

Matériaux pour la Géologie de la Suisse

GÉOPHYSIQUE  
No 16

Publiés par la Commission Suisse de Géophysique  
et la Commission Géotechnique Suisse  
Organes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles  
subventionnées par la Confédération

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE  
GÉOPHYSIQUE  
DES FONDS DU LAC LÉMAN

par

WALTER SIGRIST

En Commission  
chez Kümmerly & Frey, Geographischer Verlag, Berne

Blanc-Wittwer S.A., Genève  
1974

## PRÉFACE DE L'ÉDITEUR

*Depuis 1957 la Commission Géotechnique Suisse, Organe de la Société Helvétique des Sciences Naturelles (S.H.S.N.) éditait la série "Géophysique" des "Matériaux pour la Géologie de la Suisse". Pendant presque deux décennies elle a ainsi encouragé la recherche géophysique en Suisse par un généreux support financier et par l'édition de nombreux travaux.*

*Lors de la fondation de la Commission Géophysique Suisse, en 1971, il fut prévu que cette commission éditerait dorénavant cette série, dans laquelle quelques quinze travaux importants de géophysique sont déjà publiés.*

*Les publications Nos 16 et 17 (thèses de Messieurs W. Sigrist et R. Olivier), dont l'impression a été décidée en 1973, ont été éditées en collaboration par les deux commissions au sein desquelles Mademoiselle Jenny s'est chargée de l'exécution de tous les travaux de détails nécessaires à la mise sous presse.*

*La présente publication No 16 comprend la thèse de Monsieur Walter Sigrist, exécutée à l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne sous la direction du professeur Camille Meyer de Stadelhofen. Ce travail concerne les propriétés géoélectriques des sédiments et roches des zones côtières du Lac Léman. Il en résulte des cartes des résistivités vraies ou apparentes, d'une zone côtière d'une largeur de 1 km environ, basées sur un grand nombre de mesures géoélectriques soit terrestres soit effectuées au fond du lac. La thèse comprend également des considérations théoriques et méthodiques sur le dispositif de mesures immergé.*

*Nous remercions l'auteur de sa collaboration à la préparation de l'impression et de sa participation financière.*

*Le fond du texte et des figures est laissé à la seule responsabilité de l'auteur.*

*Zurich, Mai 1974.*

*Au nom de la Commission  
Géotechnique Suisse*

*Le président: Prof. F. de Quervain*

*Au nom de la Commission  
Géophysique Suisse*

*Le président: Prof. St. Müller*

## PRÉFACE

*Depuis l'époque de Forel déjà, mais plus particulièrement depuis quelques années, le bleu Léman est devenu un vaste laboratoire d'études et d'essais. Botanistes et chimistes, limnologues et géologues, pétroliers et géophysiciens cherchent à saisir l'évolution, récente ou ancienne, du lac et de ses fonds.*

*Notre étude s'inscrit comme une contribution dans ce mouvement. Pourtant, ce n'est pas pour nous mettre au goût du jour, voire pour suivre une mode, que nous l'avons entreprise. Si le bassin lémanique — car on ne saurait séparer le lac d'avec son milieu structural naturel — a été voici 150 ans le berceau d'une des plus fécondes théories géologiques, celle des glaciations, il n'en reste pas moins que nombre de problèmes d'origine et de structure sont loin d'être résolus. L'étude de notre propre région et de ses problèmes nous apparaît dès lors comme une sorte de vocation naturelle.*

*D'autre part, de nombreuses études récentes sur les territoires entourant le lac — je citerai notamment les profonds forages pétroliers des années 60 en Haute Savoie et en Suisse Romande — ont apporté un lot de connaissances nouvelles sur la géologie de notre pays. L'étude des continuités et discontinuités des structures entre la partie terrestre et la partie lacustre du bassin étant fondamentale pour la compréhension de son histoire géologique, l'extension des études au domaine lacustre s'imposait. Réciproquement, la découverte d'éléments nouveaux sous le lac pourra susciter de nouvelles investigations à terre. La connaissance du Léman et de son bassin ne saurait se faire que dans une étude liée et cohérente.*

