub>3</sub> et qui n'a aucun rapport avec la source S. Mais il y a d'autres moyens d'interprétation :

.../...

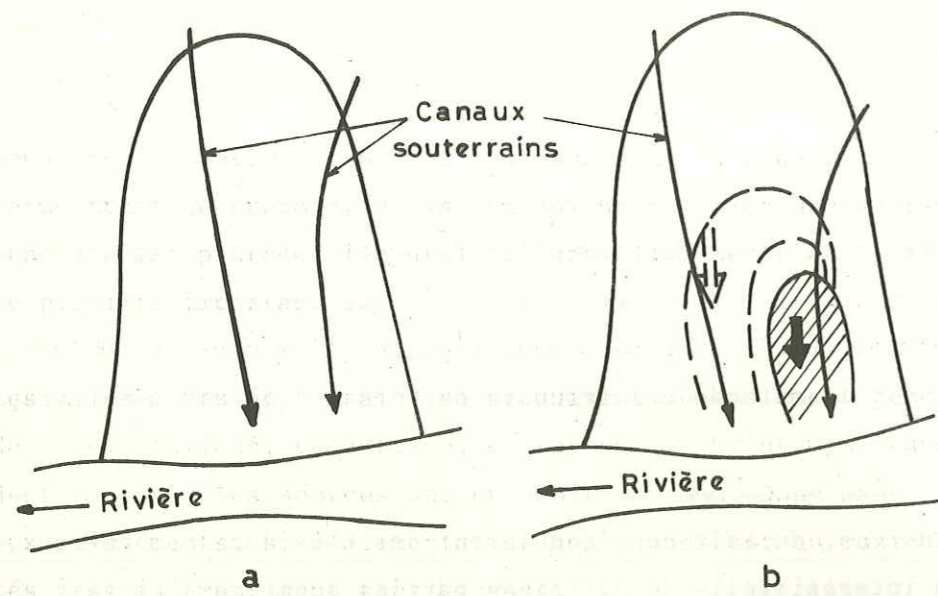


Fig. 20

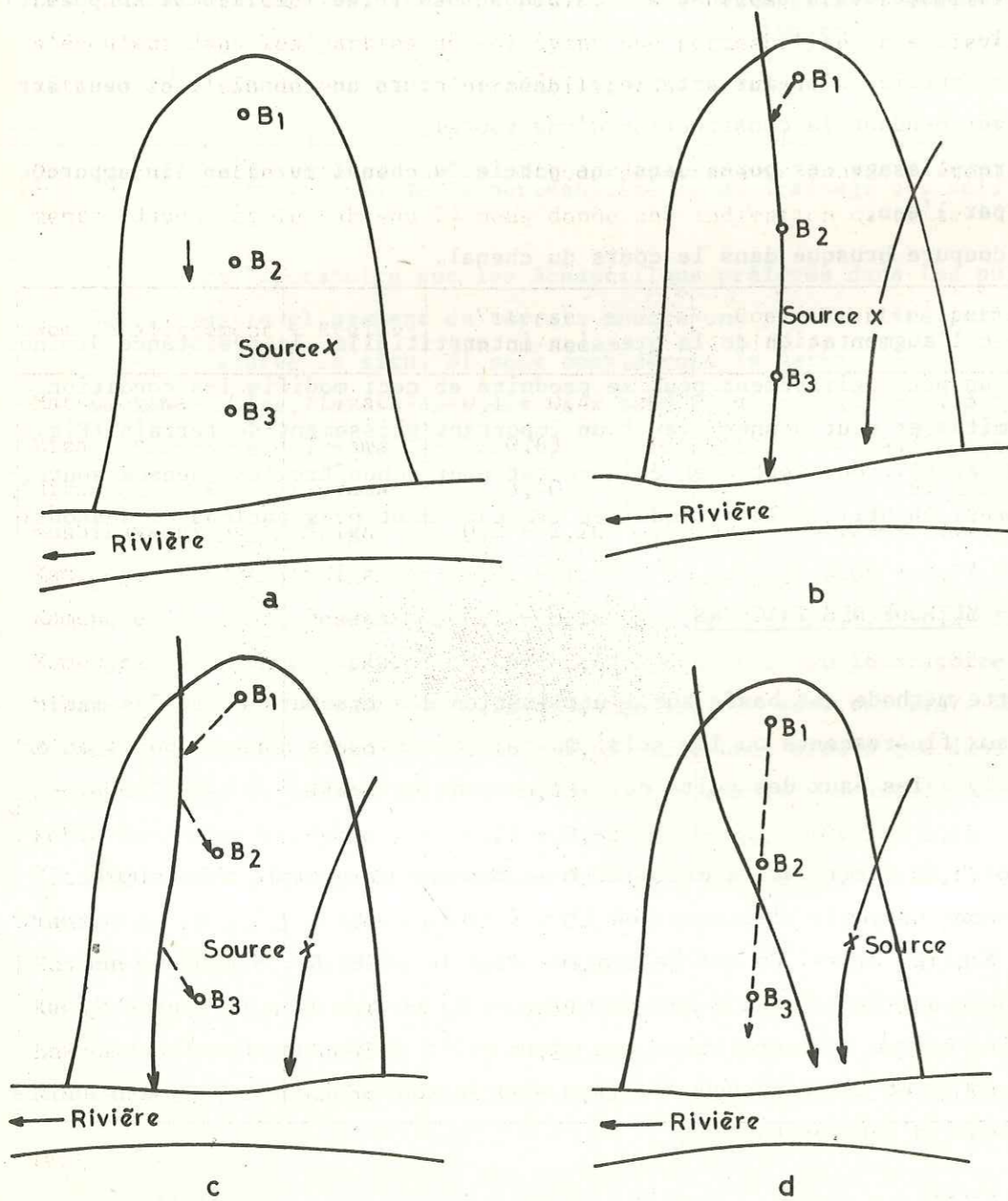


Fig. 21

- . il peut exister un chenal entre les puits B<sub>2</sub> et B<sub>3</sub> mais le traceur peut s'infiltrer par un autre chenal (Fig. 21b) ;
- . il peut exister un chenal indépendant des puits B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> et B<sub>3</sub> mais le traceur peut s'infiltrer par d'autres petits conduits (Fig. 21c) ;
- . enfin, la Fig. 21d nous donne une autre image d'interprétation.

On voit dans un petit glissement les difficultés d'interprétation, mais dans un grand glissement les inconvénients sont encore plus importants. Pour avoir un bon résultat avec cette méthode, il faut qu'il y ait beaucoup de puits et renouveler l'emploi des traceurs dans quelques puits, ce procédé n'est pas économique. C'est pourquoi le Laboratoire de Géotechnique qui étudie les glissements de terrains dans la région des Alpes s'est intéressé à l'application de la méthode thermique, qui est le sujet de cette thèse.

Dans les deux chapitres précédents nous avons expliqué toutes les généralités sur cette méthode, Nous allons expliquer son application sur le terrain.

#### 4 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

Pour employer cette méthode il est nécessaire de connaître certaines conditions particulières comme par exemple les variations de température des eaux souterraines, les périodes de travail, etc. Nous examinons ci-dessous ces différentes conditions.

##### 4.1 - Echange thermique entre les eaux et le sol

Les eaux souterraines sont le résultat des précipitations qui, en s'infiltrant, ont créé différentes nappes phréatiques. La température de ces nappes est sensiblement identique à la température moyenne annuelle des terrains dans lesquels elles s'écoulent. Les eaux de pluie en s'infiltrant rejoignent les nappes et pendant leur trajet à travers le sol ont tendance à se trouver en équilibre thermique avec le sol. Nous allons étudier brièvement cet échange thermique.

Nous rappelons que l'eau de pluie arrive sur le sol à une température inférieure d'environ 2 à 3°C à celle de l'air, au moins en été. La température journalière de la surface du sol est elle-même un peu plus éle-

vée que celle de l'air ; il y a donc une différence de température entre l'eau de pluie et la surface du sol. Les eaux de pluie s'infiltrant dans le sol et traversent les zones d'hétérothermie journalière et annuelle.

La zone d'hétérothermie journalière n'a pas une épaisseur très grande (40 à 100 cm) et l'eau ne reste pas longtemps dans cette zone dont la température varie à chaque moment de la journée. Après cette zone, l'eau entre dans la zone d'hétérothermie annuelle dont la température varie suivant la saison ; c'est-à-dire que cette zone a une température très élevée au printemps et en été, et assez basse en automne et en hiver.

La zone d'hétérothermie annuelle a un excès de calories de l'ordre de 500-800 cal/cm<sup>2</sup> en période chaude, et un déficit de calories du même ordre en période froide. L'eau infiltrée, en passant sous cette zone, subit un réchauffement ou un refroidissement selon la saison. Du fait de cette action de l'eau, les isothermes du sol subissent localement un déplacement, c'est-à-dire qu'un réchauffement de l'eau entraîne un refroidissement du sol ou vice-versa.

Les eaux de pluie passant par plusieurs types de sol ayant une porosité différente, l'évolution de leur température dépend beaucoup de facteurs comme la vitesse d'infiltration ou d'écoulement, la température du sol, etc. Le cas le plus intéressant pour notre étude est celui d'un terrain à porosité de chenaux et de grosses fissures. Nous avons parlé de l'existence des chenaux souterrains dans les zones de glissement, nous allons étudier l'échange thermique dans un chenal parallèle à la surface du sol.

La température de l'eau à un point situé à une distance x de l'origine du chenal est calculée selon la formule suivante :

$$\theta = \theta_s + \frac{\phi h}{\lambda} - (\theta_s - \theta_0 + \frac{\phi h}{\lambda}) e^{-\frac{2\pi \lambda x}{q \text{ Log } \beta}}$$

où

$\theta$  = la température de l'eau du chenal à une distance x de son origine

$\theta_s$  = la température moyenne de la zone hétérothermique annuelle

$\phi$  = le flux de chaleur venant verticalement de l'intérieur de la terre

h = la profondeur du chenal

$\theta_0$  = la température de l'eau à l'origine du chenal

$\lambda$  = le coefficient de conductivité thermique

.../...

v = la vitesse d'écoulement de l'eau dans le chenal

R = le rayon de dépression thermique

$\rho$  = le rayon du chenal

On peut écrire également :

$$\theta = \theta_i - (\theta_i - \theta_0) e^{-\frac{2\pi \lambda x}{q \text{ Log } \frac{R}{\rho}}}$$

où

$\theta = \theta_s + \frac{\phi h}{\lambda}$  est la température de l'isotherme primitive le long de laquelle le chenal est aligné

q =  $\pi \rho^2 V$  est le débit de l'eau du chenal

Si nous admettons les valeurs suivantes :

$\theta_s = 10^\circ\text{C}$   $\phi = 1,6 \cdot 10^{-6}$  unité C.G.S.  $h = 1000$  cm  $\lambda = 0,005$  unité C.G.S.

$\theta_0 = 1^\circ\text{C}$   $\rho = 10$  cm et  $\text{Lg } \frac{R}{\rho} = 10$

On aura :

$$\theta = 10,32 - 9,32 e^{-\frac{x}{v \cdot 10^5}}$$

En admettant V = 0,5, 1,0 et 2,0 cm/s,

si on trace ces graphiques on voit que l'accroissement de la température est d'abord très rapide, puis s'atténue progressivement jusqu'à devenir nul à l'infini. Nous concluons ainsi que l'eau infiltrée dans un chenal souterrain après un parcours de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres, selon sa vitesse, aura une température voisine de la température moyenne annuelle (Fig. 22)

#### 4.2 - Période de travail

En dehors des facteurs superficiels qui modifient la température du sol, il existe un facteur principal qui provoque un changement très sensible à son niveau, c'est l'écoulement des eaux souterraines, à condition qu'elles aient une différence de température avec le terrain dans lequel elles s'écoulent, c'est-à-dire qu'il y ait des échanges de chaleur entre ces eaux et le terrain.

.../...



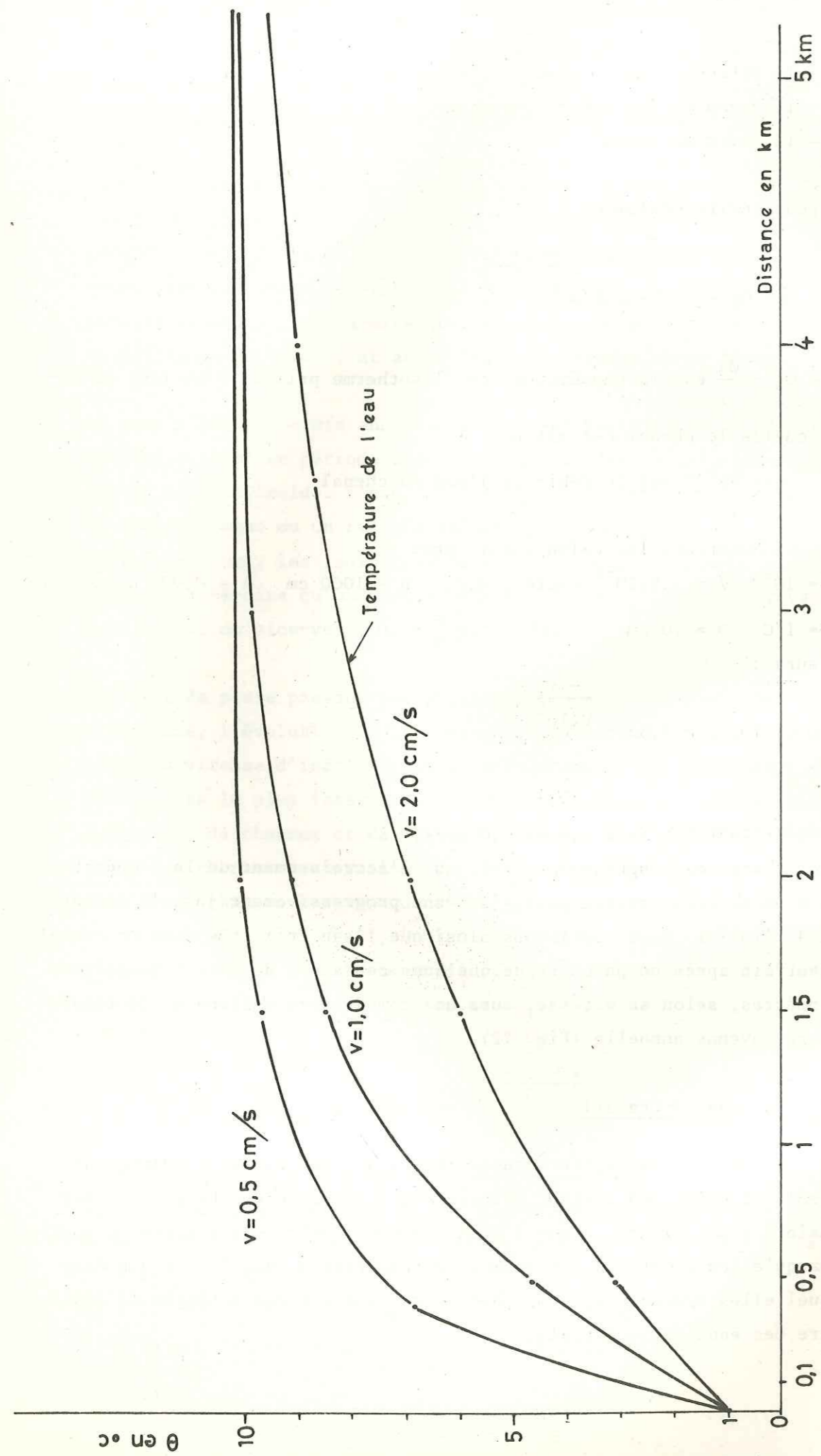


Fig. 22 - Echange thermique entre l'eau et le sol selon la distance parcourue et la vitesse

Nous avons étudié l'évolution de la température des eaux qui s'infiltrent dans les chenaux souterrains et alimentent les nappes. Ces eaux, en cas d'équilibre thermique, sont à la température moyenne annuelle du sol ; en cas de non équilibre, elles sont à une température supérieure ou inférieure à celle de la zone hétérothermique annuelle. En conséquence, elles donnent lieu à un changement de la température du sol, qui se traduit par une anomalie thermique positive ou négative.

Pour l'étudier plus précisément, nous traçons le graphique de variation de la température moyenne mensuelle pour une période d'un an : c'est une courbe périodique sinusoïdale qui nous montre l'existence de deux phases chaude et froide dans le sol, conformément à ce que nous avons expliqué dans le Chapitre I. La Figure 23 montre les courbes de variations de la température à une profondeur de 50 cm à 12 h à Saint-Geoirs et nous l'avons établie en faisant la correction nécessaire pour les altitudes 600, 800 et 1000 m. De ces courbes on a déduit que pour les mois d'Octobre et Avril le terrain passe d'une phase à l'autre.

Normalement, les eaux coulant dans les pentes, sous des éboulis, etc. n'arrivent pratiquement pas à avoir leur équilibre thermique avec le sol, c'est-à-dire qu'elles ont une température inférieure à la température moyenne annuelle du sol. Par exemple, la température moyenne annuelle dans la région des Alpes est de l'ordre de  $10^\circ\text{C}$ , tandis que la température des sources et des eaux superficielles, d'après nos mesures, varie entre  $7,5$  et  $8,5^\circ\text{C}$ . En étudiant la courbe n° 2 (Fig. 23), on peut remarquer que la différence entre la température des sources et des eaux superficielles et la température moyenne saisonnière ou mensuelle est plus grande pour les mois de Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre dans la phase chaude (ce qui donne une anomalie positive). Elle est moins grande pour les mois de Décembre, Janvier, Février (ce qui donne une anomalie négative), et elle est moyenne pour les mois d'Octobre et Mars. Mais cette différence est minime pour les mois de Novembre et Avril, ce qui veut dire que pour ces deux derniers mois on n'aura pas une anomalie détectable, on ne conseille donc pas l'application de la méthode thermique.

D'après cette discussion, nous pouvons donner le Tableau 26 qui montre les résultats correspondant à la période de travail.

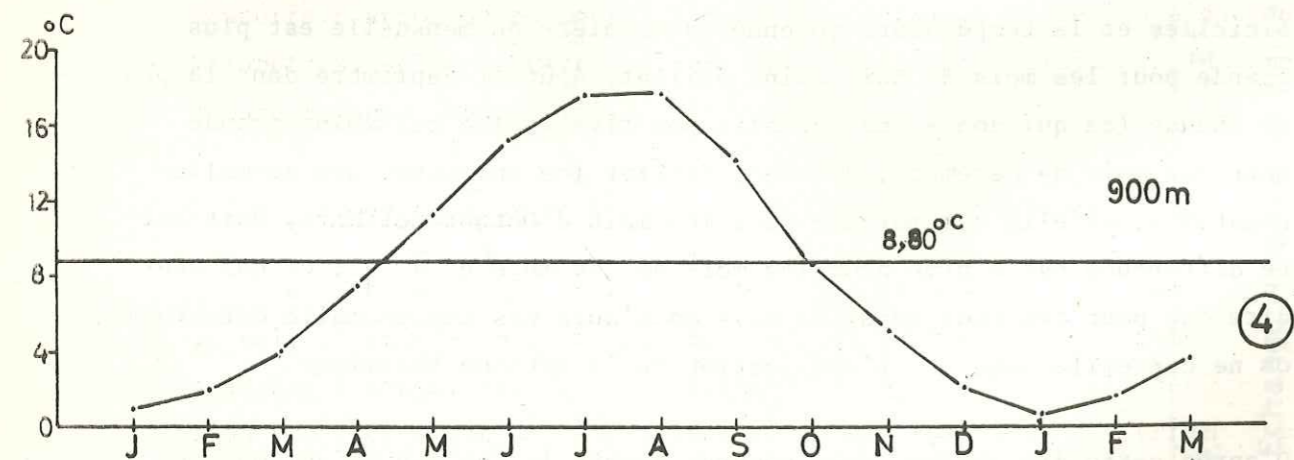
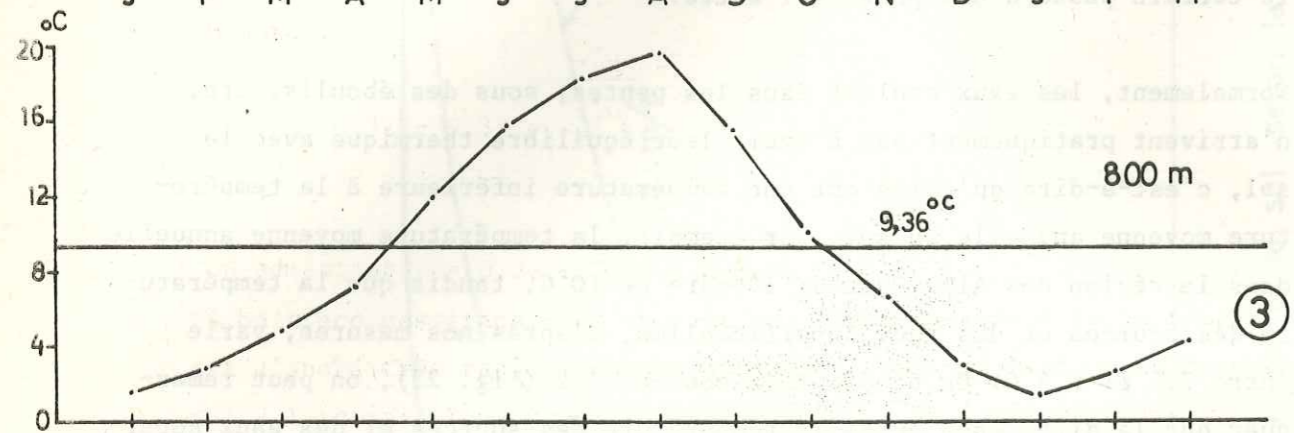
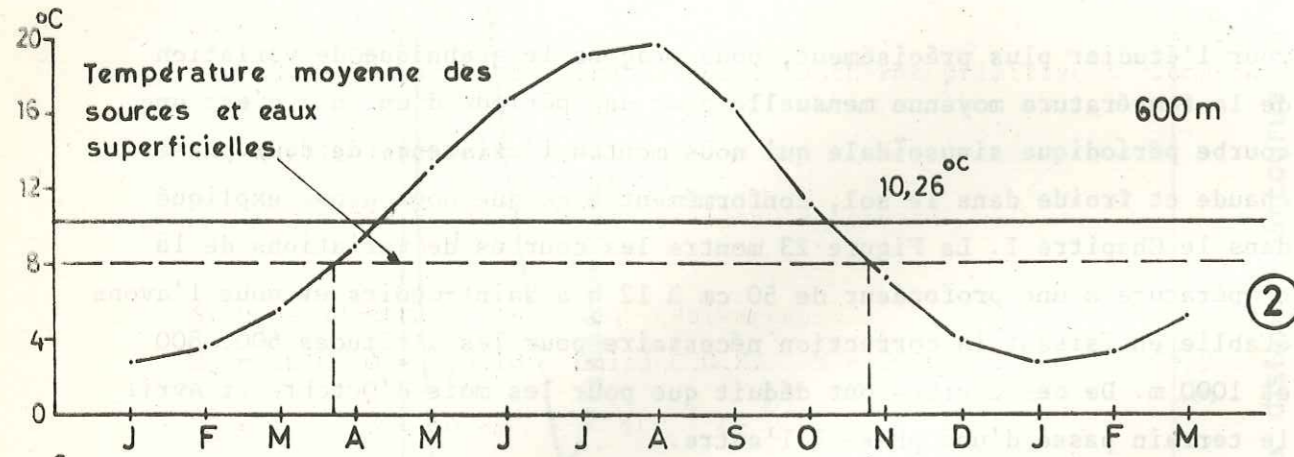
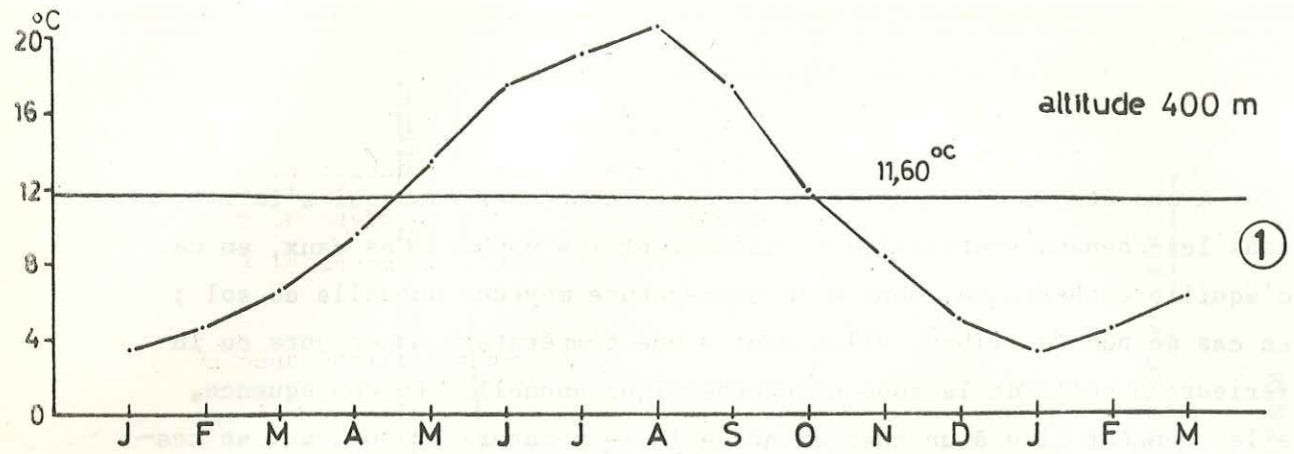


Fig. 23 - Variation de la température moyenne mensuelle à une profondeur de 50cm à 12 h à GRENOBLE ( Saint - Geoirs )

Mois	Phase	Qualité de la période de travail	Anomalie
Mai Juin Juillet Août Septembre	Chaude	Excellente	Négative
Décembre Janvier Février	Froide	Excellente	Positive
Octobre Mars	Chaude et Froide	Bonne	Négative en Octobre Positive en Mars
Novembre Avril	Période de changement de phase	Mauvaise	Faible donc pas détectable

Tableau 26 - Périodes recommandées pour l'application de la méthode thermique

#### 4.3 - Mesure de la température sur le terrain

Après une étude générale (et notamment hydrogéologique) de la zone du glissement de terrain, on a une idée de la localisation possible des chenaux. Cette étude permet en effet de prévoir les profils sur lesquels il faut mesurer la température du sol ; on doit les choisir de telle façon qu'ils passent dans les zones uniformes au point de vue des conditions de surface et qu'ils recouvrent les endroits où il y a possibilité d'existence de chenaux souterrains.

Avant de commencer les mesures il faut mettre un thermomètre dans une station qui soit à l'abri et mesurer la température de l'air toutes les demi-heures pendant la période de travail. Il faut noter aussi l'état du ciel et la température des sources et ruisseaux qui se trouvent autour de la zone de glissement. La distance des points de mesures est normalement de 5 à 10 m. Dans les lieux où on suspecte des anomalies, cette distance est ramenée à 2,5 m ; les distances entre les profils dépendront de la géométrie du glissement et varieront entre 30 et 100 m. Les profondeurs de mesure dépendront des conditions du sol et varieront entre 50-

100 cm. La profondeur idéale est 100 cm car elle permet d'annuler complètement l'influence de la variation journalière, mais à cause de la difficulté de faire des trous à la tarière à cette profondeur, on peut mesurer à 50 cm. Les mesures doivent être faites à la même profondeur pour tous les points si possible. On peut faire des trous avec une tarière à main (Photo n° 1) qui permet en plus de récolter et d'étudier les échantillons prélevés dans les trous. Les variations de la composition du sol, ainsi que les passages des différentes zones argileuses ou sableuses, etc. En même temps, il faut noter toutes les variations des conditions de surface du sol, comme le passage des profils en forêt, sol nu, sol avec végétation différentes et peut être changement des couleurs du sol, les indices de présence d'eau, variations de l'humidité du sol, etc. Dans les endroits où on observe une anomalie il faut noter toutes les conditions de surface et tous les éléments susceptibles d'avoir une influence sur la température du sol.

#### 4.4 - Appareil de mesure

C'est un appareil très simple, portatif, constitué d'une sonde de 1 à 2 mètres, dont l'extrémité est un thermocouple. Il est relié par un fil à un ohmmètre qui permet de lire directement sur le cadran la température du sol exprimée en degrés centigrades (Photo n° 2). La précision de l'appareil est 0,1°C.

#### 5 - LES CORRECTIONS

Nous avons étudié dans le premier chapitre les facteurs influençant la température du sol. Il faut rappeler que tous ces facteurs ne jouent pas le même rôle dans notre mesure, on peut les diviser en trois catégories :

- . les facteurs qui ont une influence sur la température des premiers 10 cm des couches superficielles et qui n'ont aucune influence dans notre mesure puisqu'elle est pratiquée à une profondeur d'au moins 50 cm. Ce sont la pluie, le vent, la neige, le gel, etc.
- . les facteurs qui ont une influence égale pour tous les points de mesure dans une zone de glissement, mais nous devons les connaître lorsque nous voulons comparer la température de points situés dans des régions différentes : il s'agit de la latitude, de l'altitude et de l'exposition.

.../...

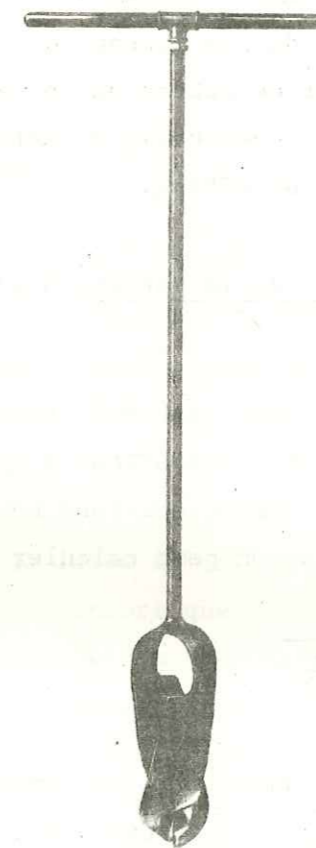


Photo n° 1 - Tarière à main

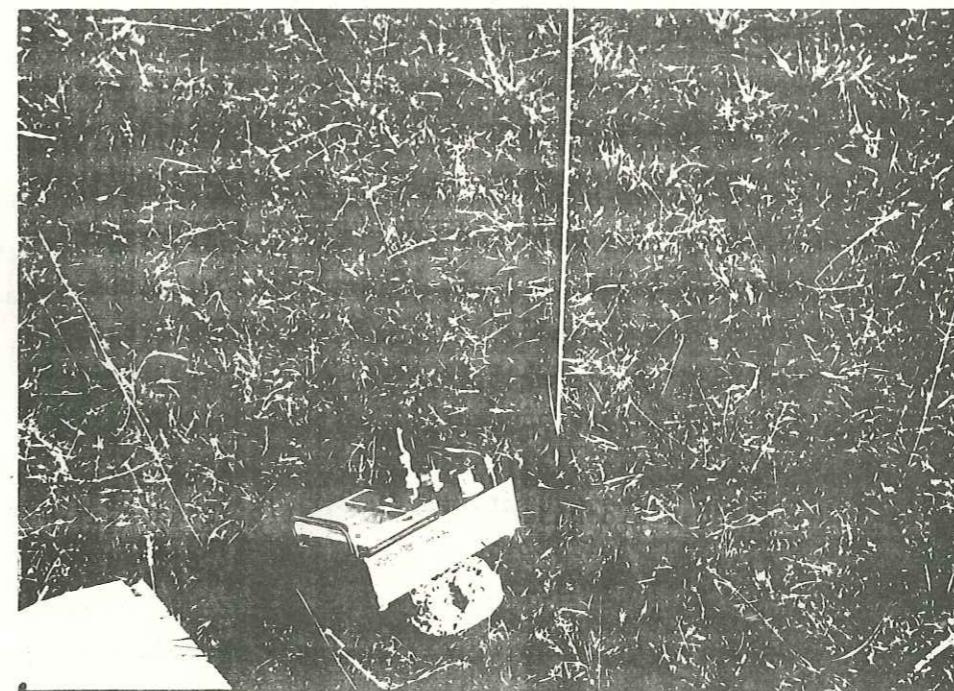


Photo n° 2 - Appareil de mesure de la température du sol

les facteurs dont les influences sont sensibles pour l'interprétation de notre étude et que nous sommes obligés de connaître pour tous les points de mesure : il s'agit de l'influence de la variation journalière de température, le changement de nature du sol et sa couverture (forêt, végétation) et de l'existence éventuelle de matériaux radio-actifs. Nous allons les étudier plus en détail.

5.1 - Correction de l'influence de la variation journalière de température

L'influence de ce facteur sur la température du sol a été étudiée en général dans le Chapitre I et les tableaux 5 et 6 nous montrent les différentes profondeurs où ces variations sont sensibles selon les différents types de sol et de roches. On peut calculer cette influence d'après la formule suivante :

$$\alpha = Ae^{-z} \sqrt{\frac{\pi}{mT}}$$

où

$\alpha$  = influence de la variation journalière de température

A = amplitude de la variation de la température de l'air dans la période de travail

T = périodicité, soit 24 h

m = coefficient de diffusivité thermique du sol.

Par exemple, pour un sol ayant  $T = 0,004$  unité C.G.S.  $T = 24$  h  $A = 10^\circ\text{C}$  et pour une profondeur  $z = 50$  cm, on aura  $\alpha = 0,085^\circ\text{C}$

5.2 - Correction de la variation de la composition du sol

La variation de la composition du sol donne le résultat de changement de coefficient de conductivité  $\lambda$  et nous rappelons que ce changement donne une différence de la température entre deux points A et B que l'on calcule par la formule suivante :

$$\Theta_{A,B} = q \frac{\Delta z}{\lambda_2} \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \text{ où}$$

$\Theta_{A,B}$  = la différence de température entre deux points A et B due à la variation de composition du sol

$\Delta z$  = la profondeur de mesure

$\lambda_1$  et  $\lambda_2$  = les coefficients de conductivité thermique du sol,

q = le courant venant de l'intérieur de la terre.

.../...

Par exemple, nous calculons  $\Theta_{A,B}$  pour deux sols ayant le maximum et le minimum de  $\lambda$ , c'est-à-dire un sol argileux et sableux dont  $\lambda_1 = 0,002$  et  $\lambda_2 = 0,005$  unité C.G.S. On prend  $z = 50$  cm et  $q = 1,6 \cdot 10^{-6}$  unité C.G.S., on aura  $\Theta_{A,B} = 0,024^\circ\text{C}$ , ce qui montre que la variation latérale de composition du sol ne produira pas d'anomalie et que son influence sera donc négligeable.

5.3 - Correction due aux variations de couvertures superficielles

Le sol parfois est couvert par la forêt ou la végétation ; nous avons donné les renseignements généraux sur ces facteurs au Chapitre I. Nous rappelons que leur influence sur la température du sol ne peut donner lieu à des formules précises.

En règle générale, la forêt et la végétation diminuent l'amplitude de la température du sol, encore que cette diminution varie suivant les espèces végétales présentes. En pratique, il faut essayer de faire passer les profils sur des zones de couverture végétale homogène, mais en cas d'impossibilité il y a lieu d'apporter une correction. Pour la calculer on doit choisir un profil sur lequel, hormis les différences de végétation, il n'existe aucune circulation d'eau souterraine qui pourrait avoir une influence sur la température du sol. Dans ce cas, les variations observées pour la température sont dues à l'influence de la couverture végétale correspondant et nous pouvons donc l'évaluer et au besoin l'éliminer dans le graphique.

5.4 - Correction due à la décomposition des matériaux radio-actifs

Certaines roches comme le granite comprennent des matériaux radio-actifs. Supposons que ces roches aient une grande extension horizontale pour une petite épaisseur, selon que les minéraux radio-actifs sont disséminés ou concentrés dans le granite, la chaleur résultant de leur désintégration se généralise dans la totalité ou dans une partie des roches en direction de la surface.

Si toute cette chaleur, ou seulement une partie, ne se transmet pas à la surface du sol, les roches se réchauffent et dans ce cas  $\partial\theta/\partial t \neq 0$ .

Si dans tous les points la température reste constante, on a  $\partial\theta/\partial t = 0$  et toute la chaleur produite dans les roches est transmise à la surface.

.../...

On peut écrire l'équation de conduction de chaleur sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{p \cdot \epsilon + r \cdot \gamma}{c} + \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad \text{où}$$

$p$  = la quantité d'uranium des roches exprimée en grammes d'uranium/gramme de roche

$\epsilon$  = la chaleur produite par 1 gramme d'uranium (cal.  $g^{-1}$  sec)

$r$  = la quantité de thorium des roches exprimée en gramme de thorium/gramme d'uranium

$\gamma$  = la chaleur produite par gramme de thorium

$c$  = la chaleur spécifique des roches cal.  $g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

$\rho$  = densité des roches

$\lambda$  = coefficient de conductivité thermique des roches

$L$  = l'épaisseur des roches en cm

Dans le cas de régime permanent, c'est-à-dire  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ , la solution différentielle est la suivante :

$$\theta = - \frac{p \cdot \epsilon + r \cdot \gamma}{\lambda} \frac{z^2}{2} + \frac{Q + (p \cdot \epsilon + r \cdot \gamma) \rho L}{\lambda} z + - \frac{(p \cdot \epsilon + r \cdot \gamma)}{\alpha} L + \theta_1$$

et l'élévation de la température due à la présence des éléments radioactifs est :

$$\Delta \theta = \frac{(p \cdot \epsilon + r \cdot \gamma) \rho}{\alpha} L + \frac{(p \cdot \epsilon + r \cdot \gamma) \rho L}{\lambda} z - \frac{(p \cdot \epsilon + r \cdot \gamma)}{\lambda} \frac{z^2}{2}$$

Pour les roches massives pouvant être riches en uranium et en thorium, on peut supposer les valeurs suivantes :

$$p = 10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{gr. uranium}}{\text{gr. roche}}$$

$$\epsilon = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ (cal/g.s.)}$$

$$r = 2,0 \cdot 10^{-5} \frac{\text{gr. thorium}}{\text{gr. roche}}$$

$$\gamma = 0,68 \cdot 10^{-8} \text{ cal.g}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$$

$$\rho = 2,8 \text{ g/cm}^3$$

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-3} \text{ cal.sec}^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$$

$$L = 3 \cdot 10^5 \text{ cm}$$

$$\alpha = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cal. cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$$

et pour  $z = 150$  cm on aura  $\theta = 1,13 \cdot 10^{-2} ^\circ C$  qui est négligeable, c'est-à-dire que la décomposition des roches comprenant des éléments radioactifs ne peut pas donner une anomalie thermique mesurable.

.../...

## 6 - PRESENTATION DES RESULTATS

Après avoir effectué toutes les corrections pour les points de mesures, il faut rapporter celles-ci à un même niveau de 1 m ou 50 cm. La présentation des résultats se fera sur les profils et en même temps on pourra dresser une carte des isothermes. Les profils permettront des interprétations quantitatives et la carte des isothermes donnera une image qualitative dont on pourra déduire le tracé probable des chenaux souterrains.

## 7 - CONCLUSIONS

D'après ce qui vient d'être dit, on peut conclure que la méthode thermique est facilement utilisable et que son application est très économique. Un avantage de cette méthode est la possibilité d'étudier la composition du sol jusqu'à une certaine profondeur, ce qui est important surtout dans les régions couvertes par la végétation dense.

Nous avons passé en revue les corrections nécessaires : on peut conclure qu'en général la variation journalière de température (dans les conditions de  $A < 10^\circ C$ ), aussi bien que les changements de composition du sol ou encore que l'intervention éventuelle de matériaux radioactifs sont des facteurs négligeables.

Le seul facteur très important réside dans les différences de la couverture végétale qui peuvent donner lieu à des variations de la température du sol. C'est pourquoi la correction à apporter sur ce point doit être faite avec précision.

En résumé, les principales consignes qui se dégagent de ce travail sont les suivantes :

- . choisir la meilleure période de travail (voir Tableau 26),
- . évaluer de façon très précise les corrections dues à la couverture végétale et si nécessaire l'influence de la variation journalière.

## CHAPITRE III

### ETUDE SUR LE CHAMP THERMIQUE

- 1 - CHAMP STATIONNAIRE A DEUX OU TROIS DIMENSIONS
- 2 - METHODE ANALYTIQUE
- 3 - DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE AUTOUR D'UN CHENAL SOUTERRAIN
- 4 - INTERPRETATION DES RESULTATS THERMIQUES
- 5 - TRAVAUX SUR MODELE PAR ANALOGIE ELECTRIQUE
- 6 - ANNEXE

1 - CHAMP STATIONNAIRE A DEUX OU TROIS DIMENSIONS

Un champ thermique plan à deux dimensions est celui qui s'établit dans un corps prismatique à génératrices isothermes, par exemple une poutre rectangulaire dont chaque face est isotherme (mais à des températures différentes de l'une à l'autre). Un champ thermique à trois dimensions est celui qui s'établit dans un volume quelconque à distribution de température périphérique quelconque, à trois ou même deux ou une dimension géométrique seulement, mais à contour non isotherme.

1.1 - Equation différentielle de LAPLACE

1.1.1 - Régissant les isothermes

Découpons dans un solide un parallélépipède élémentaire de côtés dx, dy, dz (Fig. 24 a). Considérons les deux faces opposées normales à la direction ox, offrant chacune une surface dy, dz. Dans l'unité de temps, la conduction fait entrer ou sortir par la première face, dans la direction ox, le flux de chaleur  $-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} dy \cdot dz$ , qui ressort ou entre par la seconde, augmenté de sa différentielle relativement à x.

La chaleur totale acquise ou perdue algébriquement de ce fait par l'unité de temps et par volume élémentaire, est donc égale à cette différentielle changée de signe soit en supposant  $\lambda$  fixe

$$\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dx \cdot dy \cdot dz$$

A ce flux calorifique acquis par la conduction dans la direction ox, il faut ajouter le flux acquis dans les directions oy et oz. Leurs expressions s'obtiennent par des permutations qui respectent évidemment le produit dx.dy.dz, volume de l'élément considéré dv. La variation totale de la quantité de chaleur présente dans le volume dv = dx.dy.dz et par l'unité de temps est donc :

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) dv$$

En régime permanent, cette variation est nulle, ce qui donne :

.../...

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0$$

Le premier membre que l'on désigne par le symbole condensé  $\nabla^2 \theta$  est le Laplacien de la température. Cette équation différentielle des champs thermiques pluridimensionnels étant linéaire à coefficient constant, les solutions  $\theta(x, y, z)$  s'ajoutent ou se retranchent. Plus généralement, les combinaisons linéaires de ces solutions sont encore des solutions  $\nabla^2 (\alpha \theta_1 + \beta \theta_2 + \dots) = 0$  ; pour un champ unidimensionnel, il se subsiste

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0, \text{ soit } \frac{\partial \theta}{\partial x} = M \text{ donc } \theta = Mx + N \text{ comme on l'a vu.}$$

1.1.2 - Régissant les lignes de flux

Soit l'isotherme  $\theta$  passant par P et son flux normal en P (Fig. 24 b) les projections des segments unité permettent d'écrire :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial \theta}{\partial y} \text{ donc } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = - \frac{\partial^2 \theta}{\partial y \partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \text{ donc } \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x \cdot \partial y}$$

d'où

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

et pour trois dimensions :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$

On a donc, pour les flux comme pour les températures, une équation linéaire à coefficient constant. Les combinaisons linéaires des solutions u(x, y, z) sont encore des solutions. Les deux fonctions  $\theta$  et u sont harmoniques.

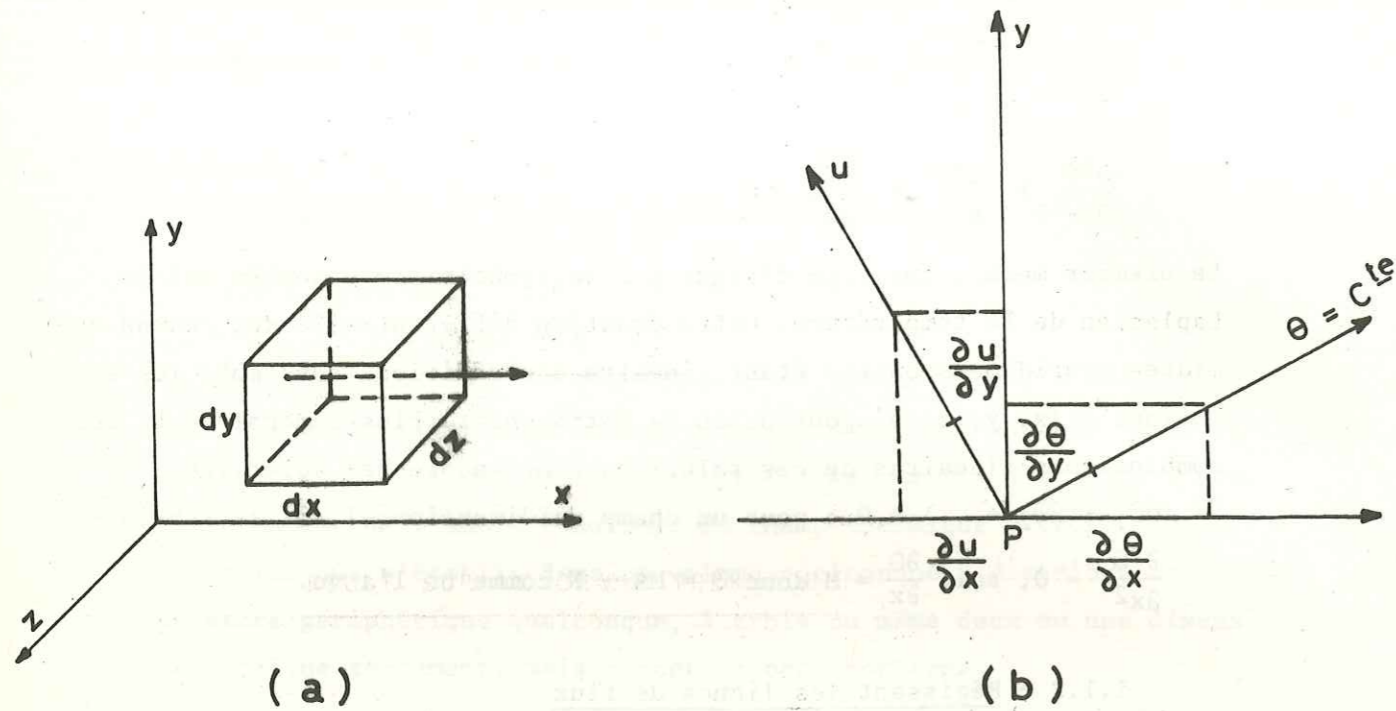
1.1.3 - Liaison entre la variante U et le flux  $\phi$

Le flux  $d\phi$  qui passe dans un tube de flux est  $\phi = \varphi \cdot ds = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} ds$  or, à deux dimensions on a :

$$ds = L \cdot dm, \frac{d\theta}{dn} = - \frac{du}{dm} \text{ et } \frac{d\theta}{dn} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dm} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dm}$$

mais du fait de l'orthogonalité des lignes de  $\theta$  et de U et d'un choix convenable du sens positif pour m et n, on a (Fig. 24 c) :

.../...