*C'est dans cette même perspective de continuité qu'a germé l'idée de nos travaux lacustres. Depuis une dizaine d'années, l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne a entrepris une étude systématique des dépôts quaternaires (et des terrains sous-jacents par voie de conséquence) du canton de Vaud, dans un but hydrologique. Grâce à une substantielle participation du Fonds National, cette étude a pu être étendue, dans un esprit moins immédiatement économique, au Lac Léman et au Chablais. Les pages qui suivent rendent compte des travaux entrepris dans le lac et des résultats et conclusions qui s'en dégagent. Nous souhaitons par ce travail avoir apporté notre pierre à cet édifice plus ambitieux que sera peut-être un jour une synthèse géologique complète du bassin lémanique et une explication satisfaisante de son existence.*

*Sur un plan différent, et en dépassant le cadre du seul Léman, les méthodes électriques de résistivités méritaient bien de devenir un peu plus marines... d'eau douce. L'exploration des fonds marins, on le sait, est devenue un grand sujet d'actualité. Elle exige des moyens énormes et des techniques puissantes. Mais toute proportion gardée, l'exploitation des lacs continentaux peut, elle aussi, devenir économiquement intéressante: hydrologie sous-lacustre, recherche de sables et de graviers, travaux de génie civil, détermination de structures géologiques... sont autant d'investigations où les méthodes électriques peuvent parfaitement convenir, grâce à leur pouvoir de résolution comme grâce à la facilité de leur mise en oeuvre. Malgré cela, elles sont, à notre connaissance, encore peu employées pour l'étude des lacs. Elles méritaient par conséquent d'être développées, adaptées au milieu lacustre, rendues opérationnelles et rentables. Nous estimons avoir fait un bon pas dans cette voie.*

*Une étude géophysique de quelque envergure ne peut évidemment plus être l'oeuvre d'un chercheur solitaire. La plupart des techniques géophysiques nécessitent la collaboration de toute une équipe. Je remercie donc d'abord les membres de cette équipe – dont la composition a changé au cours des trois années de travail – mais dont vents et tempêtes n'ont jamais altéré la bonne humeur ni l'esprit d'amicale collaboration.*

*La solution de certains problèmes techniques a été facilitée grâce à des idées et réalisations du technicien du laboratoire, M. Braissant. Qu'il trouve ici l'expression de mes remerciements. De même, je remercie M. Martig pour son aide précieuse dans l'élaboration graphique des résultats. Dans d'autres domaines, je tiens à souligner également la compréhension bienveillante que j'ai rencontrée de la part de M. Sandoz et M. Henri des câbleries de Cortaillod. M. Szutorisz et la maison Zodiac nous ont aidés par un geste méritoire.*

*Avant de quitter les contributions plus spécialement matérielles, je signale que ce travail a été très généreusement subventionné par le Fonds National de la Recherche Scientifique. Sans ce précieux apport financier, notre recherche eut été impossible.*

*La concertation avec l'équipe travaillant à terre, en Chablais, a été quasiment permanente, nécessaire et, est-il besoin de l'ajouter, heureuse et fructueuse.*

*Enfin, j'en viens à exprimer mes très vifs et sincères remerciements à mon directeur de thèse, le professeur Meyer de Stadelhofen. Il a suivi ce travail du lac avec un intérêt tout personnel, dans une largeur de vue que lui permet son excellente connaissance de la géologie de la région. Il n'a ménagé ni son temps ni sa peine pour me conseiller et m'ouvrir des perspectives nouvelles. Je lui suis tout autant reconnaissant pour la mise à disposition libre et généreuse des ressources matérielles et humaines de l'Institut de Géophysique, ainsi que de la confiance qu'il m'a accordée.*

## TABLE DES MATIÈRES

	page
PRÉFACE .....	3
I. QUELQUES ASPECTS GÉOLOGIQUES	
Généralités .....	6
Aperçu géologique:	
Le Petit Lac .....	7
La côte suisse du Grand Lac .....	8
La côte française du Grand Lac .....	8
La cuvette du Grand Lac .....	8
Les origines du lac Léman .....	9
II. CONTRIBUTION DE LA GÉOPHYSIQUE A LA CONNAISSANCE DU LAC	
Apports possibles de la géophysique pour la connaissance du lac et de son histoire	
Gravimétrie .....	11
Sismique-réflexion et réfraction .....	12
Géomagnétisme .....	12
Géoélectricité .....	12
Etudes géophysiques exécutées dans le Léman jusqu'à ce jour .....	13
III. ASPECTS THÉORIQUES ET TECHNIQUES DE LA PROSPECTION ELECTRIQUE EN MILIEU LACUSTRE	
Propriétés électriques des roches .....	14
La méthode des résistivités:	
Terrains homogènes .....	15
Terrains inhomogènes .....	16
Traîné et sondage électriques .....	17
Mesures électriques à la surface du lac .....	18
Le dispositif immergé: techniques de calcul et d'interprétation .....	19
Dispositif immergé: technique de mesure .....	24
Pouvoir de résolution du dispositif immergé, comparé au dispositif de surface.	25
Un exemple sur modèle réduit .....	25
Technique de repérage .....	28
IV. QUELQUES RÉSULTATS DE LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE	
Possibilités et limites de l'étude géoélectrique dans le lac Léman .....	31
Reconnaissance profonde des rives: Traîné de surface A B 500 mètres .....	31
La côte française .....	32
Profils sous-lacustres à travers le Petit Lac .....	34
Baie d'Excenevex – Pointe d'Anthy .....	34
Les côtes du Léman: Cartes de résistivités de surface .....	36
Région de l'embouchure du Rhône .....	44
La dépression de Rolle .....	44
Le sillon de Genève - BIT .....	51
CONCLUSIONS .....	54
BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE .....	55

## I. QUELQUES ASPECTS GÉOLOGIQUES

### GÉNÉRALITÉS

Les géographes distinguent souvent trois parties du lac Léman:

- le “Petit Lac” s’étend de Genève au détroit de Promenthoux,
- le “Grand Lac” lui fait suite jusque dans la région de Montreux,
- enfin le “Haut Lac” qui va d’une ligne Montreux - St. Gingolphe à l’embouchure du Rhône.

Des études sismiques récentes (*Horn, 1971, Vernet et Horn, 1971*) ont montré que la limite structurale du Petit Lac est en fait l’anticlinal d’Yvoire se prolongeant, sous les dépôts quaternaires, jusque vers Rolle. Nous continuerons cependant de garder au Petit Lac ses limites géographiques et visibles. Par contre, nous engloberons le Haut Lac dans le Grand Lac, aucune limite géographique naturelle vraiment significative, ni jusqu’à nouvel avis, aucune limite géologique reconnue ne séparant les deux.

La surface totale du Léman est de 582 km<sup>2</sup>, son volume de 83 km<sup>3</sup> environ, et sa profondeur maximale dans la “plaine centrale”, entre Lausanne et Evian, de 310 mètres.

Avec ses 79 km<sup>2</sup>, le Petit Lac représente environ 13 % de la surface totale du Léman, mais sa masse d’eau constitue moins de 4 % de la masse totale.

Le bassin versant du Léman a une étendue de 7975 km<sup>2</sup>, soit près de 14 fois la superficie du lac. Deux affluents principaux, le Rhône et la Dranse, drainent vers le Léman respectivement les trois quarts et le dixième de la totalité des apports liquides. Ceux-ci sont en moyenne de 7,6 km<sup>3</sup> annuellement. Quant aux apports solides, on doit se contenter d’une estimation: le Rhône en charrierait les 80 %, soit 3 à 7 millions de tonnes par an.

### APERÇU GÉOLOGIQUE

Depuis le milieu du 18ème siècle, de très nombreux auteurs se sont penchés sur l’un ou l’autre aspect de la région lémanique. Une bibliographie relativement complète, établie par Vernet, comprend près de 600 titres, dont une petite proportion seulement, il est vrai, sont des publications utilisables pour l’étude géologique. Les autres sont consacrées à des aspects chimiques, physiques ou botaniques du milieu aquatique, ou encore à des études touchant au climat ou aux courants hydrographiques.

Parmi les documents géologiques, on trouve le plus souvent des études locales. Certains auteurs ont cependant établi de véritables synthèses, à différentes époques, des connaissances acquises jusqu’alors. Je citerai en particulier *Forel (1892), Gagnebin (1937), Lombard (1939), Rigassi (1960)* et enfin l’excellent résumé de *Pachoud (BRGM 1970)* faisant, immédiatement avant les dernières études géophysiques, le point des connaissances en la matière.

Il n'est pas dans mes intentions de refaire un travail qui a déjà été fait. Cependant, afin de placer notre étude du lac dans son contexte géologique, je donnerai ici un bref aperçu de la géologie du lac et de ses alentours, ainsi que des différentes hypothèses concernant sa formation.

Avant l'utilisation de la géophysique, la géologie des fonds lacustres était avant tout basée sur les connaissances de la périphérie, immédiate ou lointaine, du lac, connaissances extrapolées avec prudence au sous-sol lacustre, la continuité ou discontinuité des structures entre terre et lac ou entre rives opposées demeurant hypothétiques.