$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{dx}{dn} = -\frac{dy}{dm}$$

et

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = -\frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{dy}{dn} = \frac{dx}{dm}$$

donc  $\frac{d\theta}{dn} = -\left(\frac{\partial u}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dm} + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dm}\right) = -\frac{du}{dm}$

ce qui donne  $d\phi = \lambda \frac{du}{dm} \cdot L \cdot dm = \lambda \cdot L \cdot du = A \cdot du$  ou  $\Delta\phi = A\Delta u$  avec  $A = \lambda L$

D'une ligne de flux à une autre, le flux qui passe est proportionnel à la variation du paramètre  $u$  multiplié par  $\lambda L$ ;  $u$  et  $\phi$  seront comptés à partir d'une ligne de flux originale.

Pour résoudre les équations différentielles des champs stationnaires, on utilise des méthodes analytiques (MAXWELL-KELVIN, etc.), graphiques, analogiques, etc. Nous allons examiner les méthodes analytiques.

2 - METHODES ANALYTIQUES

Superposition des solutions analytiques des champs unidimensionnels

Méthode des images de Lord KELVIN.

2.1 - Champ stationnaire créé par deux sources linéaires conjuguées à flux opposés (source et puits).

Considérons une source linéaire, ponctuelle en section droite, qui émet une puissance (flux pour un temps  $t = 1$ ) égale à  $\phi$  sur une longueur  $L$ , dans un milieu de conductivité  $\lambda$ . Soit  $O_1$  la trace de la source linéaire (Fig. 24 d). Le champ créé dans un milieu homogène indéfini est cylindrique, le flux traversant une surface de rayon  $r$  et de longueur  $L$  est

$$\phi = \varphi_s = -\lambda \frac{d\theta_1}{dr} (2\pi r \cdot L) \text{ d'où } d\theta_1 = -\frac{\phi}{2\pi\lambda L} \frac{dr}{r} \text{ et } \theta_1 = -\frac{\phi}{2\pi\lambda L} \log r + cte$$

La constante est la valeur que prend  $\theta_1$  pour  $\log r = 0$  donc  $r = 1$ . Soit maintenant le puits, également linéaire et ponctuel en section droite, qui absorbe un flux  $\phi$ , c'est-à-dire qu'il émet un flux  $-\phi$ , soit  $O'_1$  sa trace et  $L$  sa longueur, on aura de la même façon, pour une surface cylindrique de rayon  $r'$  :

$$-\phi = -(-\lambda \frac{d\theta'_1}{dr'}) (2\pi r' L) \text{ d'où } d\theta'_1 = \frac{\phi}{2\pi\lambda L} \frac{dr'}{r'} \text{ et } \theta'_1 = \frac{\phi}{2\pi\lambda L} \log r' - cte$$

.../...

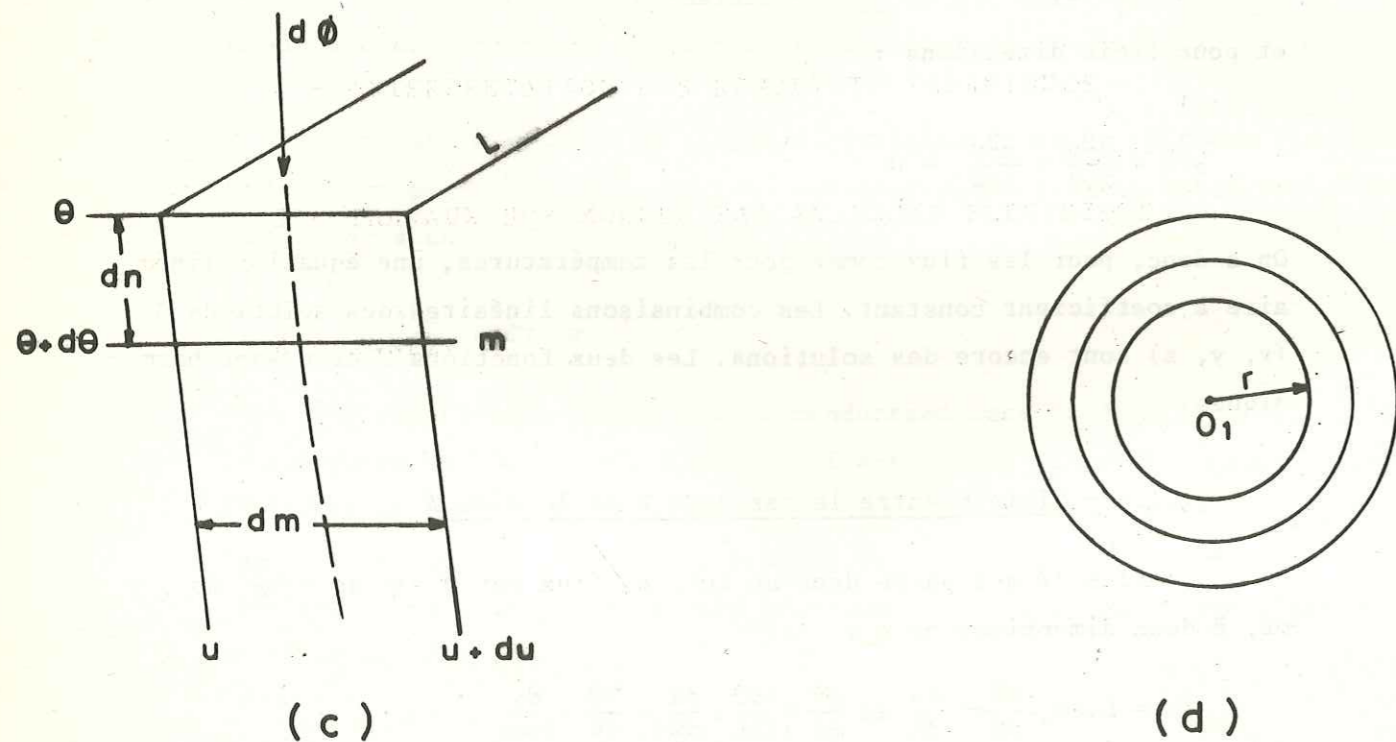


Fig. 24



La constante étant évidemment la même que pour  $\theta_1$  car pour  $r = r'$ , il faut que  $\theta_1 = \theta_1'$  soit  $2a$  la distance séparant  $\theta_1$  et  $\theta_1'$ , en tout point P ayant une distance  $r$  de  $\theta_1$  et  $r'$  de  $\theta_1'$  on aura :

$$\theta = \theta_1 + \theta_1' = \frac{\phi}{2\pi\lambda L} \log \frac{r'}{r} \quad (1) \text{ par suite de la superposition des deux solutions } \theta_1(r) \text{ et } \theta_1'(r')$$

$$\text{d'où } \log \left(\frac{r'}{r}\right)_\theta = \frac{2\pi\lambda L\theta}{\phi}$$

Pour chaque isotherme de température  $\theta$  on aura :

$$\left(\frac{r'}{r}\right)_\theta = e^{\frac{2\pi\lambda L\theta}{\phi}} = k_\theta = \text{cte}$$

Pour chaque  $\theta$  cette équation représente un cercle en coordonnées bipolaires  $(r, r')$ .

En coordonnées cartésiennes, un point P quelconque est défini par  $x$  et  $y$  tel que (Fig. 25) :

$$r^2 = x^2 + (a - y)^2 \quad \text{et} \quad r'^2 = x^2 + (a + y)^2 \quad \text{d'où}$$

$$\left(\frac{r'}{r}\right)^2 = \frac{x^2 + (a + y)^2}{x^2 + (a - y)^2} = k_\theta^2 = \text{cte} \quad \text{qu'on peut écrire } f(x, y) = 0$$

C'est une équation du second degré qui représente des cercles car il n'y a pas de termes en  $x.y$ , ces cercles sont symétriques par rapport à l'axe  $y$  car si on change  $x$  en  $-x$  la relation ne change pas.

Les coordonnées  $x_0, y_0$  des centres de ces cercles sont la solution de  $f(x) = 0$  pour l'abscisse et  $f'(y) = 0$  pour l'ordonnée, par conséquent on aura :

$$f'(x) = (1 - k_\theta^2).2x = 0 \text{ qui donne } x_0 = 0$$

$$f'(y) = 2(1 - k_\theta^2)(a + y) + 4a.k_\theta^2 = 0 \text{ qui donne } y_0 = \frac{k_\theta^2 + 1}{k_\theta^2 - 1} a \quad (2)$$

On trouve sans difficulté que le rayon  $R$  des cercles ( $R = x$  pour  $y = y_0$ ) est

$$R = \frac{2k_\theta}{k_\theta^2 - 1} a \quad (3)$$

.../...

$$\text{On vérifie d'après (2) et (3) que } R^2 = y_0^2 - a^2, \text{ donc } R = \sqrt{y_0^2 - a^2} \quad (4)$$

La double famille de cercles est donc définie par :

$$\text{- Les centres d'abscisse } x_0 = 0 \text{ et d'ordonnées } y_0 = \frac{k_\theta^2 + 1}{k_\theta^2 - 1} a > a \text{ car } k_\theta^2 > 1$$

$$\text{- Les rayons correspondant } R = \frac{2.k_\theta}{k_\theta^2 - 1} a = \sqrt{y_0^2 - a^2} < y_0 \text{ car } a^2 > 0$$

Donc aucun cercle ne peut couper le plan médian.

Chaque champ, ou famille de cercles, est caractérisé par  $a$  d'une part et par  $\lambda$  et  $\phi$  qui entrent en commun dans tous les rapports  $\frac{r'}{r} = k_\theta$  d'autre part ; chaque cercle est ensuite caractérisé par une température  $\theta$  (qui commande chaque facteur  $k_\theta$  donc chaque  $y_0, R$ ).

Pour  $a, \lambda$  et  $\phi$  fixe,  $\theta$  varie donc  $k_\theta$  et  $y_0$  varie (à partir de  $a$ ) en même temps que  $R$ .

Pour  $k_\theta = \infty, y_0 = a$  et  $R = 0$  le cercle s'identifie à la source ou au puits. Quand  $k_\theta$  diminue,  $y_0$  et  $R$  augmentent, donc les centres  $\Omega$  et  $\Omega'$  s'éloignent du plan médian et le rayon  $R$  grandit.

Quand  $k_\theta = 1, y = \infty$  et  $R = \infty$  le cercle limite semble indéterminé, mais  $k_\theta = 1$  signifie  $\frac{r'}{r} = 1$  donc  $r' = r$ . C'est donc le plan médiateur qui correspond à  $\theta = 0$

On a une autre famille de cercles symétrique de l'autre côté du plan médiateur, pour  $\frac{r'}{r} < 1$  et  $\theta < 0$  les isothermes symétriques correspondent au même paramètre  $\theta$  mais changé de signe.

### 3 - DISTRIBUTION DE LA TEMPERATURE AUTOUR D'UN CHENAL SOUTERRAIN

Supposons que le chenal soit suffisamment profond pour que la surface du sol puisse être considérée comme isotherme, soit  $0$  sa température, soit  $R$  son rayon dont le centre est situé à  $h$  de la surface du sol, soit  $\theta_0$  la température du chenal (Fig. 26). Si parmi les champs définis dans le paragraphe 2.1 qui conviennent par leur isotherme  $\theta = 0$ , il en est un dont le cercle  $y_0 = h, R = R_0$  peut respecter  $\theta = \theta_0$  alors ce champ s'identifie au champ autour du chenal, qui dès lors se trouve entièrement défini.

On aura la distance  $a$  d'une des sources fictives au plan du sol par la relation (4), c'est-à-dire :

.../...

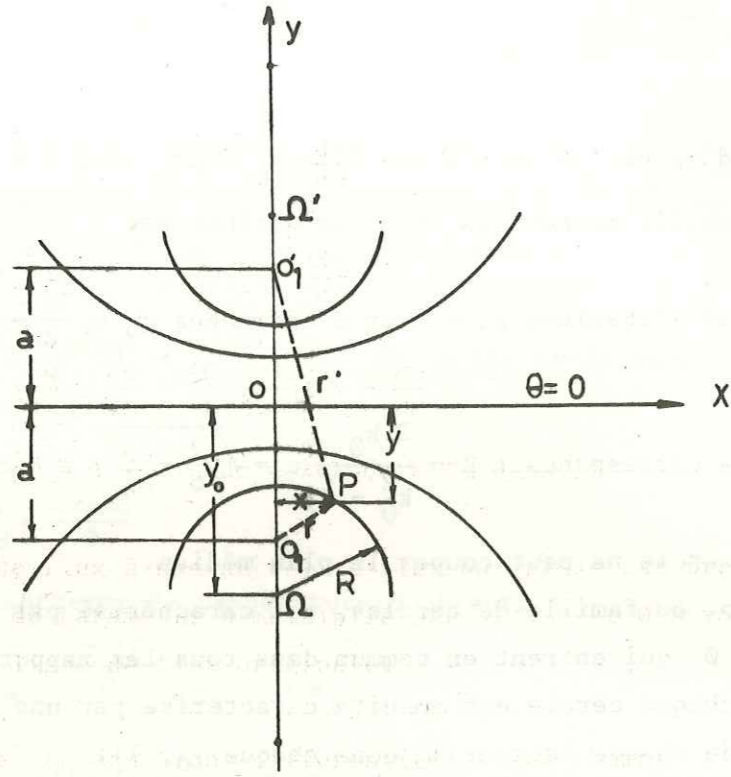


Fig. 25

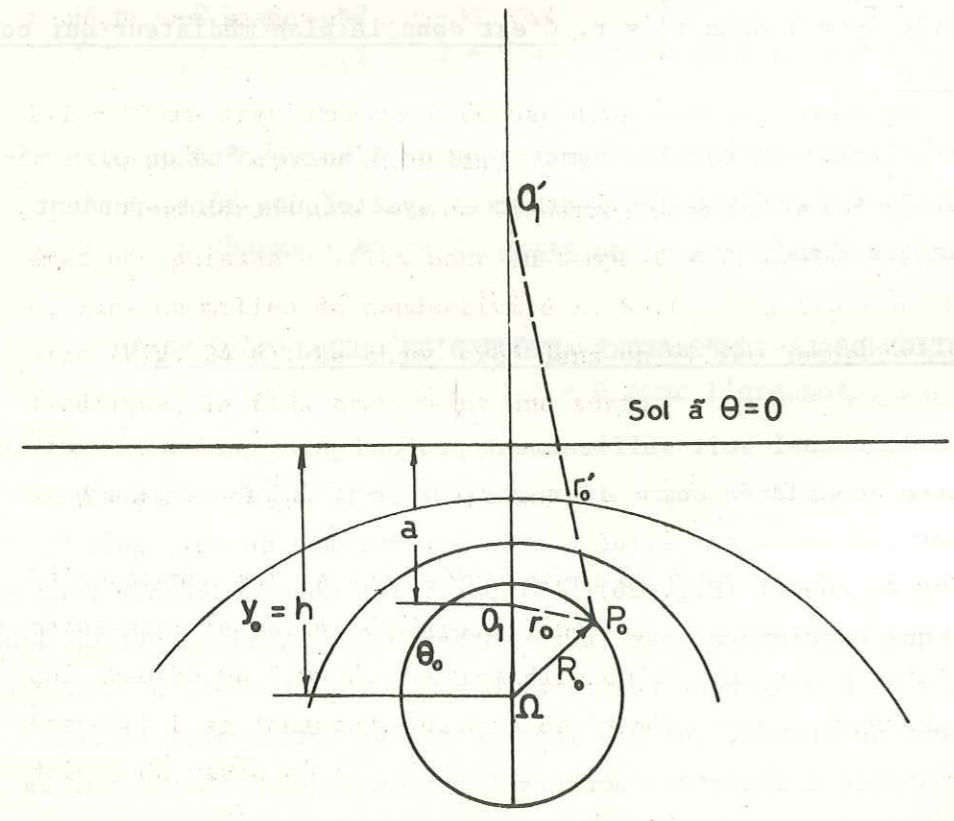


Fig. 26

$$a^2 = y_0^2 - R^2 = h^2 - R^2$$

$$\text{donc } a = \sqrt{h^2 - R^2} < h$$

et son  $k_{\theta_0}$  lié à  $\phi_{(\theta_0)}$  par la relation (2), on a

$$\frac{k_{\theta_0}^2 + 1}{k_{\theta_0}^2 - 1} = \frac{y_0}{a} = \frac{h}{a}$$

soit  $k_{\theta_0}^2 + 1 = \frac{h}{a} (k_{\theta_0}^2 - 1)$  d'où :

$$k_{\theta_0} = \pm \sqrt{\frac{h/a + 1}{h/a - 1}} = e^{\frac{2\pi L \theta_0 \lambda}{\phi_1}}$$

ce qui fixe  $\phi_{(\theta_0)}$ , seul convient le signe + car  $e^x$  toujours  $>> 0$  on aura :

$$\phi_1 = \frac{2\pi L \theta \lambda}{\log \sqrt{\frac{h/a + 1}{h/a - 1}}} \quad (5)$$

Donc le  $a$  et le  $\phi_1$  du champ sont entièrement définis sous réserve que le  $k_{\theta}$  soit réel et  $> 0$  ce qui est toujours vérifié puisque :

$$a = \sqrt{h^2 - R^2} < h \text{ et donc } \frac{h}{a} - 1 > 0$$

On peut donc calculer les cercles des isothermes pour tous les  $\theta$  et vérifier que  $\theta = 0$  pour le cercle limite avec  $k_{\theta} = 1$ .

Les cercles situés à l'intérieur du tube n'ont pas de valeur réelle (et d'ailleurs ils correspondent à des  $\theta > \theta_0$ ).

Pour calculer la distribution de la température dans le sol on peut procéder de la façon suivante :

$$\text{On a } \frac{r'}{r} = \sqrt{\frac{x^2 + (a+y)^2}{x^2 + (a-y)^2}} = e^{\frac{2\pi L \theta \lambda}{\phi}}$$

$$\text{d'où } \log \sqrt{\frac{x^2 + (a+y)^2}{x^2 + (a-y)^2}} = \frac{2\pi L \theta \lambda}{\phi}$$

En calculant  $\phi$  on aura :

$$\phi = \frac{2\pi L \Theta \lambda}{\log \sqrt{\frac{x^2 + (a+y)^2}{x^2 + (a-y)^2}}} \quad (6)$$

En comparant les deux formules (5) et (6) on trouve :

$$\log \sqrt{\frac{h/a + 1}{h/a - 1}} = \frac{2\pi L \Theta \lambda}{\log \sqrt{\frac{x^2 + (a+y)^2}{x^2 + (a-y)^2}}}$$

d'où

$$\Theta = \frac{\Theta_0}{\log \sqrt{\frac{h/a + 1}{h/a - 1}}} \log \sqrt{\frac{x^2 + (\sqrt{h^2 - R_0^2} + y)^2}{x^2 + (\sqrt{h^2 - R_0^2} - y)^2}}$$

où

$$\Theta = \frac{\Theta_0}{\log \frac{h+a}{h-a}} \log \frac{x^2 + (a+y)^2}{x^2 + (a-y)^2} \quad (7)$$

#### 4 - INTERPRETATION DES RESULTATS THERMIQUES

Au point de vue interprétation qualitative, la carte des isothermes et les coupes thermiques nous donnent une image d'existence et de localisation des circulations d'eau souterraines, mais le plus important est l'interprétation quantitative, c'est-à-dire l'estimation des profondeurs et si possible du diamètre des chenaux souterrains. Nous allons étudier et montrer le mode d'interprétation quantitative en cas d'existence d'un chenal cylindrique.

La formule (7) nous donne la distribution de la température autour d'un chenal sous le sol où nous avons trois paramètres à connaître, ce sont :

$\Theta_0$  la température de l'eau du chenal,

$h$  la profondeur du centre du chenal avec la relation  $r^2 = h^2 - a^2$

$r$  le rayon du chenal avec la relation  $r^2 = h^2 - a^2$ .

Dans les opérations suivantes, nous prenons les hypothèses ci-dessous :

. la température du sous-sol est la conséquence uniquement de la conduction, nous négligeons la convection,

.../...

. la forme du chenal est cylindrique, infiniment longue, avec un rayon  $r$ ,  
 . la température de la surface de la terre est homogène et pour faciliter le calcul on lui donne la valeur de 0.

Avec ces hypothèses on aura :

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = 0$$

où  $z = 0$  (en surface de la terre)  $\Theta = 0$  et sur le chenal dont l'équation est  $r = (h - z)^2 - x^2$  on aura  $\Theta = \Theta_0$

$\Theta_0$  est la température de l'eau du chenal

Pratiquement  $\Theta_0$  est la différence de la température de la surface de la terre et celle du chenal.

D'après la formule (7) on a trois paramètres  $r$ ,  $h$  et  $\Theta_0$  à déterminer, mais par la mesure de la température en sous sol, nous ne pouvons pas déterminer en même temps ces trois paramètres ; si l'on connaît l'une de ces trois valeurs, on peut déterminer les deux autres.

Dans nos travaux sur les glissements de terrain, la température  $\Theta_0$  de la source (l'eau du chenal) sera supposée égale à celle des sources qui existent autour du glissement. Dans ce cas, nous pouvons calculer les deux autres paramètres  $h$  et  $r$  par les opérations suivantes :  
 En mesurant la température du sous sol à 1 m de profondeur, la formule (7) devient :

$$\Theta = \frac{\Theta_0}{\log \frac{h+a}{h-a}} \log \frac{(a+1)^2 + x^2}{(a-1)^2 + x^2}$$

C'est une fonction de  $h$  et  $a$ , rappelons  $a^2 = h^2 - r^2$

Pour différentes valeurs de  $a$ , nous avons tracé les courbes de variations de  $\Theta(x)$ .

Au point d'inflexion, nous avons :

$$\left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}\right)_x = x_i = 0$$

$x_i$  est l'abscisse du point d'inflexion.

Si on groupe la deuxième dérivée de l'équation (7) par rapport à  $a$  on aura :

.../...

$$a^4 - 2a^2(1 + x_i)^2 - 2x_i^2 - 3x_i^4 + 1 = 0$$

Dans le cas  $a > 0$  et  $|x_i| \gg 1$  on a  $a = \sqrt{3} x_i$  (8)

C'est-à-dire nous déterminons le point d'inflexion des courbes, avec la formule (8) on calcule facilement la valeur  $a$ , mais la figure 27 montre que la détermination de ces points d'inflexions est assez difficile et imprécise.

Pour cela nous avons utilisé la méthode proposée par Y. KUZA YUHARI qui permet de déterminer avec plus de précision la valeur  $x_i$ , selon les opérations suivantes. Au point  $x = 0$ , l'équation (7) se réduit à :

$$\theta_{x=0} = \frac{\theta_0}{\log \frac{h+a}{h-a}} \log \frac{(a+1)^2}{(a-1)^2} \quad (9)$$

et au point  $x = x_i$  on a :

$$\theta_{x=x_i} = \frac{\theta_0}{\log \frac{h+a}{h-a}} \log \frac{(a+1)^2 + x_i^2}{(a-1)^2 + x_i^2} \quad (10)$$

En tenant compte de l'équation (8), si l'on divise l'équation (10) par l'équation (9), on aura :

$$\frac{\theta_{x=x_i}}{\theta_{x=0}} = \frac{\log \frac{(a+1)^2 + x_i^2}{(a-1)^2 + x_i^2}}{\log \frac{(a+1)^2}{(a-1)^2}} = \frac{\log \frac{(a+1)^2 + a^{2/3}}{(a-1)^2 + a^{2/3}}}{\log \frac{(a+1)}{(a-1)}} \quad (11)$$

On peut écrire l'équation (11) sous la forme suivante :

$$\frac{\theta_{x=x_i}}{\theta_{x=0}} = \frac{\log \frac{1 + 2a + 4a^{2/3}}{1 - 2a + 4a^{2/3}}}{2 \log \frac{1 + 1/a}{1 - 1/a}} = \frac{\log \frac{1 + \frac{2a}{1 + 4/3 a^2}}{1 - \frac{2a}{1 + 4/3 a^2}}}{2 \log \frac{1 + 1/a}{1 - 1/a}}$$

Comme  $a \gg 1$  on peut utiliser les équivalents du 1er ordre et on obtient :

$$\frac{\theta_{x=x_i}}{\theta_{x=0}} = 3/4 \text{ ou } \theta_{x=x_i} = 3/4 \theta_{x=0} \quad (12)$$

.../...

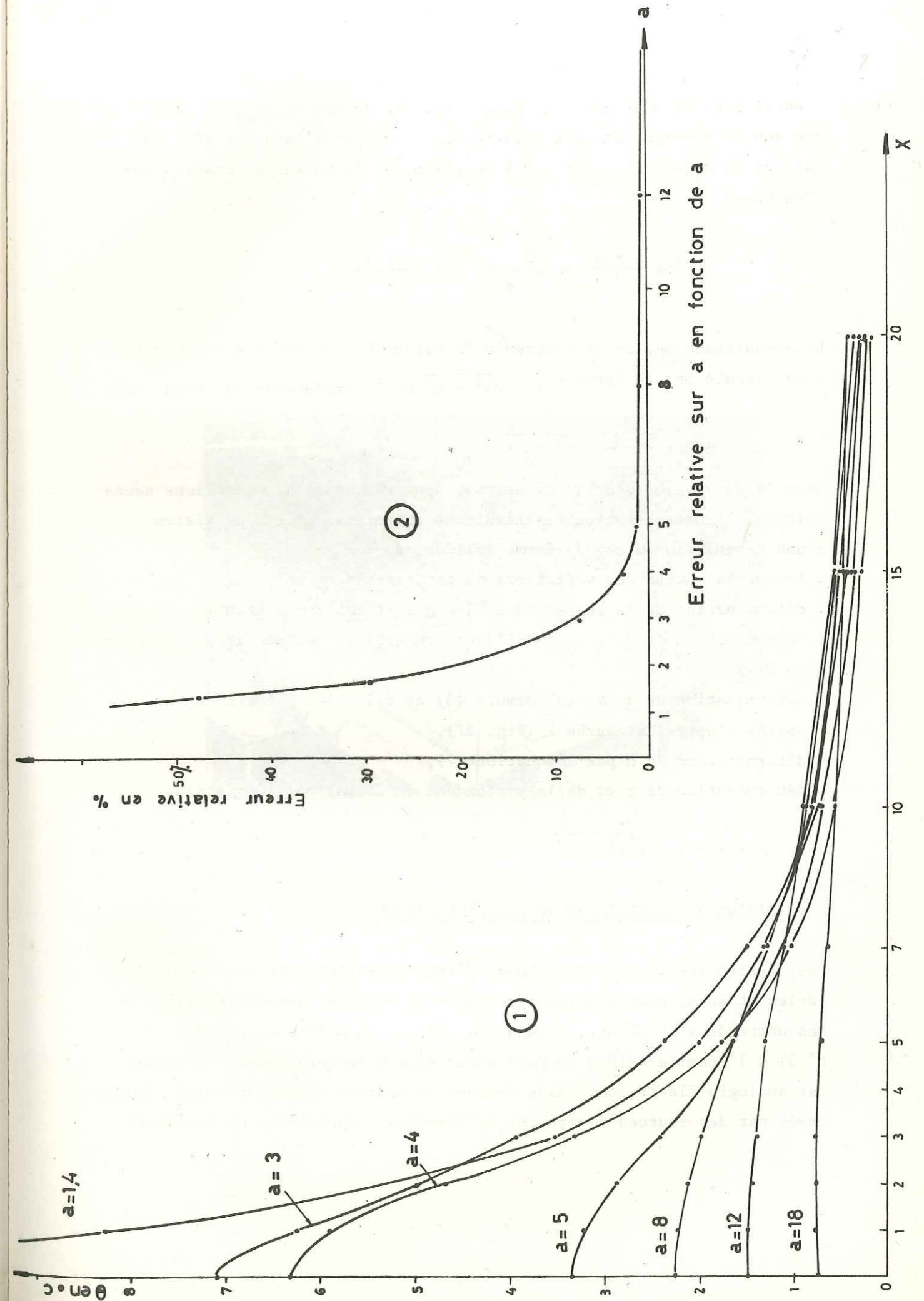


Fig. 27 - Variation de  $\theta(x)$  pour différentes valeurs de  $a$  (formule 7)

C'est-à-dire si nous obtenons  $\theta_{x=0}$  par une courbe de  $\theta_{y=1}(x)$  mesurée sur le terrain, on peut déduire  $\theta_x$  et par l'équation (12) on obtient la valeur  $x_i$ , puis par l'équation (8) la valeur  $a$ . Ensuite par l'équation :

$$\log \frac{h+a}{h-a} = \frac{\theta_0}{\theta_{x=0}} \log \frac{(a+1)^2}{(a-1)^2}$$

En connaissant  $\theta_0$ , on peut obtenir la valeur  $h$  ; le rayon  $r$  du chenal sera calculé par la formule  $r = \sqrt{h^2 - a^2}$  et la profondeur du chenal sera :

$$h - r = r - \sqrt{h^2 - a^2}$$

Avec la discussion décrite ci-dessus, nous résumons les opérations nécessaires à l'interprétation des résultats thermiques en cas d'existence d'une circulation d'eau de forme cylindrique :

- . tracer la courbe des variations de température du sol,
- . détermination de la température  $\theta_x = 0$  soit maximum ou minimum,
- . détermination de  $\theta_x = x_i$  par l'équation (12) et obtenir  $x_i$  par la courbe  $\theta(x)$
- . détermination de  $a$  par la formule (8) et faire les corrections nécessaires d'après la courbe 2 (Fig. 27),
- . détermination de  $h$  par l'équation (7),
- . détermination de  $r$  et de la profondeur du chenal par l'équation

$$h - r = r - \sqrt{h^2 - a^2}$$

5 - TRAVAUX SUR MODELE PAR ANALOGIE ELECTRIQUE

Pour mettre en évidence la méthode d'interprétation dont nous venons de parler et aussi pour étudier les formes de chenaux souterrains qu'on rencontre dans la nature, nous avons utilisé un modèle électrique (photo n° 3) à l'échelle 1/1000 et nous avons étudié les problèmes thermiques par analogie électrique ; nous donnons ci-dessous les formules des champs créés par des sources électrique et thermique ponctuelles et linéaires.

.../...

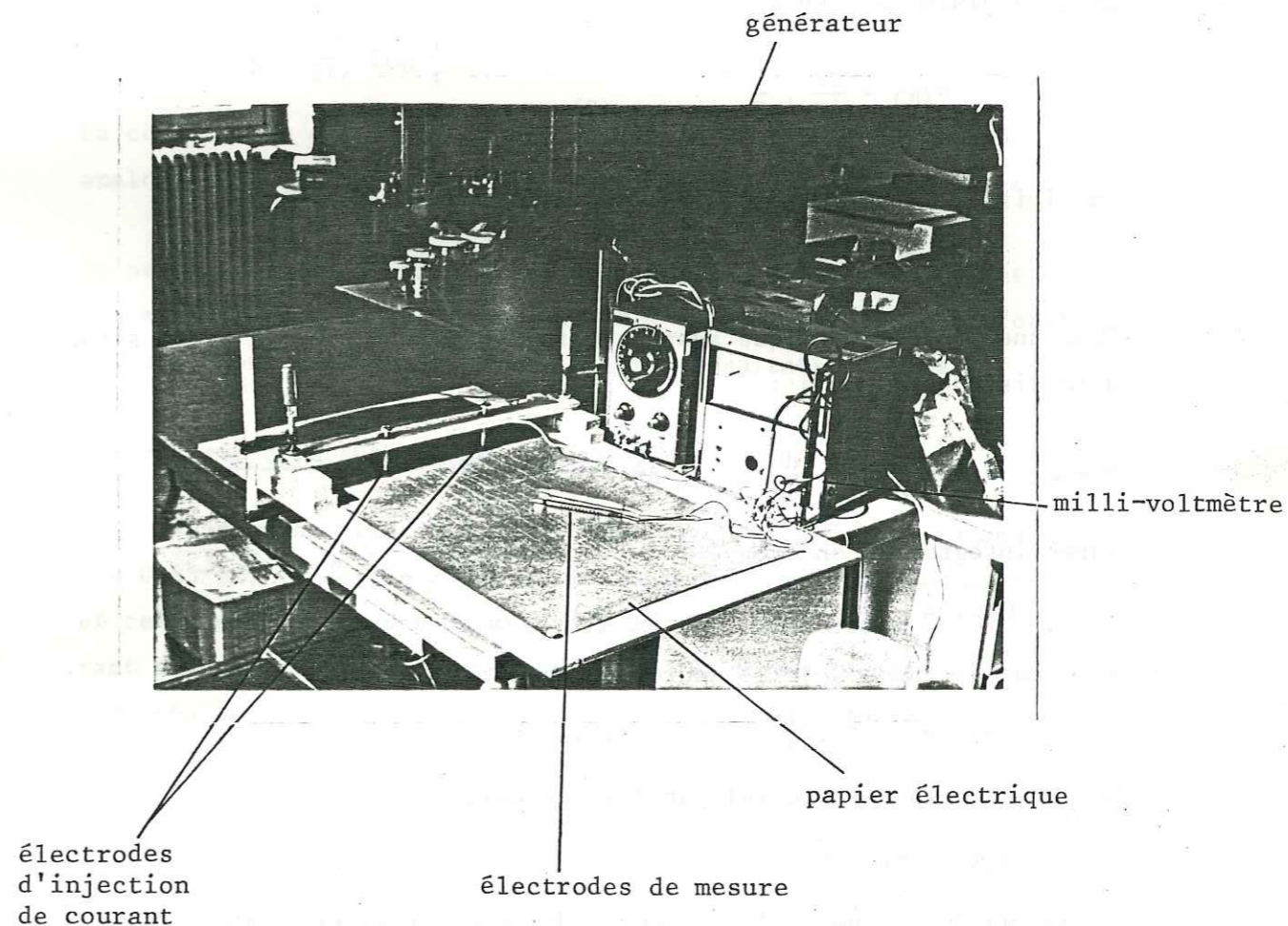


Photo n° 3 - Modèle électrique

Pour une source ponctuelle, le potentiel électrique à une distance r sera :

$$dv = - \rho \frac{I}{s} \cdot dr \quad \text{pour une sphère est } 4\pi r^2 \quad \text{donc } dv = - \rho \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{dr}{r^2}$$

Après intégration, on aura :

$$v(r) = \frac{\rho I}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (1)$$

et à la distance R on a :

$$v(R) = \frac{\rho I}{4\pi} \cdot \frac{1}{R} \quad (2)$$

En divisant la formule (1) par (2), on trouve :

$$v(R) = v(r) \cdot \frac{r}{R} \quad (3)$$

Pour une source thermique ayant une température  $\theta$  pour un point situé à la distance r, on a :

$$\phi = \varphi \cdot s = - \lambda (4\pi r^2) \frac{d\theta}{dr} \quad \text{or } d\theta = - \frac{\lambda \phi}{4\pi} \frac{dr}{r^2}$$

Après intégration on trouve :

$$\theta(r) = - \frac{\lambda \phi}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (4)$$

et à une distance R de la source on aura :

$$\theta(R) = - \frac{\lambda \phi}{4\pi} \cdot \frac{1}{R} \quad (5)$$

En divisant la formule (4) par (5), on aura :

$$\theta(R) = \theta(r) \frac{r}{R}$$

ce qui donne la même relation que pour le champ électrique.

Pour une source électrique linéaire, le potentiel dans un point P situé à la distance r sera déterminé par :

$$dv(r) = - \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{dr}{r} \quad \text{pour unité de longueur}$$

ou  $v(r) = - \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \log r + C$

La constante est la valeur que prend  $v(r)$  pour  $\log r = 0$  donc  $r = 1$ . Soit maintenant une autre source également linéaire mais avec signe (-) pour le point P qui a une distance r' de cette source on peut écrire :

.../...

$$v(r') = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \log r - C$$

Le potentiel à un point P sera :

$v_p = v(r) + v(r')$  on aura donc :

$$v_p = \frac{\rho I}{2\pi} \log \frac{r'}{r}$$

Pour un champ thermique dans le cas de deux sources linéaires (source et puits) l'étude que nous avons effectuée conduit à la formule suivante :

$$\theta_p = \frac{\phi}{2\pi\lambda} \log \frac{r'}{r}$$

La comparaison des formules électrique et thermique montre que I est analogue à  $\phi$  et  $\lambda$  avec  $\rho = \frac{1}{R}$  c'est-à-dire avec la conductivité électrique.

En pratique, nous avons utilisé un papier de basse résistivité et nous avons étudié les champs créés autour d'un cylindre et de différentes plaques. Nous expliquons ci-dessous les résultats obtenus :

### 5.1 - Champ créé autour d'un cylindre

Nous avons pris deux électrodes circulaires ayant chacune un rayon  $r = 0,85$  cm, la distance des deux électrodes est choisie égale à 20 cm et celle des électrodes de mesure 1 cm, le champ est créé par un courant alternatif de basse fréquence (200 Hz). Les résultats de mesure sont reportés sur la Fig. 28.

Nous avons interprété cette courbe par la méthode de YUHARA et nous avons trouvé le rayon des électrodes.

Par ailleurs, théoriquement, pour un chenal ayant  $r = 0,85$  cm et  $h = 10$  cm, nous avons calculé le champ thermique, les résultats sont reportés sur la Fig. 28 et nous les avons comparés avec ceux des champs électriques, on trouve une petite différence, négligeable, entre les deux, ce qui confirme la méthode d'interprétation proposée.

.../...

### 5.2 - Champ créé autour de différentes plaques

On a étudié le champ créé autour de plaques, pour cela on a pris trois types de plaques comme électrodes d'envoi de courant. Ces plaques ont différentes dimensions (15.0,5 - 10.0,5 - 5.0,5 cm). Les distances des électrodes d'envoi de courant (plaque) ont été choisies à 5, 10, 15 et 20 cm pour chaque essai.

Les résultats des mesures sont présentés sous la forme de courbes numérotées de 1 à 12 (Fig. 29, 30, 31, 32, 33 et 34) et sur chaque courbe on a noté la différence de potentiel  $V_p$  entre les deux plaques et celle d'entre deux points situés au voisinage immédiat de chacune des plaques.

D'après les résultats obtenus et en comparaison des différents éléments, on a tiré les conclusions suivantes :

- . Les paliers des courbes dépendent de la longueur des profils. Le palier correspondant à  $0,9 \text{ max}$  représente la longueur de plaque.
- . On a considéré que les plaques sont constituées de plusieurs cylindres de même diamètre. On a interprété les extrémités des anomalies observées en considérant qu'elles sont dues aux électrodes de forme cylindrique. Naturellement on a trouvé une profondeur assez faible, car sur les flancs et le point maximum considéré il y a une influence des autres cylindres. On a exprimé cette méthode d'interprétation pour différents couples de plaques présentant différents écartements.

En comparant les écartements obtenus par le calcul et les écartements comme à priori, on fait apparaître un coefficient de correspondance :  $k = 1,2$ . Donc pour avoir une estimation pratique de la profondeur des anomalies présentant un palier (c'est-à-dire correspondant à une circulation d'eau en forme de plaque), il suffit d'interpréter l'extrémité des anomalies en considérant qu'elle correspond à une conduite de forme cylindrique et de multiplier la profondeur calculée par le coefficient  $k = 1,2$ .

.../...