Comme possibilité d'observation directe, mentionnons:

- la morphologie sous-lacustre, connue grâce à une excellente carte bathymétrique établie de 1885 à 1889 sur la base de 11955 points de mesure;
- les affleurements sous-lacustres de la molasse en eaux peu profondes;
- les blocs erratiques;
- les apports fluviatils superficiels (deltas);
- les prélèvements de dépôts sédimentaires ou morainiques;
- enfin, de très rares forages.

Point n'est besoin d'ajouter de commentaires sur le caractère limité, en étendue comme en profondeur, de ces observations et des conclusions géologiques à en déduire. Pourtant, on leur doit la connaissance des pendages de la molasse le long des rives suisses – fait significatif par excellence – et les sondages dans la rade de Genève ont donné d'intéressants renseignements sur le toit de la molasse.

La sismique-réflexion marine, utilisée pour la prospection pétrolière d'abord, à des fins de recherche ensuite, devait nous révéler une grande quantité de données nouvelles – en fait les premières données profondes non fondées sur des extrapolations – concernant la structure du lac. Mais les habituels problèmes d'interprétation, lors du passage de l'enregistrement sismique à l'esquisse géologique, existent ici comme dans toute méthode géophysique.

Enfin – je l'ai dit au début de ces pages pour en marquer l'importance – on ne saurait trop insister sur l'apport à l'étude du lac de toutes les observations géologiques de la région, cartes géologiques, forages pétroliers et études géophysiques effectuées sur les deux versants du bassin du Léman. L'existence du lac et sa structure ne peuvent se comprendre que dans une étude vaste et intégrée, dépassant peut-être même le cadre de l'actuel bassin lémanique proprement dit.

### **Le Petit Lac:**

Il est généralement admis qu'il s'agit d'un synclinal molassique dissymétrique. La couverture morainique et sédimentaire peut, d'après les cartes sismiques, atteindre jusqu'à 40 mètres d'épaisseur, notamment entre Versoix et Hermance. On rencontre plusieurs accidents tectoniques dans la molasse, accidents qui pourraient être en relation avec les failles du Salève et du Jura. Signalons aussi l'existence au large de Corsier, des "Hauts-Monts", de nature molassique.

L'anticlinal de Coligny - Messery constitue la limite structurale de cette cuvette au sud-est. Cette limite se prolonge dans le lac à partir de la Pointe d'Yvoire en direction d'Allaman. Sa relation avec l'anticlinal de St. Prex - Morges, sans être exclue, n'est toutefois pas prouvée.

Morphologiquement, la forme du Petit Lac peut faire penser à une vallée fluviale (*Joukowsky*, 1920), constatation qui n'est pas étrangère à certaines théories sur l'origine du lac. Cette "vallée" est divisée en quatre paliers dont les profondeurs vont de 52 à 79 mètres.

### La côte suisse du Grand Lac:

Les rives nord de Rolle au Lavaux sont sculptées dans le plateau molassique. La Molasse s'épaissit progressivement du Jura vers le lac. Elle atteint 2000 mètres d'épaisseur au forage de Savigny. Aux abords du lac, les couches s'inclinent généralement vers le sud-est.

La topographie a été considérablement remodelée par les glaciers, par le creusement de vallées et par des dépôts morainiques et fluvio-lacustres.

L'accident majeur dans les formations tertiaires est le chevauchement de la Molasse subalpine sur la Molasse autochtone. Ce chevauchement aurait son origine dans le "grand paroxysme orogénique" (*Schroeder*, 1920) de la mise en place des préalpes, à la fin du tertiaire. C'est dire son importance pour l'histoire du Léman. Ce contact des deux Molasses subalpine et autochtone, étudié entre autres par *Bersier*, 1938, a pu être localisé parfaitement et suivi depuis Auboranges jusqu'à la Claie-aux-Moines grâce à la géoélectricité (*Meyer de Stadelhofen et Russy*, 1973). Sa continuité dans le lac reste, à notre connaissance, problématique. Il en est de même en ce qui concerne son éventuel prolongement sur la rive française.

Plus à l'est, les Poudingues du Mont-Pélerin seraient le cône de déjection d'un Rhône oligocène. Mais il s'agirait probablement plutôt d'éléments charriés que d'un dépôt en place. (*Burri et Bersier*, 1972).

La Molasse rouge affleure à Vevey, comme d'ailleurs de l'autre côté du lac, au Bouveret. Et l'on touche enfin aux Préalpes en franchissant la Baye de Clarens.

Comme élément de structure profonde, signalons l'anomalie magnétique du Jorat d'axe nord-est - sud-ouest, décelable jusqu'en Haute-Savoie.

### La côte française du Grand Lac:

Mis à part un affleurement de Molasse près du Bouveret, ce sont des falaises entaillées dans les Préalpes qui bordent le lac jusqu'à Lugrin. (Carte géologique de *Badoux*, 1965.) Entre Lugrin et Thonon environ, la géologie est caractérisée par une très grande épaisseur de Quaternaire. La limite entre la Molasse et le Flysch ou entre la Molasse et les formations préalpines n'est pas connue avec exactitude du fait de l'omniprésence des dépôts quaternaires.

### La cuvette du Grand Lac:

Morphologiquement, le Grand Lac se caractérise

- par des versants abrupts, à l'est notamment d'une ligne Lausanne - Evian,
- par l'existence d'une vaste plaine centrale, à la profondeur de 309 mètres,
- par une topographie irrégulière vers l'embouchure du Rhône.

Dans cette dernière région, les mesures bathymétriques font apparaître un chenal sous-lacustre de 10 km de long, profond d'une quinzaine de mètres. La sismique a mis en évidence trois autres chenaux, actuellement recouverts, au nord-est du chenal actuel et parallèles à celui-ci, correspondant à d'anciennes embouchures du Rhône (*Houbolt et Jonker*, 1968).

A part les levés sédimentologiques de la Shell et du Centre de Géodynamique de Thonon, on ne dispose que de peu de données précises sur la nature des fonds du Grand Lac. La sismique montre une grande épaisseur de dépôts, sauf vers la côte nord. Mais il ne semble pas qu'elle

ait pu, jusqu'ici, suivre avec précision la Molasse, ni à plus forte raison, permis de connaître son épaisseur ni délimiter le contact des Molasses subalpine et autochtone.

A en croire les sismiciens, une faille profonde suivrait la rive française de Meillerie à Evian.

A l'heure actuelle, les résultats de la dernière campagne sismique, effectuée par le groupe Géolem, ne sont pas encore publiés.

## LES ORIGINES DU LAC LÉMAN

Mouvements tectoniques, érosion glaciaire, érosion fluviale... sont autant de facteurs principalement ou partiellement responsables de la formation de la cuvette lémanique et de son aspect actuel. On est bien d'accord en général pour ne pas attribuer les origines du lac à une seule de ces causes. Mais selon les auteurs, l'influence respective de ces différents facteurs ne prend pas la même importance. On pourrait ainsi grouper les différentes hypothèses de formation en trois catégories:

- origine glaciaire et fluviale,
- origine tectonique et fluviale,
- origine tectonique et glaciaire.

Une description de ces hypothèses étayées de leurs arguments respectifs nous amènerait à dépasser largement le but et le cadre de ce travail. Nous ne ferons donc que les parcourir brièvement:

L'action de l'érosion glaciaire est indéniable. Les différentes glaciations par leurs dépôts et leur action érosive ont modelé le relief de nos régions. Aussi, la possibilité de former un lac par surcreusement glaciaire est réelle:

Gel et dégel font éclater les roches, et les énormes masses d'eau en déplacement sous forme de glaces ou de cours d'eau assurent l'évacuation des débris.

L'idée du surcreusement glaciaire date du milieu du 19ème siècle. *Joukowsky* en 1920, puis *Gagnebin* (1937) reprennent cette théorie et la développent. Selon *Gagnebin*, aucune cuvette ne préexistait aux glaciations. Le Rhône et la Dranse évacuèrent séparément d'abord, puis conjointement, leurs eaux vers le nord. Pour le Rhône, plusieurs cours d'eau pourraient avoir existé successivement: vallée de la Sarine, puis de la Broye, enfin de la Venoge. Le surcreusement dû aux glaciers successifs, la mise en place temporaire d'un lac de barrage autre que le Léman actuel, ainsi que l'érosion régressive d'un affluent de l'Arve se terminant par la capture du Grand Lac, donnèrent au lac à peu près l'aspect que nous lui connaissons aujourd'hui.

Selon d'autres auteurs, le Léman serait avant tout la continuation de la vallée du Rhône, vallée barrée ou déprimée par des mouvements orogéniques (basculement, soulèvement de l'avant-pays) plus, éventuellement, la mise en place d'un barrage morainique (*Rütimeyer*).