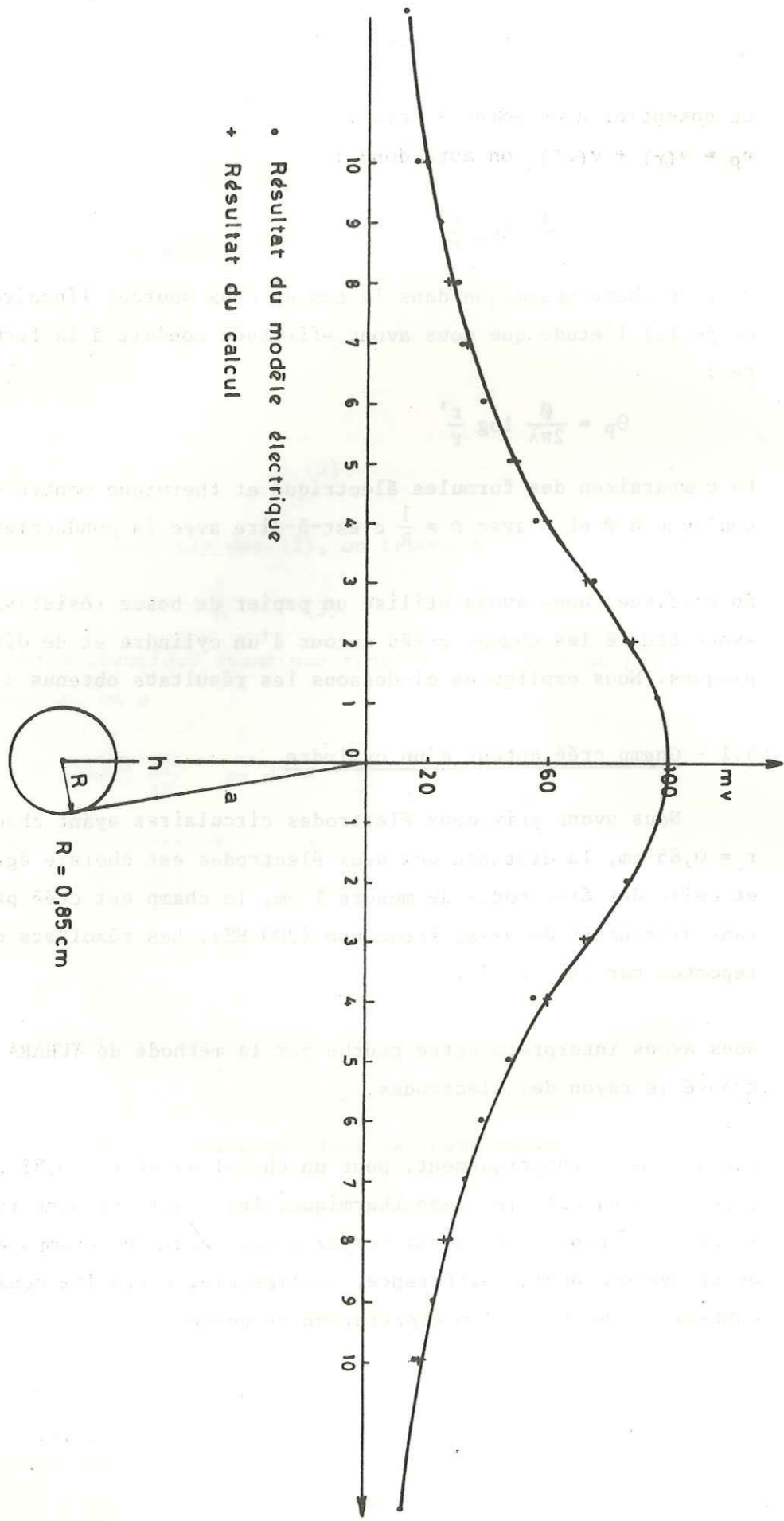


Fig. 28 - Champ électrique créé autour d'un cylindre

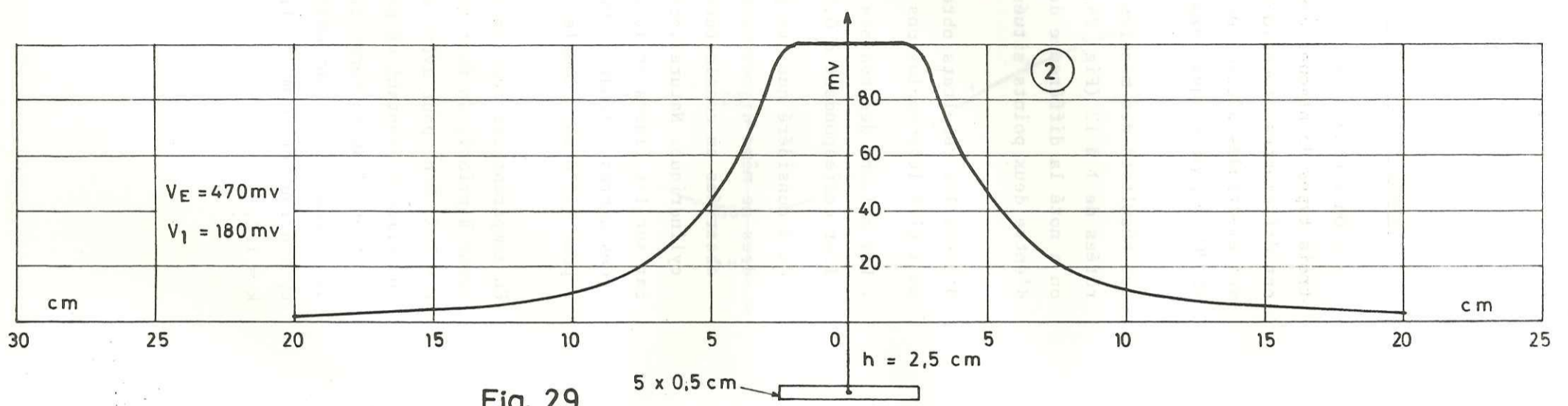
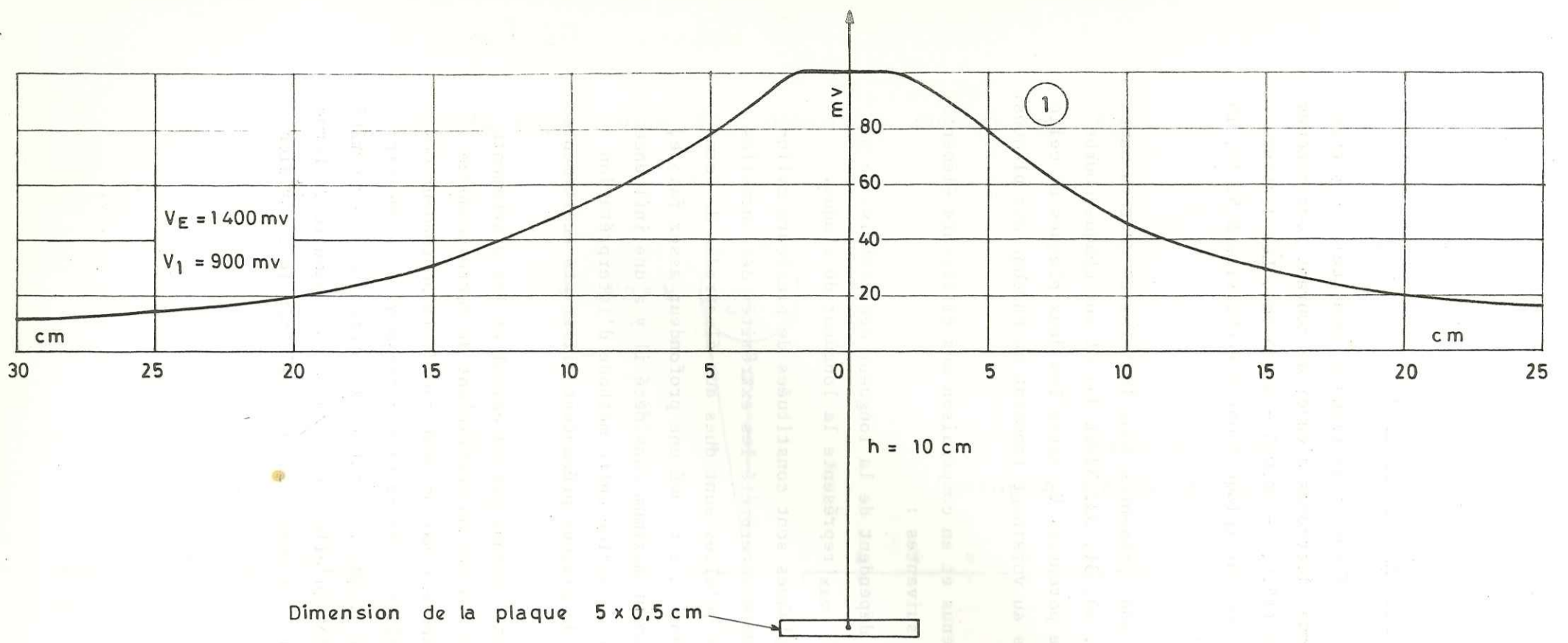


Fig. 29

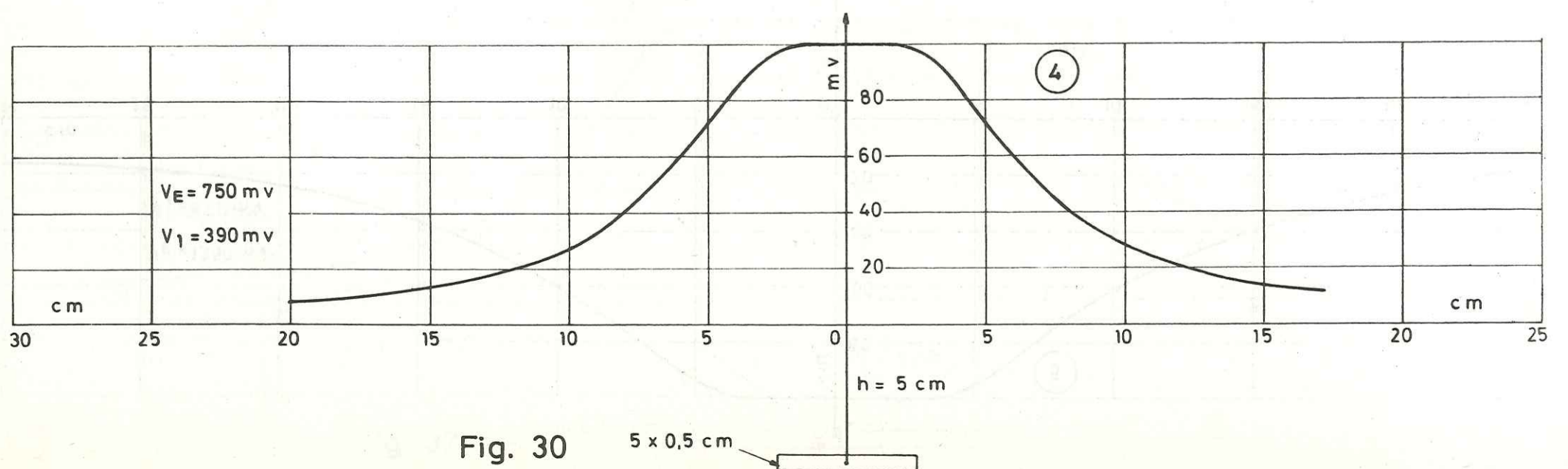
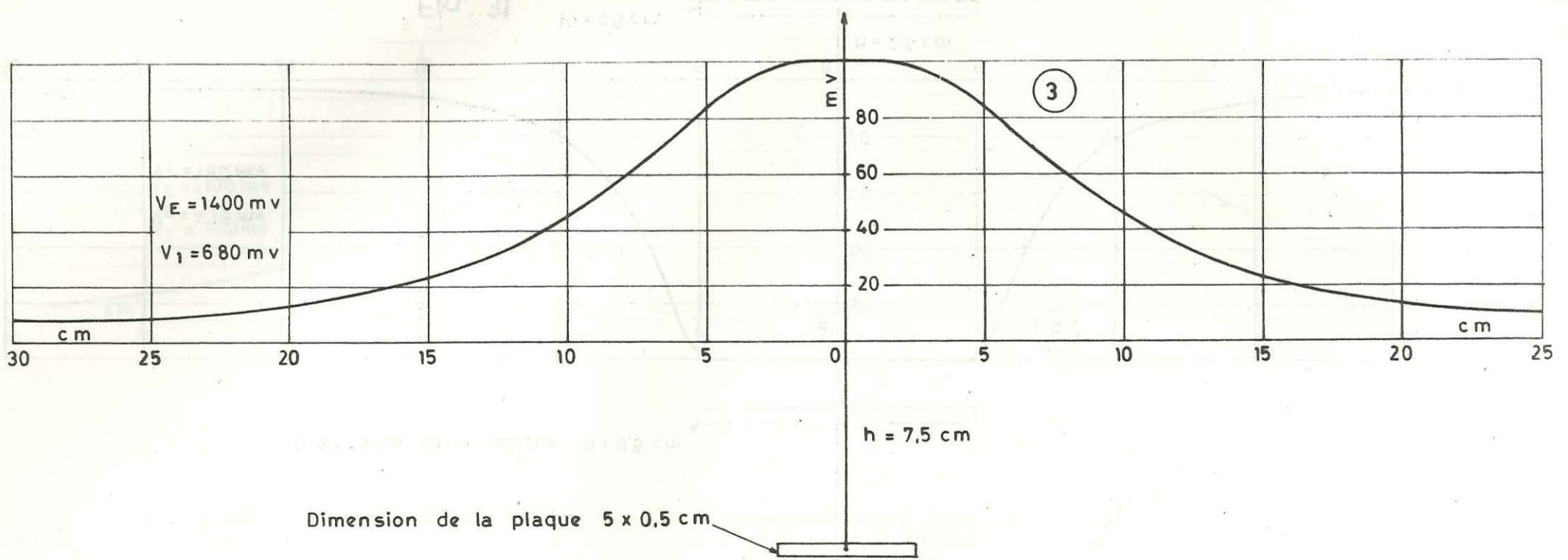


Fig. 30



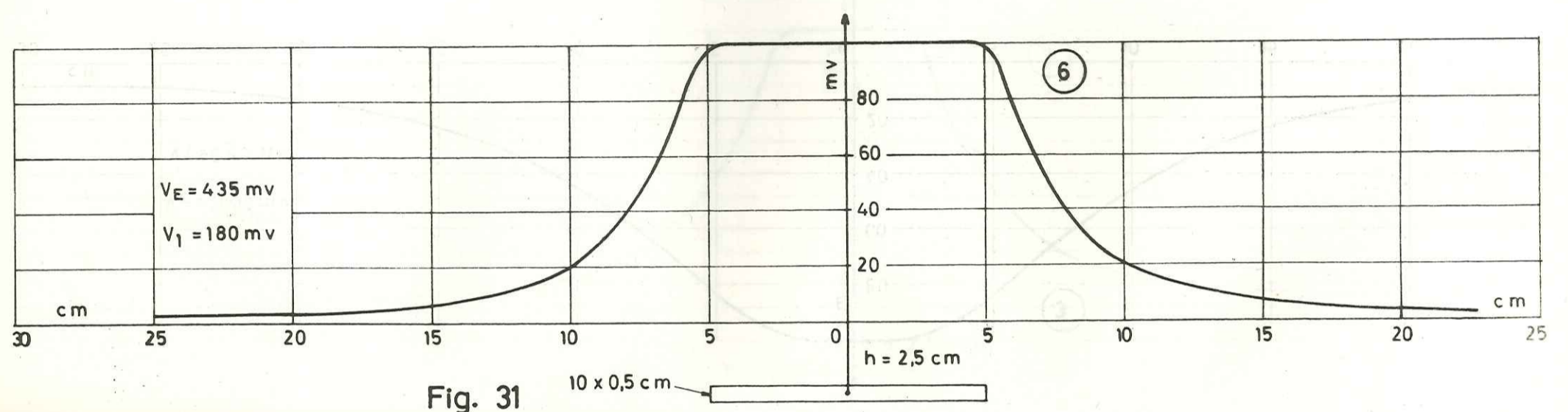
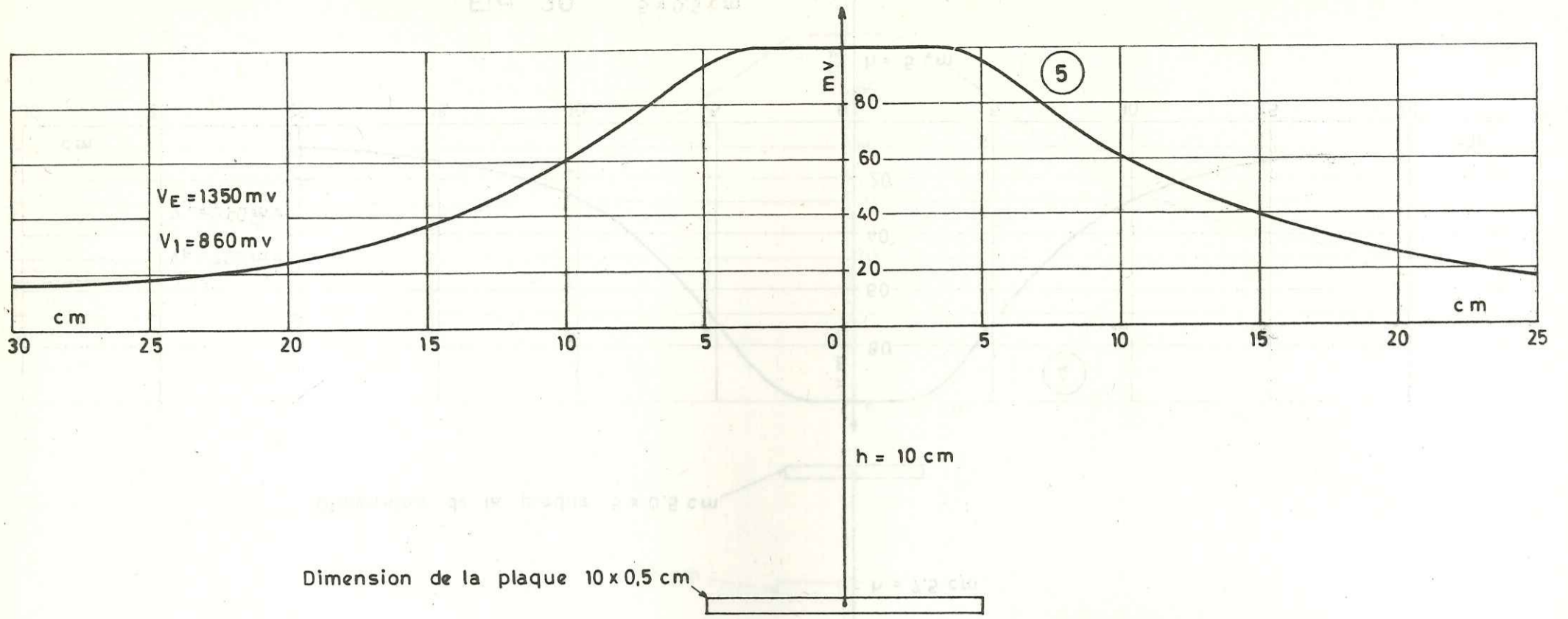


Fig. 31

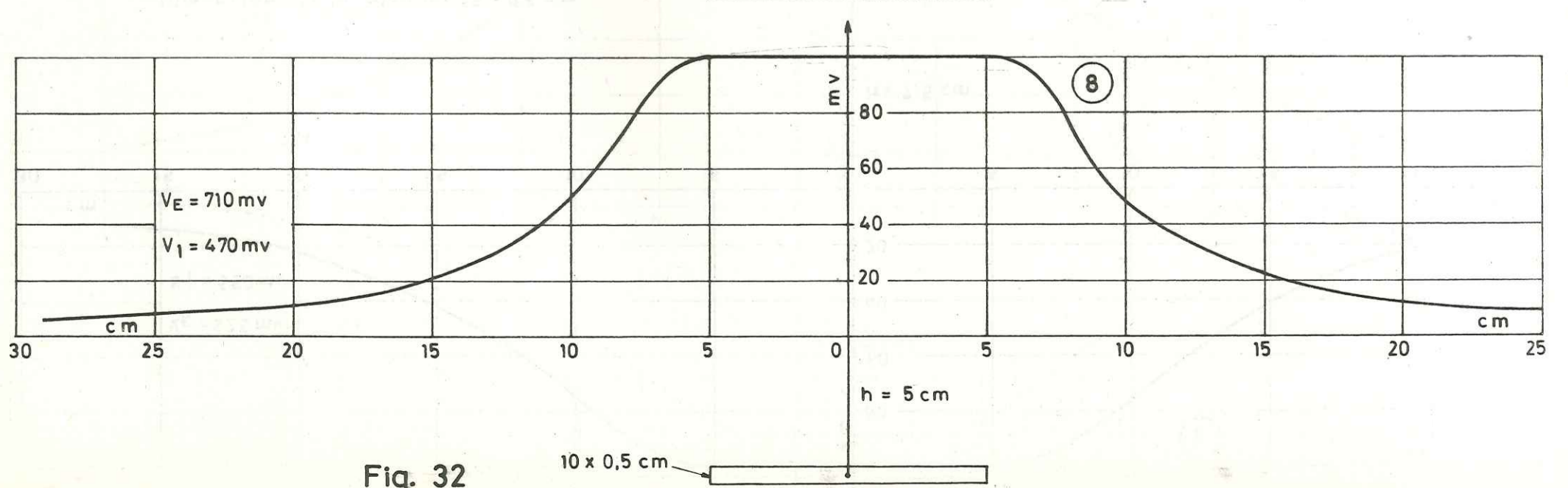
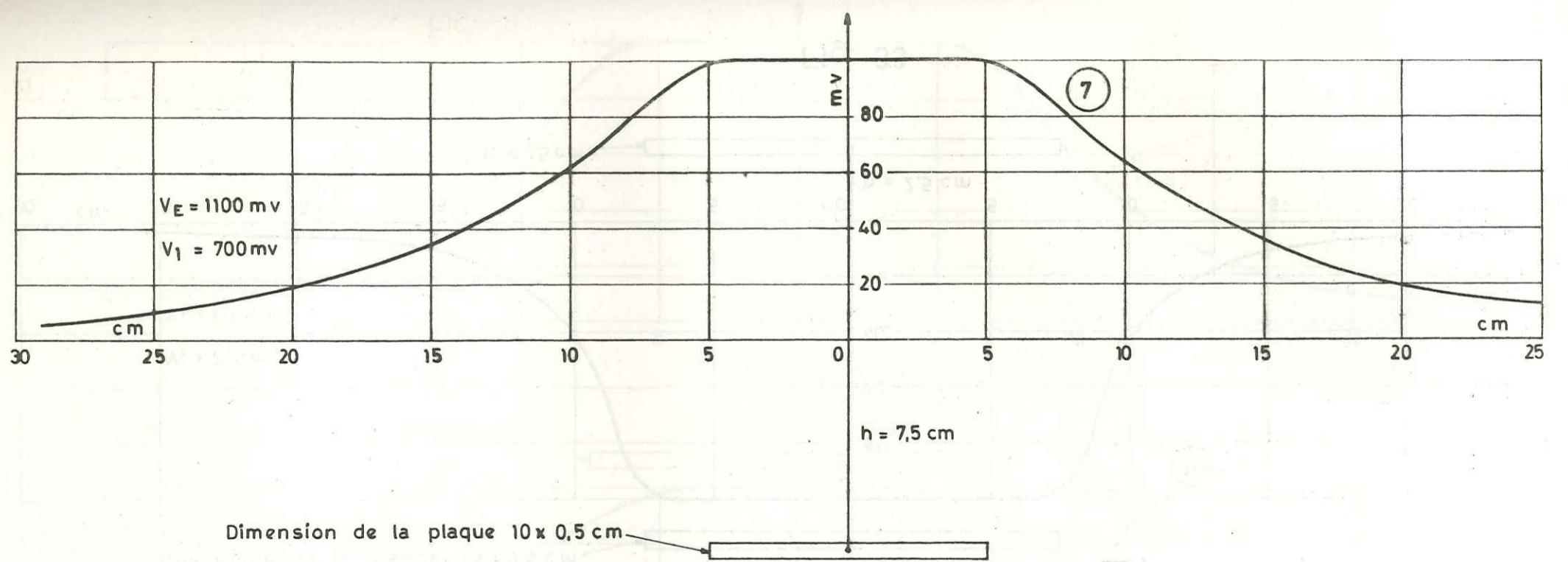


Fig. 32

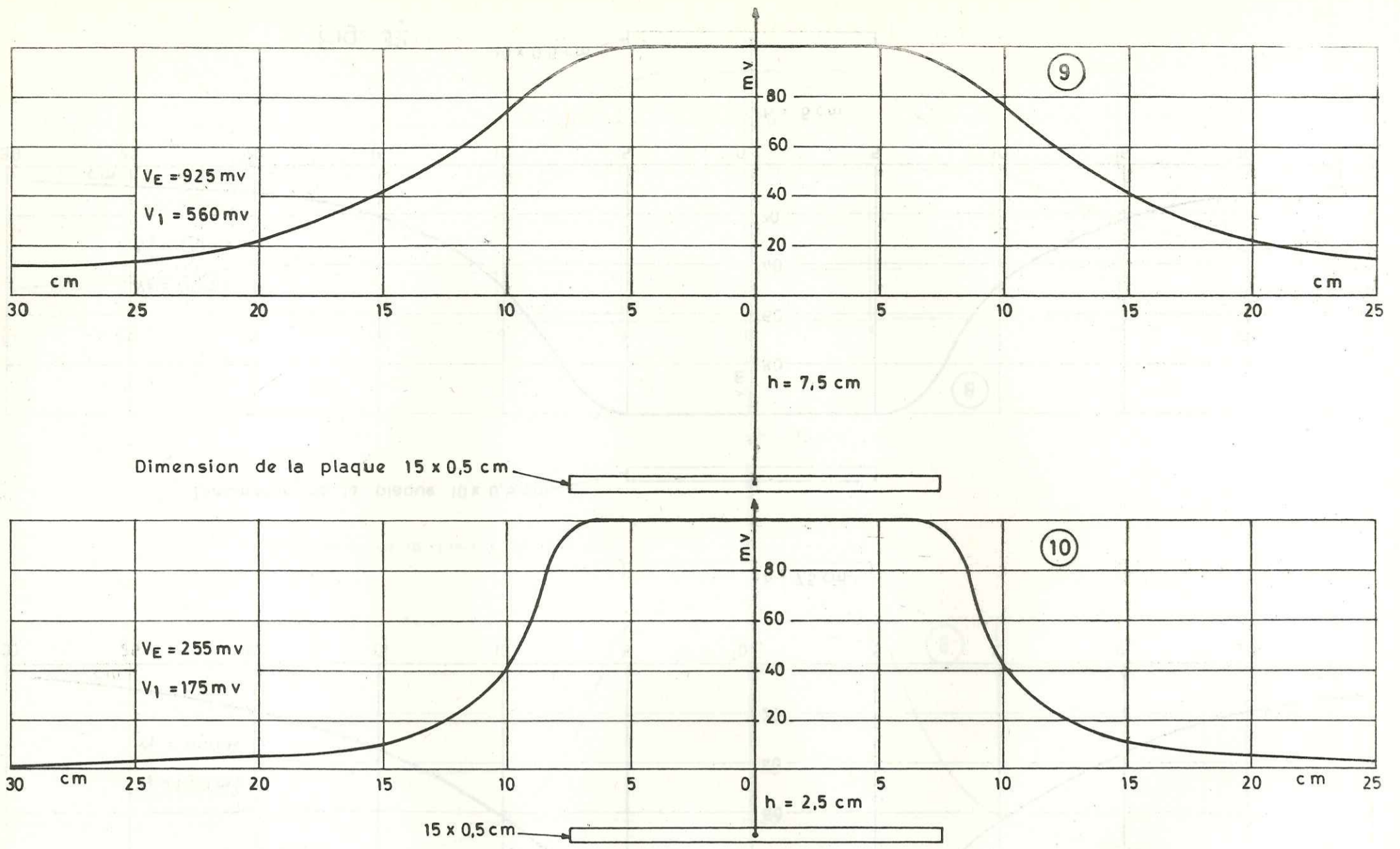


Fig. 33

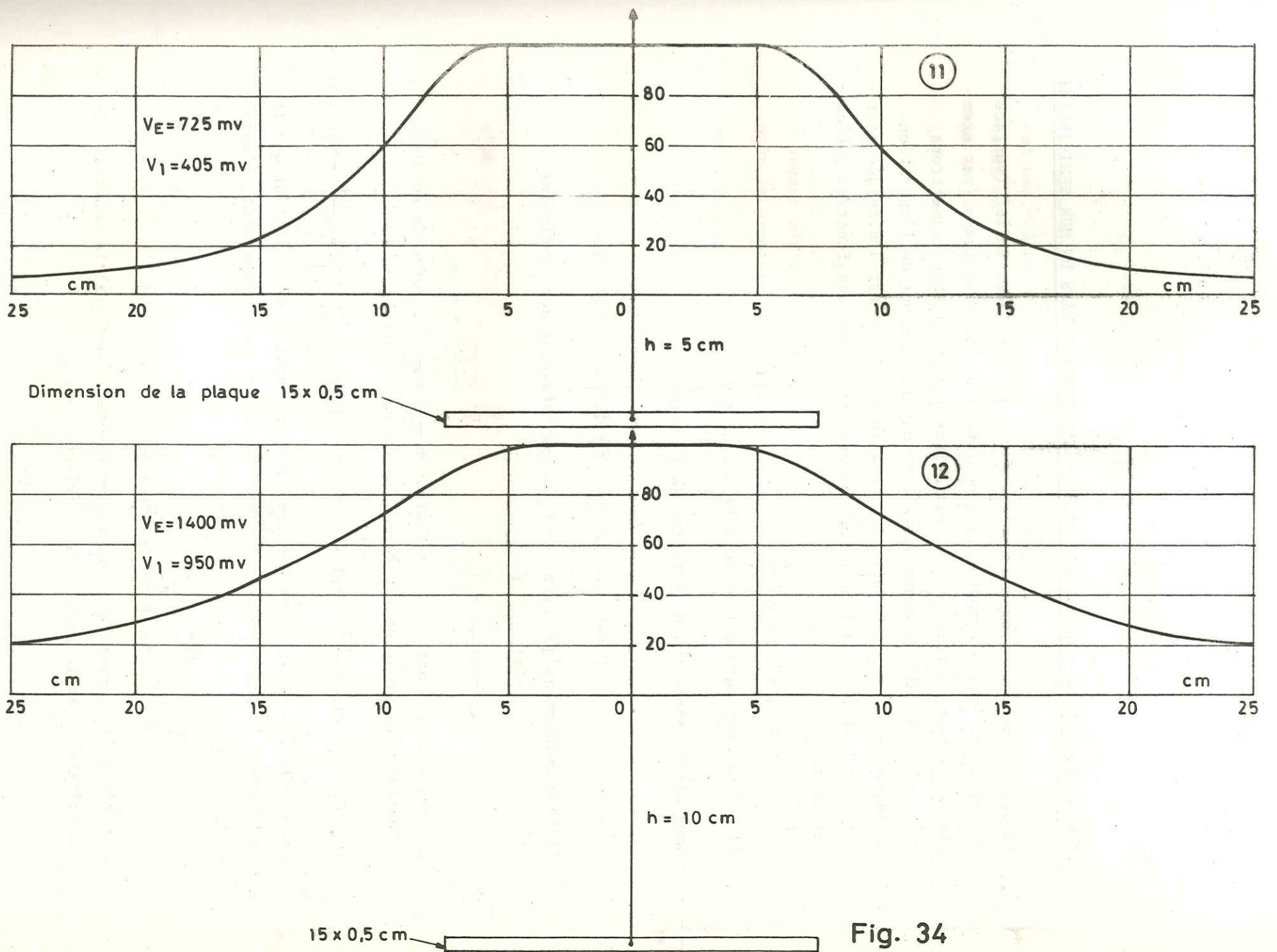


Fig. 34

ANNEXE

PROPAGATION D'UNE ONDE SINUSOÏDALE DE TEMPERATURE DANS UN MUR SEMI-INFINI

Supposons que l'on impose à la face z = 0 d'un mur semi-infini (surface du sol), une loi de température fonction sinusoïdale du temps (par exemple la chaleur fournie par les radiations solaires). Nous admettrons qu'il s'est écoulé un temps assez long depuis le début de l'opération de façon que l'on ait affaire à un régime établi, c'est-à-dire que pour chaque valeur de z la température se présente comme une fonction périodique du temps.

Soit \theta(z = 0, t) = A\_1 \sin \frac{2\pi t}{T\_1} (1)

la loi de température imposée à la face z = 0

Nous allons chercher une solution de la forme

\theta(z, t) = A\_1 f\_1(z) \sin \left[ 2\pi \frac{t}{T\_1} - \varphi\_1(z) \right] (2)

Il faut évidemment que f\_1(z) et \varphi\_1(z) satisfassent aux conditions

f\_1(z)\_{z=0} = 1

\varphi\_1(z)\_{z=0} = 0

Portons dans l'équation de la chaleur m \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\partial \theta}{\partial t} la forme de solution (2) on obtient, en groupant les termes en sinus et cosinus :

(f\_1'' - f\_1 \varphi\_1'^2) \sin \left( \frac{2\pi t}{T\_1} - \varphi\_1 \right) + \left[ 2f\_1' \varphi\_1' + f\_1 \varphi\_1'' + \frac{2\pi}{mT\_1} f\_1 \right] \cos \left( \frac{2\pi t}{T\_1} - \varphi\_1 \right) = 0

Cette relation devant être vérifiée quel que soit z et t, il faut que le coefficient du sinus et celui du cosinus soient nuls séparément, c'est-à-dire :

f\_1'' - f\_1 \varphi\_1'^2 = 0
2f\_1' \cdot \varphi\_1' + f\_1 \cdot \varphi\_1'' + \frac{2\pi}{mT\_1} f\_1 = 0 (3)

Pour résoudre ce mystère, nous allons essayer pour \varphi\_1(z) la fonction linéaire \varphi\_1(z) = a\_1 z le système (3) devient alors :

.../...

f\_1''(z) = a\_1^2 f\_1(z)

a\_1 f(z) = - \frac{\pi}{mT\_1} \cdot f\_1(z)

Ces deux équations sont compatibles, ce qui prouve que la forme \varphi\_1 = a z est une solution possible. Nous admettrons sans démonstration que c'est celle qui correspond au régime obtenu après une période transitoire plus ou moins longue, lorsque l'on impose une loi sinusoïdale de température sur la face d'un mur initialement à la température uniforme zéro.

Chacune des deux équations (4) a une solution de la forme :

f(z) = e^{\alpha z}

\alpha devant vérifier

pour la première relation \alpha^2 = a\_1^2 (5)

pour la deuxième relation a\_1 \alpha = - \frac{\pi}{mT\_1} (6)

De (5) on tire \alpha = \pm a\_1

mais comme a\_1 doit être réel, la relation (6) impose que l'on prenne \alpha = - a\_1, l'équation (6) s'écrit alors :

a\_1^2 = \frac{\pi}{mT\_1}

d'où

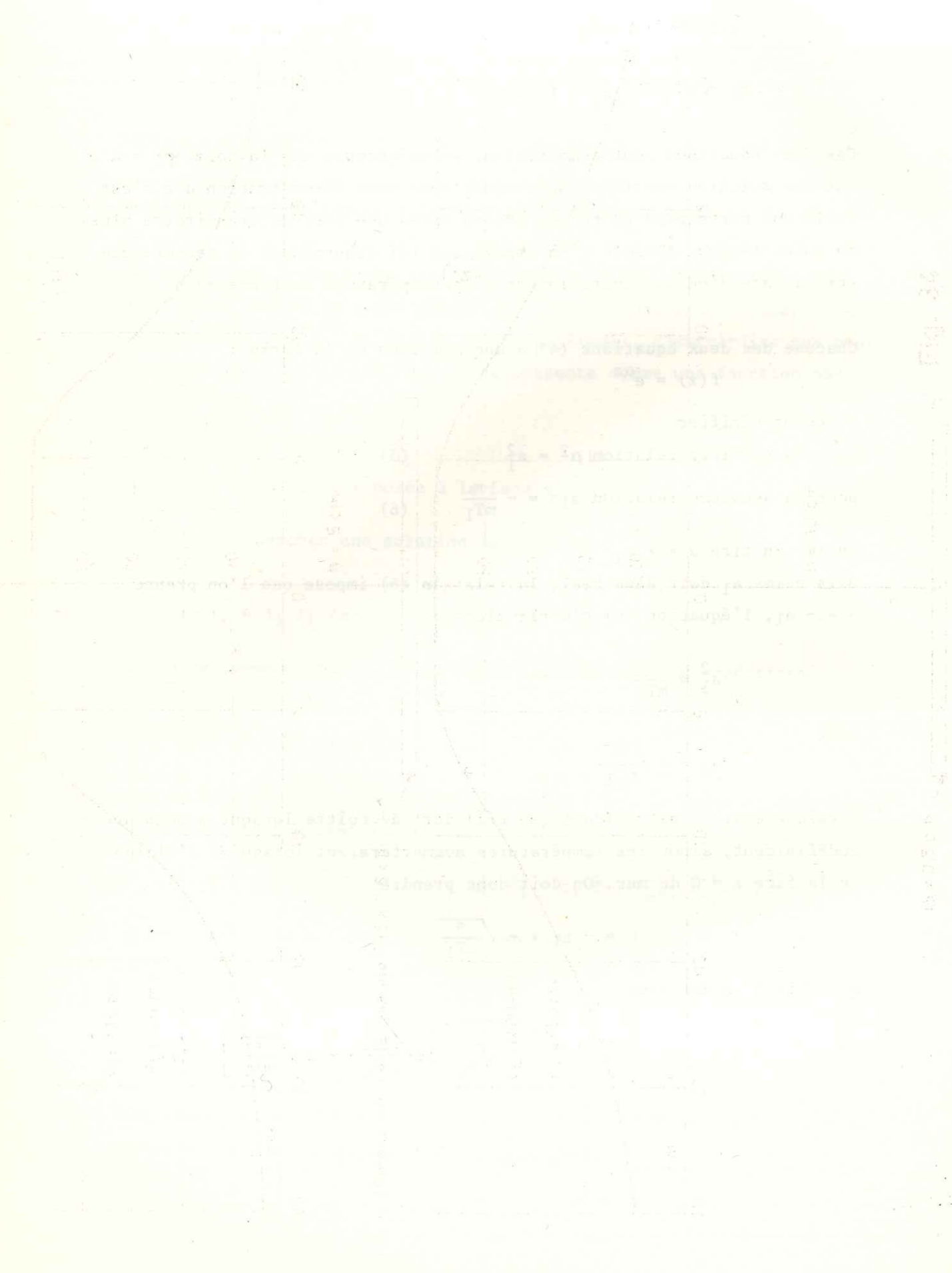
a\_1 = \pm \sqrt{\frac{\pi}{mT\_1}}

Physiquement, il est évident que f(z) doit décroître lorsque z augmente indéfiniment, sinon les températures augmenteraient lorsqu'on s'éloigne de la face z = 0 du mur. On doit donc prendre

\alpha = - a\_1 = - \sqrt{\frac{\pi}{mT\_1}}

On obtient en définitive :

\theta = A\_1 e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{mT\_1}}} \sin \left[ \frac{2\pi t}{T\_1} - z \sqrt{\frac{\pi}{mT\_1}} \right] (7)



DEUXIEME PARTIE

EXEMPLES D'APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

E X E M P L E I

INTRODUCTION

- 1 - RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES
- 2 - OBSERVATIONS GEOLOGIQUES GENERALES
- 3 - LIMITES DU GLISSEMENT EN SURFACE
- 4 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE
  - 4.1 - Sources et suintements
  - 4.2 - Application sur le terrain et résultats obtenus
  - 4.3 - Interprétation qualitative
  - 4.4 - Interprétation quantitative
- 5 - POSITION DU SUBSTRATUM D'APRES LES METHODES SISMIQUE ET ELECTRIQUE
- 6 - RESULTATS DE LA METHODE SISMIQUE
- 7 - RESULTATS DE LA METHODE ELECTRIQUE
- 8 - NATURE DES TERRAINS DE COUVERTURE
- 9 - CONCLUSIONS

## INTRODUCTION

Cette étude a été effectuée dans le but d'analyser les causes d'instabilité des talus et des pentes naturelles au voisinage d'un chemin départemental au cours des travaux d'élargissement.

Les terrassements ont commencé le 16 Octobre 1974 aux profils 2, 3 et 4. Les premiers mouvements ont été observés le 25 Octobre 1974 aux profils 5 et 6. Le 18 Novembre 1974, un poteau E.D.F. situé sur la zone en mouvement, a dû être déplacé. Enfin, entre le 18 et le 25 Novembre 1974, des fissures sont apparues plus haut dans la pente, de même que dans les murs d'une maison. Devant l'amplitude des mouvements du 25 Novembre 1974 et l'importance des circulations d'eau sur le terrain, il a été préconisé de capter les eaux d'une source située à la cote 1180, d'abord à l'aide de tuyaux d'incendie, puis à l'aide de tuyaux en plastique souple.

Après ces premières propositions d'actions d'urgence pour enrayer les mouvements, l'étude a consisté en une reconnaissance géologique et hydrogéologique. En effet, nous avons cherché à définir le plus précisément possible :

- . la position et la nature du substratum,
- . les limites en surface et en profondeur des terrains en mouvement,
- . les particularités de l'alimentation en eau des terrains en mouvement,
- . les caractéristiques géotechniques des terrains en mouvement.

Pour obtenir les renseignements ci-dessus, nous avons exécuté des reconnaissances géophysiques et des observations de terrain, des essais d'identification et des calculs de stabilité. Nous ne rentrons pas ici dans le détail des essais et calculs de stabilité ; nous nous bornons à décrire les méthodes géophysiques utilisées et à montrer leur intérêt pratique.

### 1 - RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES

Pour mettre en évidence les axes de circulation d'eau sous les glissements, la position et la nature du substratum du glissement, nous avons utilisé les méthodes géophysiques suivantes :

- . la méthode thermique (4 profils représentant 92 points de mesure de température),
- . la méthode électrique (92 sondages électriques AB<sub>max</sub> = 15 m et 16 sondages AB<sub>max</sub> = 78 m),
- . la méthode sismique (13 profils de 50 m de long).

Avant d'étudier les résultats géophysiques, nous donnons quelques renseignements sur la géologie générale, les limites du glissement et l'hydrogéologie de la zone glissée.

### 2 - OBSERVATIONS GEOLOGIQUES GENERALES

Il existe très peu d'affleurements dans la zone étudiée. Néanmoins, le substratum est constitué de (Fig. 35) :

- . calcaires sublithographiques durs, à allure de brèche parfois, du jurassique supérieur. Ils forment l'ossature du versant RD de la vallée. Ils affleurent vers 1280 m ;
- . ces calcaires sont normalement surmontés de calcaires marneux gris-jaunâtres, sur 30 m environ (Berriasien),
- . puis vient une épaisse série de marnes gris-jaunâtre et de calcaires marneux (valanginien). Ces calcaires et marnes affleurent dans le lit de la rivière.

D'autres affleurements de marnes et calcaires marneux existent (Fig. 35) :

- . en contrebas du glissement (c), au bord de la route, on observe des marnes sableuses ocre jaune et des calcaires marneux. Cet affleurement, vraisemblablement en place, présente un pendage N 140-20 W. Les marnes s'altèrent en argiles ;
- . en bordure RG du glissement ancien, à la cote 1150, on observe les mêmes marnes ;
- . on les observe enfin à la source (1180) située à la bordure supérieure du glissement ancien.

.../...

Par conséquent, le substratum sous le glissement est vraisemblablement formé de marnes surmontant les calcaires durs du jurassique supérieur. Ce substratum affleure en plusieurs points du pourtour de l'ancien glissement. Sa position exacte sous la surface sera déterminée par les reconnaissances géophysiques.

Les terrains de couverture sont formés :

- . soit d'éboulis contenant des blocs de calcaires massifs et de calcaires marneux dans une matrice argilo-graveleuse,
- . soit de terrains d'altération des marnes (éboulis à blocs de marnes dans une matrice plus argileuse).

### 3 - LIMITES DU GLISSEMENT EN SURFACE

On peut constater l'existence de plusieurs glissements emboîtés (Fig. 36) :

- . un glissement (a), le plus actif, déclenché le premier, qui s'étend sur 30 m de long, 20 m de large, autour du profil 6. Les matériaux de ce glissement sont très remaniés. Ses limites latérales sont très nettes ;
- . un glissement (b), qui s'est produit entre le 18 et le 25 Novembre 1974 à la suite du glissement (a) ; il est de forme approximativement carrée (50 m x 50 m). La niche d'arrachement de ce glissement, caractérisée par un rejet de 1 à 2 m, passe à 5 m de l'angle d'une maison (quelques fissures ont même été observées dans le terrain traversant de part en part la surface couverte par la maison. Ces fissures ne sont pas ouvertes). La maison s'est fissurée en plusieurs endroits et le trottoir bordant la façade a été nettement décalé vers l'aval (10 à 20 cm). Les matériaux de ce glissement semblent moins intensément remaniés que ceux du glissement (a). Les fissures les plus importantes sont les fissures latérales et la niche d'arrachement. Enfin, les fissures latérales ne semblent pas s'étendre à la plate-forme de la route actuelle et à celle déjà réalisée au cours des travaux de rectification ;
- . un glissement annexe (c), situé en bordure RD du glissement (b). Ce glissement est peu profond car on observe qu'à cet endroit le substratum (marnes sableuses et calcaires marneux) est à 1 ou 2 m sous la surface topographique.

.../...

Remarquons enfin que les photographies aériennes permettent de mettre en évidence un ancien glissement dont les limites sont approximativement (Fig. 35) :

- . en RG la crête séparant la zone glissée du talweg situé plus à l'amont,
- . en RD la limite actuelle du glissement (b) en RD,
- . sur le front (partie inférieure) le lit de la rivière,
- . en limite supérieure, la cote 1200.

Certaines maisons sont bâties sur les matériaux restant de ce glissement. Jusqu'à présent, aucun autre mouvement actif autre que ceux mentionnés ci-dessus n'a été repéré. Les mouvements semblent donc bien circonscrits.

#### 4 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

##### 4.1 - Sources et suintements

Les principales sources sont les suivantes et sont représentées sur la Fig. 36 :

- . La source de la cote 1180, en tête de l'ancien glissement. Elle se trouve à un contact marnes/éboulis à blocs de calcaires. On observe des signes de mouvements (fissures) un peu à l'amont de cette source. Elle est captée directement depuis le 26 Novembre 1974 et canalisée par des tuyaux en plastique souple jusqu'au chemin communal où elle rejoint le caniveau existant.
- . Plusieurs sources entre les maisons situées à l'amont et à l'aval du chemin. Ces sources sont canalisées depuis Décembre 1974, dans une conduite en ciment en bordure du chemin communal.
- . Des traces temporaires de suintement immédiatement à l'amont de la maison fissurée,
- . Un certain nombre de suintements le long des talus de la route en cours d'exécution (profils 6-7, profil 9, profil 9-8).
- . La source du profil 6-7 correspond vraisemblablement à celle captée par la scierie et qui sort à côté de la maison (Fig. 36).
- . Une source située à la cote 1150 en bordure RG de l'ancien glissement est captée pour une maison d'habitation.

.../...

Ces sources ne sont que la manifestation superficielle de circulations d'eau dans les terrains de couverture. En effet, lorsqu'on a capté la source de la cote 1180, cela a très peu affecté le débit de plusieurs sources situées entre les maisons, sources pourtant en contrebas de la précédente. Les sources ont une température de l'ordre de 7,5°C.

##### 4.2 - Application sur le terrain et résultats obtenus

Pour déterminer les circulations d'eau sous ce glissement, on a appliqué cette méthode au mois de Décembre (phase froide). On a effectué 4 profils de mesure de la température du sol (3 profils sont implantés dans la zone glissée et 1 à proximité de la source situé à la cote 1180). Les longueurs et les directions des profils varient selon les observations hydrogéologiques, mais en général les directions sont parallèles aux lignes de niveau (Fig. 36)

Les sondages sont faits au moyen d'une tarière de 8 cm de diamètre ; on a mesuré la température du sol à 50 cm de profondeur au moyen d'une sonde à thermocouple ayant une précision de 0,1°C.

La zone étudiée est couverte uniformément de prairies et de ce fait on n'a eu aucune correction concernant la couverture du sol. La température de l'air était mesurée pendant la durée de travail, son amplitude est 5°C en prenant les chiffres suivants :

$$z = 50 \text{ cm} \quad T = 24 \text{ h} \quad A = 5^\circ\text{C} \quad m = 0,005 \text{ unité C.G.S.}$$

$$\text{on aura } \alpha = Ae^{-z} \sqrt{\frac{\pi}{mT}} = \frac{5}{71,08} = 0,07^\circ\text{C}$$

C'est-à-dire que la correction maximale des variations journalières est de 0,07°C, valeur pouvant être tenue pour négligeable.

Les résultats des mesures de la température du sol sont représentés sur les profils I à IV (Fig. 38, 39, 40 et 41), la carte des isothermes (Fig. 37) montre la distribution de la température dans la zone étudiée.

##### 4.3 - Interprétation qualitative

La carte de distribution de la température (Fig. 37) donne une image de l'existence des circulations d'eau sous la zone de glissement ; d'ailleurs, les anomalies de température correspondent très bien avec les

.../...



zones glissées et confirment le rôle important des écoulements d'eau pour les glissements. D'après les résultats des mesures de la température du sol sur le profil IV exécuté à la cote 1180, on observe plusieurs anomalies. Si toutes ces anomalies sont liées à des écoulements d'eau, on peut constater que l'alimentation du site se fait par plusieurs voies, la source située à la cote 1180 ne représentant qu'une de ces voies. De plus, comme les mesures de température ont été effectuées après captage de la source, l'anomalie située à son niveau indique qu'un écoulement souterrain a encore lieu, c'est-à-dire que le captage de la source n'a pas supprimé toutes les circulations d'eau en profondeur. Une autre preuve de ce fait est l'observation que les débits des autres sources de la région ont été peu ou pas affectées par ce captage.

4.4 - Interprétation quantitative

Du point de vue quantitatif, d'après ce qu'on a étudié dans le chapitre III, on a essayé d'interpréter les résultats obtenus en envisageant deux cas, c'est-à-dire des chenaux ayant une forme de cylindre ou une forme de plaque. On trouve ci-dessous l'interprétation quantitative qu'on a faite pour chacune des anomalies se trouvant sur les profils.

Dans tous les tableaux on trouve les symboles suivants :

- $\Delta\theta_{max}$  = anomalie mesurée sans tenir compte du fond thermique
- $x_i$  = abscisse du point d'inflexion des courbes d'anomalies
- $a$  =  $\sqrt{h^2 - r^2}$
- $h$  = profondeur du centre du chenal
- $r$  = rayon du chenal
- $h - r$  = profondeur du chenal de forme cylindrique
- $(h-r) K$  = profondeur du chenal en forme de plaque

Profil I

Dans ce profil on peut distinguer quatre anomalies (Fig. 38). En considérant les formes des anomalies et en tenant compte des résultats des méthodes sismique et de résistivité, les anomalies 1, 2 et 3 sont interprétées comme correspondant à un chenal en forme de plaque. L'anomalie 4 est interprétée comme correspondant à un chenal cylindrique. Le Tableau 27 montre les résultats de l'interprétation quantitative pour ce profil. Sur ce profil, on a déterminé le fond thermique (c'est-à-dire la valeur de la température à la profondeur de 50 cm pour laquelle l'influence des facteurs superficiels est homogène de même que l'influence des facteurs géologiques) de l'ordre de 1,25°C.

.../...

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	$a$ (m)	$h$ (m)	$r$ (m)	$h - r$ (m)	$(h - r) K$ (m)
1	0,3	2	3,45	3,45	0,1	3,35	3,35
2	0,7	1,2	2,40	2,40	0,14	2,26	2,7
3	0,25	2	3,45	3,45	très petit	3,45	4,14
4	0,9	1,40	2,45	2,46	0,30	2,25	2,25

Tableau 27 -

Profil II

Sur ce profil, on a distingué cinq anomalies (Fig. 39). Les anomalies 1, 2, 3 et 4 sont interprétées selon leur allure comme correspondant à une forme en plaque, l'anomalie 5 est interprétée comme due à un chenal cylindrique. Le Tableau 28 donne les résultats des calculs. D'après la coupe thermique, on a calculé le fond thermique et trouvé 1,65°C.

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	$a$ (m)	$h$ (m)	$r$ (m)	$h - r$ (m)	$(h - r) K$ (m)
1	0,85	1,0	2,22	2,22		2,22	2,67
2	0,75	2,0	3,70	3,80	0,90	2,90	3,48
3	0,90	1,6	2,95	3,00	0,64	2,36	2,75
4	0,85	1,8	3,30	3,40	0,84	2,56	3,0
5	1,10	1,3	2,55	2,62	0,62	2,00	2,0

Tableau 28

Profil III

Sur ce profil on peut distinguer 5 anomalies (Fig. 40). Elles sont interprétées comme la conséquence de chenaux cylindriques. Le Tableau 29 montre les résultats de cette interprétation (le fond thermique est de 1,65°C)

.../...

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	a (m)	h (m)	r (m)	(h - r) (m)	(h - r) K (m)
1	0,85	1,00	2,22	2,22	qq.cm	2,22	-
2	1,55	2,80	4,15	5,75	3,98	1,77	-
3	1,55	2,60	4,50	6,56	4,77	1,80	-
4	2,85	3,60	6,23	19,66	18,64	1,02	-
5	0,95	1,80	3,10	3,21	0,85	2,35	-

Tableau 29 -

Profil IV

Sur ce profil on a déterminé six anomalies (Fig. 41). L'anomalie 4 correspond à la source de la cote 1180. Le Tableau 30 montre les résultats de l'interprétation.

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	a (m)	h (m)	r (m)	h - r (m)	(h - r) K (m)
1	2,4	1,60	2,95	3,74	2,30	1,44	-
2	0,95	1,20	2,40	2,41	0,25	2,16	2,60
3	0,50	3,00	5,20	5,23	0,58	4,65	-
4	1,13	1,20	2,40	2,43	0,42	2,00	-
5	0,80	1,80	3,10	3,11	0,30	2,80	-
6	1,00	2,40	4,15	4,37	1,38	3,00	-

Tableau 30 -

D'après les résultats obtenus et à la suite d'autres observations, on a préconisé une tranchée drainante en amont du Profil III. Les observations faites à partir d'elle montrent qu'il existe des circulations d'eau en 7 points. Après comparaison des points de passage de l'eau et des anomalies déterminées sur ce profil, on constate qu'il existe entre eux une très nette correspondance (Fig. 37). Le Tableau 31 montre les profondeurs qu'on a calculé d'après les anomalies et celles des passages d'eau observés dans la tranchée ; on peut remarquer que la différence qui les sépare est de l'ordre de 20 %.

.../...

N° des anomalies	1	2	3	4	5
Profondeur calculée (en m)	2,35	1,77	1,80	1,02	2,35
Profondeur dans la tranchée (en m)	2,75	2,15	1,30	1,60	2,20

Tableau 31 -

En considérant que cette tranchée est faite trois mois après l'application de la méthode thermique et de plus qu'il y a un décalage entre le lieu de la tranchée et celui du profil III, ces résultats sont satisfaisants.

5 - POSITION DU SUBSTRATUM D'APRES LES METHODES SISMIQUE ET ELECTRIQUE

Le substratum marneux a été repéré par la méthode sismique et ensuite partiellement par la méthode électrique. L'emplacement des reconnaissances géophysiques est représenté à la Fig. 36 et les résultats sont résumés sur les 4 profils transversaux des figures 38, 39, 40 et 41. Sur ces profils, on n'a pas indiqué le relief, et la profondeur du substratum est comptée perpendiculairement à la surface du substratum.

Comme cette surface, dans la zone étudiée, est irrégulière, les profondeurs indiquées sur les Fig. 38, 39, 40 et 41 sont des profondeurs moyennes et ne tiennent pas compte des irrégularités secondaires de la surface du substratum.

6 - RESULTATS DE LA METHODE SISMIQUE

Profil I - Sondages SS<sub>1</sub>; SS<sub>2</sub>, SS<sub>3</sub>, SS<sub>7</sub>, SS<sub>8</sub>, SS<sub>9</sub>, SS<sub>10</sub> (Fig. 38)

A l'extrémité Sud de ce profil, le substratum est situé à 2,40-2,50 m de profondeur. La vitesse des ondes longitudinales V<sub>l</sub> dans cette partie est de l'ordre de 3400 m/s. Vers le point 10 (Fig. 36), on remarque une remontée du substratum vraisemblablement très altéré et qui se confond avec les terrains de couverture. La vitesse V<sub>l</sub> de ces formations 1600 m/s indique qu'elles sont parfaitement saturées. Le substratum compact se trouve vers 3 m de profondeur (V<sub>l</sub> = 3400 m/s).

.../...

Entre les points 14 et 23, le substratum forme un talweg rempli d'éboulis. La profondeur maximale de ce talweg entre les points 16 et 22, atteint 5 à 6 m. La vitesse des ondes longitudinales dans cette partie du substratum est nettement plus faible que dans la partie Sud ( $V_l = 2000$  m/s). Ceci peut être dû à un certain remaniement lié aux anciens mouvements de terrains. Pour une raison analogue, la vitesse des ondes longitudinales dans la couverture ( $V_l = 250-350$  m/s) est inférieure à celle dans la partie Sud du profil.

Profil II (Sondages SS4, SS5, SS6, SS7, SS8, SS9, SS10, SS11 (Fig. 39)

L'allure générale de la surface du substratum est semblable à celle du Profil I avec toutefois certaines différences :

- . dans la partie Sud, le substratum est plus profond (2,5 à 3 m) et les matériaux de couverture sont des éboulis qui ne sont pas parfaitement saturés (on analysera plus loin, à l'aide de données électriques, les variations de faciès des terrains de couverture). La vitesse  $V_l$  des ondes dans le substratum est 2800 m/s et dans les terrains de couverture elle est de 250 à 450 m/s ; les valeurs plus basses de vitesses étant caractéristiques des terrains fissurés ;
- . dans la partie Nord du profil, le talweg est plus étroit et son fond est à 5,50-5,80 m de profondeur, près du point 10.

Profil III (Sondages SS11, SS12, SS13 (Fig. 40)

Le substratum remonte vers l'extrémité Sud (Profondeur 1,50-2,50 m) et dans la partie Nord on distingue le talweg dont la profondeur maximale (vers le point 4) est 4 à 5,5 m environ. La vitesse  $V_l$  du substratum est de 2200 à 2400 m/s. Les terrains de couverture ( $V_l = 400-450$  m/s) sont formés d'éboulis.

7 - RESULTATS DE LA METHODE ELECTRIQUE

On a pu également mettre en évidence la position du substratum par les sondages électriques à faible profondeur ( $AB_{max} = 15$  m). La distance entre les centres de ces sondages est 5 m. On a effectué 30 sondages sur le Profil I, 28 sondages sur le Profil II, 15 sondages sur le Profil III et 29 sur le Profil IV.

.../...

On a complété ces sondages par 16 sondages AB = 78 m (SE1 à SE16) (Fig. 42). D'après les résultats de ces mesures, on peut définir les résistivités caractéristiques suivantes pour les différents terrains rencontrés sur la zone de glissement.

Terrain	Résistivité ( $\Omega.m$ )
Eboulis à gros blocs Matrice peu importante	200 - 500
Eboulis avec blocs. Faible teneur en argile	150 - 300
Eboulis avec forte teneur en argile	50 - 150
Sol essentiellement argileux	30 - 40
Substratum marneux	50 - 100

Par conséquent, on peut déterminer la position du substratum par la prospection électrique lorsque la teneur en argile des formations superficielles n'est pas trop importante, de manière à avoir un bon contraste de résistivité. En effet, aux Profils I et II, dans leur partie Nord, là où les terrains de couverture sont composés d'éboulis à faible teneur en argile ( $\rho = 100 \Omega.m$ ), on obtient une position de surface du substratum qui est en accord avec les données sismiques. Sur le Profil III, on peut suivre assez bien le substratum par les sondages électriques.

Sur le Profil IV (exécuté vers la cote 1150 en contrebas de la source principale), les résistivités n'indiquent pas la présence de substratum marneux à 5 m de profondeur et le substratum n'apparaît sur les sondages SE15 et SE16 qu'à 9-10 m de profondeur. Ceci montre que l'exécution d'une tranchée, même profonde de 5 à 6 m au-dessus du chemin départemental, ne serait pas d'une grande utilité pour éliminer les alimentations en eau du site du glissement.

8 - NATURE DES TERRAINS DE COUVERTURE

On peut différencier les terrains de couverture d'après les caractéristiques géophysiques, surtout les variations de résistivité qui traduisent les hétérogénéités importantes.

.../...

Le remplissage du talweg est constitué d'éboulis à faible teneur en argile ( $\rho = 150$  à  $300 \Omega.m$ ) contenant des blocs calcaires de toutes tailles (les zones à gros blocs correspondent aux résistivités les plus élevées de l'ordre de  $500 \Omega.m$ ). Ces matériaux affleurent d'ailleurs dans les talus réalisés aux profils 7 et 8. On peut également remarquer la présence de lentilles à teneur en argile assez élevée au sein de ces éboulis (Profil III, point 5).

Les éboulis de la partie Sud du site sont caractérisés par une augmentation de la teneur en argile ( $\rho = 70 - 100 \Omega.m$ ) et l'apparition de lentilles d'argile ( $\rho = 30$  à  $40 \Omega.m$ ) à l'extrémité Sud des Profils I et II.

La vitesse sismique des éboulis de la partie Sud sont plus élevées (500-700 m/s) que celle des terrains qui ont glissé (250-350 m/s). Ceci peut être interprété comme une augmentation de la teneur en eau dans la partie Sud et une fissuration plus importante dans la partie Nord en mouvement.

#### 9 - CONCLUSIONS

Les reconnaissances géophysiques effectuées sur le site en question ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- . le substratum est formé de marnes. Sa surface, parallèle à la surface topographique est inclinée de  $15^\circ$  en moyenne et présente des talwegs ;
- . les terrains de couverture, qui ont donné des glissements en Novembre 1974, sont formés d'éboulis à blocs calcaires et à matrice argileuse. Ils sont hétérogènes et on y trouve des passages franchement argileux ;
- . l'alimentation en eau de la zone des glissements se fait par la partie supérieure uniquement. Les reconnaissances thermiques ont permis de montrer qu'il n'existait pas d'arrivées d'eau sous les éboulis. Les circulations d'eau dans ces éboulis sont situées dans les zones préférentielles (plus perméables ou à cause du substratum).

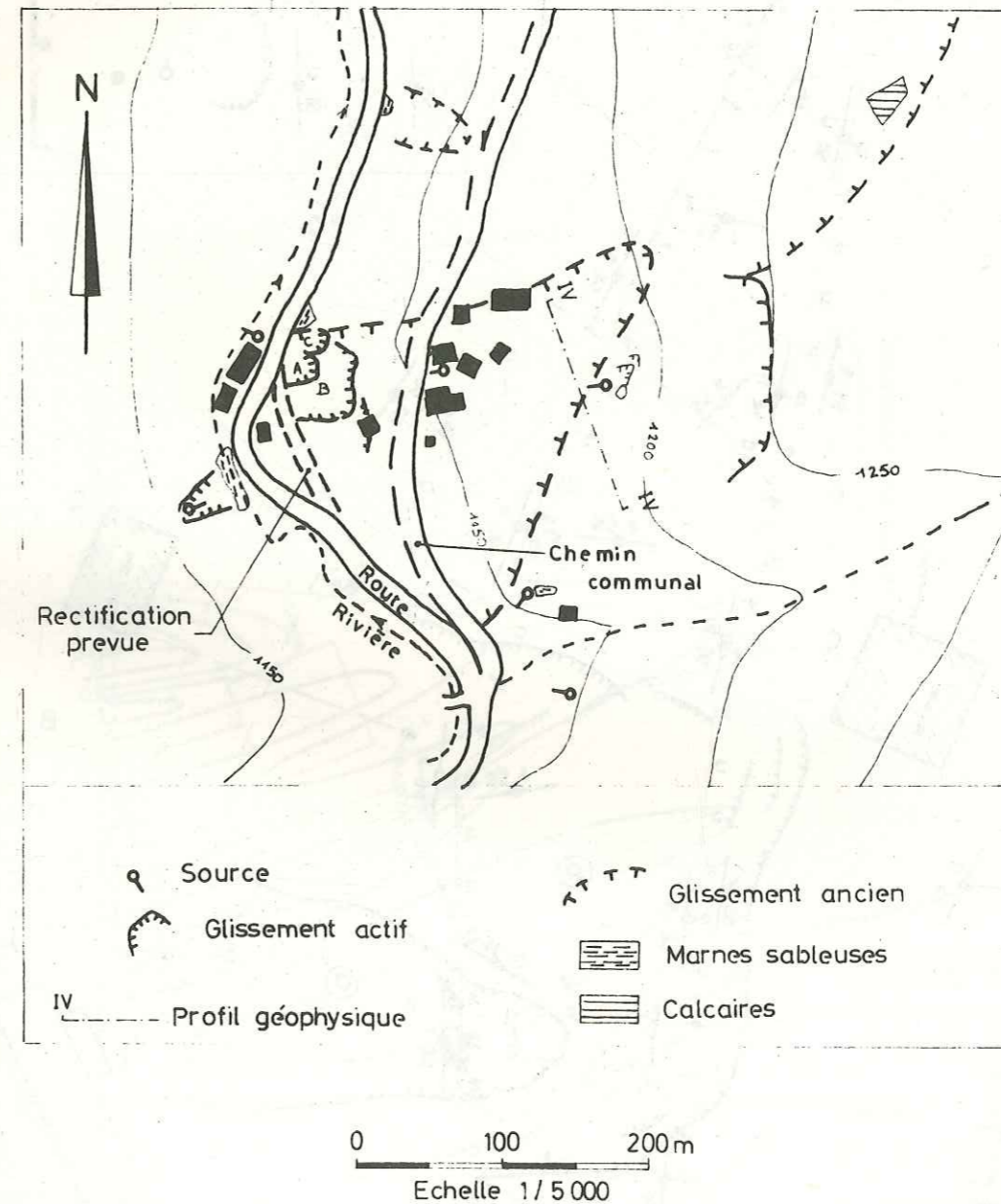
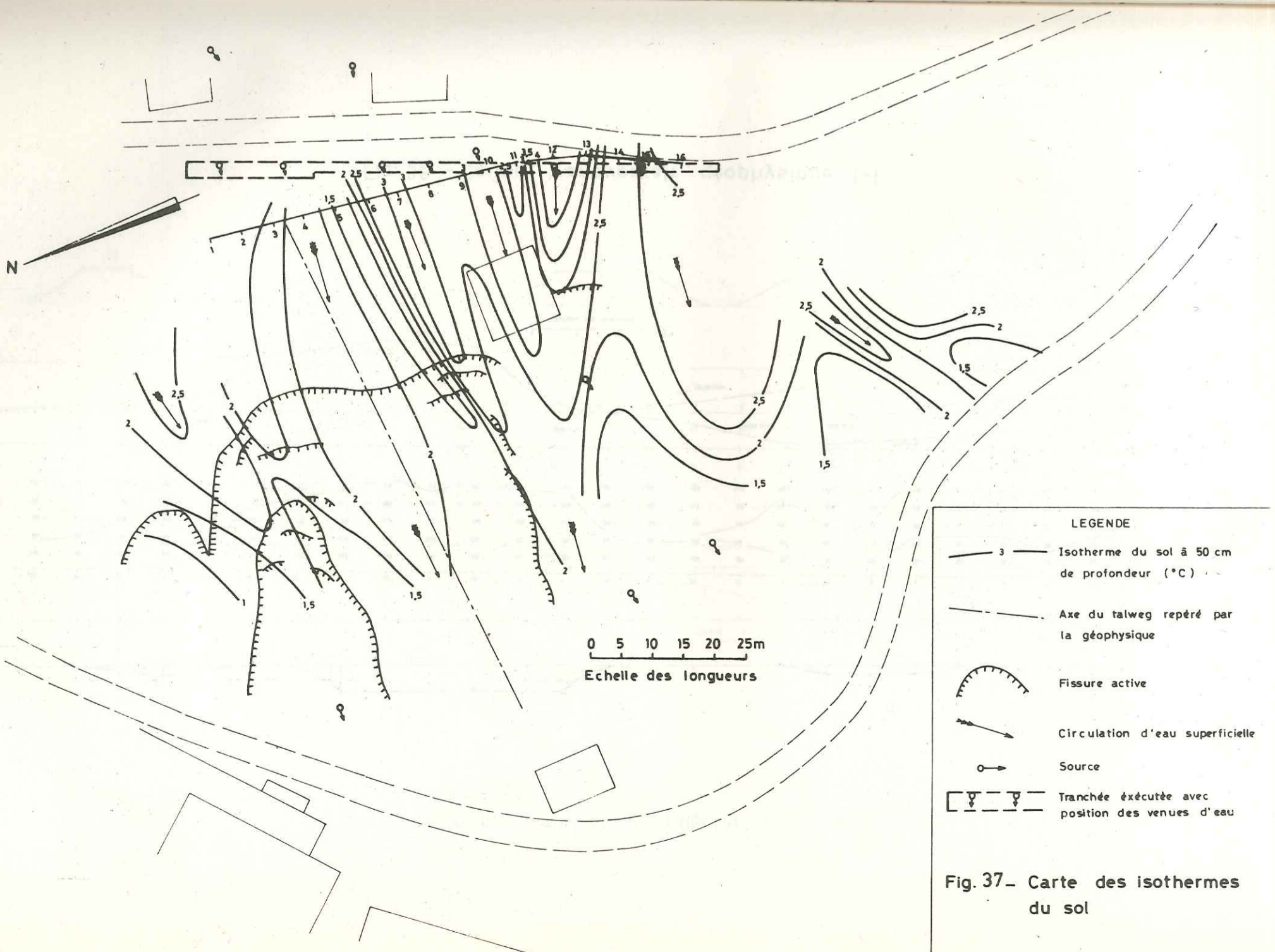
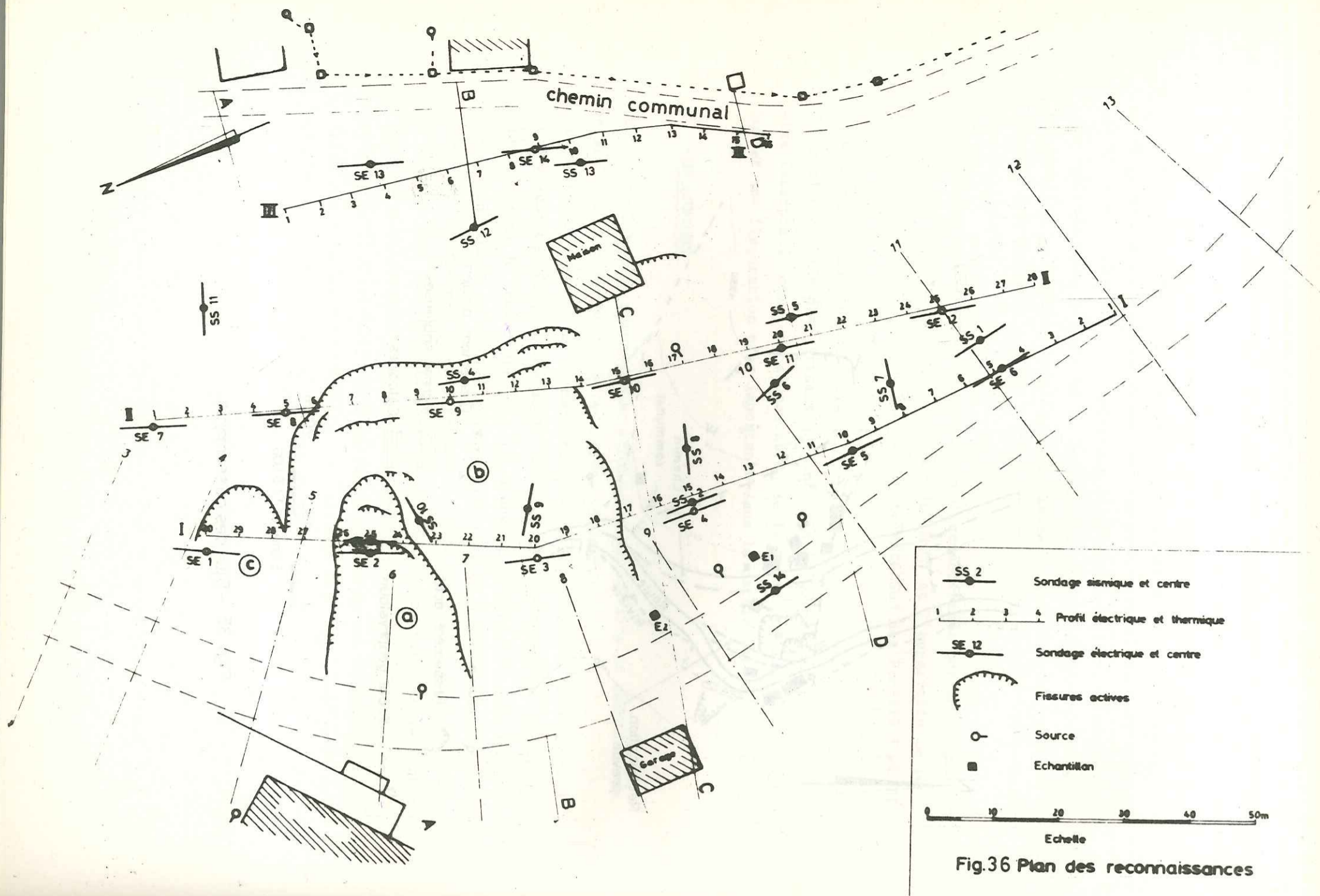


Fig. 35 - Site des glissements



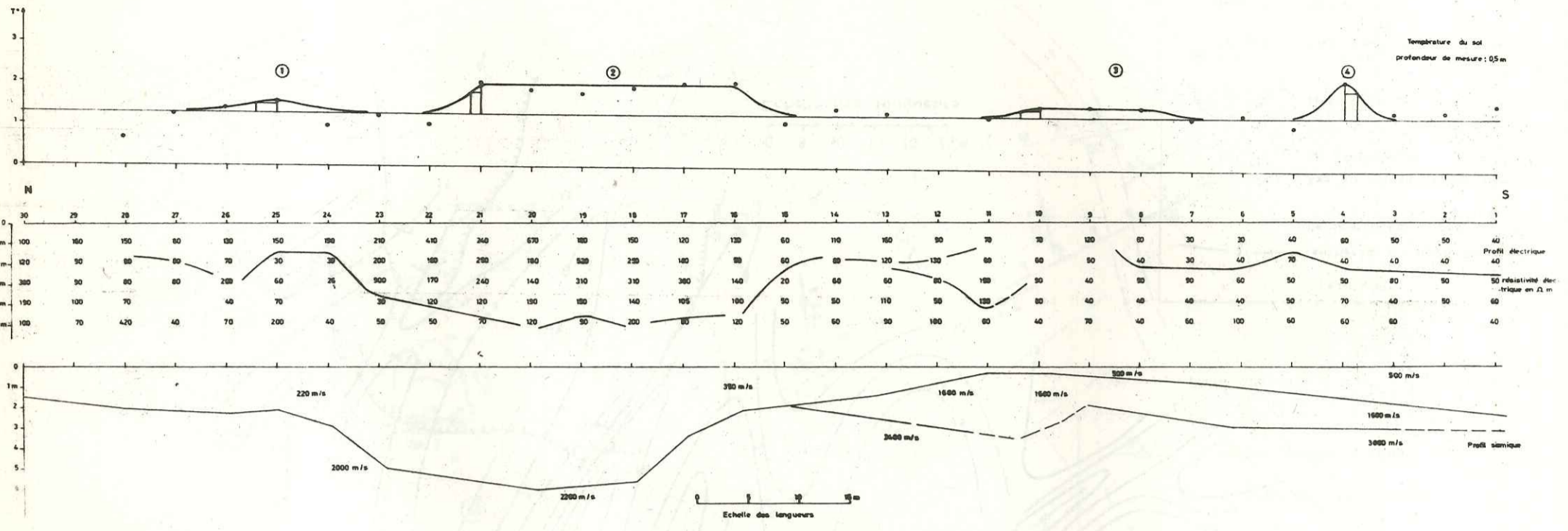


Fig. 38 - Coupe transversale géophysique I-I

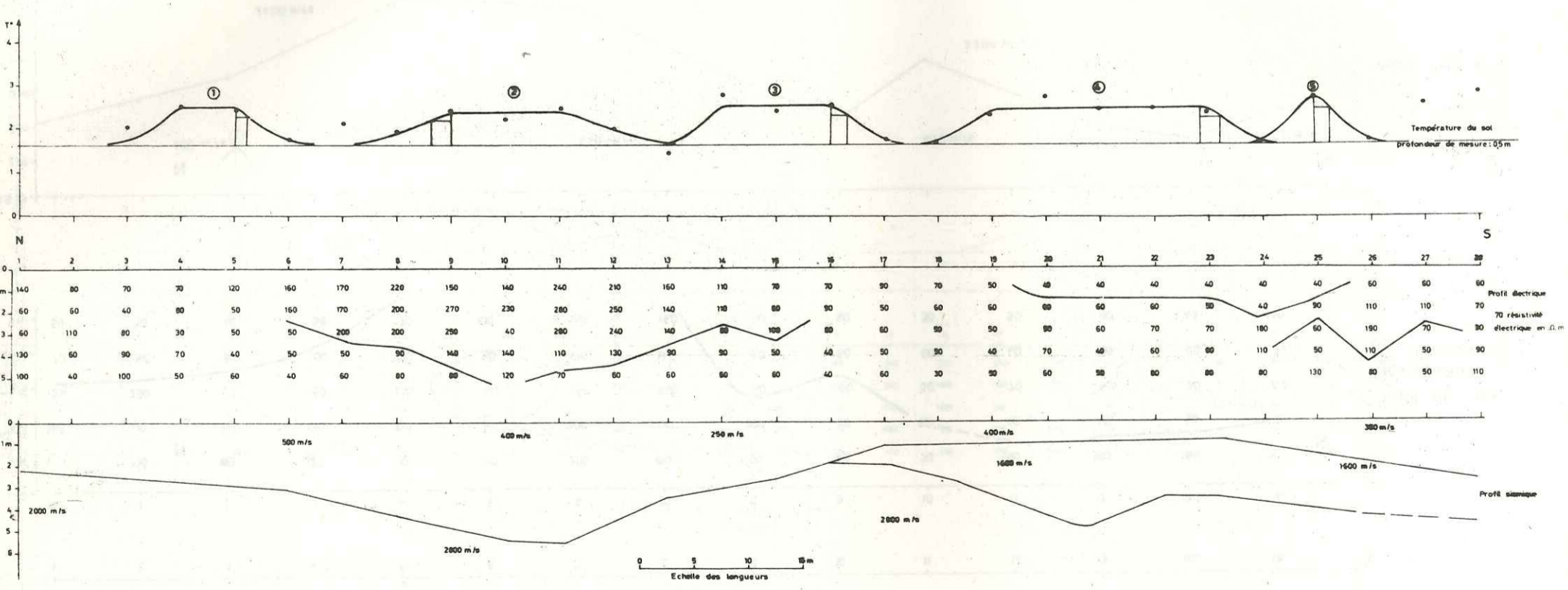


Fig. 39 - Coupe transversale géophysique II-II

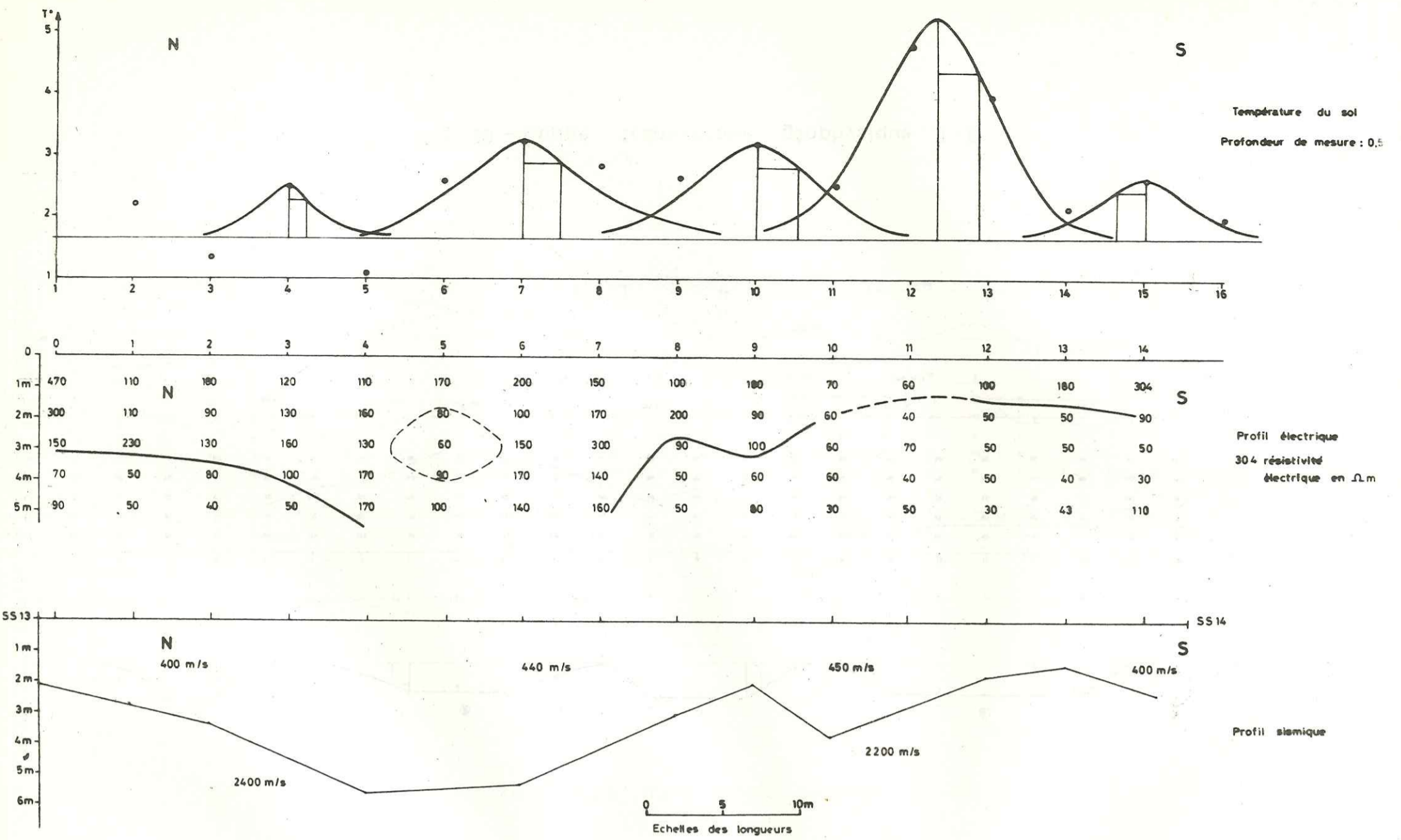


Fig. 40 - Coupe transversale géophysique III-III

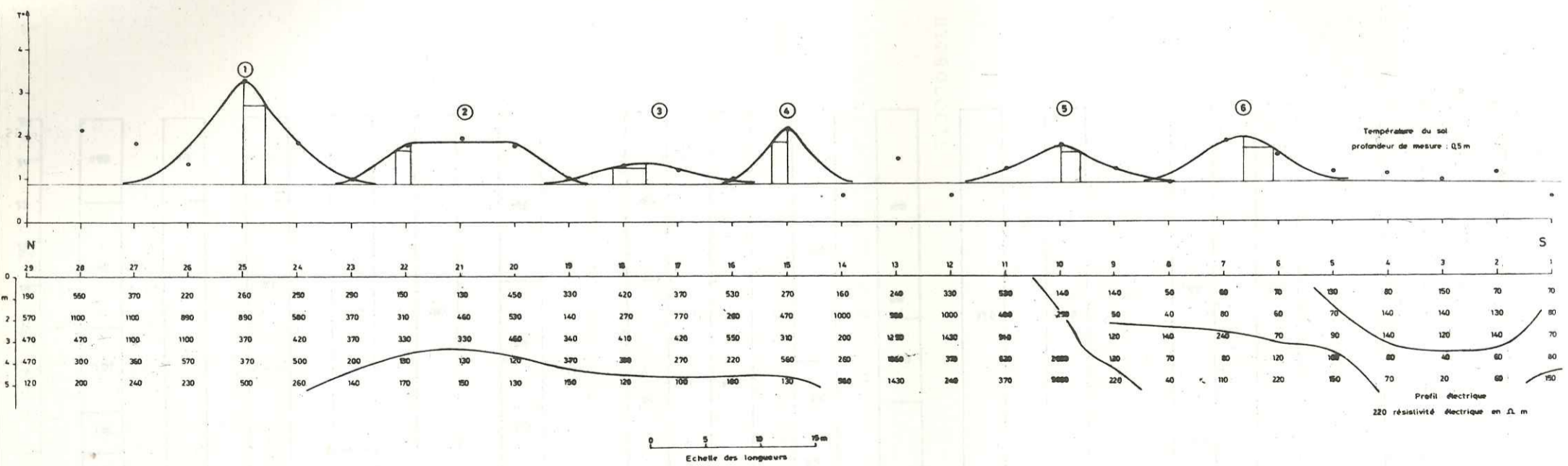


Fig. 41 - Coupe transversale géophysique IV-IV

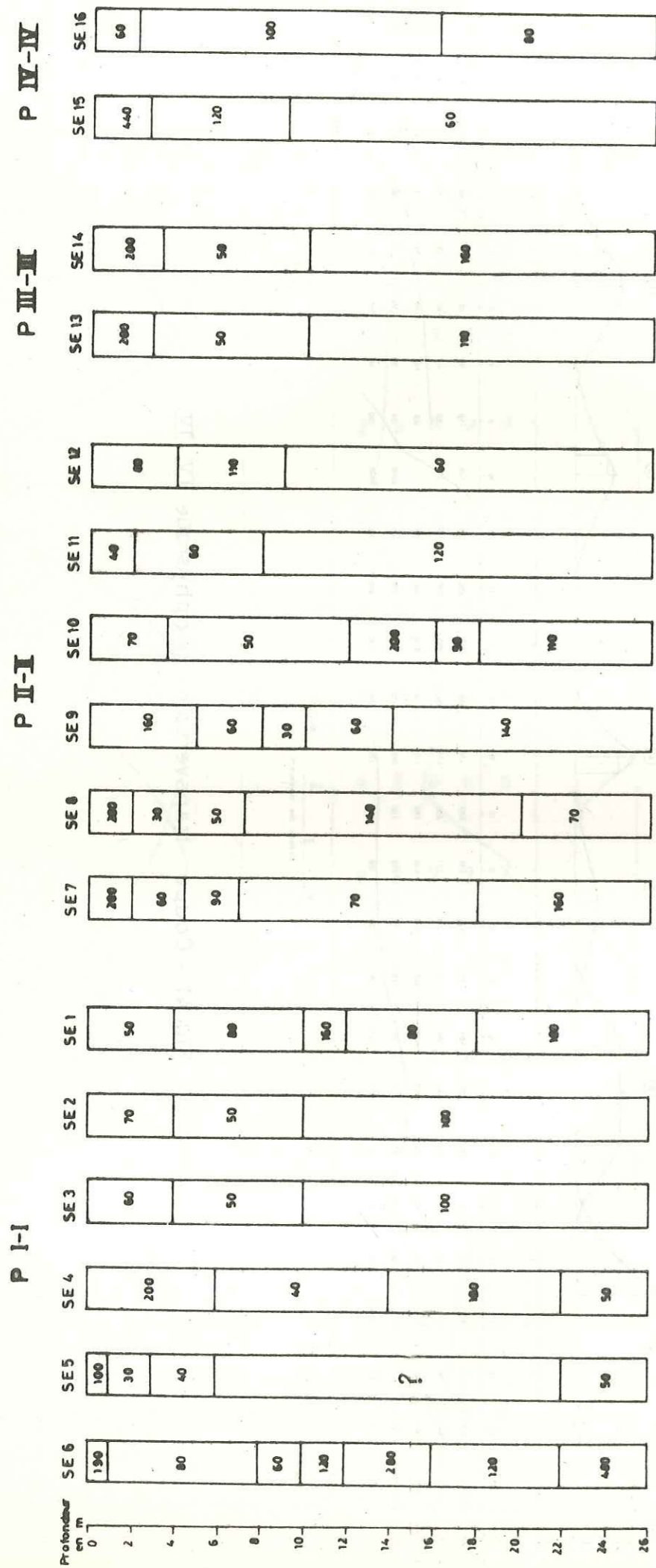


Fig. 42 - Coupes des sondages électriques

EXEMPLE II

INTRODUCTION

- 1 - GEOLOGIE GENERALE
- 2 - HYDROLOGIE
- 3 - RECONNAISSANCES EFFECTUEES
- 4 - APPLICATION DES METHODES SISMIQUE ET DE RESISTIVITE
- 5 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE
  - 5.1 - Interpretation quantitative
  - 5.2 - Interpretation qualitative
- 6 - CONCLUSIONS



## INTRODUCTION

Cette étude a été effectuée dans le massif des Bauges (Savoie). Un chemin départemental traverse plusieurs zones où des affaissements de chaussée ou de remblais ont été notés. Ces affaissements sont plus ou moins réguliers et en plusieurs endroits c'est presque la moitié de la chaussée qui est affectée de mouvements.

Cette étude doit permettre de définir des axes de circulations d'eau, la nature et la profondeur du substratum. Les travaux effectués ont consisté en :

- . observations géologiques de terrain,
- . réalisation de profils sismiques de 50 m de long, de sondages électriques à 5 et 17 mesures, de points de mesures thermiques et sondages pénétrométriques dynamiques.

### 1 - GEOLOGIE GENERALE

La vallée qui s'étend du Col des Prés au Chatelard est un synclinal, le synclinal des Aillons. Les terrains qui le composent sont formés de calcaires durs (Urgonien et Sénonien) et de grès et marnes tertiaires.

L'ossature du synclinal est formée par les calcaires massifs urgoniens (Mont Margeriaz). Ces calcaires sont très épais (200 à 300 m). Ils n'intéressent pas les zones étudiées. Ils sont recouverts de calcaires en petits bancs contenant des silex du Sénonien. Ces calcaires manquent sur le flanc W. Au-dessus, on trouve encore les conglomérats du Lutétien (éocène) et les grès du Priabonien (éocène). Toutes ces couches forment un ensemble plus dur que le reste, et, en général, stable pour les problèmes qui nous intéressent.

Le remplissage du synclinal est formé de terrains tertiaires (obligocène) et quaternaires. On peut distinguer, selon la lithologie, de bas en haut :

.../...

- . des marnes gris noir à patine grise, assez schisteuses, en bancs minces (5 mm) contenant de nombreuses écailles de poisson (marnes à Meletta). Ce sont ces marnes qui affleurent près du PK 10,435 ;
- . des marnes gris noir, un peu sableuses, fissurées, avec traces d'oxydation, à lignites, avec des passées de grès gris noir micacés et ligniteux (marnes à lignites) ;
- . des grès verdâtres micacés parfois très durs, en bancs de 10 à 50 cm (grès des Aillons).

Toutes ces formations de remplissage s'altèrent en donnant des argiles ou des sables argileux. Les marnes à lignites donnent des argiles.

En plus des terrains d'altération des roches précédentes, on trouve des dépôts morainiques sous forme de placages (il ne semble pas exister de grandes accumulations) épais de quelques mètres à 10-20 m. Il s'agit d'une argile sableuse à galets et blocs un peu arrondis. Les blocs atteignent facilement 1 m. Ces dépôts sont abondants surtout dans la région du Col des Prés et d'Aillon-le-Jeune où la morphologie en auge est encore bien visible.

L'observation de terrain complétée par les photographies aériennes a révélé l'existence d'un glissement de terrain ancien près de la Lavanche (c'est d'ailleurs la traversée de cet ancien glissement qui donne lieu à des désordres sur la route). Cette zone est d'ailleurs assez tourmentée puisque les eaux qui apparaissent entre les PK 23 et 23,300 proviennent d'infiltrations à partir du ruisseau du Marié.

Tous les mouvements sont associés à des concentrations d'eau provenant de circulations souterraines. Ils ont en général lieu dans les parties basses des versants qui sont plus argileuses et où le drainage se faisant plus difficilement, les pressions interstitielles peuvent augmenter, ce qui favorise l'instabilité. Ces parties basses sont plus argileuses pour deux raisons :

- . on y trouve en général des marnes à lignites qui s'altèrent en argiles plastiques,
- . les particules fines entraînées par les circulations d'eau se déposent dans les parties basses des versants.

.../...

## 2 - HYDROLOGIE

En ce qui concerne l'hydrologie, les versants ne renferment pas de nappe à proprement parler. Les circulations d'eau en profondeur s'effectuent par des passées plus perméables soit au sein des éboulis, soit au sein des moraines. Ceci est prouvé par les restes d'anciens talwegs dont les formes sont à présent arrondies et qui correspondent à des venues d'eau ou à des passages repérés par la méthode thermique.

L'alimentation en eau peut se faire par infiltrations dans les terrains de couverture, mais aussi par certaines fractures et par les réseaux karstiques dans les calcaires urgoniens. Les sorties d'eau sont déterminées par la présence de marnes (marnes à Meletta ou à lignites). Pour ces raisons, l'alimentation en eau des terrains de couverture peut se faire de manière très ponctuelle.

Un exemple typique de ce type de circulations d'eau privilégiée est donné par les infiltrations du ruisseau du Marié : entre les cotes 850 et 900 ce ruisseau disparaît entièrement dans les grès priaboniens (mais les calcaires urgoniens ne sont pas loin) pour réapparaître sous une forme plus diffuse à la base des grès des Aillons pour former le Nant des Bories. A cet endroit, on note les traces d'un ancien glissement de terrain ayant affecté les marnes et les grès et leurs terrains de couverture. Comme on l'a vu, c'est la traversée de ce glissement ancien qui détermine les mouvements de terrain près de la Lavanche.

## 3 - RECONNAISSANCES EFFECTUEES

Sur le site étudié, la route fait deux lacets (voir Fig. 43), on observe un certain nombre de glissements de remblai et de talus de déblais entre les deux lacets et au-dessus du deuxième lacet. Ces mouvements affectent 400 m de route environ. Les pentes sont faibles à la sortie inférieure du versant (8°) pour atteindre 28° au-dessus du deuxième lacet. Ces pentes sont plus ou moins moutonnées, indiquant des mouvements de terrain anciens.

.../...

Outre les observations géologiques de surface, nous avons effectué les reconnaissances suivantes :

- . 11 profils sismiques SS<sub>1</sub> à SS<sub>11</sub> de 50 m de long, exécutés à l'aide de l'enregistreur à 1 canal Sismeasy ;
- . 3 profils électriques :
  - PE<sub>1</sub> comprenant 33 sondages à 5 mesures (profondeur 5 m) espacés de 6 m,
  - PE<sub>2</sub> comprenant 25 sondages à 5 mesures (profondeur 10 m) espacés de 9 m,
  - PE<sub>3</sub> comprenant 27 sondages à 5 mesures (profondeur 10 m) espacés de 9 m,
- . 16 sondages électriques à 17 mesures SE<sub>1</sub> à SE<sub>16</sub> (profondeur 24 m),
- . 7 sondages au pénétromètre dynamique P<sub>2</sub> BEVAC SP<sub>1</sub> à SP<sub>7</sub>,
- . 2 profils thermiques comprenant :
  - pour PT<sub>1</sub> 29 points de mesure à 1 m de profondeur,
  - pour PT<sub>2</sub> 36 points de mesure à 1 m de profondeur.

L'implantation de ces reconnaissances est portée en Fig. 43.

#### 4 - APPLICATION DES METHODES SISMIQUE ET DE RESISTIVITE

On a exécuté 3 profils dont nous allons expliquer les résultats obtenus :

##### Profil 1

Sur le profil 1 exécuté au-dessus du deuxième lacet, on peut mettre en évidence l'existence d'un substratum formé de marnes à Meletta à une profondeur variant entre 1 et 5 m en partie Sud. Ce sont les zones de résistivité 50 à 80 Ω.m du profil PE<sub>1</sub>. Ceci est en accord avec les affleurements observés entre les profils 8T à 12T et avec le sondage sismique SS<sub>3</sub> (voir Fig. 44).

Au Nord du profil 8T, le substratum s'enfonce (sondage SS<sub>1</sub>). Vers 14 m on note pour ce sondage un interface avec V<sub>1</sub> = 3000 m/s sur une longueur très limitée. Ce peut être le substratum.

Les terrains de couverture sont formés de matériaux argileux, de débris de marnes avec des résistivités de 20 à 50 Ω.m. En partie Nord, la couverture morainique devient plus importante et est caractérisée par des résistivités atteignant 200 Ω.m pour des passages plus perméables à gros blocs tels qu'on en observe à proximité du deuxième lacet. En profondeur, le substratum est formé de marnes à Meletta caractérisées par des résistivités de 55 à 100 Ω.m selon la nature exacte des marnes (plus ou moins sableuses). Voir Fig. 44.

.../...

##### Profil 2

Sur le profil 2 réalisé entre les deux branches du deuxième lacet (Fig. 43), la prospection électrique ne permet plus de distinguer partout les terrains de couverture du substratum. En effet, en plus des marnes à Meletta qu'on repère au milieu du profil à 3 m de profondeur environ, il apparaît des marnes plus argileuses dont les résistivités sont basses (16 à 30 Ω.m), ce qui ne permet pas de les distinguer des terrains d'altération argileux. Ces marnes sont vraisemblablement les marnes à lignites qui affleurent en RD côté Sud de la vallée. Ce sont des marnes gris à gris noir contenant des grès ligniteux, un peu sableuses et très fissurées près de la surface. Leur direction est N20, leur pendage variant de 50 à 90° vers l'Est. Elles affleurent également près du premier lacet (au profil 8T). Leur position stratigraphique normale est au-dessus des marnes à Meletta. On va voir plus loin qu'elles forment le substratum de toute la partie basse.

Le sondage sismique SS<sub>6</sub> effectué en amont des profils 15B à 18 (Fig. 45) a rencontré un substratum caractérisé par V<sub>1</sub> = 3000 m/s à 1,40 m de profondeur. Ce sont les marnes à lignites car leur résistivité est caractérisée par des valeurs de 16 à 30 Ω.m. Le sondage sismique SS<sub>5</sub> a rencontré le substratum avec une surface irrégulière entre 1 et 2 m de profondeur. Les terrains de couverture sont caractérisés par des vitesses de 250 à 400 m/s.

Le sondage sismique SS<sub>4</sub> situé entre les deux branches du lacet 2 a repéré le substratum côté S à 3,30-4 m et côté N difficilement à 6,50 m (V<sub>1</sub> = 3000 m/s). Compte tenu des résistivités, il s'agit de marnes à lignites.