*Charles Lyell* en étudiant les différents lacs alpins, et *Forel* à sa suite en ce qui concerne le Léman en particulier, attribuent aux mouvements tectoniques la principale cause de l'existence du lac. Les glaciers n'auraient joué qu'un rôle secondaire. L'idée de l'exutoire vers le nord, liée à la théorie du surcreusement, ne serait dès lors qu'une vue de l'esprit.

Certains auteurs modernes, dont *Lombard*, croient de plus en plus aux origines tectoniques et, rejoignant *Forel*, associent la formation du lac à la mise en place des Préalpes.

En conclusion, on ne dispose pas pour l'heure de données suffisantes pour trancher entre les différentes hypothèses. Les faits probants sont encore rares, et les théories nombreuses.

Aussi, toute affirmation trop catégorique doit-elle être reçue avec prudence. Les conclusions de Forel sur ce chapitre restent en substance vraies de nos jours:

“... Peut-être que dans les générations suivantes, quand nos successeurs auront accumulé cent et mille fois plus de faits spéciaux et généraux que nous n'en possédons actuellement, pourront-ils tenter de faire une histoire complète de la genèse de notre lac, sur des bases peut-être bien différentes de celles qui nous semblent possibles ou probables à la fin du XIXe siècle. Ecrire aujourd'hui cette histoire détaillée me semble une parfaite impossibilité.”

*A. Forel. Le Léman (1892)*

## II. CONTRIBUTION DE LA GÉOPHYSIQUE A LA CONNAISSANCE DU LAC

Ce n'est pas par hasard que le plus récent des développements de la géophysique appliquée ait coïncidé avec le début de l'exploitation pétrolière des fonds marins. Là où le marteau du géologue ne pénètre plus, là où toute observation directe devient difficile, voire impossible, la géophysique fournit les instruments appropriés de reconnaissance et d'étude.

Les données récentes concernant le lac Léman sont essentiellement dues à l'utilisation systématique de la géophysique. Nous allons jeter un coup d'oeil sur les possibilités de celle-ci pour une meilleure connaissance de la géologie sous-lacustre, ainsi que pour une approche plus rationnelle des problèmes d'origine du Léman. Nous terminerons par une liste des travaux entrepris jusqu'à ce jour.

### APPORTS POSSIBLES DE LA GÉOPHYSIQUE POUR LA CONNAISSANCE DU LAC ET DE SON HISTOIRE

Disons d'emblée, pour ceux qui auraient encore quelques vues trop optimistes à ce sujet, qu'il ne faut pas attendre de la géophysique quelque moyen magique pour résoudre les problèmes du lac. Les mesures géophysiques apportent certes une grande quantité de données. Mais quels qu'en soient le coût et les difficultés d'exécution, les mesures physiques même très bien faites – ce qui n'est pas toujours possible – ne constitueront toujours qu'un stade préparatoire. Le critère permettant d'apprécier les résultats sera un plus ou moins judicieux passage à l'hypothèse géologique, c'est-à-dire le travail de l'interprétation. On sait le rôle subjectif que peut y jouer l'expérience de l'interpréteur, ce qui peut d'ailleurs jouer dans un sens favorable ou non. La géophysique est un outil qui demande à être utilisé à bon escient.

#### La gravimétrie

pourrait jouer un rôle privilégié dans l'approche des problèmes du lac. Elle peut étudier la répartition des masses rocheuses se différenciant par leur densité. Ceci d'ailleurs presque aussi facilement à une petite échelle, au niveau de problèmes locaux et d'accidents mineurs, qu'à une échelle très vaste et pour l'étude de problèmes profonds.

Les contrastes de densités entre roches carbonatées, molasses et matériaux quaternaires sont particulièrement intéressants pour notre région. Or on sait l'importance de la mise en place et de l'architecture des molasses dans l'évolution du bassin tout entier. La question de l'importance respective de la tectonique et de l'érosion glaciaire pourrait y trouver, sinon une réponse définitive, du moins des arguments majeurs.

Plusieurs travaux de gravimétrie sont en cours ou en voie d'achèvement (*Klingelé, 1972, Donzé, à paraître, Olivier, 1974*).

Nous n'anticiperons pas sur les résultats. Regrettons toutefois que, pour des raisons financières, le lac doive constituer une lacune dans un réseau gravimétrique de haute précision.