Les sondages pénétrométriques dynamiques SP<sub>6</sub> et SP<sub>7</sub> ont été effectués sur ce profil. Le sondage SP<sub>6</sub> exécuté dans l'axe du glissement du profil 14T a rencontré vraisemblablement le substratum fissuré à 1 m de profondeur. Le sondage SP<sub>6</sub>bis réalisé 12 m plus au Nord a mis en évidence le même phénomène et l'épaisseur des marnes fissurées peut être estimée à 5 m. Les circulations d'eau profondes peuvent avoir lieu dans ces terrains fissurés.

Les sondages SP<sub>7</sub> et SP<sub>7</sub>bis atteignent une couche plus dure, respectivement à 3 et 2 m. Ce sont vraisemblablement des marnes à lignites plus

.../...

ou moins altérées et fissurées (ceci est confirmé par le sondage sismique SS5).

Profil 3

Sur le profil 3, le profil électrique PE3 (Fig. 46) montre que l'ensemble des matériaux est argileux sans qu'on puisse distinguer le substratum des terrains de couverture. On note simplement la plus grande résistivité (170 Ω.m) des matériaux du glissement D, matériaux de remblai rapportés pour la plupart.

Les sondages sismiques montrent qu'en dessous les terrains de surface meubles, caractérisés par des vitesses de propagation des ondes longitudinales de 350 à 400 m/s et épais de 1 à 2 m, on trouve des terrains où la vitesse varie de 900 à 1300 1/s (SS8, SS9, SS10, SS11) et qui sont soit des marnes fissurées et partiellement saturées, soit d'anciens résidus de glissements (paquets de marnes dans une matrice argileuse). Les vitesses de 1300-1400 m/s indiquent des matériaux parfaitement saturés, les vitesses inférieures à 1300 m/s indiquent des matériaux partiellement saturés.

Le substratum est situé à des profondeurs variables (Fig. 46) comprises entre 2 m et 8,50 m. Les vitesses de propagation dans ce substratum vont de 2650 à 3000 m/s. Dans la partie S le substratum est très proche (2m). Dans la partie moyenne, l'épaisseur des terrains de couverture augmente jusqu'à 8,50 m (au niveau d'une bosse du terrain naturel, qui est un résidu d'ancien glissement).

Le sondage SS12 exécuté parallèlement à l'axe du glissement D montre dans la partie haute les terrains de couverture glissés sur 3,70 à 4,50 m d'épaisseur (V1 = 400 m/s). En-dessous, on a jusqu'à 5,40 m de matériaux complètement saturés à 1400 m/s, puis le substratum (marnes à lignites V1 = 2600 m/s). Dans la partie basse, on a très rapidement les terrains d'altération des marnes, saturés (V1 de 1400 à 1700 m/s), puis à partir de 3-4 m les marnes à 2600 m/s.

.../...

Les sondages électriques SE9 à SE14 montrent de faibles résistivités (en moyenne 15-30 Ω.m) avec quelques passages plus résistifs (bancs de grès ligniteux). Au sondage SE15, on note sur 3,50 m les matériaux glissés avec  $\rho = 120 \Omega.m$  (Fig. 47)

Les sondages pénétrométriques SP1 à SP5 confirment ces données. SP1 et SP2 exécutés sur le glissement D montrent des couches très peu résistantes ( $R_p < 10$  bars) jusqu'à 2 m, puis une augmentation progressive jusqu'à 5-6 m où on rencontre le substratum avec  $R_p > 300$  bars. SP3, SP4 et SP5 exécutés en contrebas de la route (entre deux lacets) montrent également une couche très peu résistante, épaisse de 1,20 à 2 m, puis des zones de  $R_p$  variables mais augmentant jusqu'au substratum proprement dit à 4-6 m de profondeur.

5 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

On a appliqué cette méthode au mois de Juin 1975. A cette époque les eaux souterraines ont un déficit de calories, donc les anomalies seront les points de température minimum sur les profils. On a choisi deux profils dans la zone de glissement, l'un au-dessus du premier lacet, parallèle à la route, le second entre le premier et le deuxième lacet. La figure 43 montre les positions et les directions des profils. Dans chaque sondage effectué à la tarière (diamètre 8 cm) on a mesuré les températures du sol à 1 m de profondeur au moyen d'une sonde thermocouple ayant une précision de 0,1°C. Le sol était couvert d'une végétation uniforme, ce qui a éliminé la correction de couverture. Pour la correction journalière, on a mesuré la température de l'air et la Figure 9 montre sa variation et son amplitude (8,5°C) pendant la durée du travail (Fig. 48). En prenant  $m = 0,005$  unité C.G.S., on peut calculer l'influence de la variation journalière pour une profondeur de 1 m d'après la formule suivante =

$$\alpha = Ae^{-z} \sqrt{\frac{\pi}{mT}}$$

où on connaît  $A = 8.5^\circ C$      $T = 24$  h     $z = 100$  cm

on aura  $\alpha = 0,0016^\circ C$

ce qui est négligeable pour tous les points.

La température des sources existant dans la zone de l'étude était de 8,5°C

.../...

5.1 - Interprétation qualitative

On a dressé une carte des isothermes de la zone comprenant tous les mouvements de terrain (les glissements A, B, C et D). La Figure 49 montre la position des anomalies déterminées par rapport aux glissements ; on peut observer la relation entre les anomalies de la température correspondant aux circulations d'eau par rapport aux mouvements de terrain. D'autre part, les suintements observés dans la zone étudiée prouvent l'existence de circulations souterraines et les anomalies de température montrent leurs localisations.

5.2 - Interprétation quantitative

Profil 1

Sur ce profil on a mesuré 29 points, les points de mesure de température correspondant à ceux de la résistivité. On a déterminé des anomalies que nous avons distinguées en 3 groupes (Fig. 44) :

Le groupe I au Sud correspond au glissement du remblai, en effet à la base de ce glissement, on observe des suintements. Ce groupe est composé de 3 anomalies.

Le groupe II comprend deux anomalies, il correspond aux mouvements à l'aval de la chaussée.

Le groupe III comprend une seule anomalie qui peut correspondre aux suintements temporaires de cette zone et au glissement situé en contrebas du premier lacet.

Le Tableau 32 donne le résultats des calculs. D'après leurs formes les anomalies sont dues à des conduites de forme cylindrique. Le fond thermique est pris égal à 9,65°C.

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	a (m)	h (m)	r (m)	h - r (m)	Groupe
1	1,35	1,6	2,95	4,84	3,04	1,20	Groupe I
2	0,95	1,3	2,5	2,78	1,22	1,56	
3	0,9	1	2,2	2,32	0,70	1,60	
4	1,45	2	3,5	6,03	4,91	1,12	Groupe II
5	1,35	2	3,5	5,69	4,49	1,20	
6	1,15	2,20	3,80	5,87	4,40	1,47	Groupe III

Profil 2

Ce profil est exécuté au-dessous du premier lacet dont la position des points de mesure est montrée sur la Figure 43. D'après les résultats obtenus (Fig. 46) on remarque quelques anomalies, celles situées au Sud du profil sont dues à l'humidité superficielle. D'ailleurs, dans cette partie, on peut voir des suintements et ce fait est causé par la remontée du substratum dont la profondeur ne dépasse pas 1 m à 1,50 m.

Les deux anomalies situées au Nord du profil sont dues au passage de l'eau sous le remblai du lacet 2. Le Tableau 33 montre l'interprétation quantitative. On a pris un fond thermique égal à 10,1°C.

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	a (m)	h (m)	r (m)	h - r (m)	(h - r) K (m)
1	0,9	1,0	2,20	2,32	0,7	1,6	
2	0,3	0,8	2,07	2,07	0,02	2,05	2,05x1,2=2,5

Tableau 33 -

6 - CONCLUSIONS

On a appliqué les trois méthodes géophysiques et on a obtenu les résultats suivants :

- . l'application de la méthode thermique montre la relation essentielle entre les mouvements de terrains et l'écoulement souterrain et elle nous donne les localisations de ces écoulements (dont la profondeur est située entre 1 et 2 m) ;
- . la méthode électrique, dans l'ensemble, montre l'irrégularité existant dans le substratum. Cette méthode permet de distinguer la nature des terrains de couverture et du substratum ;
- . enfin, les sondages sismiques montrent la profondeur du substratum et permettent de distinguer en différents points l'épaisseur du terrain de couverture.

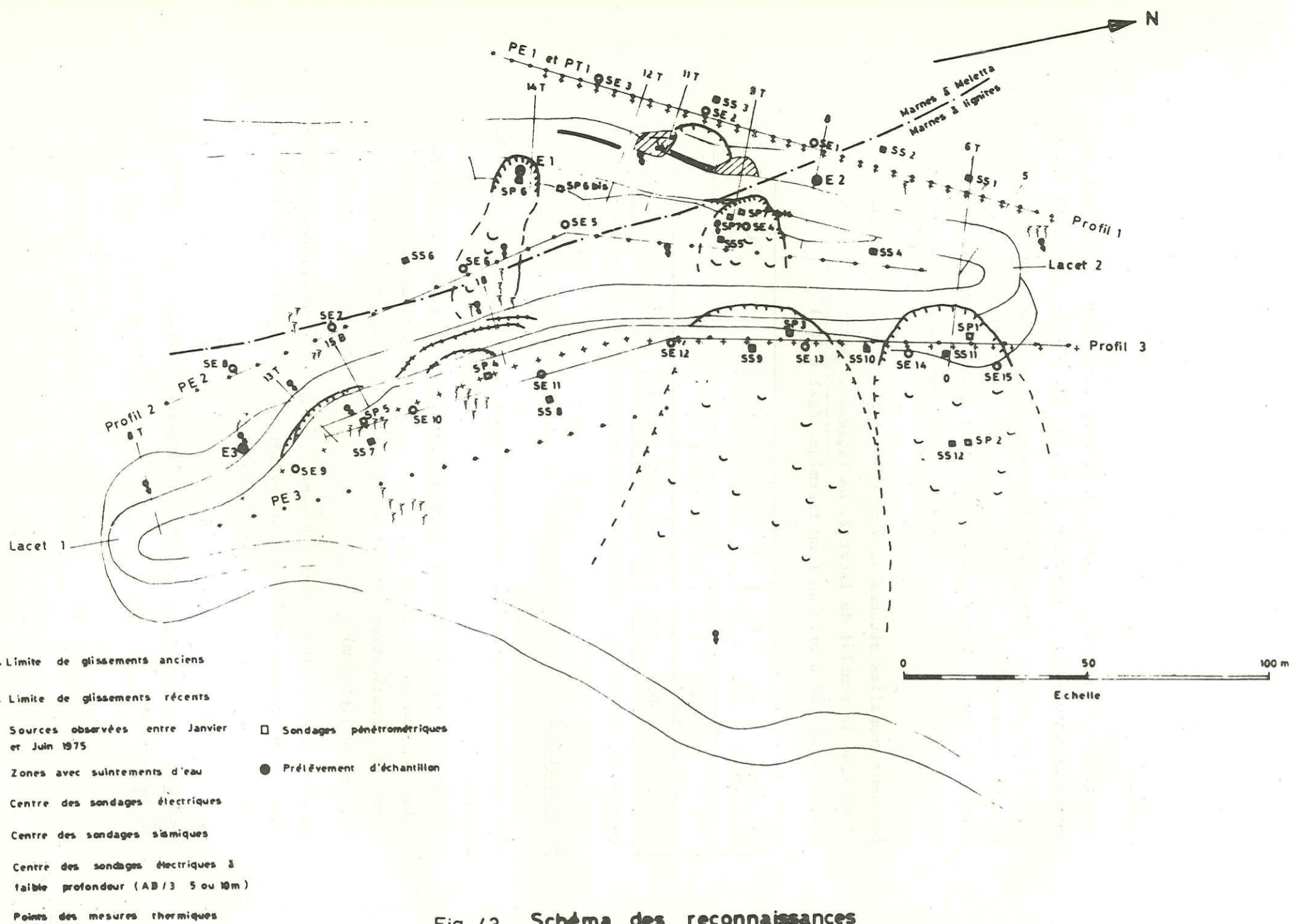


Fig. 43 - Schéma des reconnaissances

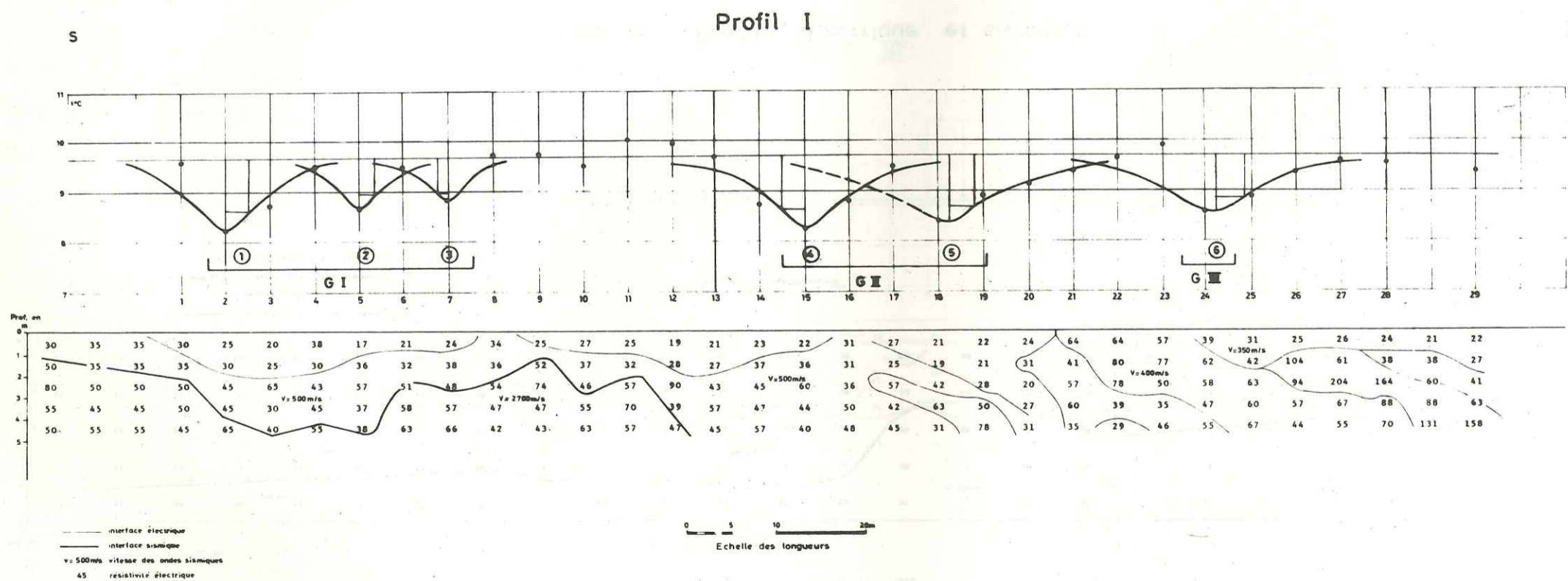


Fig. 44 - Profils électrique, sismique et thermique

### Profil II

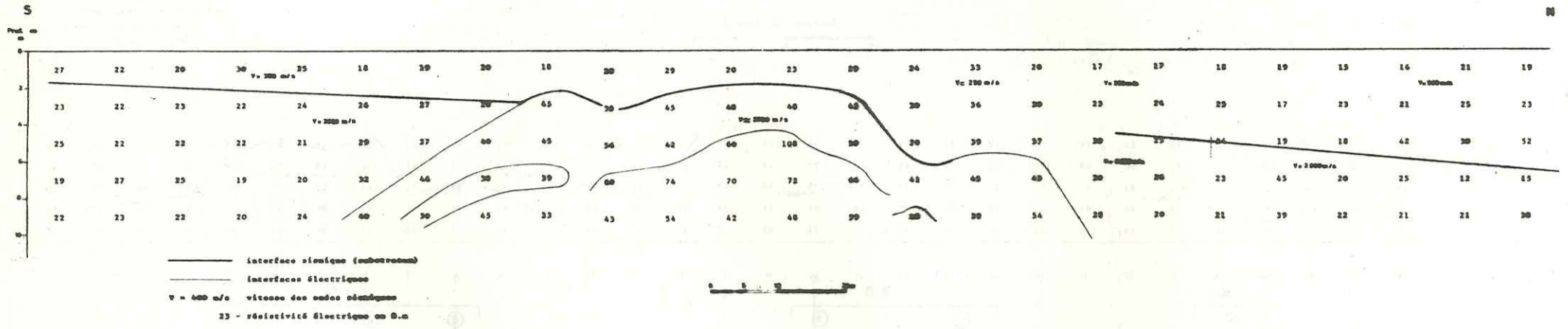


Fig. 45 - Profils électrique et sismique

### Profil III

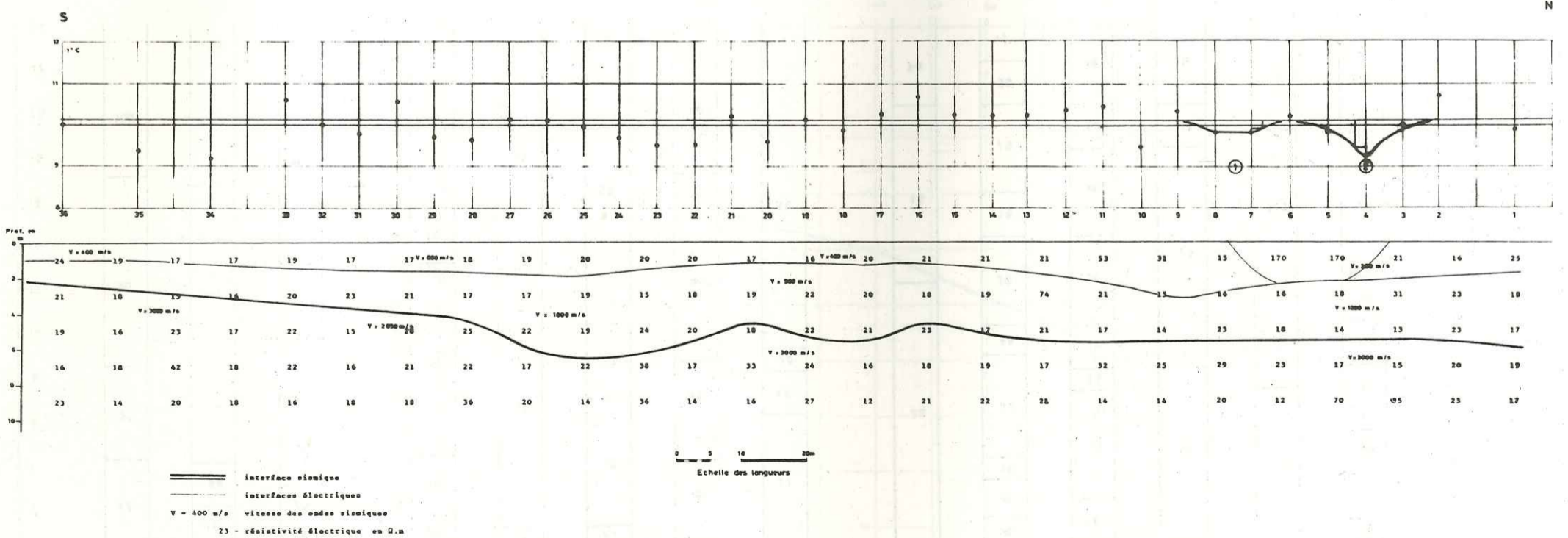
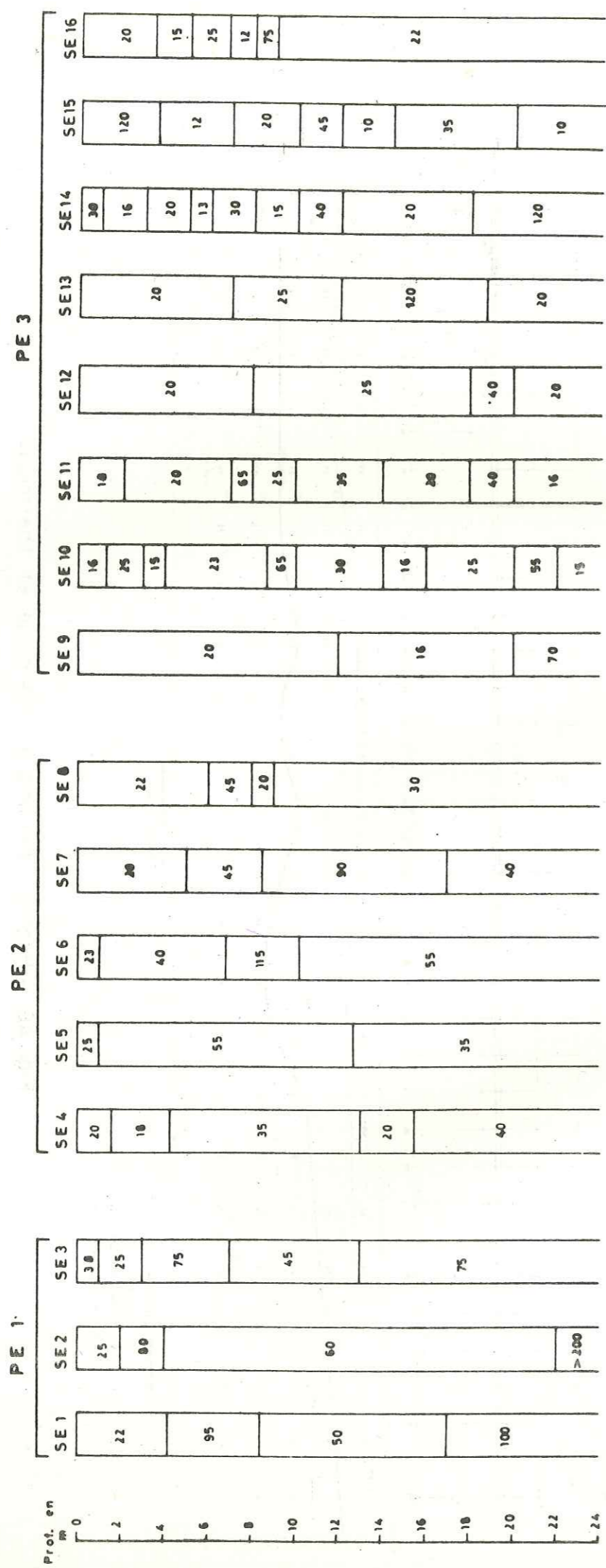


Fig. 46 - Profils électrique, sismique et thermique



95: résistivité en Ω·m

Fig. 47 - Coupes des sondages électriques

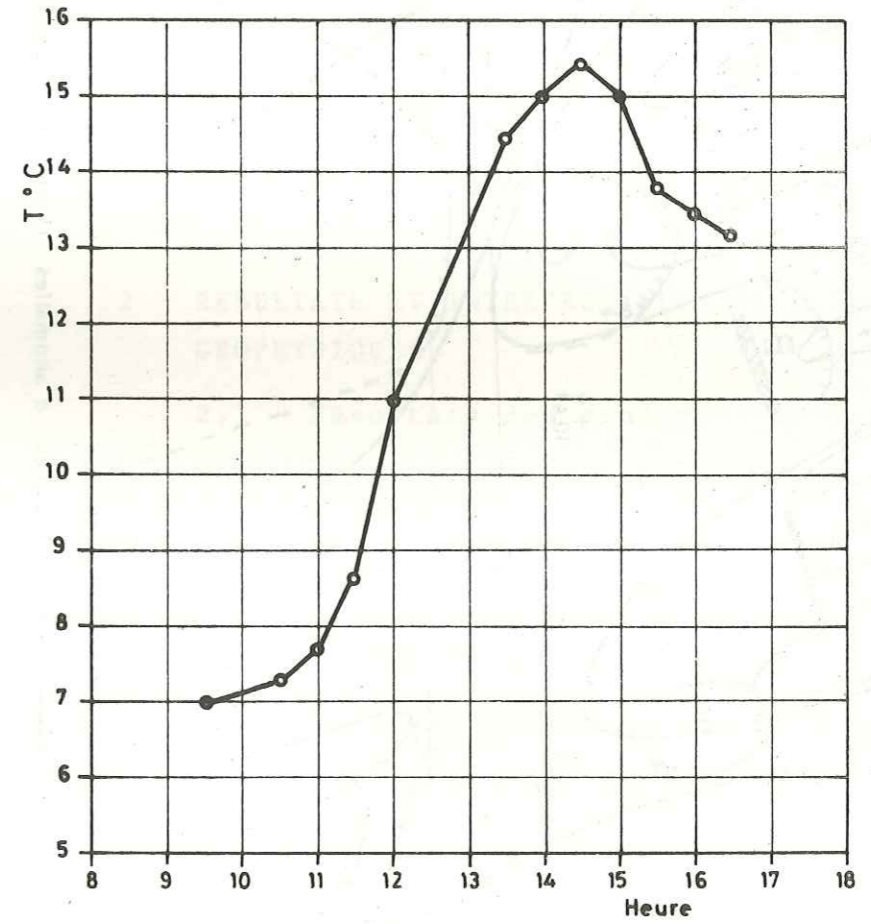


Fig. 48 - Variation de la température de l'air pendant la durée de travail



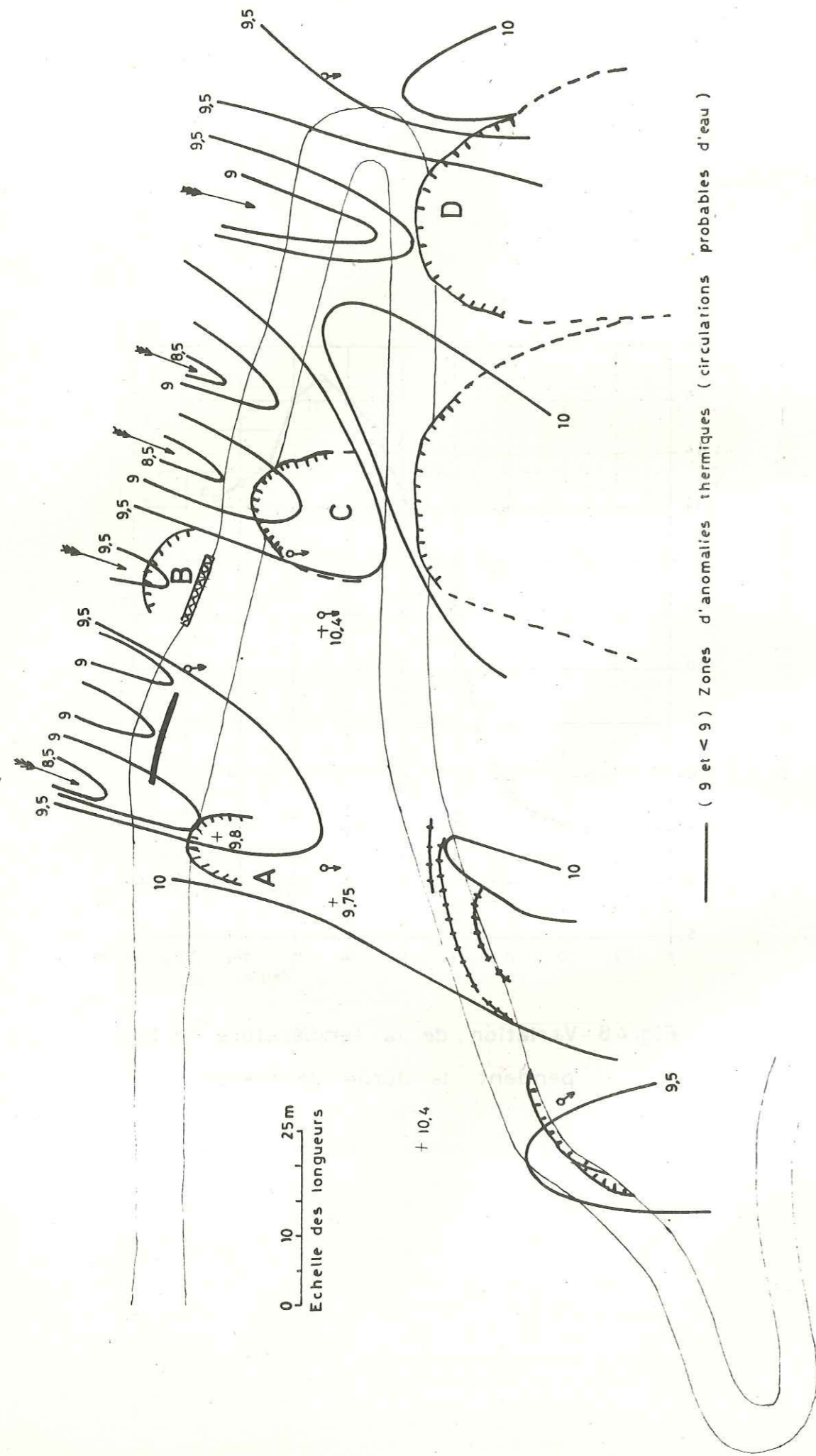


Fig. 49 — Carte d'Isothermes

EXEMPLE III

INTRODUCTION

- 1 - RESULTATS DES OBSERVATIONS SUR LE TERRAIN
- 2 - RESULTATS ET INTERPRETATION DES ESSAIS GEOPHYSIQUES
  - 2.1 - Résultats des sondages sismiques
  - 2.2 - Résultats des sondages électriques
- 3 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE
  - 3.1 - Hydrogéologie
  - 3.2 - Résultats des mesures thermiques
  - 3.3 - Interprétation qualitative
  - 3.4 - Interprétation quantitative
- 4 - CONCLUSIONS

## INTRODUCTION

Cette étude a été effectuée pour définir les conditions géologiques et géotechniques des terrains pour la réalisation d'une route départementale en Tarentaise.

Le projet de tracé comporte entre les profils P34 et P70, la traversée de zones très humides avec mise en place de remblais dont deux dépassent 10 m de hauteur. La présente étude a pour but de définir les conditions géologiques et géotechniques des terrains dans la zone en question.

L'étude effectuée est composée de :

- . observations géologiques sur le terrain,
- . réalisation de 12 profils sismiques de 50 m de long,
- . réalisation de 3 profils électriques représentant 62 sondages électriques à 5 mesures au pas de 1 m, par la méthode de Wenner,
- . réalisation de 4 profils de mesures thermiques représentant 136 mesures de température du sol à une profondeur de 50 cm.

### 1 - RESULTATS DES OBSERVATIONS SUR LE TERRAIN

La zone étudiée est située sur un versant entre 1400 et 1500 m d'altitude. Sa pente moyenne est de 30 à 35° en partie basse (jusqu'à 1400 environ) et de 22 à 28° en partie haute. Les irrégularités locales des pentes sont des signes de mouvements lents ou anciens. On reviendra plus loin sur ce point.

L'ossature du versant est formée de roches primaires du houiller. On y rencontre :

- . des schistes noirs anthraciteux à feuillage très marqué, s'altérant facilement,
- . des schistes et grès micacés gris,
- . des conglomérats durs à galets étirés.

Cette ossature n'affleure pas dans la zone étudiée, sauf au lacet (schistes anthraciteux). On rencontre quelques affleurements de grès vraisemblablement en place.

Pour tous ces affleurements, le pendage ne représente pas un indice très intéressant car ces formations sont habituellement affectées de fauchage d'une part, et plissotées d'autre part.

La zone proprement dite qui intéresse le tracé de la route, se présente comme une croupe limitée latéralement par deux talwegs dans lesquels on remarque des circulations d'eau. Cette morphologie se remarque très nettement sur les photos aériennes et il est possible (mais les signes morphologiques ne sont pas nets) que cette zone soit un ancien glissement. C'est probablement pour cette raison qu'on ne trouve pas d'affleurement en place sur la zone étudiée, à l'exception peut-être des schistes noirs situés dans le talus de déblai au 1er lacet (1425 environ). Partout ailleurs, ce sont soit des paquets de schistes et grès très fissurés, soit des éboulis contenant parfois de gros blocs (par exemple au P52). On rencontre également des dépôts morainiques qui constituent des placages (ex. au P34 - P36, au P48 - P49).

La morphologie de détail confirme l'existence de mouvements de surface. Les pentes sont irrégulières, en particulier dans le talweg RG. D'autre part, on note des signes de reactivation locale, ancienne ou actuelle en de nombreux points (Fig. 50) :

- . En contrebas des P34 - P35, on note des traces d'arrachements anciens avec des pentes assez raides (35°) et moutonnées.
- . En contrebas du P36 existe une petite coulée bien localisée correspondant à une venue d'eau.
- . En contrebas du P40, une coulée s'est formée en Juin 1975. Elle correspond à une venue d'eau. Sa largeur est de 10 m et l'épaisseur glissée de 3 à 4 m. Les matériaux sont descendus sur 200 m le long de la pente et ont fortement endommagé une habitation.
- . Au-dessus des P42 - 44, on note des mouvements de surface sur la pente dont l'inclinaison est moyenne (28°).
- . Au-dessus et au-dessous des P63-64, on note des formes moutonnées correspondant à des mouvements plus ou moins actifs.

Les pentes varient entre 22 et 40° et ont été notées sur la Fig. 50. Les circulations d'eau seront décrites plus loin, avec les résultats des mesures thermiques.

.../...

## 2 - RESULTATS ET INTERPRETATION DES ESSAIS GEOPHYSIQUES

Les emplacements des profils sismiques et des sondages électriques sont indiqués sur la Fig. 50.

### 2.1 - Résultats des sondages sismiques

On a représenté sur la Fig. 51 les résultats des sondages sismiques, sous forme de coupes sismiques. Pour l'ensemble des sondages, on peut distinguer 4 types de terrains :

- . terrains de couverture, terre végétale avec  $V_1 = 250$  à  $400$  m/s
- . éboulis (de schistes, ou de grès)  $V_1 = 400$  à  $600$  m/s
- . éboulis compactés ou dépôts morainiques  $V_1 = 750$  à  $1800$  m/s
- . substratum (schistes ou grès) fissuré  $V_1 = 1800$  à  $2400$  m/s

#### - Profil sismique PSSI (SS3, SS4, SS5, SS6)

La couche de surface ( $V_1 = 200$  à  $270$  m/s) est épaisse de 0,60 à 1,20 m. En-dessous, on rencontre des couches avec  $V_1 = 500$  à  $900$  m/s qui sont des éboulis plus ou moins denses. A l'extrémité de SS6, vers le chalet, l'épaisseur de ces éboulis augmente et atteint 10 m.

Le substratum (vraisemblablement des schistes anthraciteux comme dans le talus du lacet) est situé vers 2,50 m de profondeur au milieu du profil. Les vitesses relativement faibles dans ce substratum ( $V_1 = 2000$  à  $2200$  m/s) indiquent qu'il doit être fissuré.

#### - Profils sismiques SS1 et SS2

Ils sont implantés à l'emplacement du remblai du profil 89-40. Les terrains de surface sont ici épais de 1 à 2 m avec des vitesses de 200 à 270 m/s. En-dessous, on trouve des éboulis avec  $V_1 = 850$  à  $1100$  m/s. La vitesse de 1100 m/s rencontrée à l'extrémité S du profil indique que les éboulis sont presque saturés. Quant au substratum avec  $V_1 = 1800$  m/s, il peut être constitué de schistes fissurés (avec éventuellement des circulations d'eau) ou des dépôts morainiques très compacts.

.../...

- Profils SS7 et SS8

La couche de surface est épaisse de 0,6 à 1 m ( $V_1 = 300$  à  $400$  m/s). En-dessous, on trouve des éboulis ( $V_1 = 600$  à  $650$  m/s) dont l'épaisseur varie au SS7 de 3,50 m dans la partie haute à 6 ou 7 m dans la partie basse. Au SS8, ces éboulis ont des vitesses de 700 à 850 m/s. Le substratum avec  $V_1 = 1200$  m/s au SS7 et 1500 à 1600 m/s au SS8 doit être constitué de grès très fissuré ou d'éboulis anciens bien compactés.

- Sondage SS9

La couche de surface avec  $V_1 = 330$  à  $440$  m/s est épaisse de 1,20 à 2,20 m. A l'extrémité N on trouve un niveau d'eau localisé avec  $V_1 = 1400$  m/s à 2 m de profondeur. Les éboulis ailleurs sont caractérisés par  $V_1 = 1000$  m/s. Il n'y a pas de substratum à moins de 15 m (profondeur d'investigation).

- Sondage SS10

Comme au SS9, il n'y a pas de substratum et les éboulis sont caractérisés par  $V_1 = 750$  m/s, ce qui indique peut-être une teneur en eau moins élevée qu'au SS8.

- Sondage SS11

Il a été effectué en contrebas du futur mur de soutènement aval. La couche de surface est épaisse de 2,5 à 3,5 m ( $V_1 = 320$  à  $420$  m/s). En-dessous, on trouve des éboulis compacts avec  $V_1 = 750$  m/s et épais de 8 à 12 m.

La couche à 1800 m/s rencontrée ensuite peut être (mais de façon incertaine) un substratum schisteux et gréseux fissuré.

- Sondage SS12

Il donne des résultats analogues à SS11, mais on peut distinguer deux catégories d'éboulis, à 500 m/s et 750 m/s. Ils sont différenciés par leurs compacités et l'imbrication plus ou moins grande des blocs. Enfin, on n'a pas repéré de substratum à moins de 12-15 m.

.../...

2.2 - Résultats des sondages électriques

Ils sont représentés sur les figures 52, 53 et 54.

D'après les résistivités, on peut distinguer les formations suivantes :

- . éboulis contenant de gros blocs (schistes et surtout grès et conglomérats avec matrice essentiellement sableuse sèche  $\rho > 1000 \Omega.m$
- . éboulis de schistes gréseux et de grès à matrice sablo-argileuse  $\rho = 300$  à  $750 \Omega.m$
- . substratum de schistes  $\rho = 40$  à  $300 \Omega.m$ . Les faibles résistivités sont liées à l'apparition de veines anthraciteuses. En effet, on se trouve dans des terrains houillers,
- . substratum de grès,  $\rho = 750$  à  $1300 \Omega.m$ . La fissuration du substratum et le colmatage des fissures par de l'argile humide peuvent entraîner des chutes sensibles de résistivité par rapport à ces valeurs.

Le fait que les valeurs de résistivités des différentes formations se chevauchent, rend difficile l'identification des terrains par la méthode électrique seule. Par conséquent, les limites entre substratum et terrains de couverture ne correspondront pas toujours à des limites entre résistivités différentes. Mais en combinant les résultats sismiques et électriques, on peut distinguer la nature des terrains de couverture et celle du substratum.

Il faut remarquer que les valeurs de résistivité des terrains sur le site en question sont suffisamment élevées pour exclure la présence de couches argileuses dans les terrains de couverture et même dans le substratum.

- Profil électrique PSE 1 (Fig. 52)

D'après les mesures de résistivité, les terrains de couverture sont constitués d'éboulis de schistes plus ou moins gréseux avec une matrice sablo-argileuse (mais avec faible proportion de fines comme on le verra d'après les essais d'identification). On remarque deux zones où la résistivité est plus élevée (points 11 à 13 et 5 à 7). Ceci peut correspondre à une perméabilité localement plus importante dans les terrains de couverture, pouvant faciliter les écoulements épidermiques. On remarque en effet à l'aval de ces points de sondages des suintements.

.../...

Le substratum est formé de schistes gréseux ( $\rho = 200$  à  $300 \Omega.m$ ). La dispersion plus importante dans les résistivités entre les points 17 et 20 peut correspondre à l'hétérogénéité du substratum.

- Profil électrique PSE 2 (Fig. 53)

Pour ce profil, situé au-dessus du 1er lacet, on ne dispose pas de données sismiques. Dans la partie Sud du profil, le substratum de schistes contenant des veines anthraciteuses est situé à 1,50-2,0 m de profondeur et il est recouvert d'un éboulis à matrice sableuse ( $\rho = 510$  à  $660 \Omega.m$ )

Dans la partie Nord du profil (points 1 à 5), le substratum s'enfonce à une profondeur de 7 à 8 m et les terrains de couverture sont composés d'éboulis schisteux. Mais il est également possible que le substratum se trouve près de la surface (2 à 2,50 m) et que le changement de résistivité qu'on observe à 7-8 m de profondeur soit dû à un changement de nature du substratum, plus gréseux dans la partie haute.

- Profil électrique PSE 3 (Fig. 52)

On peut identifier, par les données électriques, le substratum dans la partie N du profil (points 1 à 5). Sa résistivité est de 300 à 400  $\Omega.m$  et sa profondeur augmente de 5 à 10 m (entre 5 et 6). Dans cette partie, les terrains de couverture sont assez hétérogènes ( $\rho$  de 400 à 1280  $\Omega.m$ ) et sont composés d'éboulis de schistes et de grès, à matrice sableuse.

Entre les points 6 et 20, on remarque une augmentation importante de la résistivité des terrains de couverture. Ceci correspond vraisemblablement à un éboulis à gros blocs (grès et conglomérats surtout). La matrice est sableuse et sèche. Dans cette zone, le substratum est à plus de 10 m.

A partir du point 20, on remarque une alternance de zones de résistivités différentes et il est difficile de préciser la position du substratum. Cette dernière est à plus de 15 m par endroits comme on l'a vu d'après les sondages sismiques.

.../...

Entre les points 29 et 31, on remarque une zone préférentielle à résistivité plus élevée, donc plus perméable, qui peut être une voie préférentielle de circulation d'eau à faible profondeur (on observe des suintements en contrebas de cette zone).

- Sondages électriques

On a exécuté 6 sondages avec  $AB_{max} = 72$  m selon la méthode de Wenner. Ces sondages sont implantés en Fig. 50 et leur coupe est donnée en Fig. 54.

Les sondages SE<sub>1</sub> et SE<sub>2</sub> exécutés à proximité de P 59 et P 65 permettent difficilement de repérer le substratum. En effet, les éboulis ayant la même nature que le substratum, leurs résistivités sont du même ordre de grandeur. En tenant compte du fait que les éboulis de surface dans ce site ont une résistivité supérieure à 300  $\Omega.m$  (s'ils ne sont pas formés de schistes anthraciteux), au sondage SE<sub>1</sub> on peut associer l'interface entre les couches à 310  $\Omega.m$  et 160  $\Omega.m$  au toit du substratum schisteux. Mais des schistes ne sont pas repérés au sondage SE<sub>2</sub>, distant du premier de 40 m. Si dans SE<sub>2</sub> le substratum est formé de schistes gréseux à résistivité plus élevée, on peut associer l'interface située à 10 m de profondeur, entre les couches à 310  $\Omega.m$  et 620  $\Omega.m$  avec le toit du substratum.

Dans les deux sondages SE<sub>1</sub> et SE<sub>2</sub>, les terrains de couverture sont constitués d'éboulis de schistes (310  $\Omega.m$ ) et d'éboulis contenant des blocs de grès ( $\rho = 690$  à  $1100 \Omega.m$ ).

Le sondage SE<sub>3</sub> est implanté au même emplacement que le sondage sismique SS<sub>11</sub>. Ces deux sondages indiquent le toit du substratum vers 12 m de profondeur. Ce substratum, d'après sa résistivité, est constitué de schistes gréseux. Les terrains de couverture sont composés d'éboulis contenant une quantité importante de blocs de grès et schistes gréseux à matrice sableuse ( $\rho = 2500 \Omega.m$ ). Il faut remarquer que la résistivité élevée de la couverture exclut a priori les circulations importantes d'eau dans cette dernière.

Les sondages SE<sub>4</sub>, SE<sub>5</sub> et SE<sub>6</sub> sont situés sur le profil sismique PSS<sub>1</sub> (SS<sub>3</sub> à SS<sub>6</sub>). Le substratum correspond à l'interface électrique entre les couches 750-440  $\Omega.m$  et 320-150  $\Omega.m$ . Cette position du substratum

.../...

correspond à l'interface réfringente avec  $V_1 = 2200 - 2400$  m/s. Le substratum est composé de schistes gréseux avec parfois des passées anthraciteuses (SE<sub>6</sub>). Les terrains de couverture sont constitués de blocs de schistes et de grès à matrice essentiellement sableuse.

Ces 6 sondages confirment donc les données précédentes sur la nature des terrains de couverture et du substratum.

### 3 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

#### 3.1 - Hydrogéologie

On a noté sur la Fig. 50 tous les écoulements d'eau superficiels ainsi que les sources et les zones de suintements.

Les zones humides se situent de part et d'autre de la croupe centrale. Dans cette dernière, située approximativement entre P50 et P54, on ne note aucune circulation de surface et de plus les sondages électriques (points 6 à 21 du PSE<sub>3</sub> - Fig. 52) montrent que les résistivités sont très élevées. Le matériau doit être formé d'éboulis à blocs gréseux et de conglomérats, vraisemblablement sans matrice argileuse, donc relativement perméables. Par conséquent, si de l'eau circule, c'est à plus de 8 m de profondeur.

Côté Nord, on remarque plusieurs ruisseaux confluant en aval du P39 et des zones humides ou de suintements (entre P35 et P39). Certains de ces suintements peuvent correspondre à des passées plus perméables dans les terrains de couverture (repérées par des résistivités plus fortes).

Côté Sud, on remarque un ruisseau passant à l'extérieur du lacet actuel (P57) et des suintements dans le talus amont du lacet existant, et au niveau des P58 et P59 (voir Fig. 50).

#### 3.2 - Résultats des mesures thermiques

On a effectué 4 profils de mesures de température du sol. Dans chaque sondage effectué à la tarière, on a mesuré la température du sol à 50 cm de profondeur, au moyen d'une sonde à thermocouple ayant une préci-

.../...

sion de 0,1°C. Les profils de température sont représentés sur les figures 56 et 57. Ils sont exécutés dans un sol couvert uniformément de végétation. La température de l'air est mesurée pendant la période du travail, son amplitude est de 6,80°C (Fig. 55), par conséquent on peut calculer l'influence de la variation journalière en prenant les chiffres suivants :

$$z = 50 \text{ cm} \quad A = 6,8^\circ\text{C} \quad m = 0,005 \text{ unité C.G.S.} \quad T = 24 \text{ h et on trouve}$$

$$\alpha = \frac{6,8}{71,08} = 0,095^\circ\text{C}$$

ce qui est inférieur à la sensibilité de l'appareil, donc d'influence négligeable. Les résultats des mesures sont présentés sur 4 profils 1 à 4 dont nous expliquons les interprétations qualitative et quantitative.

#### 3.3 - Interprétation qualitative

Les profils exécutés sont situés dans différents endroits éloignés les uns des autres et c'est pourquoi nous n'avons pas pu établir une carte des isothermes. Mais en étudiant les profils, nous trouvons une correspondance entre les anomalies de température et les traces de mouvements observés dans le sol ainsi que nous allons le voir ci-après.

#### 3.4 - Interprétation quantitative

##### Profil I

Le profil I a été exécuté à l'amont de la coulée qui s'est produite en Juin 1975 (Fig. 56). On y remarque une anomalie importante (points 7 et 8), et une autre au point 3. Ces deux anomalies montrent l'existence de circulations d'eau qui ont provoqué la coulée. Pour l'interprétation quantitative, nous avons calculé deux fonds thermiques (11,5°C et 12,5°C), car à partir du point 5 et jusqu'au point 11 sur le terrain il y avait de l'humidité à cause de l'infiltration de l'eau d'un ruisseau se trouvant à l'amont du profil et qui a diminué la température du sol jusqu'à une profondeur de 50 cm. Le Tableau 34 donne le résultat de l'interprétation quantitative.

.../...

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	a (m)	h (m)	r (m)	h - r (m)
1	0,9	2	3,5	3,84	0,50	3,00
2	1,85	3,80	6,58	11,40	9,30	2,10

Tableau 34 -

Profil II

Le profil II a été exécuté en recoupant une petite coulée (P36), on y remarque une anomalie située près de la surface. Cet écoulement se repère bien sur le terrain et doit correspondre aux anomalies rapprochées du profil III (voir ci-dessous).

Profil III

Ce profil a été exécuté entre P34 et P38 au-dessous du premier lacet (Fig. 56), on y note les quatre anomalies suivantes :

- . une anomalie fondamentale aux points 4 et 5,
- . deux anomalies rapprochées, aux points 9 et 11 qui correspondent aux suintements observés entre P36 et P37,
- . une anomalie localisée (point 17) qui correspond à un suintement en contrebas.

Le Tableau 35 donne le résultat de l'interprétation quantitative (on a considéré un fond thermique de 12,5°C).

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	a (m)	h (m)	r (m)	h - r (m)
1	2	3,6	6,2	17,8	16,6	1,2
2	1,1	1,0	2,4	2,55	0,85	1,7
3	0,7	1,5	2,6	2,63	0,40	2,2
4	0,6	1,0	2,4	2,40	0,20	2,2

Tableau 35

Profil IV

Sur le profil IV exécuté près du deuxième lacet (Fig. 57), on note 3 anomalies ; celle du point 5 correspond à un écoulement voisin de la surface dont on peut voir des suintements en contrebas, l'anomalie des

.../...

points 8 et 12 serait due à un autre écoulement. Le Tableau 36 donne l'interprétation quantitative (le fond thermique est pris égal à 12,5°C).

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	a (m)	h (m)	r (m)	h - r (m)
1	1,25	1,30	2,40	1,00	1,60	-
2	0,45	1,30	2,40	0,10	2,3	-
3	0,85	1,60	2,90	0,9	2,0	-

Tableau 36

4 - CONCLUSIONS

D'après les résultats de la géophysique, nous dégagons les points suivants :

- . la méthode thermique a mis en évidence des écoulements souterrains et par ailleurs elle confirme le rôle essentiel de l'eau dans la coulée qui s'est produite ainsi que dans les mouvements du sol qui existent çà et là. La profondeur des circulations d'eau est située entre 1,5 et 2,5 m selon les profils.
- . D'après les profils électriques et les sondages électriques, nous avons précisé la nature des terrains de couverture : il s'agit d'éboulis de schistes plus ou moins gréseux avec matrice sablo-argileuse. D'autre part on a obtenu des indications concernant le substratum.
- . Les sondages sismiques ont déterminé l'épaisseur de la couche de terre végétale, ainsi que des éboulis, éboulis compactés ou dépôts morainiques, et enfin ils ont indiqué la profondeur du substratum en différents endroits.

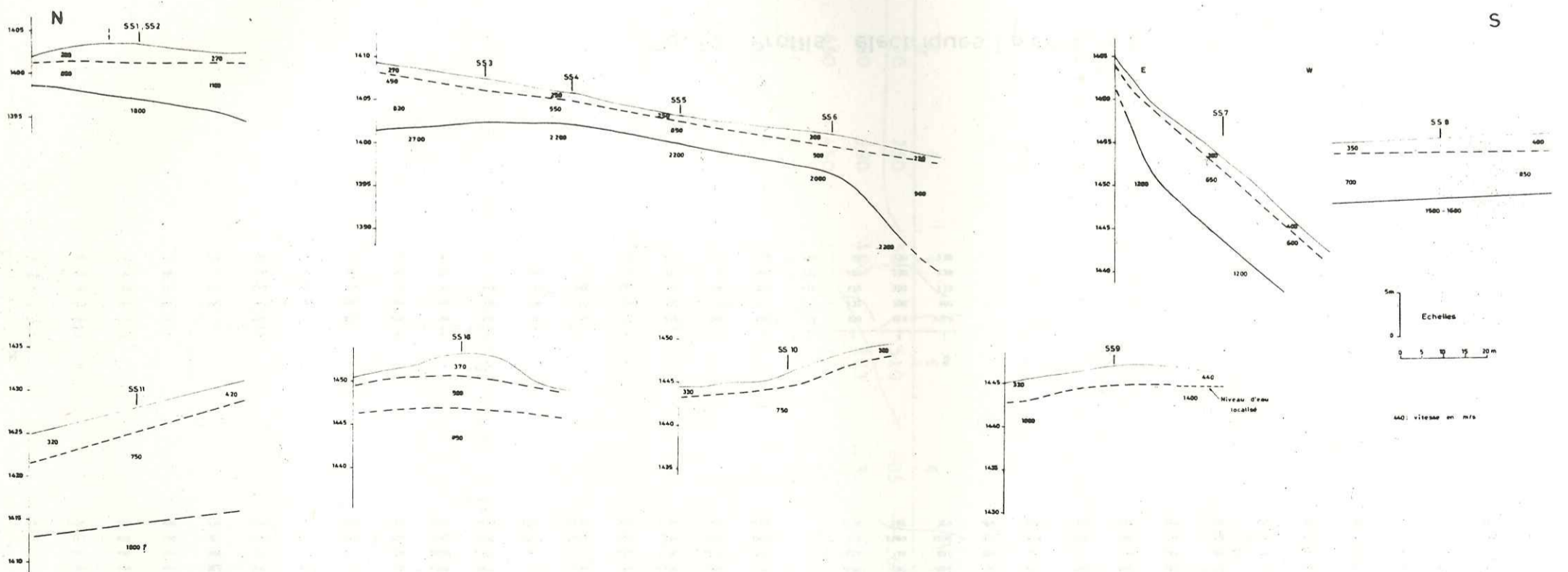
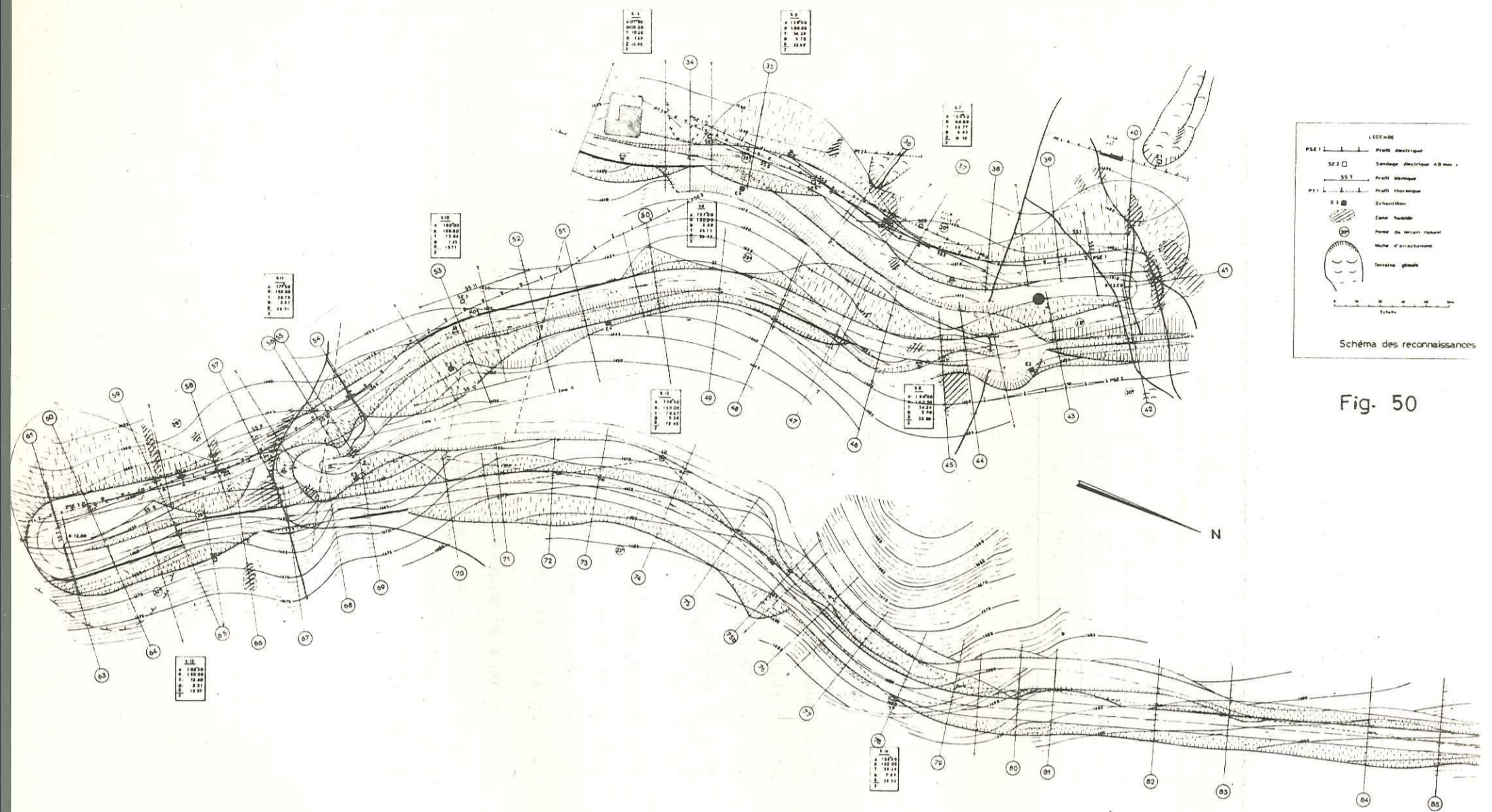


Fig. 51 - Profils sismiques



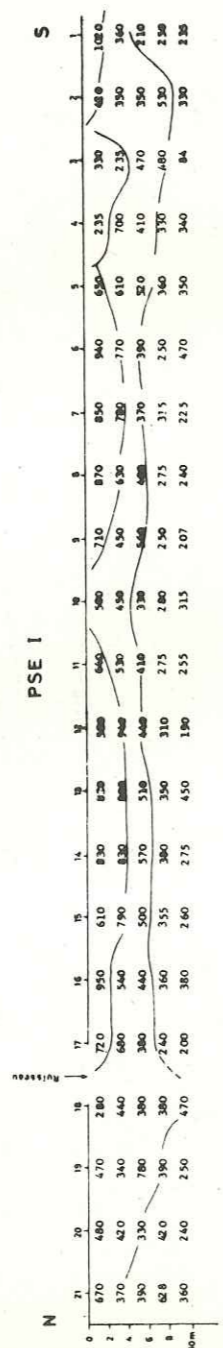
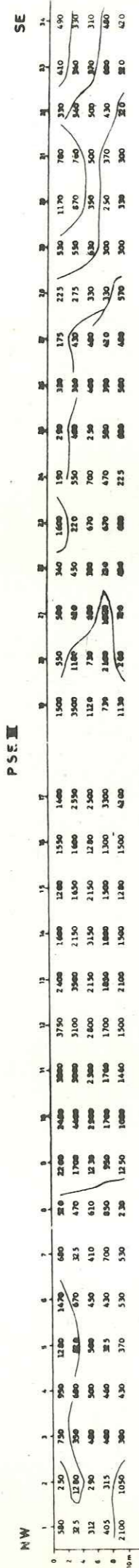


Fig. 52 - Profils électriques ( $\rho$  en  $\Omega \cdot m$ )

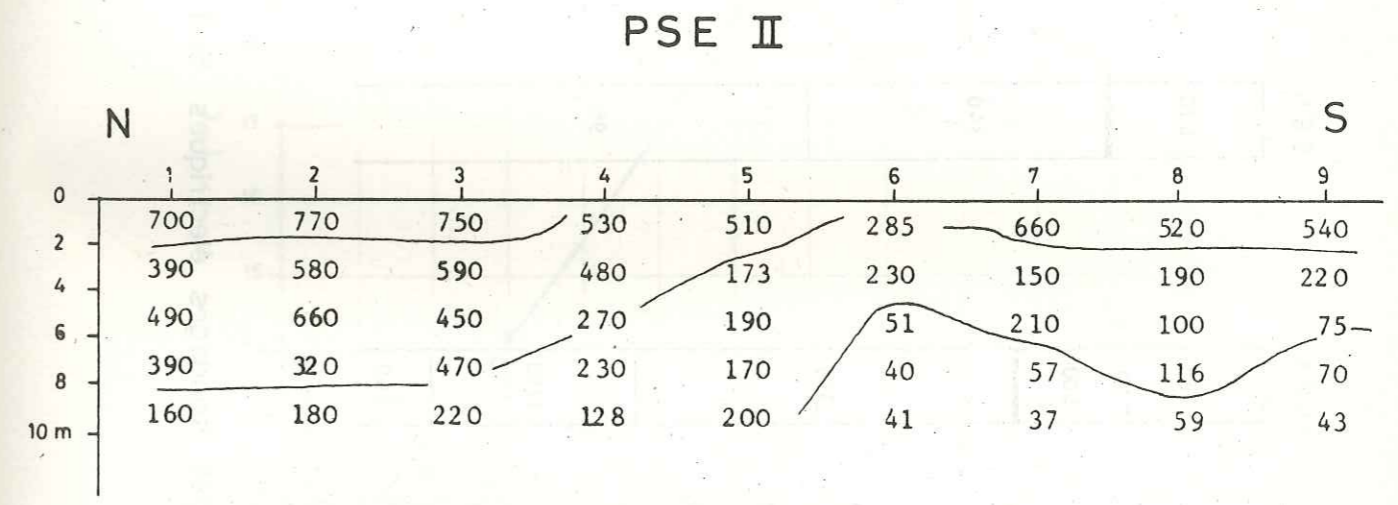


Fig. 53 Profil électrique ( $\rho$  en  $\Omega \cdot m$ )

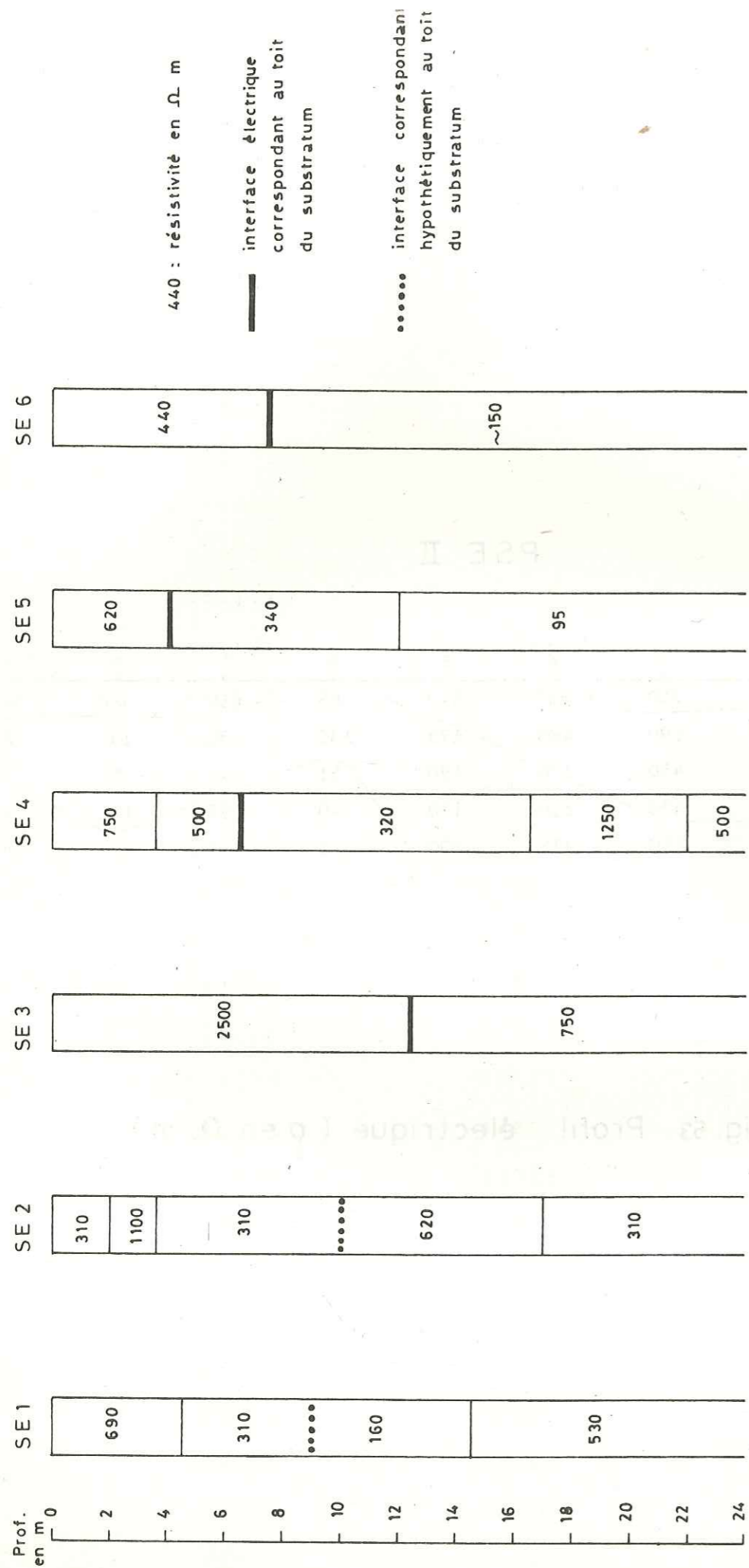


Fig. 54 Coupes des sondages électriques SE1 à SE 6

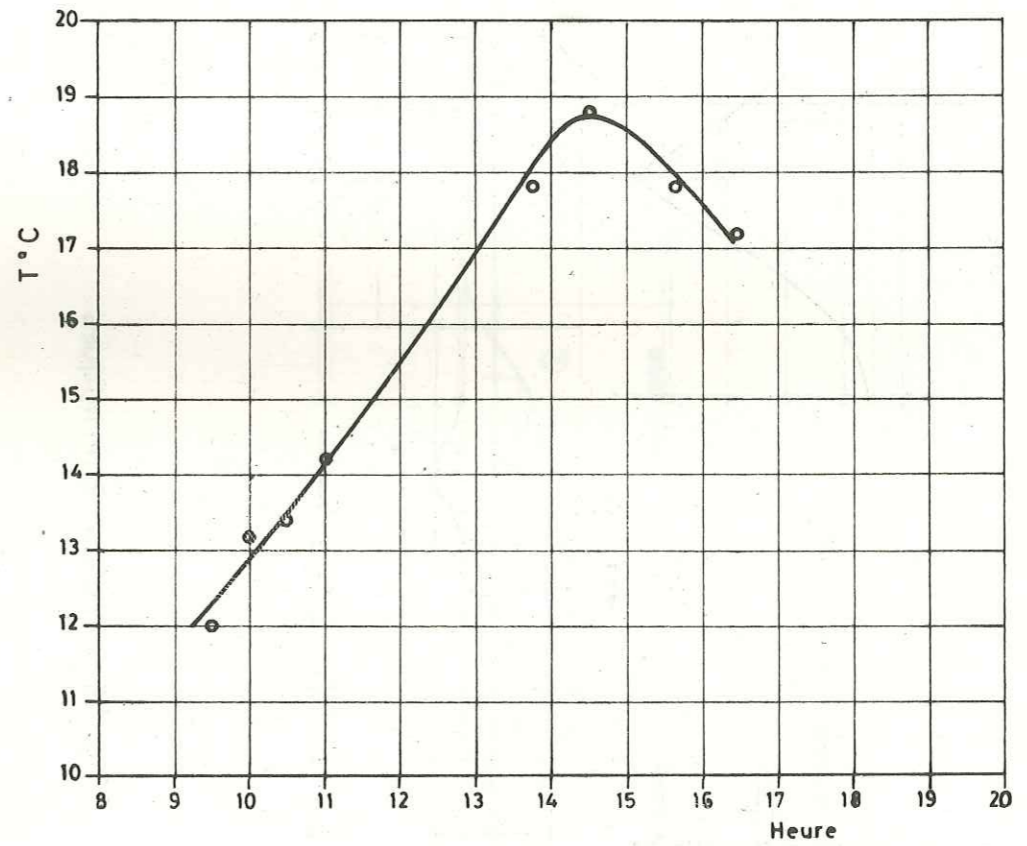


Fig. 55 - Variation de la température de l'air pendant la durée de travail

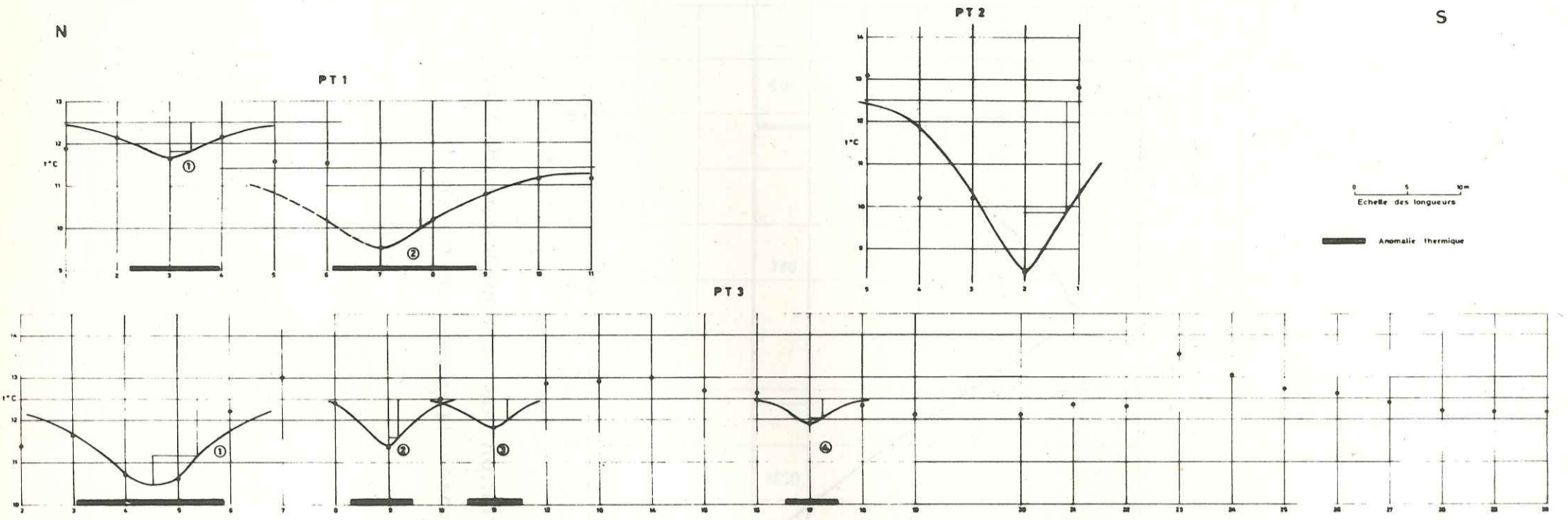


Fig. 56 - Profils thermiques

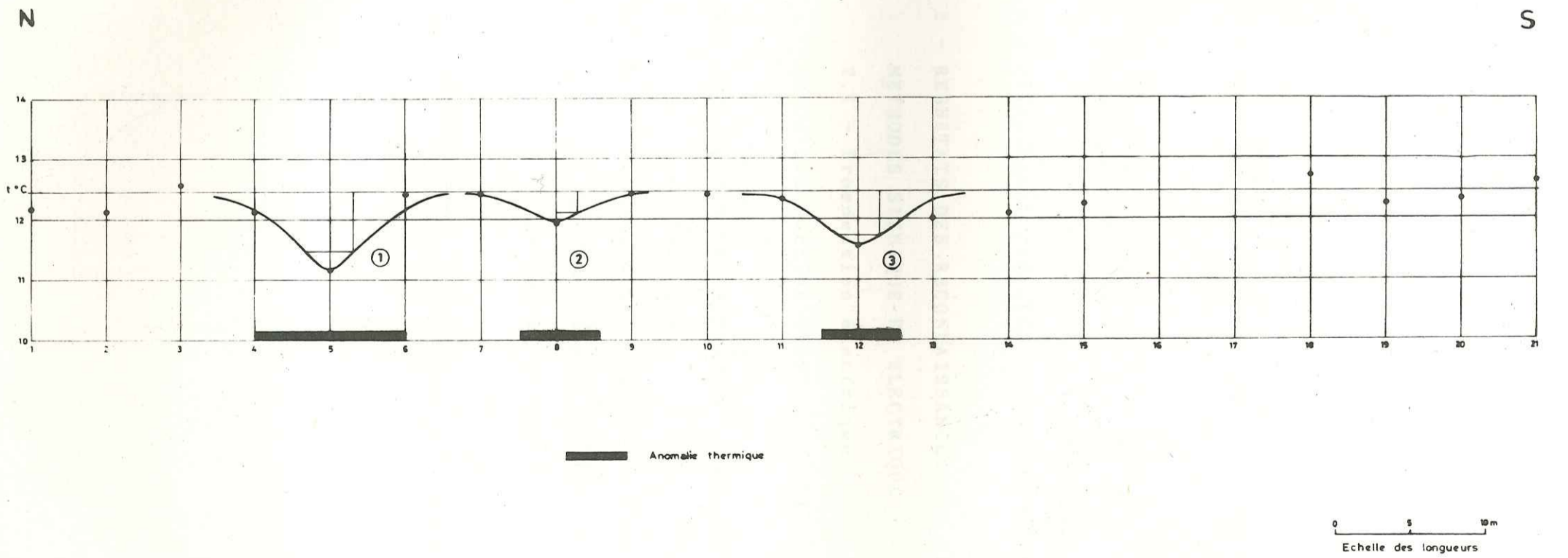


Fig. 57 - Profil thermique PT 4

EXEMPLE IV

INTRODUCTION

- 1 - PRINCIPALES OBSERVATIONS GEOLOGIQUES
- 2 - RESULTATS DES RECONNAISSANCES PAR LES METHODES SISMIQUE ET ELECTRIQUE
  - 2.1 - Prospection électrique
  - 2.2 - Prospection sismique
- 3 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE
  - 3.1 - Hydrogéologie
  - 3.2 - Résultats des mesures de température
    - a) Interprétation qualitative
    - b) Interprétation quantitative
- 4 - CONCLUSIONS

## INTRODUCTION

Cette étude a été effectuée pour définir les conditions géologiques et géotechniques au voisinage d'une route départementale en Tarentaise, et de préciser les travaux de stabilisation nécessaires. En effet, entre les cotes 850 et 1000 m environ, sur une longueur de 1,800 km environ, la route est affectée en plusieurs endroits par des glissements de talus amont ou aval nécessitant des recharges et des nettoyages de chaussée.

L'étude effectuée a comporté, outre les observations géologiques de terrains, la réalisation de :

- . 14 profils sismiques de 50 m de long,
- . 56 sondages électriques à 5 mesures avec ABmax = 15 m répartis sur 3 profils,
- . 56 points de mesures thermiques à 2 mesures sur 2 profils,
- . prise de 3 échantillons remaniés et essais d'identification.

### 1 - PRINCIPALES OBSERVATIONS GEOLOGIQUES

Dans la zone étudiée, la route est tracée sur un versant dont les pentes moyennes sont 35-40° en partie basse et 25-30° au-dessus de 950 m (surtout en partie W).

L'ossature du versant est formée de terrains houillers dont la profondeur est variable. Ils sont formés :

- . de grès plus ou moins grossiers, micacés en gros bancs avec une patine roussâtre,
- . de schistes gréseux et micacés souvent très fracturés,
- . de schistes feuilletés parfois anthraciteux et également fracturés.

La fracturation du substratum qui est très nette en plusieurs endroits (P42 - P105) est vraisemblablement liée à d'anciens glissements (voir plus loin).

Les terrains de couverture sont formés d'éboulis de terrains houillers et de dépôts morainiques.

Les éboulis sont des terrains d'altération sur place des roches houillères et contiennent des blocs de grès, schistes dans une matrice argilo-sableuse, de couleur gris à gris-noir. La limite n'est pas toujours évidente entre ces terrains et le substratum fissuré.

Les dépôts morainiques se présentent comme une argile sableuse contenant des graviers et galets de toutes natures ainsi que des blocs arrondis. Ces derniers peuvent atteindre 1 m. L'épaisseur de ces terrains de couverture a pu être précisée par la prospection sismique (voir plus loin).

D'après l'examen des photographies aériennes, on peut mettre en évidence l'existence d'un glissement de terrain ancien. La limite part du lacet 1 (P42), recoupe la route vers le P70 et le P62, puis redescend en recoupant la route aux P52,5 et P33. C'est dans l'emprise de cet ancien glissement qu'on trouve la plupart des mouvements de terrains actuels. Ce glissement ancien a affecté la couverture d'éboulis et de moraines ainsi que la partie superficielle très fissurée du substratum, comme on peut le constater près du lacet 1. L'épaisseur intéressée peut varier de 3 à 10 m.

Les désordres observés sur la route peuvent se classer en plusieurs catégories :

- . glissements du terrain naturel emportant la partie aval de la route (P45 - P67),
- . glissements de la partie superficielle des remblais (P50 - P52 - P55 - P63 - P72,5 - 101 - P115). Ces glissements nécessitent des recharges annuelles,
- . glissements superficiels des talus amont liés aux périodes de dégel ou de forte pluviométrie. On en rencontre un grand nombre. Ils nécessitent des nettoyages de chaussée.

## 2 - RESULTATS DES RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES

### 2.1 - Prospection électrique

Pour la reconnaissance de la partie superficielle du terrain, nous avons réalisé 3 profils comprenant au total 56 sondages électriques à 5 mesures au pas de 1 m (profondeur approximative de prospection : 5 m). Ces profils sont implantés sur la Fig. 58.

.../...

D'après les résultats, des mesures de résistivité, on peut distinguer les terrains suivants :

- . placages morainiques avec  $350 < \rho < 2000 \Omega.m$
- . schistes fissurés ou éboulis de schistes avec  $\rho < 300 \Omega.m$

Pratiquement, il est très difficile de distinguer le substratum très fissuré de l'éboulis de schistes. D'autre part, on ne rencontre pas de substratum sain avant 5 m, sauf peut être aux sondages 1 et 2 du PE 1.

Le PE 1 va du P42 au P52,5 entre les lacets 1 et 2 (Fig. 59). Entre les sondages 2 et 6, on observe une poche d'éboulis à grande résistivité, épaisse au maximum de 4 m. Du sondage 6 au sondage 8, le substratum de schistes fissurés remonte jusqu'à la surface. Entre les points 9 et 11, on note un nouveau placage de moraine et éboulis, puis une remontée du substratum fissuré entre les sondages 11 et 14. Au niveau des sondages 15 et 16, il existe un placage d'éboulis. Entre les sondages 17 et 22, on rencontre un éboulis de schistes puis un placage morainique.

Le PE II va du P60,5, jusqu'à P69 entre les lacets 2 et 3 Fig. 60. Du sondage 1 au sondage 16, on rencontre des dépôts morainiques sur une épaisseur pouvant atteindre 5 m avec des résistivités de l'ordre de 370 à 1300  $\Omega.m$ . Du sondage 16 au sondage 18, on trouve soit de l'éboulis de schiste, soit le substratum très fissuré, puis une nouvelle poche d'éboulis ou de moraines (épaisseur 2 m à 2,50 m).

Le profil PE III a été exécuté entre le P72,5 et le P76,5 (Fig. 61). Dans la partie N.E., on met en évidence un remplissage d'éboulis vraisemblablement sur 4 m d'épaisseur, ceci jusqu'au sondage 7 où le substratum remonte et est recouvert de 2,50 m d'éboulis de schistes.

Signalons que les schistes fissurés et l'éboulis de schiste ne peuvent pas être distingués par les données électriques.

### 2.2 - Prospection sismique

Les 14 sondages sismiques sont implantés en Fig. 58. D'après les mesures de vitesses de propagation des ondes longitudinales, on peut distinguer 3 catégories de terrains :

.../...

- . une couche de surface comprenant la terre végétale et la partie supérieure décomprimée des terrains de couverture. Cette couche d'épaisseur 1 m à 1,50 m se trouve pratiquement partout. Les vitesses de propagation des ondes varient de 300 à 500 m/s,
- . une couche intermédiaire représentant les éboulis et moraines avec des vitesses variant de 400 à 1400 m/s. Les vitesses les plus faibles sont vraisemblablement associées aux placages morainiques (400-700 m/s) ou aux éboulis meubles de schistes. Au contraire, les vitesses plus élevées peuvent correspondre aux éboulis plus ou moins compacts ou au substratum assez fissuré (800-1400 m/s),
- . le substratum formé de schistes et grès. Pour les parties gréseuses, on a  $V_l = 3000$  à  $3400$  m/s, tandis que pour les schistes, plus ou moins fissurés,  $V_l$  varie de 1100 à 2500 m/s (Fig. 61, 62 et 63).

Les sondages SS<sub>1</sub> et SS<sub>2</sub> ont été effectués au remblai du P73. Au SS<sub>1</sub> on repère 6 m d'épaisseur de remblai avec  $V_l = 430$  m/s, puis les terrains de couverture saturés avec  $V_l = 1240$  m/s. Au SS<sub>2</sub> on observe une épaisseur de 2,50 m de terrain de surface (ou de remblai) avec  $V_l = 400-500$  m/s. Vers 2,50 m on rencontre un interface avec  $V_l = 1430$  m/s qui peut représenter le substratum fissuré. Le substratum avec  $V_l = 2000$  m/s s'enfonce de 3 à 10 m vers le N.E.

Les sondages SS<sub>3</sub>, SS<sub>4</sub> et SS<sub>7</sub> ont été exécutés près du glissement du P45. Au SS<sub>3</sub> on met en évidence une faible épaisseur (0,50 à 1,00 m) de terrains glissés avec  $V_l = 400-500$  m/s. Puis on rencontre des schistes très fissurés ( $V_l = 1130$  m/s). Le substratum (grès vraisemblablement) se trouve entre 6 et 12 m de profondeur avec enfoncement vers l'Est. Au SS<sub>4</sub>, le substratum s'enfonce de 2 à 7 m vers l'Est. Au SS<sub>7</sub>, le substratum est situé à 10 m de profondeur.

Le sondage SS<sub>5</sub> a été réalisé sur un glissement dans le sens de la pente. Les matériaux glissés sont épais de 2 à 5 m et le substratum avec  $V_l = 1800$  m/s est formé de schistes fissurés.

Le sondage SS<sub>6</sub> montre également un substratum avec  $V_l = 1840$  m/s dont la surface est irrégulière (voir Fig. 62).

.../...

Enfin, le profil constitué par les sondages SS<sub>8</sub> à SS<sub>14</sub> (voir Fig. 63) montre une couche superficielle épaisse de 2 à 2,50 m avec  $V_l = 330$  à 550 m/s. Ensuite, on rencontre les éboulis et moraines avec  $V_l$  de 600 à 1080 m/s. (Mais les valeurs élevées de vitesses pour ces terrains peuvent être associées à des schistes fissurés). Le substratum est constitué surtout de schistes avec  $V_l$  de 1800 à 2360 m/s. Sa surface est irrégulière et se situe entre 5 et 7 m de profondeur, sauf une remontée vers le P69. Il est possible que les talwegs repérables dans le substratum soient des voies préférentielles d'écoulement de l'eau en profondeur.

### 3 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

#### 3.1 - Hydrogéologie

En ce qui concerne l'hydrogéologie, on observe un certain nombre de sources et suintements, surtout à l'intérieur de l'emprise de l'ancien glissement (voir Fig. 58). En dehors de ce glissement, on note deux talwegs (secs durant les observations faites en Avril, Juin et Septembre 1975). Ces talwegs doivent être le siège d'éboulements lors de gros orages, ou de fontes des neiges intenses. La température de la principale source de la zone étudiée est de 8,5°C.

#### 3.2 - Application sur le terrain et résultats obtenus

Les mesures thermiques ont été effectuées sur 2 profils PT<sub>1</sub> et PT<sub>2</sub>. Les points de mesure de la température du sol sont espacés de 5 m et parfois de 10 m, les mesures sont faites dans les éboulis au bord de la route. Dans les sondages effectués à la tarière, on a mesuré la température du sol à 50 cm de profondeur au moyen d'une sonde à thermocouple ayant une précision de 0,1°C. Les profils de température sont représentés sur la Fig. 66. Les éboulis n'étaient pas couverts par la végétation, sauf dans quelques points où l'on a remarqué des suintements. La température de l'air pendant la durée du travail a été mesurée. La figure 64 montre sa variation et son amplitude (6,8°C), donc en admettant  $m = 0,005$  unité C.G.S.  $T = 24$  h, on peut calculer l'influence de la variation journalière sur la température du sol à une profondeur de 50 cm, ce qui nous donne :

$$\alpha = 0,095^\circ\text{C qui est négligeable.}$$

.../...

a) Interprétation qualitative

On a dressé une carte d'isotherme (Fig. 65). D'après cette carte on peut distinguer les axes de circulation d'eau. Il y a 3 axes principaux qui correspondent bien aux mouvements observés en surface. Ceci prouve encore une fois qu'une des causes des désordres est l'existence de circulations d'eau dans les couches superficielles.

b) Interprétation quantitative

Le profil PT<sub>1</sub> a été exécuté entre P43,5 et P52,5. Il comprend 37 points de mesure de la température du sol. Sur la figure 66 on a représenté les valeurs de mesures de température.

Les anomalies de température sont situées au point 33 et au point 34. Une anomalie importante indiquant un passage d'eau à très faible profondeur est située entre les points 15 et 19, avec un maximum au point 17. Deux autres anomalies sont situées entre les points 8 et 10 et les points 3 et 4.

Le Tableau 37 donne l'interprétation quantitative de ces anomalies. Le fond thermique d'après les mesures est 14,85°C.

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	a (m)	h (m)	r (m)	h - r (m)
1	1,9	1,5	2,8	3,3	1,74	1,56
2	1,6	2,0	3,45	4,21	2,41	1,80
3	2,0	1,20	2,45	2,83	1,43	1,4
4	0,55	1,20	2,45	2,45	0,02	2,43
5	1,4	1,6	2,77	3,0	1,10	1,90

Tableau 37

Le profil PT<sub>2</sub> a été exécuté entre les P62 et P70,5 (Fig. 66). On note plusieurs anomalies thermiques, en particulier aux points 3, 4, aux points 11 et 12 (anomalie importante), aux point 16, aux points 20 à 23.

.../...

Ces trois dernières anomalies correspondent à des glissements observés en aval.

Les allures des anomalies montrent qu'elles correspondent à des chenaux en forme de cylindre.

Le Tableau 38 donne l'interprétation quantitative. Le fond thermique est 13,15°C

N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	a (m)	h (m)	r (m)	h - r (m)
1	0,8	1,2	2,25	2,27	0,32	1,95
2	0,82	1,0	2,2	2,22	0,30	1,9
3	1,65	2,2	3,80	6	4,15	1,35
4	1,0	1,80	2,4	2,5	0,7	1,8
5	1,5	2,20	3,8	5,9	4,5	1,4

Tableau 38

4 - CONCLUSIONS

D'après ces trois méthodes géophysiques, nous avons mis en évidence les éléments suivants :

- les zones d'écoulement d'eau ainsi que la localisation des circulations souterraines qui correspondent aux glissements existants et confirment le rôle essentiel de la circulation d'eau dans cette étude. La profondeur de ces circulations est en général de 1,50 à 2 m.
- On a déterminé par la méthode électrique les poches d'éboulis et les placages morainiques, schistes fissurés ou éboulis de schistes.
- A l'aide des reconnaissances sismiques et en mesurant la vitesse de propagation des ondes longitudinales, on a déterminé l'épaisseur de la terre végétale et celle de la partie supérieure décomprimée des terrains de couverture (1 - 1,5 m), la couche intermédiaire constituée par les éboulis et les moraines ( $V_1 = 400$  à  $1400$  m/s) et enfin la profondeur du substratum formé de schistes et grès ( $V_1 = 1100$  à  $2500$  m/s).