Les 10 stations qui y ont été mesurées (*Gonet*, 1969) sont suffisamment imprécises pour qu'un rattachement au réseau terrestre soit pour le moins contestable. Il existe actuellement des gravimètres submersibles utilisés en mer qui permettraient, sur le lac, un travail précis.

### Sismique-réflexion et réfraction

Le rôle joué par la *sismique-réflexion* est suffisamment connu pour que nous n'ayons pas besoin d'en parler longuement. C'est la méthode la plus employée en mer. En ce qui concerne le Léman, c'est à elle que nous devons une des connaissances fondamentales: la position du toit de la molasse. Cet horizon n'a pas jusqu'à présent été dépassé. Si un jour, grâce à la mise en oeuvre de moyens plus puissants, le secondaire pouvait être atteint, un pas important serait franchi.

Notons toutefois que certaines ambiguïtés ne sont pas exclues. Idéalement, un horizon réflecteur est dû au contact de deux formations, mais la confusion avec une discontinuité accidentelle au sein d'une même formation est toujours possible. De plus, le passage des cartes isochrones aux isobathes d'un horizon donné s'effectue en utilisant des hypothèses sur les vitesses, ce qui introduit un certain arbitraire. Une bonne connaissance des vitesses pourrait être obtenue par *sismique-réfraction*, mais une étude valable pour de telles profondeurs se heurterait à un coût prohibitif, sans parler des difficultés techniques et des grandes charges d'explosifs nécessaires...

### En géomagnétisme

les possibilités sont assez limitées dans le cas précis. Notons l'étude de l'anomalie du Jorat qui, par sa profondeur, ne paraît liée aux origines du lac que de façon très indirecte. L'hypothèse la plus vraisemblable pour expliquer cette anomalie, celle d'une intrusion gabbroïque témoignant de mouvements tectoniques profonds est cependant à retenir. Aussi avons-nous jugé utile de retravailler cette question. Avec la collaboration de quelques étudiants, un nouveau levé magnétique précis, en champ total, s'étendant également au lac où les mesures manquaient jusqu'à présent, a été entrepris en 1971 (*Meyer de Stadelhofen, Sigrist et Donzé*, 1973).

### La géoélectricité

s'adresse, quant à elle, avant tout aux problèmes peu profonds: dépôts récents, chenaux pré- ou interglaciaires, roches sous une faible couverture sont les formations ou accidents que cette méthode permet d'étudier. C'est à ces problèmes que s'attache notre propre étude. On touche donc là surtout à l'histoire récente du lac. Nous verrons cependant des exemples où cette perspective de faible profondeur peut, indirectement, apporter des arguments aux théories de formation.

Il serait également possible de mettre au point des sondages électriques atteignant de plus grandes profondeurs. Des investigations de plusieurs centaines de mètres sont couramment réalisées à terre. Il en a été réalisé à l'étranger, dans des conditions particulièrement favorables, il est vrai, qui atteignaient plusieurs kilomètres de profondeur. La géoélectricité détiendrait là une des clés pour cerner de plus près les problèmes profonds du lac. Il suffirait pour cela de quelques développements techniques et... financiers.

★ ★ ★

Aucune technique n'est donc finalement "la bonne". C'est plutôt à partir de recoupements de très nombreuses données, de natures diverses, que l'on arrivera à une meilleure connaissance des formes et des structures. Par une élimination systématique des hypothèses manquant de fondements objectifs, peu à peu on parviendra à des vues plus claires et plus synthétiques.

## ÉTUDES GÉOPHYSIQUES EXÉCUTÉES DANS LE LÉMAN JUSQU'À CE JOUR

Nous nous limitons dans la liste qui suit aux travaux effectués dans un but géologique. En sont exclus par conséquent les études concernant le milieu aquatique, telles que les études sur les courants, les températures de l'eau ou sa radioactivité. Bien qu'il s'agisse d'observations de nature géophysique, elles sont sans rapport immédiat avec notre sujet.