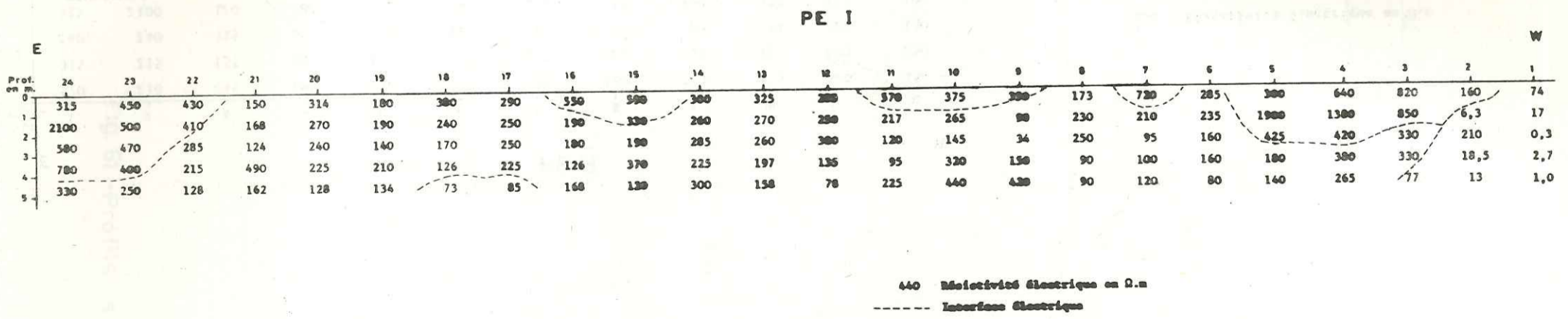
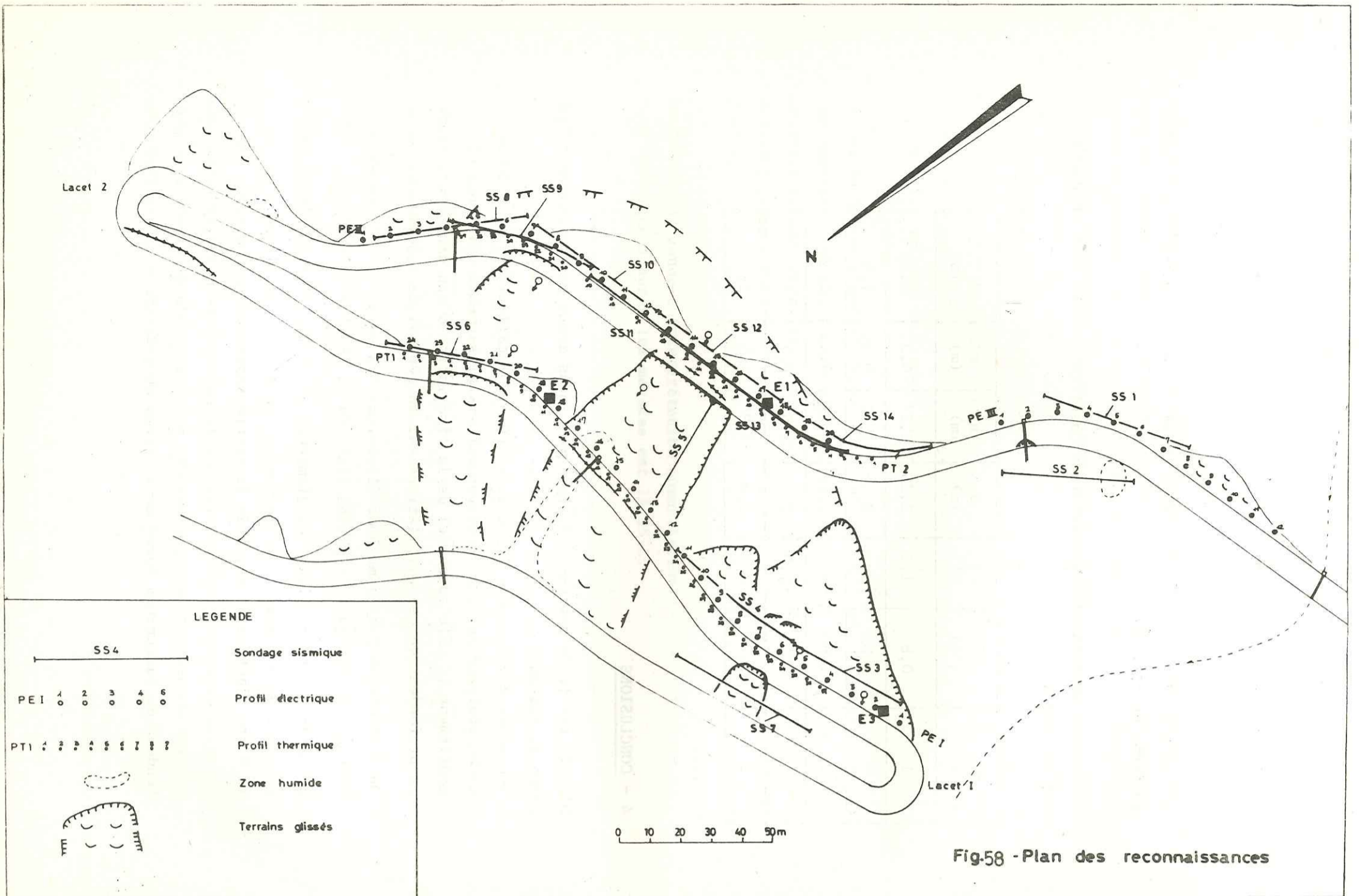
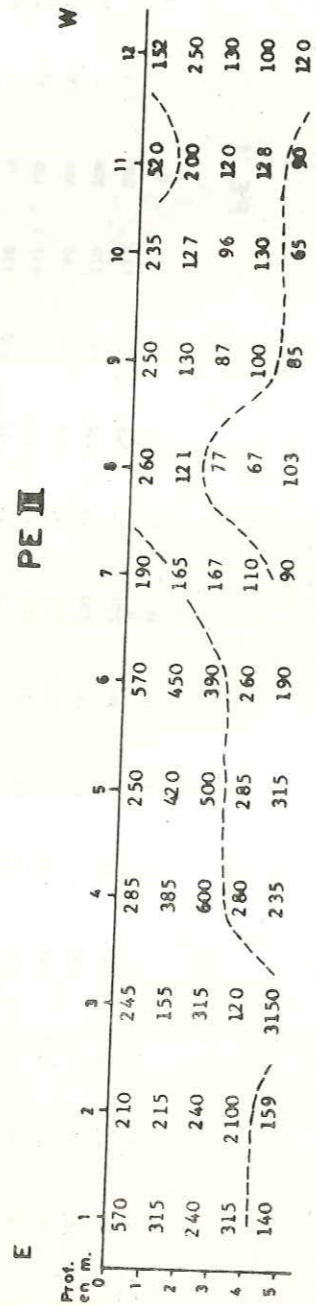
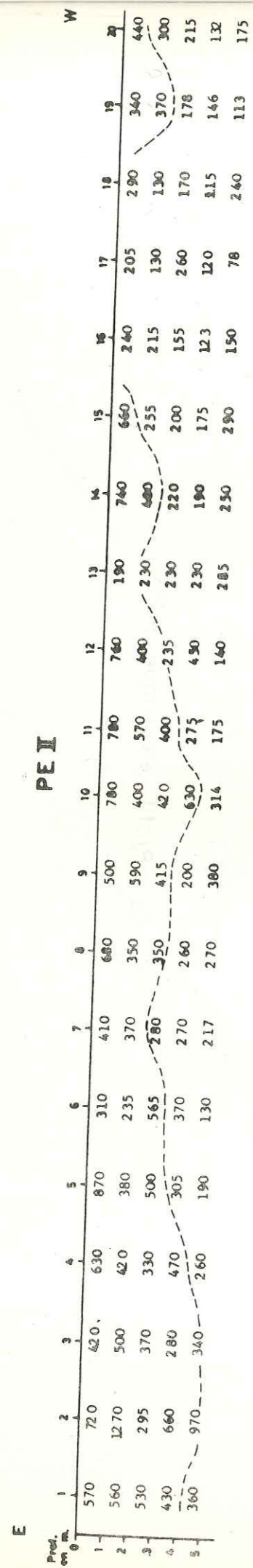


Fig. 59 - Profil électrique PE I



130 Résistivité électrique en  $\Omega \cdot m$   
 --- Interface électrique

Fig. 60 - Profils électriques PE I et PE II

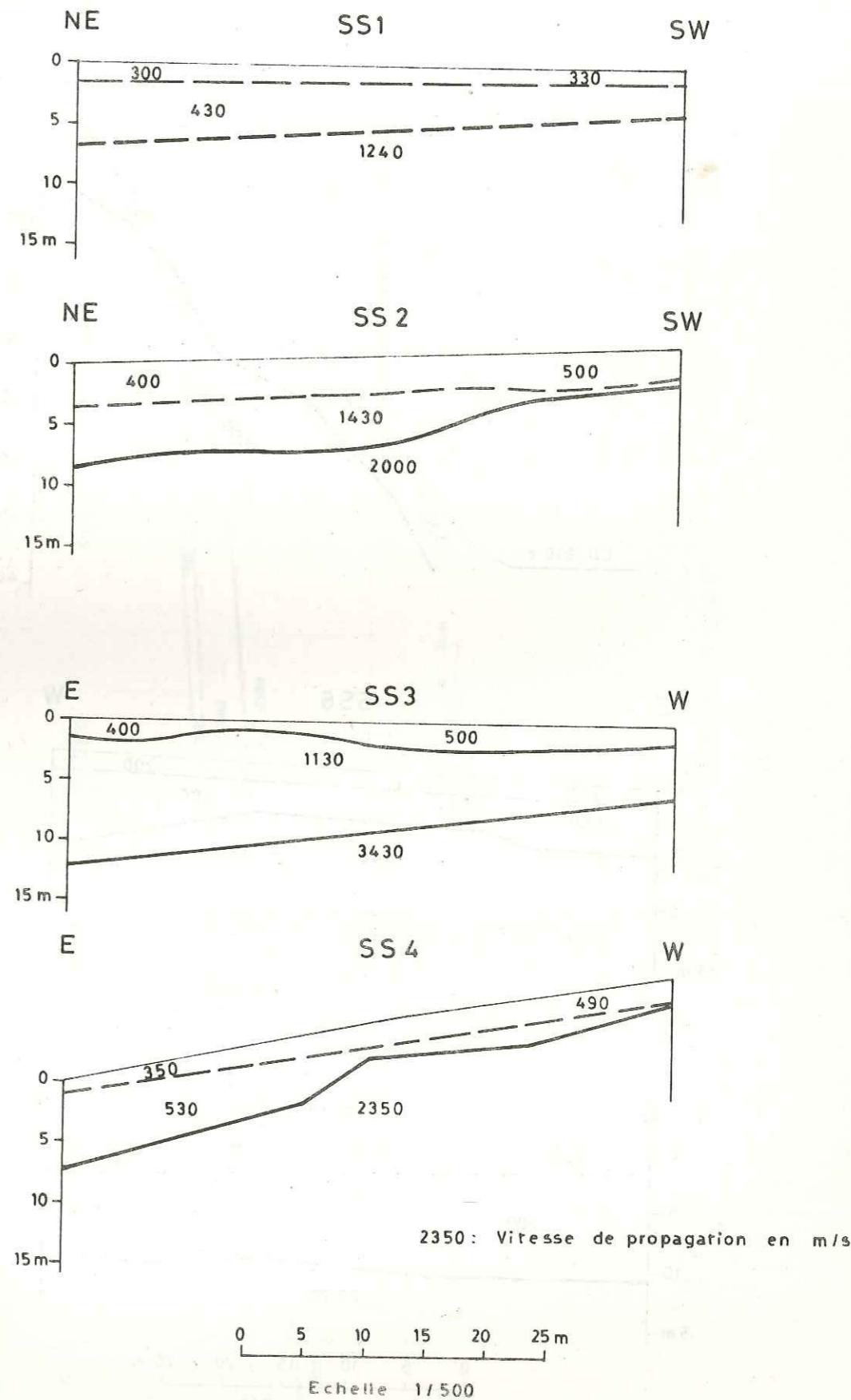


Fig. 61 - Profils sismiques

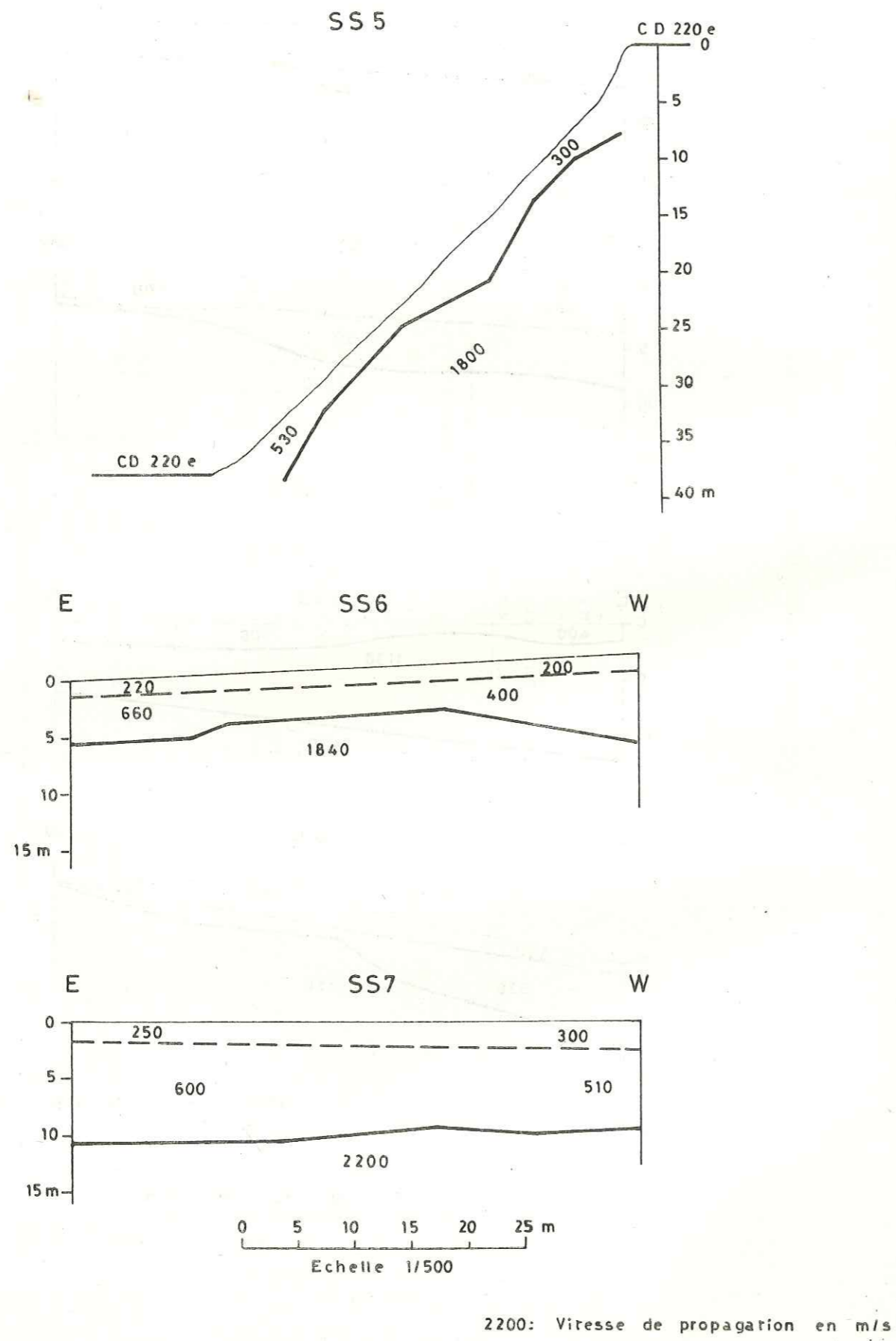


Fig. 62 - Profils sismiques

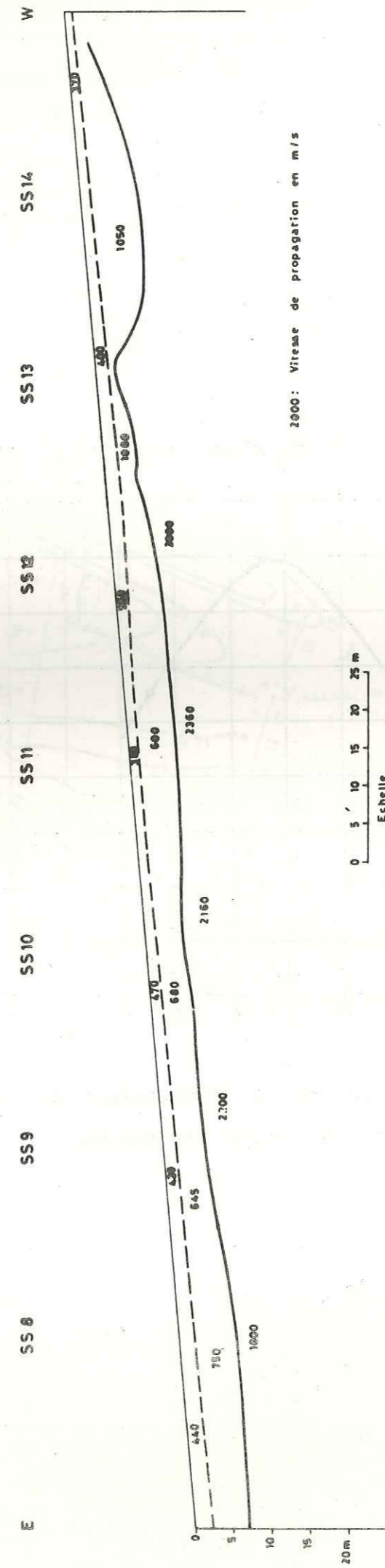


Fig. 63 - Profils sismiques

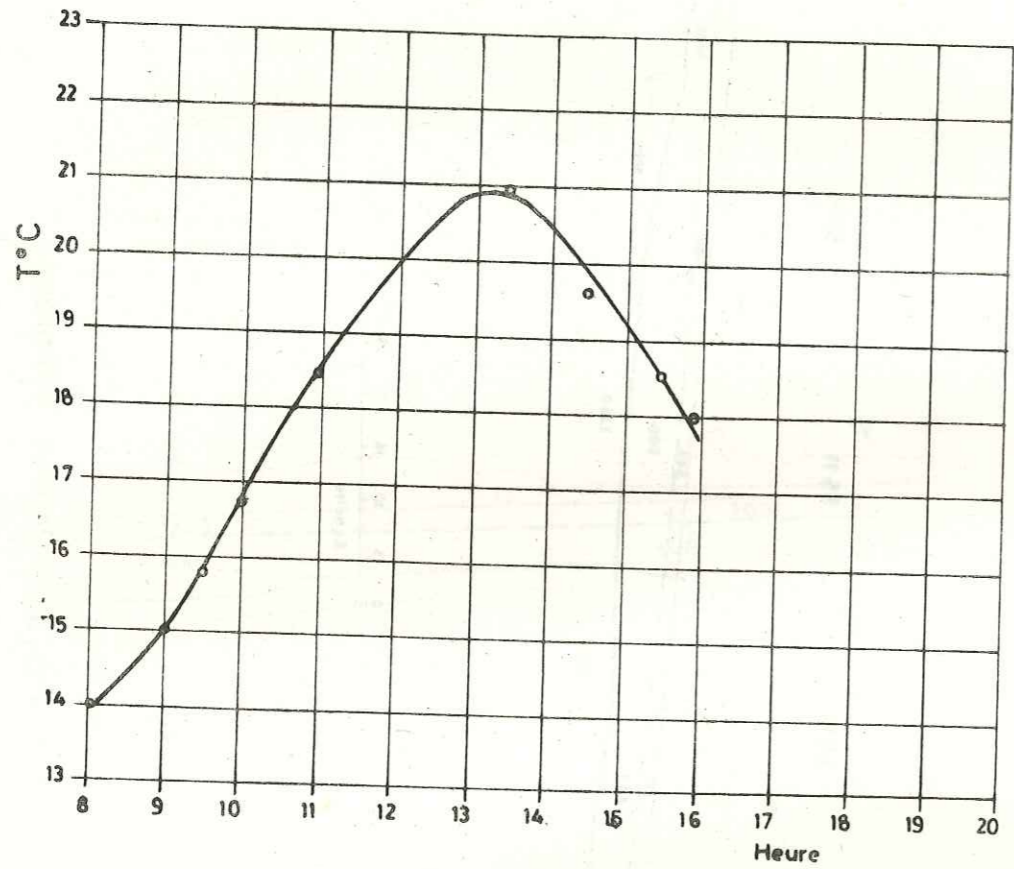


Fig. 64 - Variation de la température de l'air  
Pendant la durée de travail

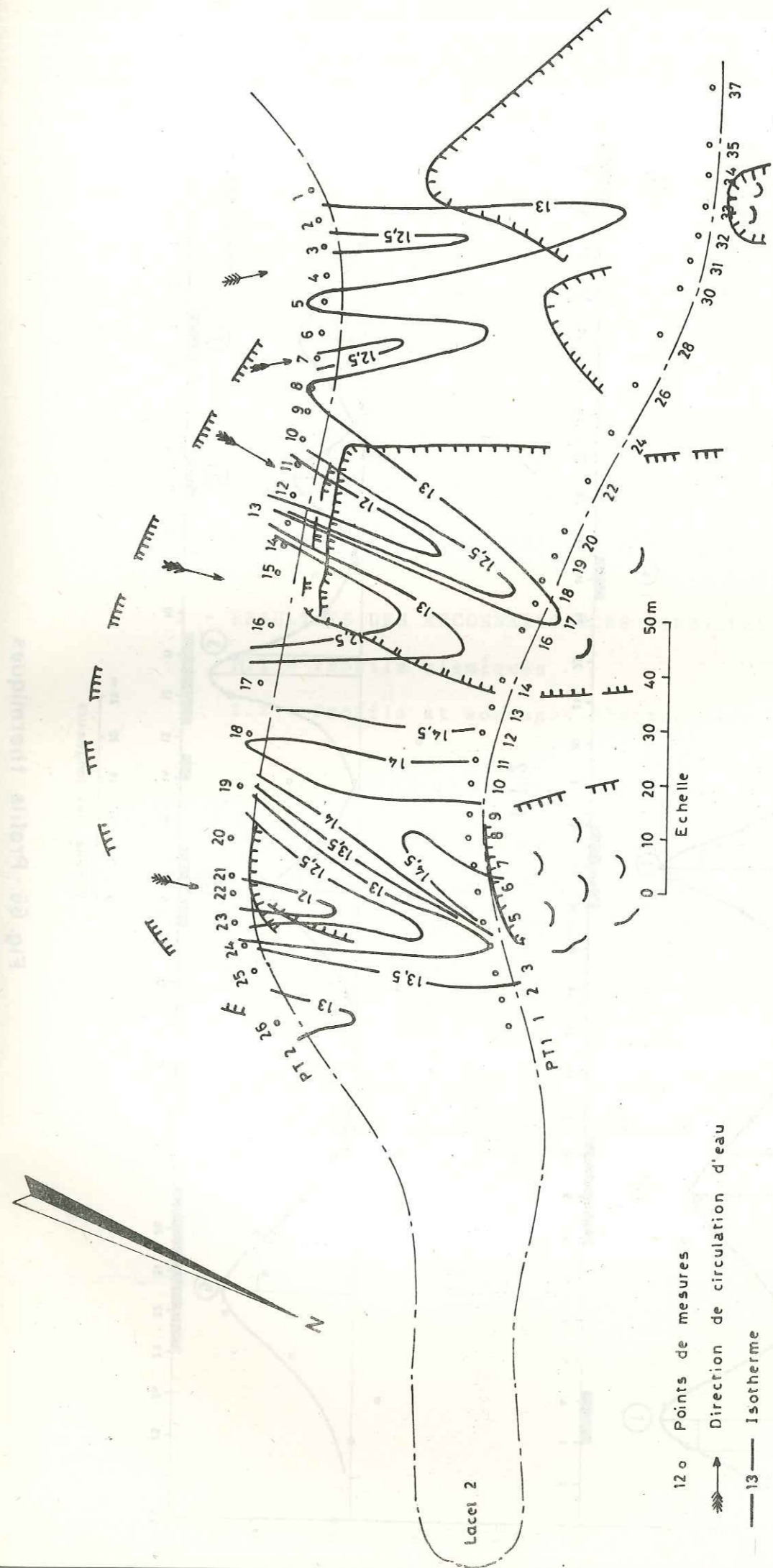


Fig. 65 - Carte des isothermes du sol

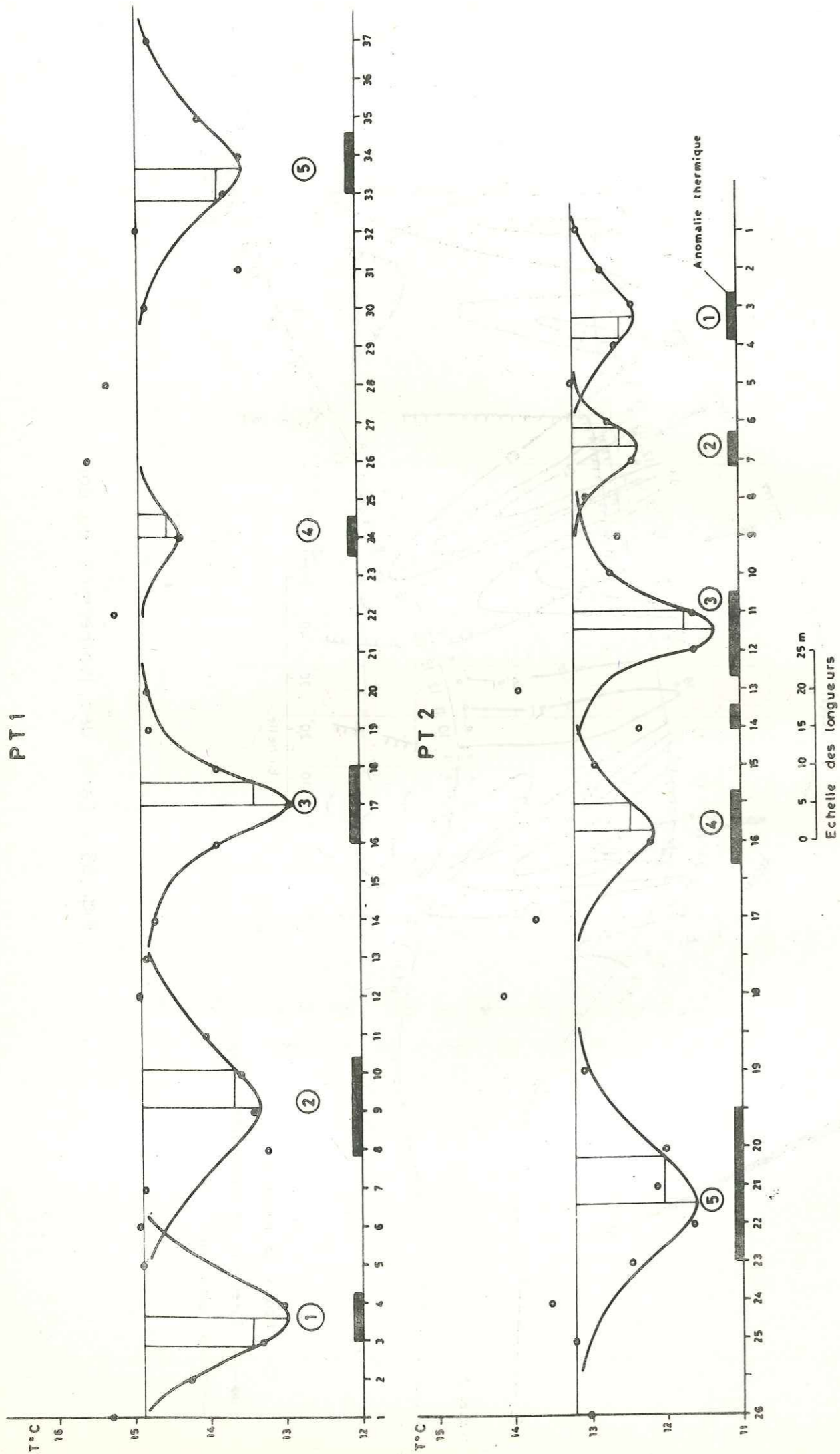


Fig. 66 - Profils thermiques

EXEMPLE V

INTRODUCTION

- 1 - GEOLOGIE DU SITE D'APRES UN SONDAGE MECANIQUE
- 2 - RESULTATS DES RECONNAISSANCES SISMIQUES
  - 2.1 - Profils sismiques
  - 2.2 - Profils et sondages électriques
- 3 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE
  - 3.1 - Interprétation qualitative
  - 3.2 - Interprétation quantitative
- 4 - CONCLUSIONS

## INTRODUCTION

Cette étude a été effectuée sur un ancien glissement pour analyser les causes des mouvements du sol qui menacent une route à 30 km au Sud de Grenoble. Ce glissement existe au moins depuis 1948 car il est très visible sur les photographies aériennes de cette époque.

En Novembre 1973, on a effectué une campagne d'essais sismiques et électriques pour préciser d'une part la position du substratum à l'amont du glissement et pour déceler si possible les circulations d'eau.

Elle a consisté en :

- . 16 sondages électriques avec  $\frac{AB}{3} = 30$  m et 18 sondages sismiques de 50 m de longueur. Mais l'interprétation des sondages électriques n'a pas permis d'estimer la profondeur du substratum pour les raisons suivantes :
  - les résistivités du substratum et des terrains de couverture sont toutes très hétérogènes,
  - les valeurs de résistivité du substratum et des terrains de couverture varient entre 30 et 200  $\Omega.m$  et sont du même ordre de grandeur.
- . Les sondages sismiques ont permis assez facilement de repérer le niveau d'eau, mais n'ont pas pu repérer avec autant de certitude la position du substratum car :
  - les vitesses de propagation des ondes longitudinales dans les terrains de couverture parfaitement saturés et dans le substratum sont assez proches (1300-1700 et 2400-2200 m/s),
  - les profondeurs des interfaces correspondant au niveau de saturation parfaite et au substratum sont assez voisines, il en résulte donc une certaine incertitude quant à la position du substratum.
- . Un sondage mécanique a été réalisé en Avril 1975 entre la route et la niche d'arrachement (Fig. 67).

Les résultats de ce sondage de reconnaissance ont été complétés par d'autres travaux destinés à préciser au niveau du glissement actuel la profondeur du substratum rocheux, la nature des terrains de couverture et les axes de circulations d'eau. Ces travaux réalisés en 1975-76 comprennent :

- . 42 sondages électriques à 5 mesures ( $\frac{AB}{3} = 5$  m) disposés sur 3 profils,
- . 3 sondages électriques à 17 mesures ( $\frac{AB}{3} = 24$  m)
- . 3 profils sismiques de 50 m de long,
- . 73 points de mesures thermiques disposés sur 4 profils.

L'interprétation de toutes ces données permet ensuite d'estimer les propriétés géotechniques des terrains en glissement.

### 1 - GEOLOGIE DU SITE D'APRES UN SONDAGE MECANIQUE

Comme nous l'avons vu plus haut, un sondage mécanique de reconnaissance a été réalisé en Avril 1975. Sa coupe est donnée en Fig. 68. Sous la terre végétale, on rencontre des couches peu argileuses jusqu'à 6,30 m contenant des galets arrondis. Il s'agit vraisemblablement d'anciens dépôts torrentiels. Jusqu'à 11,90 m, les terrains sont constitués d'une argile silteuse gris-noir à galets et graviers, sauf un passage plus perméable de 11,90 à 13,30 m. De 13,30 à 23,00 m (fond), on rencontre une argile silteuse grise compacte à galets et graviers. Certains galets atteignent 250 mm. Ils sont essentiellement formés de calcaires tithoniques et kimméridgiens de la série sus-jacente.

Le sondage a été équipé de 2 piézomètres séparés par un bouchon d'argile ciment. On constate donc que le "substratum" repéré par la sismique avec  $V_1 = 2500$  m/s est constitué de dépôts glaciaires consolidés. Ce sont eux qui affleurent en falaise verticale en contrebas de l'ancien tracé de la route.

Quant au substratum rocheux, il est plus profond que 23 m à l'endroit du sondage. Pour estimer sa position, on peut utiliser les résultats des sondages électriques des précédentes reconnaissances. On remarque en effet que les sondages SE<sub>10</sub>, SE<sub>11</sub>, SE<sub>12</sub>, SE<sub>13</sub> et SE<sub>14</sub> indiquent des terrains à 30 Ω.m entre 13 et 22 m de profondeur. Cette résistivité constante peut indiquer qu'on rencontre là les marnes schisteuses des Terres Noires.

Dans la partie Sud, le substratum est vraisemblablement formé de calcaires marneux et marnes qui donnent des résistivités plus élevées mais plus hétérogènes. Il est donc difficile de repérer le substratum à partir des données électriques, en partie Sud. Néanmoins, on peut extrapoler dans cette partie la position du substratum d'après les données en partie N

.../...

(Fig. 70), ce qui donne au niveau du sondage une profondeur vraisemblable de 30 m.

La combe dans laquelle se produisent actuellement les mouvements est donc due à un ancien glissement survenu lors du retrait des glaciers. La surface de glissement ancienne est située près du substratum rocheux. La zone traversée par la route est formée des résidus de ce glissement. Ces résidus comprennent à la base des dépôts glaciaires : argiles silteuses à galets et blocs consolidés, et à la partie supérieure des terrains à perméabilité hétérogène qui sont produits par le remaniement des dépôts glaciaires par des torrents.

Il semble néanmoins que la perméabilité verticale ne soit pas trop faible car les deux niveaux piézométriques montrent les mêmes variations (Fig. 69).

### 2 - RESULTATS DES RECONNAISSANCES SISMIQUES

#### 2.1 - Profils sismiques SS<sub>1</sub>, SS<sub>2</sub>, SS<sub>3</sub>

Les 3 profils SS<sub>1</sub>, SS<sub>2</sub> et SS<sub>3</sub> sont implantés en Fig. 67. Le profil SS<sub>2</sub> n'est pas interprétable à cause des irrégularités de la surface topographique. Néanmoins, à son extrémité Sud, il permet de mettre en évidence à 6 m de profondeur le substratum rocheux ( $V_1 = 3500$  m/s).

Le profil SS<sub>3</sub> montre que la couche de surface avec  $V_1 = 350-450$  m/s est épaisse de 1 à 2 m. En-dessous, on rencontre des terrains avec  $V_1 = 900$  à 1900 m/s pouvant correspondre aux dépôts glaciaires consolidés. Le substratum rocheux avec  $V_1 = 3500$  m/s est situé à 10 m de profondeur.

Le profil SS<sub>1</sub>, exécuté en contrebas de la niche d'arrachement et parallèlement à celle-ci, montre un interface à 2000 m/s à une profondeur variable de 1,5 à 4,5 m (voir Fig. 71). Ceci représente le toit des dépôts glaciaires consolidés. Au-dessus on rencontre un terrain avec  $V_1 = 1050$  m/s représentant des éboulis et dépôts torrentiels peu consolidés et vraisemblablement saturés. Il faut remarquer que la remontée du toit des dépôts glaciaires consolidés correspond aux venues d'eau visibles sur le terrain.

.../...

### 2.2 - Profils et sondages électriques

Le but de ces reconnaissances était de préciser les hétérogénéités existant dans les cinq premiers mètres. D'après la Fig. 72, on constate que ces résistivités sont relativement homogènes (de 80 à 100 Ω.m) sauf au PE<sub>2</sub> entre les sondages 23 et 32 où on observe une zone où la résistivité varie de 100 à 200 Ω.m. Le profil PE<sub>3</sub> exécuté sur le glissement montre que les résistivités sont plus importantes (ρ = 150 Ω.m) dans le glissement. Ceci est lié à la perméabilité plus importante dans les terrains en mouvement. Sur les sondages SE<sub>1</sub> et SE<sub>2</sub> (Fig. 73) on remarque, vers 8-10 m de profondeur, une couche très argileuse avec ρ = 30 Ω.m, alors qu'au sondage SE<sub>3</sub> cette couche est absente.

### 3 - APPLICATION DE LA METHODE THERMIQUE

On a réalisé 4 profils thermiques représentant 73 points de mesure de la température du sol à 50 cm de profondeur. Cette étude a été faite au mois de Janvier (phase froide) et les anomalies sont les points à température très élevée. Les points de mesure sont espacés de 5 m et parfois de 10 m. Ils sont implantés comme indiqué sur la Fig. 67. Les mesures sont faites avec un thermocouple à une précision de 0,1°C et les résultats sont représentés sur les Fig. 74 et 75.

Toute la zone étudiée était couverte de prairies de manière uniforme. Par conséquent, on n'a pas à introduire de correction de couverture ; en ce qui concerne la variation journalière, la correction est par ailleurs négligeable parce que la mesure de la température de l'air montre une amplitude de 5,6°C qui n'a pas d'influence sensible à une profondeur de 50 cm.

Sur le profil 3 fait en contrebas du glissement, on peut remarquer plusieurs suintements et aussi une source dont la température était de 10°C. Le fond thermique, d'après les coupes, est de 2,2°C.

#### 3.1 - Interprétation qualitative

D'après ces 4 profils faits sur la zone de glissement, on a dressé une carte d'isothermes (Fig. 74), on peut en conclure que l'eau coule sur une très large surface, ce qui est mis en évidence par plusieurs suin-

.../...

tements en contrebas du glissement. Cette carte montre la correspondance entre l'écoulement de l'eau et les mouvements du sol et confirme le rôle essentiel de l'eau dans ce glissement.

#### 3.2 - Interprétation quantitative

Nous avons interprété PT<sub>2</sub> et PT<sub>4</sub>, car le profil PT<sub>3</sub> est exécuté en contrebas du glissement où nous avons remarqué plusieurs suintements à 20 cm de profondeur. Le profil PT<sub>1</sub> est commun avec le profil PT<sub>2</sub> jusqu'au point 37.

##### Profil PT<sub>2</sub>

Sur ce profil, on a effectué 28 mesures de la température du sol ; entre les points 43 et 59 les mesures ont donné des valeurs très élevées et la courbe montre un grand palier. Dans la partie W on remarque une anomalie qui correspond à une source qui se trouve en contrebas du glissement. La mesure 40 est faite à côté du sondage mécanique. La profondeur calculée pour le niveau d'eau est de 3,5 m à 4 m, ce qui montre une différence de 10 à 15 pour cent avec celle indiquée par les piézomètres du sondage mécanique. Le Tableau 39 donne l'interprétation quantitative. Le fond thermique, d'après les mesures, est de 2,2°C.

N° des anomalies	Δθ (°C)	x <sub>i</sub> (m)	a (m)	h (m)	r (m)	h - r (m)	(h - r)K (m)
1	0,9	2	3,45	3,49	0,55	2,94≈3	-
2	1,2	5	8,66	13,63	10,52	3,11	3,73

Tableau 39

##### Profil PT<sub>4</sub>

Sur ce profil, nous avons effectué 30 mesures de la température du sol et nous avons distingué deux anomalies, l'une à l'Est du profil entre les points 2 et 7, qui correspond à une circulation assez profonde et l'autre à partir du point 11, jusqu'au point 23, qui correspond à une conduite très étendue. Le Tableau 40 donne l'interprétation quantitative pour ce profil.

.../...



N° des anomalies	$\Delta\theta$ (°C)	$x_i$ (m)	a (m)	h (m)	r (m)	h - r (m)	(h - r) K (m)
1	0,45	2,5	4,3	4,3	0,10	4,20	5
2	1,7	5	8,65	17,88	15,64	2,29	2,7

Tableau 40

Le profil PT<sub>4</sub> est exécuté en amont de la route, l'anomalie observée sur ce profil est plus grande que celle du profil PT<sub>2</sub>, ce qui veut dire que l'eau dans la partie amont du glissement est moins profonde que le long du profil PT<sub>2</sub>. On peut interpréter ce fait comme la conséquence du drainage réalisé par une tranchée en bordure de la route et qui draine une partie de l'eau de telle façon que le niveau de l'eau à la partie amont de la route se trouve relevé.

#### 4 - CONCLUSIONS

Les reconnaissances géophysiques effectuées sur ce glissement ont permis de mettre en évidence l'existence de circulations d'eau très étendues et d'ailleurs confirmées par les suintements en contrebas du glissement. Cet exemple est une vérification de l'application de la méthode thermique. D'après le sondage mécanique fait en amont du glissement, on connaît le niveau de l'eau et ses fluctuations au cours de l'année. La différence entre le niveau de l'eau estimé par la méthode thermique et celui mesuré par le sondage mécanique est de 10-15 %.

Le sondage sismique SS<sub>3</sub> fait en contrebas du glissement a mis en évidence l'existence d'un rocher avec  $V_l = 3500$  m/s à 10 m de profondeur et le sondage SS<sub>1</sub> montre le toit des dépôts glaciaires consolidés.

Les sondages électriques sur les profils PE<sub>II</sub> et PE<sub>III</sub> montrent des zones où la résistance est assez forte (100 à 200  $\Omega$ .m). Ces zones ont une perméabilité importante, elles correspondent aux endroits où nous avons remarqué des anomalies thermiques.

.../...

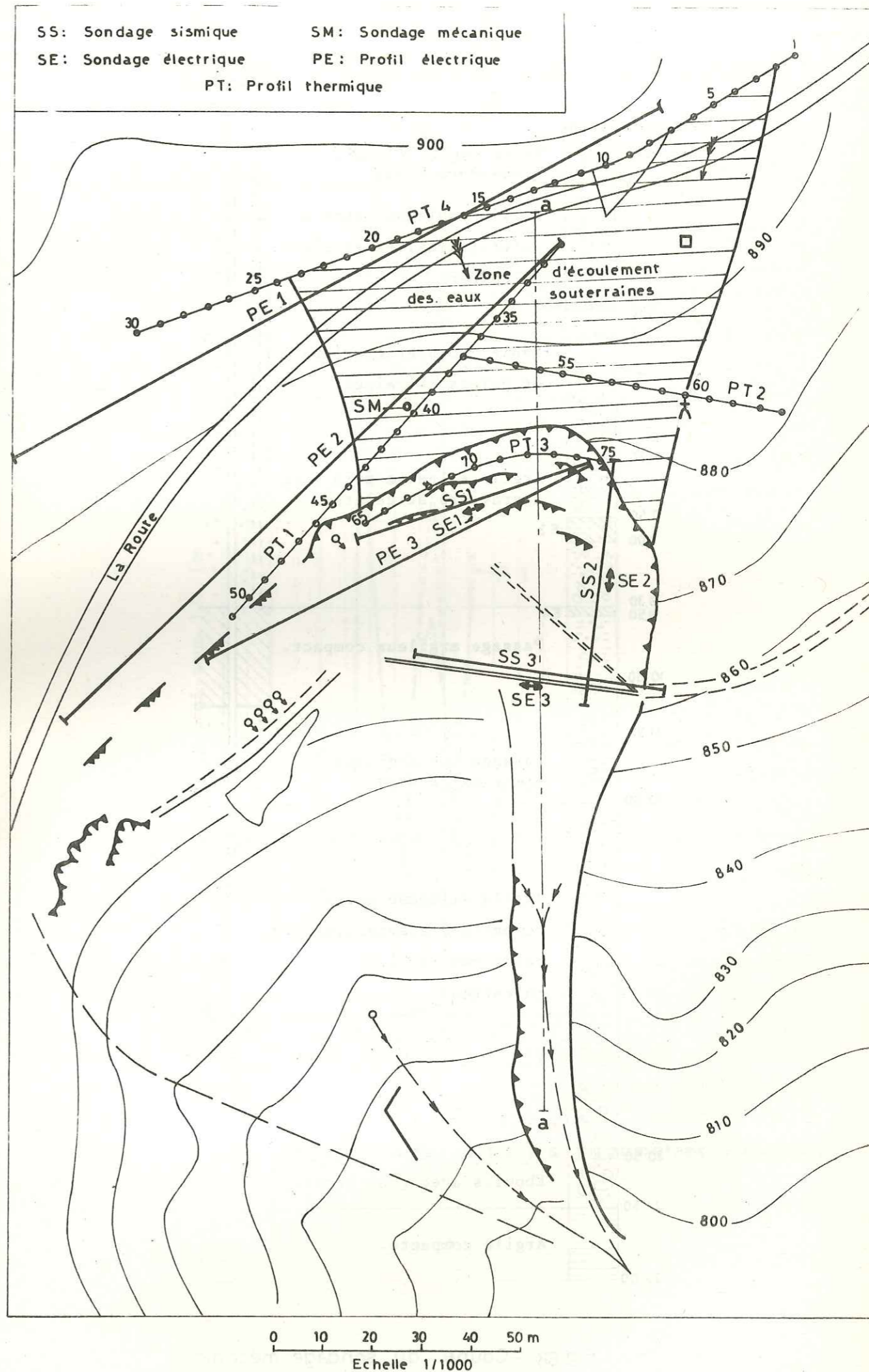


Fig. 67 - Implantation des reconnaissances

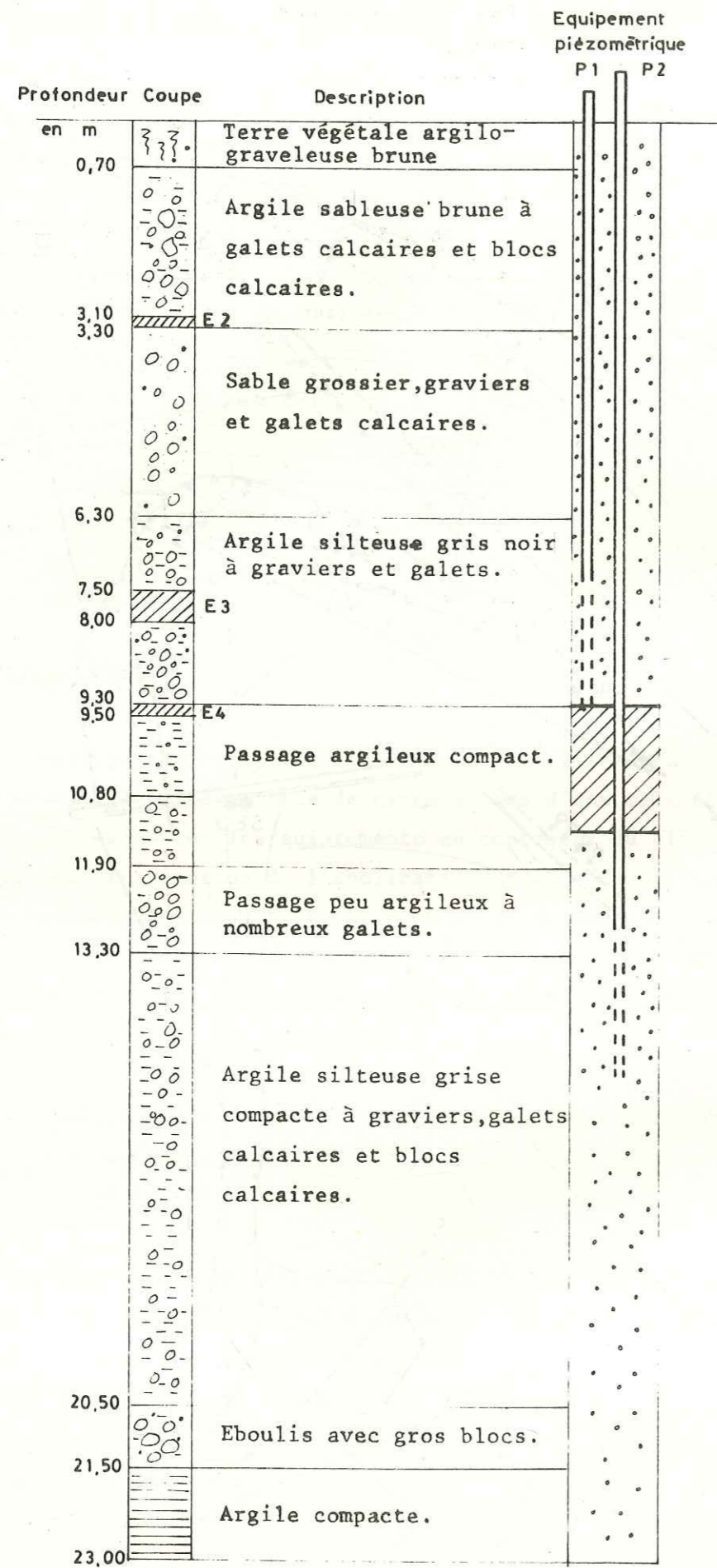


Fig.68 - Coupe du sondage mécanique

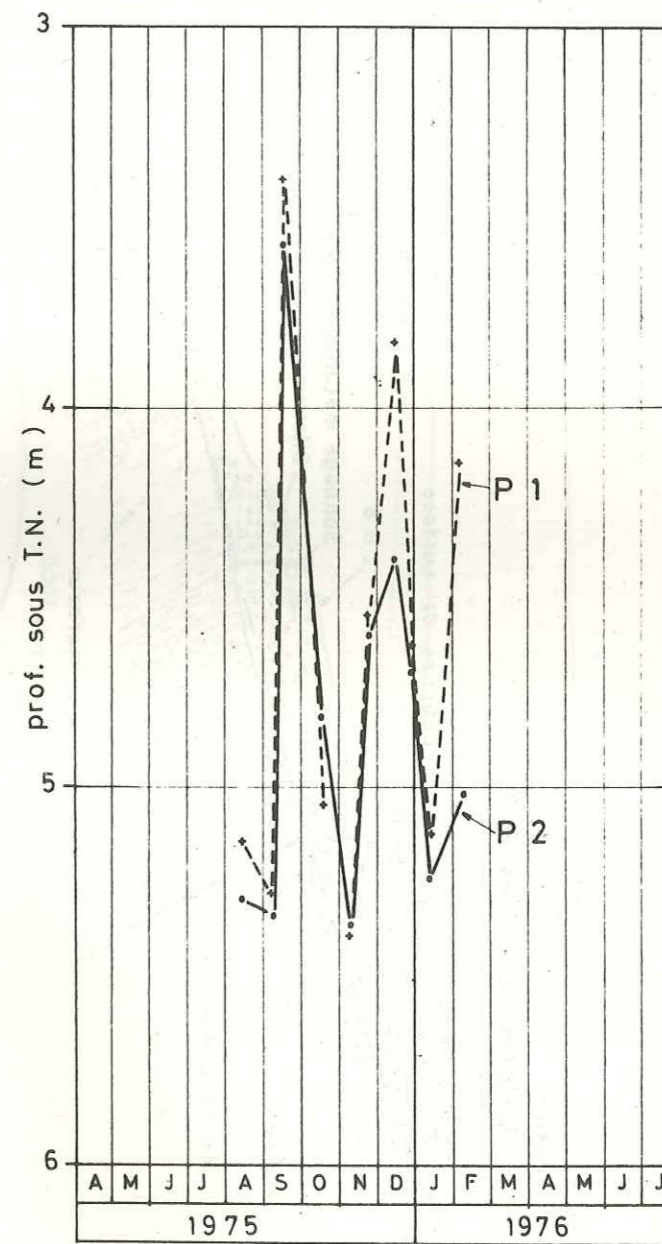


Fig.69 - Niveaux d'eau dans les piézomètres P1 et P2

Fig. 70 - Coupe géologique a a

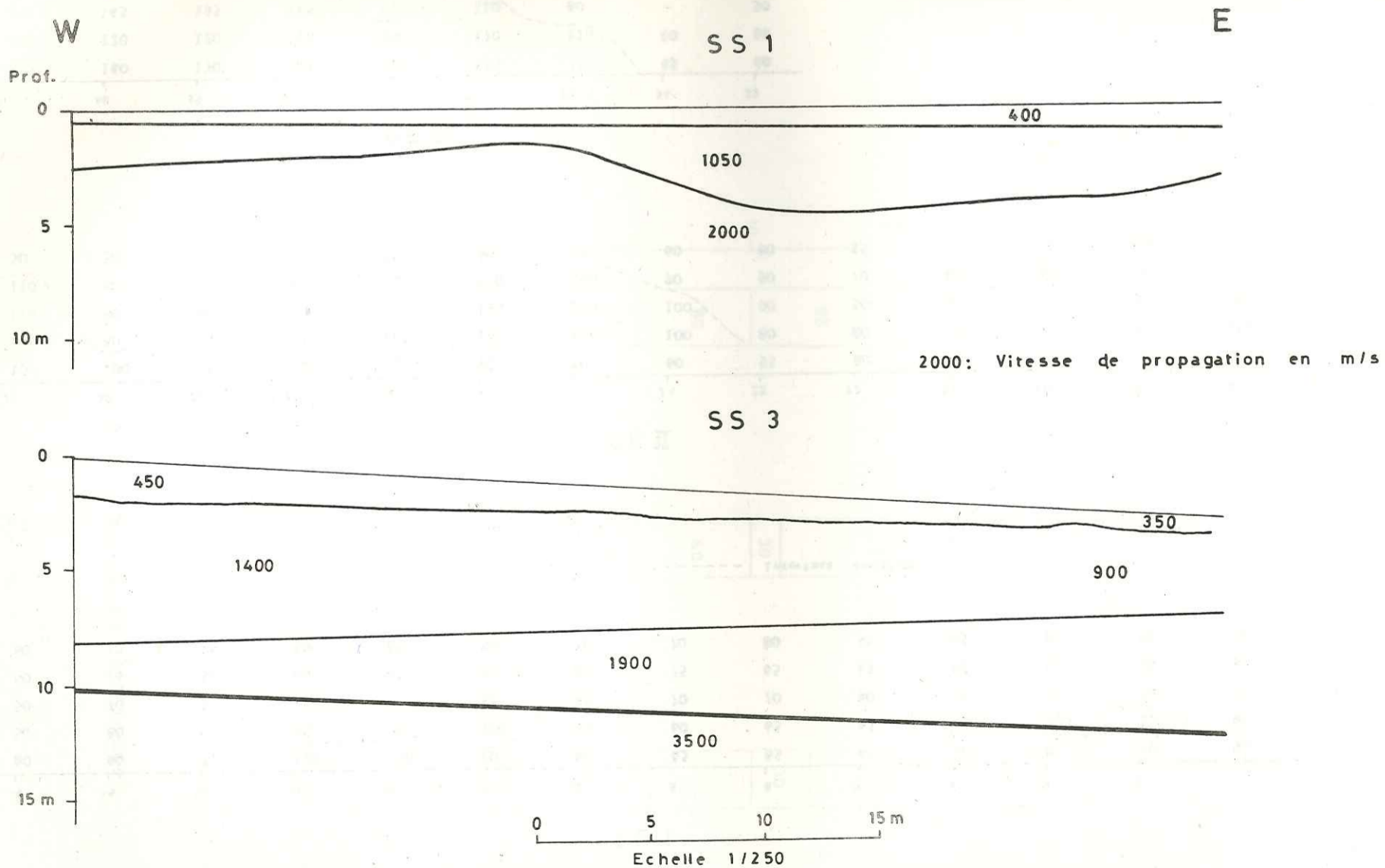
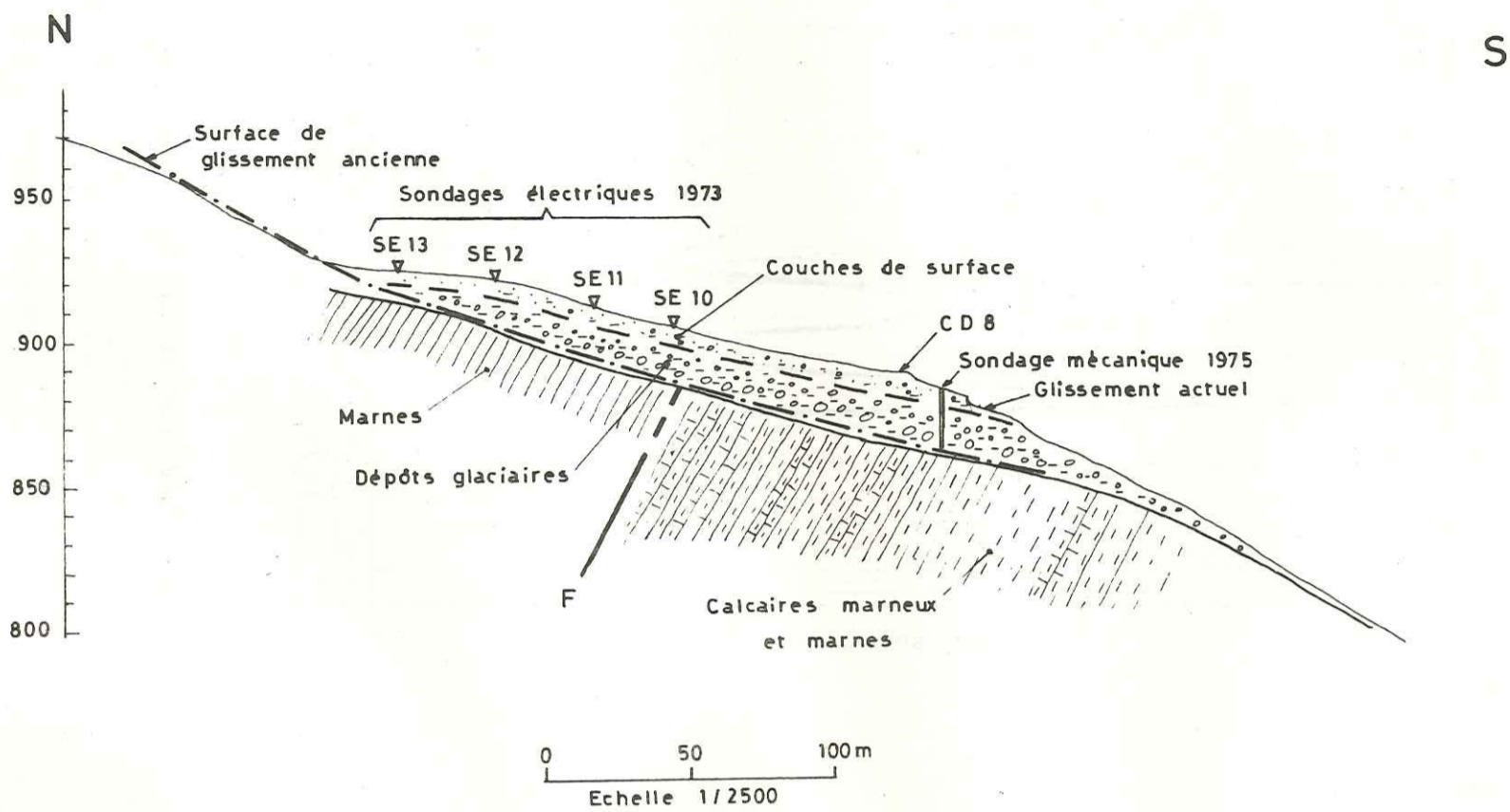


Fig. 71 - Profils sismiques

Fig. 72 - Profils électriques (résistivité en  $\Omega \cdot m$ )

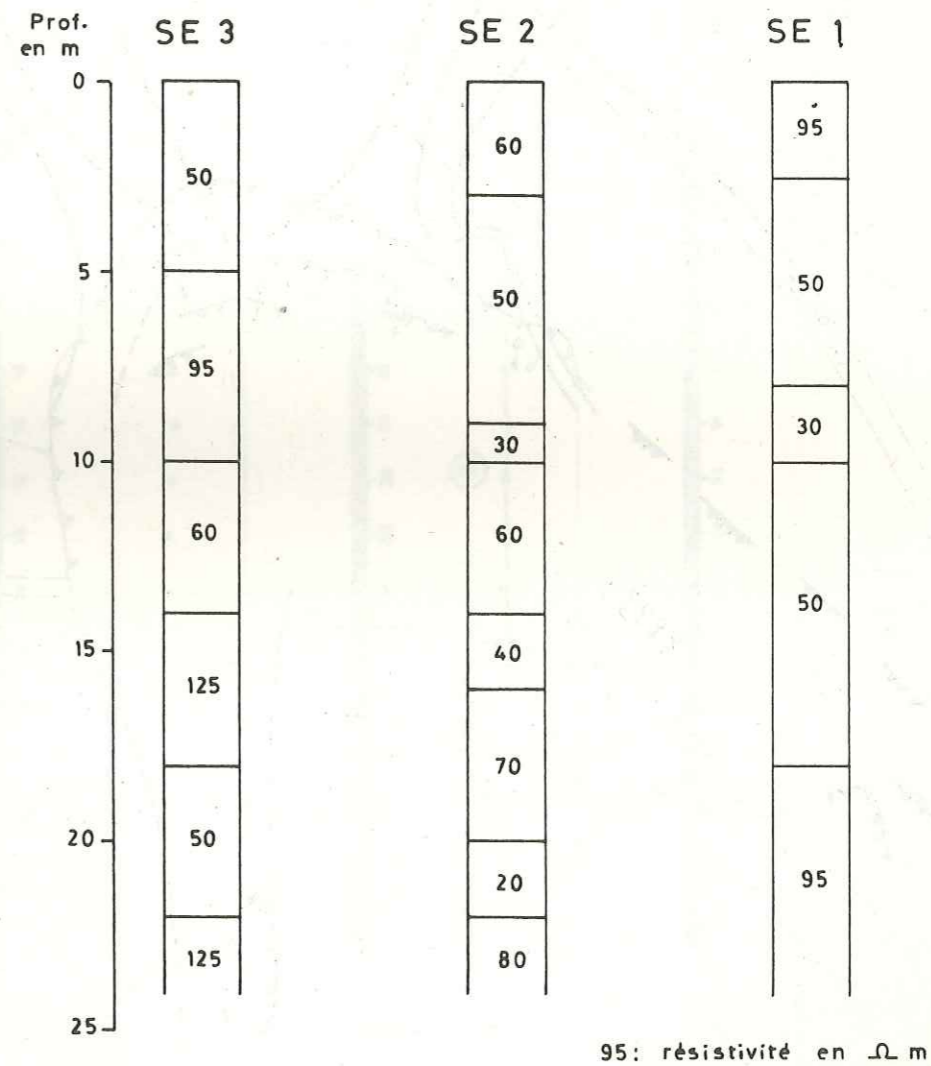
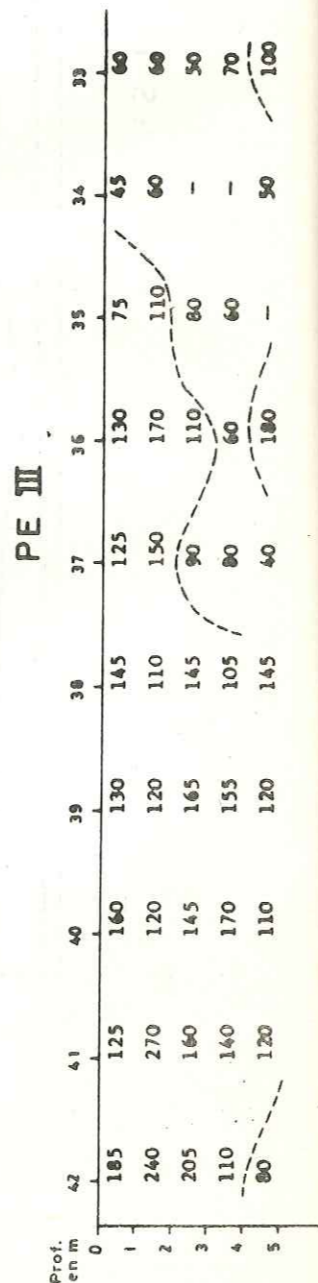
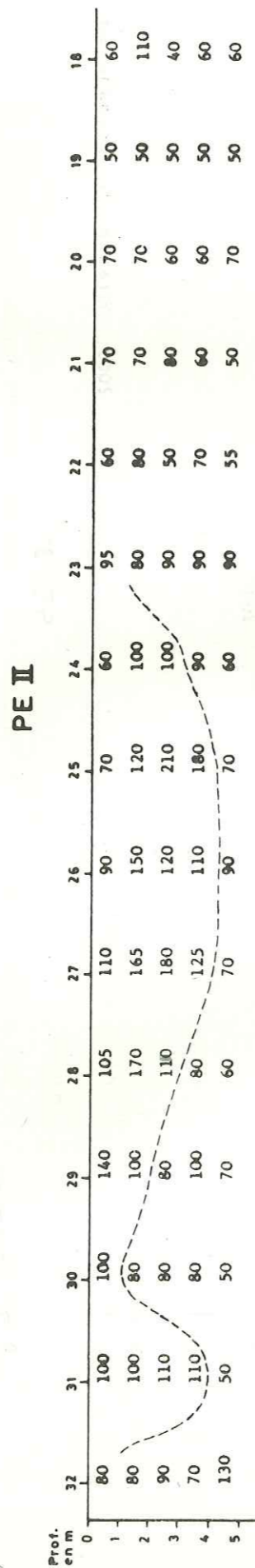
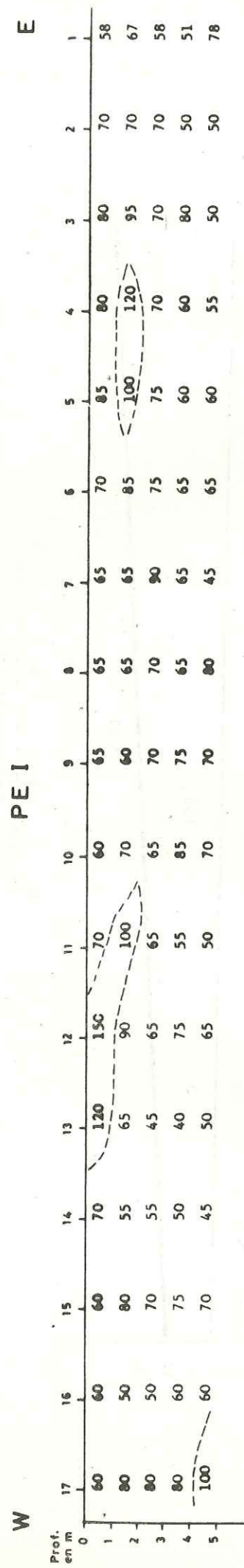
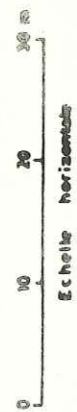


Fig. 73 - Sondages électriques

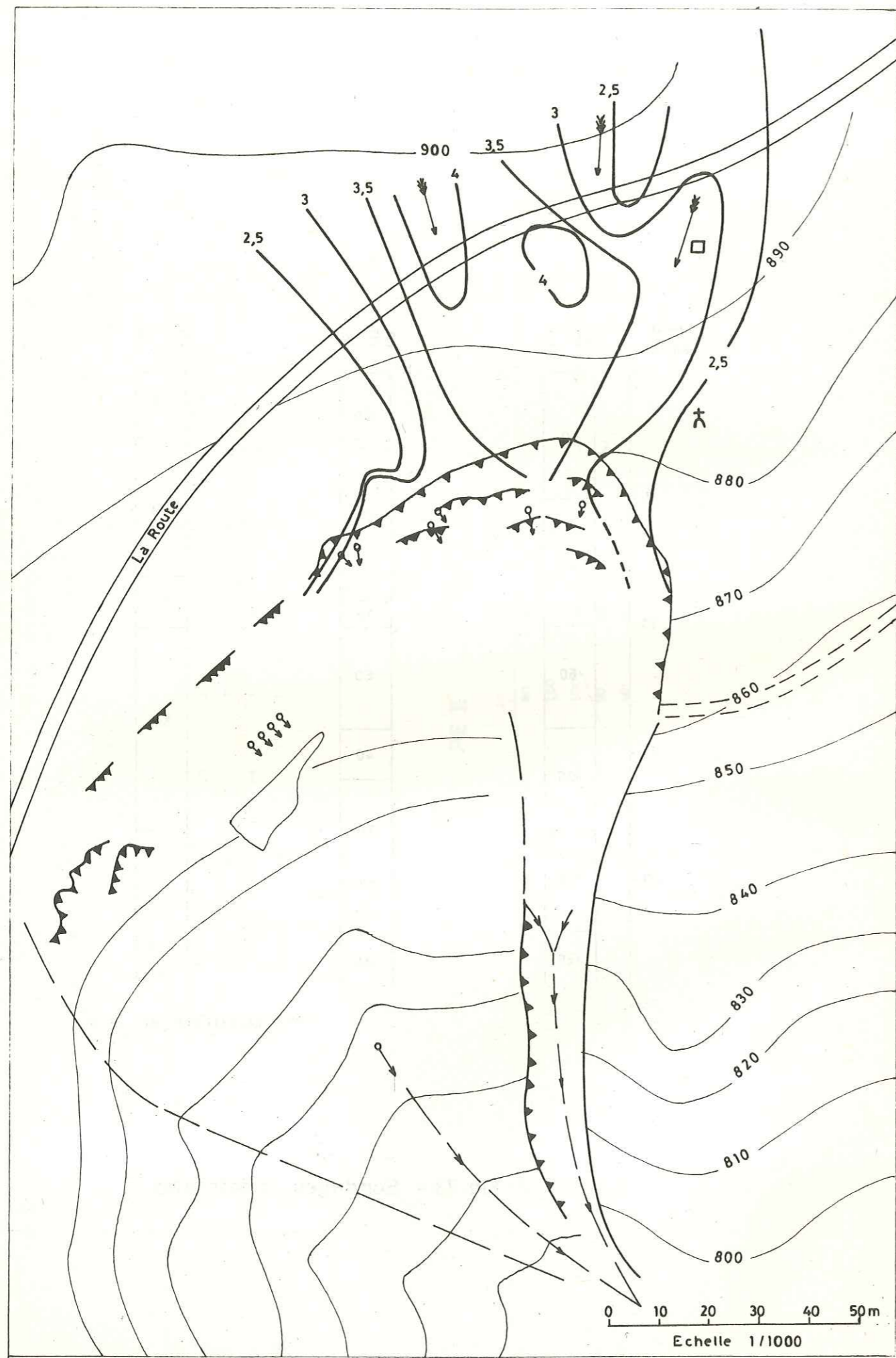


Fig. 74 - Carte des isothermes du sol

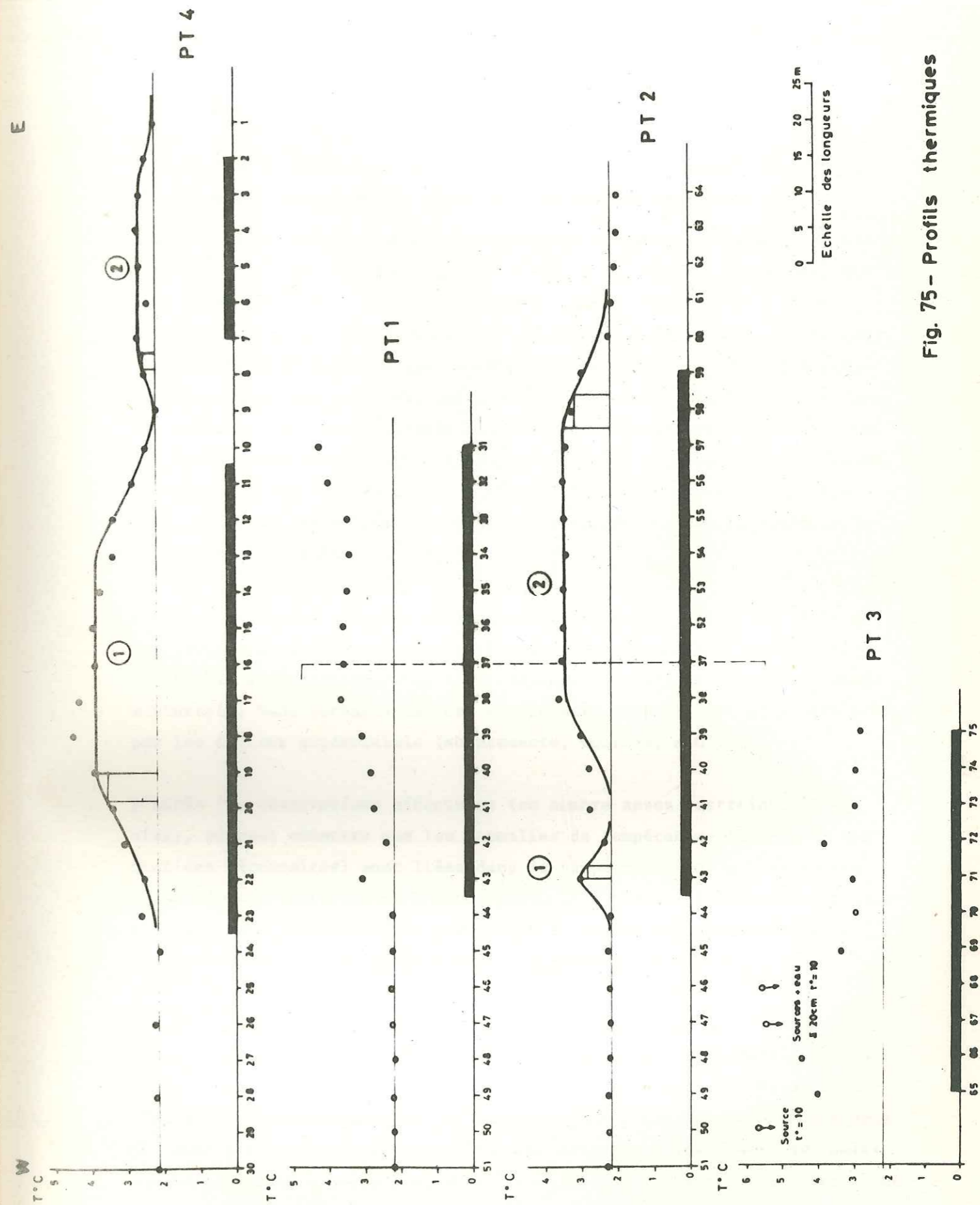


Fig. 75 - Profils thermiques

REMARQUES SUR LES EXEMPLES

D'après les 5 exemples qui sont caractérisés par des conditions géologiques diverses, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Dans les sites en question qui concernaient différents problèmes de stabilisation de terrain, d'élargissement ou de réparations de routes, etc. nous avons utilisé la méthode thermique comme un élément de l'ensemble des reconnaissances géologiques et géophysiques (sismique et électrique). Cette méthode thermique a mis en évidence des anomalies thermiques existant dans tous les exemples. Certaines de ces anomalies, localisées dans des zones en mouvements, prouvent la liaison existant entre l'écoulement des eaux souterraines dans les chenaux avec les mouvements des terrains (ce qui peut être mis en évidence par les cartes thermiques). D'autre part, certaines anomalies thermiques correspondent à des suintements ou à des sources situées à l'aval.

D'après nos études dans les zones où on a eu la possibilité de vérifier les résultats de l'interprétation de la méthode thermique, on a constaté que les anomalies thermiques correspondaient toujours à un écoulement souterrain. Dans certains cas ces écoulements ne pouvaient être décelés par les indices superficiels (suintements, sources, etc.)

D'après les observations effectuées (en nombre assez restreint, il est vrai), on peut admettre que les anomalies de température (après les corrections nécessaires) sont liées dans la plupart des cas à l'existence d'écoulements souterrains. D'autre part, la méthode d'interprétation quantitative dans la plupart des cas permet d'obtenir des résultats satisfaisants (calcul de la profondeur d'écoulement  $\pm 20\%$ ).

Signalons que l'interprétation des résultats donnés par la méthode thermique ne peut être envisagée que dans le cadre d'une reconnaissance complète comprenant des observations géologiques et d'autres essais géophysiques (électrique-sismique). Il faut en effet remarquer que par les deux méthodes sismique et résistivité on peut déterminer les zones favorables aux circulations d'eau, ces zones se décelant par une résistivité assez forte par rapport à celle des autres zones à cause du manque d'argile. Mais seule la méthode thermique est capable de mettre en évidence des circulations d'eau dans de telles zones, ce qu'on peut remarquer dans les exemples donnés.

CONCLUSIONS GENERALES

D'après ce que nous avons étudié dans ce mémoire, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

1 - Nous avons rappelé qu'on a appliqué la méthode thermique dans le domaine de la géologie pour déterminer les structures géologiques (dômes de sel, failles, etc.) ainsi que dans le domaine hydrogéologique pour étudier au cours des dernières années les nappes souterraines et on a trouvé des résultats intéressants. Nous avons utilisé cette méthode dans le but de trouver un moyen simple pour localiser les circulations d'eau telles qu'elles existent dans les pentes ainsi que sous les éboulis des glissements. L'importance de l'étude des circulations d'eau et leur détermination dans le domaine du génie civil est évident, car nous avons observé que ces chenaux souterrains peuvent localement provoquer un glissement de terrain en modifiant la nappe phréatique :

- . remontée locale de la nappe au niveau des chenaux à cause de l'alimentation partielle,
- . construction d'un obstacle artificiel dans le cours du chenal (ceci peut arriver par exemple pendant la construction d'un mur),
- . modification de la nappe par colmatage progressif de l'exutoire de l'écoulement par des particules argileuses,
- . coupure brusque dans le cours du chenal causée par des mouvements lents du terrain sur la pente.

Du fait des causes ci-dessus, la pression interstitielle dans les points correspondants augmente, ce qui modifie les conditions aux limites hydrauliques et peut donner lieu à un glissement de terrain. Donc, la reconnaissance de ces chenaux au point de vue des consignes de drainage est très importante.

Pour déterminer les cheminements d'eau dont nous venons de parler, il n'existe pas de méthode classique. Il faut néanmoins préciser que dans les dernières années l'Institut d'Hydrogéologie du Japon a commencé à étudier ces problèmes. Nous avons pris contact avec M. ATOCHI, responsable du Laboratoire correspondant, mais il nous a répondu que leurs études ne sont pas terminées. En revanche, il nous a questionné sur différents problèmes rencontrés et il reste en relation avec le Laboratoire de Géotechnique.



Nous avons donc étudié le problème de manière exhaustive en analysant les différents facteurs et difficultés rencontrés.

2 - Nous rappelons que cette méthode est basée sur la mesure de la température du sol à une profondeur de 0,5 à 1,5 m. C'est pourquoi nous avons étudié les relations entre la température du sol et l'origine de l'énergie parvenant aux couches superficielles. Nous avons donc examiné :

- la radiation solaire dont les ondes de chaleur parviennent au sol et entrent dans les couches superficielles sous forme de deux types d'ondes de chaleur :
  - . l'onde journalière qui a une période de 24 h ; sa vitesse dans les couches superficielles est de 60 cm/j,
  - . l'onde annuelle qui a une période d'un an et une vitesse de 4 cm/j ;
- l'énergie parvenant de l'intérieur de la terre. Cette énergie est négligeable par rapport à l'énergie qui provient du soleil, mais en fait cette chaleur est l'origine de la température des couches profondes.

Enfin, toutes les évolutions de la température dans les couches superficielles nous permettent de distinguer deux zones principales à l'intérieur de celles-ci :

- zone hétérothermique qui reçoit principalement son énergie du soleil ; on peut distinguer :
  - . la zone hétérothermique journalière dont la profondeur maximale est de 1,2 m,
  - . la zone hétérothermique annuelle dont la profondeur maximale est de 30 m,
- zone homothermique où les ondes de chaleur journalières et annuelles ne parviennent plus. Le gradient de température de cette zone est 3°C/100 m sous l'influence de l'énergie venant de l'intérieur de la terre.

3 - C'est ainsi que nous avons distingué deux phases dans les couches superficielles. Ce sont :

- . la phase chaude où le gradient de température est orienté de haut en bas,
- . la phase froide où le gradient de température est dirigé de bas en haut.

.../...

Cette distinction des phases nous a amenés à déterminer les périodes de travail pour que les contrastes entre température moyenne du sol et température de l'eau soient suffisants. D'après le Tableau 26, les mois d'Avril et Novembre ne sont pas convenables pour l'application de la méthode thermique car à cette époque la terre change de phase.

4 - Nous avons examiné les facteurs ayant une influence sur la température du sol et qui perturbent localement le champ thermique terrestre.

Il s'agit de :

- . la variation de température journalière qui a une influence sur la température du sol jusqu'à 1 à 1,20 m selon le type de sol et de rocher ; les Tableaux 5 et 6 donnent la profondeur de l'influence de la variation journalière avec une sensibilité de 0,1 et 0,01°C pour différentes amplitudes de cette variation ;
- . la variation annuelle, son influence se fait sentir au maximum à 25 ou 30 m dans le rocher et les sols, nous avons donné les Tableaux 3 et 4 qui montrent cette profondeur pour différents sols et rocher selon l'amplitude de la variation annuelle ;
- . l'altitude, dont l'influence est de 0,43 à 0,44°C par 100 m d'élévation pour une profondeur de mesure de 1 à 1,20 m,
- . la latitude, dont l'influence est de 0,6°C par degré de latitude ;
- . la couverture, dont l'influence sur la température des couches superficielles du sol dépend du genre de végétation et du type de forêt. En général la couverture végétale modifie la température du sol. Les Tableaux 14 et 15 montrent l'influence de la couverture pour différentes forêts : elle est de l'ordre de 2 à 3°C pour une profondeur de 60 cm ;
- . l'influence du vent, de la pluie, de la neige et du gel est sensible dans les dix premiers centimètres du sol. Mais les pluies d'été peuvent avoir une influence assez profonde ;
- . l'influence de l'exposition. Elle est évidente. Le Tableau 18 nous donne la radiation du soleil reçue par un sol exposé sous différentes directions et pentes. En hiver, les pentes Est présentent le minimum de température et les pentes S.W le maximum. En été, c'est l'exposition N qui donne la température minimale et l'exposition Sud la température maximale ;
- . l'influence de la nature du sol : cette influence augmente avec le compactage du sol (c'est-à-dire son état physique) et dépend de sa couleur (état chimique) ainsi que de sa teneur en eau : jusqu'à

.../...

une teneur en eau de l'ordre de 5 à 10 % il y a une augmentation de la température du sol. Au-delà il y a diminution. Ce changement est dû lui-même à la diminution du coefficient de conductivité et diffusivité.

Enfin, le plus important facteur qui nous intéresse et qui d'ailleurs peut avoir une influence importante sur la température des couches superficielles, est la circulation des eaux. L'amplitude de cette influence dépend de la différence entre la température de l'eau et celle du sol. Mais pour détecter l'anomalie correspondant à la circulation d'eau, il faut connaître l'amplitude de l'influence de chacun des facteurs que nous venons d'énumérer et en cas de nécessité il faut appliquer les corrections correspondantes.

Il faut rappeler que tous ces facteurs ne jouent pas un rôle substantiel dans notre mesure ; on peut les diviser en trois catégories :

- . Les facteurs qui ont une influence sur la température des premiers dix centimètres des couches superficielles et qui n'ont aucune influence dans notre mesure, puisqu'elle est appliquée à une profondeur d'au moins 50 cm ; ce sont : le vent, la pluie, la neige, etc.
- . Les facteurs qui ont une influence égale pour tous les points de mesure dans une zone étudiée ; mais il nous faut les connaître lorsque nous voulons comparer la température des points situés dans des régions différentes, il s'agit de la latitude, de l'altitude, de l'exposition et de la nature du sol.
- . Les facteurs dont les influences sont sensibles dans notre étude et que nous sommes obligés de connaître pour tout point de mesure : il s'agit de la variation journalière de la température et de la couverture.

En ce qui concerne la variation journalière de la température, nous avons donné le Tableau 5 qui indique la profondeur correspondant à une influence de 0,1°C. D'après ce tableau, pour un sol ordinaire, si on mesure la température du sol à une profondeur de 50 cm et pour une amplitude de la variation journalière de 10°C, nous pouvons négliger l'influence de cette variation journalière. Par contre, si l'amplitude de la variation journalière dépasse 10°C, il est nécessaire d'en tenir compte et nous avons indiqué le moyen de calculer la correction convenable.

.../...

Au point de vue de la correction due à la couverture, nous ne pouvons pas établir une formule exacte. Nous avons expliqué qu'il faut apprécier l'importance de cette influence de la forêt ou des végétaux d'après la coupe thermique et appliquer cette différence pour les points correspondants.

Les corrections permettent de distinguer les anomalies dues à des circulations d'eau. Leur amplitude dépend de la profondeur de mesure. En augmentant cette profondeur, les anomalies de la température augmenteront, mais pratiquement cette profondeur est limitée du fait de la difficulté des sondages de mesure. D'après nos expériences dans la région des Alpes, si les mesures sont faites à une profondeur de 0,50 m, l'influence de la variation journalière sera négligeable.

La sensibilité de notre appareil de mesure était de 0,1°C ce qui est suffisant ; si on augmente cette sensibilité, il faut calculer l'influence de tous les facteurs susceptibles d'intervenir au même niveau de précision, ce qui compliquera le problème et d'ailleurs sera inutile du point de vue de l'interprétation quantitative.

5 - La présentation des résultats apparaîtra sur les profils et en même temps on dressera une carte des isothermes. Les profils permettront des interprétations quantitatives, et la carte des isothermes donnera une image qualitative dont on pourra déduire le tracé probable des circulations d'eau souterraines et d'ailleurs cette carte montre la relation entre les circulations d'eau et les mouvements du sol.

6 - Du point de vue interprétation quantitative, nous rappelons que nous avons essayé de présenter une méthode d'interprétation simple et pratique pour l'évaluation de la profondeur des écoulements souterrains. Actuellement, on peut étudier les champs thermiques créés autour des écoulements de toutes formes et calculer les facteurs nécessaires par la méthode des éléments finis et au moyen des ordinateurs. Néanmoins, en considérant la précision demandée pour les problèmes posés et de plus en étudiant l'influence des différents facteurs sur la température du sol (et par conséquent sur l'interprétation quantitative), nous avons donné une méthode simple pour l'estimation de la profondeur d'écoulement

.../...

de l'eau. C'est pourquoi nous avons étudié le champ créé autour de deux formes classiques très simples : cylindre et plaque et dont nous avons tiré les résultats suivants :

- . Pour les circulations d'eau correspondant à une forme cylindrique dont l'allure de l'anomalie est en forme de cloche, nous avons indiqué une méthode de calcul basée sur la mesure de  $x_i$  (l'abscisse de point d'inflexion de la courbe d'anomalie) et d'après une formule simple (formule 7, Chapitre III), nous pouvons donner une évaluation de la profondeur de la conduite.
- . Pour l'anomalie correspondant à une circulation d'eau en forme de plaque dont la courbe d'anomalie a un palier défini, nous interprétons l'extrémité de la courbe des températures comme étant due à une circulation d'eau de forme cylindrique, mais en réalité il faut multiplier la profondeur calculée par un coefficient  $K = 1,2$ . Nous avons trouvé ce coefficient en étudiant le champ électrique créé autour des différentes plaques ayant différents écartements. Cette étude est réalisée par un modèle basé sur une analogie entre champs électriques et champs thermiques.

7 - En ce qui concerne la profondeur maximale à laquelle nous pouvons déterminer les écoulements d'eau, il faut remarquer que nous ne pouvons pas donner un chiffre exact car cette profondeur d'investigation dépend de différents facteurs dont les principaux sont les suivants :

- . La profondeur de mesure. En augmentant cette profondeur, les amplitudes de la température mesurée du sol augmenteront, ce qui permet de détecter les anomalies correspondant aux chenaux assez profonds.
- . La différence entre la température de l'eau des circulations d'eau et celle du sol où se trouve le chenal. La température du sol à 10 m de profondeur est égale à la température moyenne annuelle de la surface du sol. La température de l'eau circulant dans la zone hétérothermique annuelle est égale à la température moyenne annuelle de la surface du sol. C'est-à-dire que l'eau coulant à une profondeur de 10 m ne donne pas lieu à une anomalie détectable. Dans les conditions habituelles cette profondeur diminue du fait du changement de phase à l'intérieur du sol et également d'autres facteurs. D'après les expériences que nous avons menées dans la région des Alpes, pratiquement la profondeur d'investigation est de l'ordre de 5 à 6 m.

.../...

8 - En deuxième partie, nous avons donné 5 exemples d'études de l'hydrogéologie des glissements au moyen de cette méthode. Dans tous les exemples, les cartes isothermes dressées d'après les mesures de la température du sol correspondent nettement aux mouvements du terrain. Les axes des chenaux déterminés par cette méthode montrent les localisations des chenaux sous les glissements ainsi que l'influence de l'eau dans les mouvements de terrain.

Les résultats de cette méthode sont complétés par la méthode sismique réfraction et électrique, ce qui permet de tirer les conclusions pratiques suivantes :

- . détermination du niveau libre de l'eau dans le terrain,
- . détermination de la limite entre deux terrains de même nature, mais de degrés de fissuration différents,
- . détermination de la nature des terrains de couverture,
- . détermination de la profondeur du substratum.

Dans le cas du premier exemple, la méthode thermique a montré des circulations importantes et les axes déterminés par cette méthode sont dans la direction des mouvements de terrain. D'ailleurs, les méthodes sismiques et de résistivité ont montré un talweg dans le centre du glissement où l'on peut remarquer des anomalies thermiques confirmant les écoulements d'eau. Les circulations d'eau repérées par la méthode thermique ont été confirmées par les observations dans la tranchée.

Dans le cas du deuxième exemple, les axes de l'écoulement d'eau déterminés par cette méthode sont localisés dans la direction des mouvements existant dans le sol. Les méthodes sismique et de résistivité montrent l'existence à faible profondeur d'un substratum marneux, ce qui apporte l'explication des différents suintements constatés dans le contrebas des glissements.

Dans le cas du troisième exemple, l'anomalie déterminée sur  $PT_1$  à l'amont de la coulée intervenue en Juin 1975, montre l'existence d'une circulation d'eau ; les autres anomalies déterminées correspondent aux mouvements existant dans le sol. Les méthodes sismique et de résistivité ont déterminé la nature du terrain de couverture et la profondeur du substratum.

.../...

Nous avons les mêmes résultats dans le cas des autres exemples où nous avons distingué :

- . les axes des circulations d'eau dans le sol,
- . la nature des terrains de couverture,
- . la profondeur du substratum.

Deux facteurs principaux (forme des chenaux et leur profondeur) étaient essentiels pour les circulations d'eau déterminées par la méthode thermique dans ces glissements. La forme du chenal est déterminée par la forme des anomalies, c'est-à-dire que si la courbe des anomalies a un palier bien marqué, le chenal doit être en forme de plaque. On peut voir ce cas dans l'exemple V. L'allure de l'anomalie nécessite un chenal très plat et ceci est mis en évidence par plusieurs suintements en contrebas du glissement. Les courbes en forme de cloche impliquent au contraire des chenaux de forme cylindrique, comme cela a été constaté sur plusieurs exemples.

Au sujet de la profondeur des circulations d'eau, nous avons essayé d'obtenir une évaluation par les méthodes de calcul. Nous l'avons fait systématiquement pour tous les exemples et nous avons procédé à des vérifications dans les deux cas suivants :

- . Dans le cas de l'exemple V, la différence entre la profondeur de l'eau mesurée par le sondage mécanique et celle de l'interprétation quantitative est de 10 à 15 %.
- . Dans le cas de l'exemple I, la différence entre la profondeur des circulations d'eau observées dans la tranchée faite sur le Profil III et celle de l'interprétation quantitative est de  $\pm$  20 %.

Compte tenu des fluctuations du niveau de l'eau et des conditions géologiques, il semble que ces résultats soient satisfaisants.

9 - Au point de vue de l'application pratique, nous n'avons pas rencontré de difficultés importantes mais il convient d'insister sur les points suivants :

- . La mesure de la température des sources existant dans la zone étudiée doit être faite avec précision, en particulier il faut faire attention que les sources dont on mesure la température ne soient pas des sources superficielles dont la température subit des variations journalières.

.../...

- . La température de l'air doit être mesurée régulièrement pendant la durée du travail pour en tenir compte dans la correction journalière.
- . Le fond thermique doit être déterminé soit sur les profils thermiques, soit par le calcul.
- . Quant à l'interprétation quantitative, elle demanderait des connaissances sur certains problèmes particuliers et que nous ne pouvons pas préciser ici (variations locales de  $\lambda$ , influence exacte de la couverture végétale...) On rappellera seulement les points suivants :
  - Dans l'interprétation quantitative, d'après les calculs théoriques nous avons donné les rayons des chenaux, mais dans certains cas ces rayons sont très grands et souvent les conditions géologiques ne permettent pas de justifier de telles dimensions ; c'est pourquoi nous n'insistons pas sur ce point particulier. Par ailleurs, nous ne pouvons pas accepter l'idée d'écoulements qui seraient cylindriques car l'eau sous l'action de la gravité et de la pression hydraulique, ne peut pas couler sous cette forme dans le sol.
  - Enfin, il nous semble qu'il faut étudier le champ thermique créé autour des chenaux en forme de demi-cylindre et de demi-ellipse et également des chenaux formés de cylindres de différentes dimensions pour essayer de construire une abaque générale, ou pour trouver des moyens très simples permettant l'estimation de la profondeur. Ceci peut faire l'objet d'un programme de recherche à venir.

B I B L I O G R A P H I E

- AZIMI C., DESVARREUX P. - "Importance des problèmes de stabilité des pentes"  
C.R. Premières Journées Mécanique des Sols, Ecole Centrale de Paris  
Septembre 1972.
- BIRCH, FRANCIS, - "The present state of geothermal investigations",  
Geophysics, 4, Vol. XIX, 1954
- BIRMAN, J. H., 1969 - "Geothermal exploration for ground water" Bull. Geol.  
Soc. Am. 80, 617-630.
- BULLARD, E.C. "Historical in traduction to terrestrial heat flow" Am. Geophys-  
sic, Vol. 8, p. 1-15. 1965
- CARSLAW, H.S. and JAEGER, J.C. "Conduction of heat in solids 2nd Ed. Oxford  
University Press, England, 1959.
- CARSON, J.E., MOSES, M. "The annual and diurnal heat exchange cycle in upper  
layers of soil" (Radiological physics Division, Argonne National  
Laboratory) Argonne, Illinois, 1962.
- CARSON, J.E., "Analysis of soil and air temperatures by Fourier techniques"  
(Radiological Physics Division, Argonne National Laboratory)  
Argonne, Illinois - Journal of Geophysical Recherche, Vol. 68  
n° 8.
- CLARK, S.P. "Handbook of physical constants" Revised edit. 1966, Geol.  
Soc. Amer. Spec. Papers n° 97.
- COLLIN, J.P. "Mesure sur la conductivité thermique du sol"
- DESVARREUX, P. "Recherche d'une méthode d'étude des mouvements de terrain  
et application pratique" Thèse de Docteur-Ingénieur, 1970.
- EBLE, L. "Etude expérimentale de la propagation de la chaleur dans le sol"
- FERRUCCIO Mosetti, "Etude sur le mouvement des eaux souterraines par le  
procédé thermique".
- GESLIN, M.H., - "Action particulière du froid, ses conséquences du point de  
vue agronomique". Revue Météorologique, 1937.
- HEILAND, C.A. - "Geophysical exploration", 1946.
- KAPPELMEYER, O., 1957 "The use of near surface temperature measurements for  
discovering anomalies due to causes at depth". Geophys. Prosp. 5,  
239-258.
- LETTAU, H., 1951 - "Theory of surface-temperature and heat transfer oscilla-  
tions near a level ground surface". Trans. Amer. Geophys. Un. 32,  
189-200.

LOVERING, T.S. and GOODE, H.D., 1963. "Measuring geothermal gradients in drill holes less than 60 feet deep", East Tintic district, Utah. Geol. Surv. Bull. 1172.

LLIBOUTRY, L., Cours de Physique B.G. 2

MICHEL, R., LETOURNEUR, J., (1971) "Géologie du Génie Civil". Libr. A. Colin

ORSTRAND, C.E., VAN 1943, "Applications of geothermics to geology". Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol. 18, 13-38.

OLMER - "Transfert de chaleur par conductivité".

POLEY, J., PH, and STEVENINCK, J. VAN - "Delineation of shallow salt domes and surface faults by temperature measurements at a depth of approximately 2 metres".

R. GEIGER, 1965- "The climate near the ground" Harvard Univ. Press. Cambridge. Massachuset.

SCHULLER, M., 1962-1949 "Les eaux souterraines". Ed. Masson et Cie, Paris.

SELIG, F. WALLICK, G.C., 1966 - "Temperature distribution in salt domes and surrounding sediments", Geophysics 31, 346-361.

SIMMONS, G. 1967, "Interpretation of heat-flow anomalies". I Revs; of Geophysics 5, 43-52.

TAKEUCHI, A., 1971, "Underground temperature survey in and around the landslide area". Bull. Disas. Prev. Res. Kyoto Univ. Vol. 21 Part 3, N° 192, January, 1972.

VERON, M., "Thermique industrielle", Cours Ecole Centrale de Paris.

YUHARA, K., "Geothermal Prospecting of Underground Heat Source", Society of Exploration Geophys. of Japan, Vol. 8, N° 1, 1955, March, pp. 27-33.

#### REFERENCES DES TABLEAUX

Tableau n° 2 - Revue Météorologique, 1937  
Tableaux n° 7, 8, 9 - Météorologie, Grenoble  
Tableaux n° 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 23 - SHULLER, 1949  
Tableaux 17, 18, 19, 20 - The climate near the ground (R. GEIGER)  
Tableau n° 22 - Geothermal prospecting  
Tableaux n° 24, 25 - Geothermal prospecting of under ground heat source (Yuhara K.)

#### REFERENCES DES FIGURES

Fig. n° 1, 2, 3, 4, 15, 16, 17, 18 - Revue Météorologique, 1937  
Fig. n° 7 - Geophysical Prospect. 1957  
Fig. 8, 9, 11 - SHULLER, 1949  
Fig. 10, 12, 14, 19 - The climate near the ground (R. GEIGER).

#### LISTE DES SYMBOLES


A	:	Amplitude de la température
D	:	Densité de flux
$\theta$	:	Température
I	:	Energie
$\varphi$	:	Flux
$\lambda$	:	Coefficient de conductivité
Q	:	Quantité de chaleur
C	:	Chaleur spécifique
$\rho$	:	Densité
m	:	Coefficient de diffusivité
e	:	Coefficient d'échange de surface
G	:	Gradient de température
T	:	Périodicité
t	:	Temps
Z	:	Profondeur
$\alpha$	:	Angle
R	:	Rayon
r	:	Rayon
L	:	Longueur
h	:	Profondeur
a	:	Longueur
$x_i$	:	Abscisse du point d'inflexion
$\rho$	:	Résistivité
V	:	Vitesse
Vl	:	Vitesse de propagation des ondes longitudinales

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le

Le Président de la thèse



VU, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

Le Président de l'Institut  
National Polytechnique

Le Président de l'Université  
Scientifique et Médicale