Les campagnes de sismique-réflexion ont été les plus importantes. Ce sont:

- au printemps 1964: Quelques profils de sismique continue au sparker de 1000 Joules et au Mudpenetrator, dans le Grand Lac. SNPA et CGG. Publié par *Winnock* (1965).
- en automne 1964: Sismique dans le Petit et le Grand Lac. Mud Penetrator et boomer 1000 Joules. Publié par *Serruya, Leenhard et Lombard* (1967).
- au printemps 1966: Campagne sparker dans la partie orientale du Grand Lac. Shell. Résultats publiés partiellement seulement (*Houbolt et Jonker*, 1966).
- été 1970: Campagne Boomer 1000 Joules, nombreux profils surtout dans le Petit Lac. Géolem. Opérateur BRGM. Résultats dans *Ecl. Géol. Helv.* 1971 par *Vernet et Horn*.
- printemps 1971: Suite de la campagne de 1970, extension au Grand Lac. Résultats non encore publiés.
- En gravimétrie: Un seul travail, d'ailleurs très peu précis, jusqu'à présent: 10 stations de mesure dans le Grand Lac. Publié par *Gonet* (1969).
- En magnétisme: Etude de l'anomalie du Jorat en champ total, y compris ses prolongements sur le lac. Résultats publiés par *C. Meyer de Stadelhofen, W. Sigrist et A. Donzé* (1973).
- En électricité: Le chapitre IV du présent travail rendra abondamment compte des différentes études géoélectriques effectuées ces dernières années sur le Léman. Nous ne les énumérerons donc pas ici. Comme autres travaux, nous avons connaissance d'études faites par Géoconsult en 1964 et 1967 dans la région du delta du Rhône, pour le compte de l'industrie privée. Résultats non publiés.

### III. ASPECTS THÉORIQUES ET TECHNIQUES DE LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE EN MILIEU LACUSTRE

#### PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES ROCHES

La conductibilité électrique peut avoir plusieurs causes, selon qu'elle est de type métallique, de type semi-conducteur ou de type ionique. Les deux premiers constituent l'exception dans la croûte terrestre. Ils sont le fait des métaux natifs, de certains oxydes et sulfures, des graphites, etc. Si les roches ou les terrains sont conducteurs d'électricité, c'est presque toujours grâce à l'eau plus ou moins saline qu'ils recèlent. La résistivité électrique, qui est par définition l'inverse de la conductibilité, sera ainsi fonction

- de la porosité de la roche,
- du degré de saturation en eau des pores,
- de la salinité et de la dissociation ionique de cette eau, soit de la résistivité de l'eau,
- du facteur de formation (ou de cimentation).

Cette dépendance est exprimé par la loi d'Archie:

$$\rho = \frac{\rho_w}{\Phi \cdot m \cdot S_w^2} \quad (1)$$

- $\rho$  résistivité de la roche ( $\Omega \text{ m}$ )
- $\rho_w$  résistivité de l'eau d'imbibition ( $\Omega \text{ m}$ )
- $\Phi$  porosité
- $m$  facteur de formation
- $S_w$  degré de saturation

L'expérience a montré que la résistivité électrique d'un terrain constitue un paramètre spécifique, capable dans certains cas de caractériser une formation.

#### LA MÉTHODE DES RÉSISTIVITÉS

Cette méthode, qui est une des méthodes de prospection électrique, a pour but de caractériser les différentes formations géologiques par leur résistivité électrique spécifique, et de délimiter des formations en étendue comme en profondeur.

Elle emploie le plus souvent un système de quatre électrodes:

- deux électrodes A et B d'émission du courant  $i$ , créant dans le sous-sol un champ électrique continu;
- deux électrodes de potentiel M et N, permettant la mesure de ce champ, par mesure de la différence de potentiel entre M et N. Cette dernière mesure peut se faire soit par voltmètre à haute impédance, soit, le plus souvent, au moyen d'un potentiomètre.

Le dispositif quadripolaire symétrique que nous utilisons est du type Schlumberger. caractérisé par un espacement MN petit par rapport à AB:

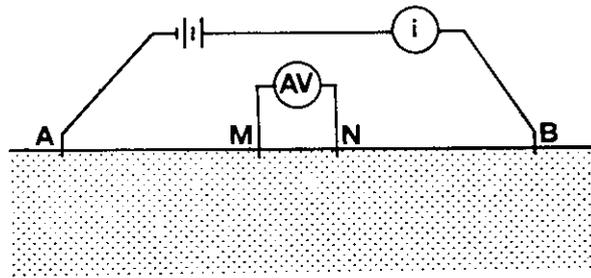


Fig. 1 Le quadripôle Schlumberger

### Terrains homogènes:

La résistivité  $\rho$  d'un terrain homogène mesurée à l'aide d'un dispositif quadripolaire AMNB peut être déduite de la loi d'Ohm comme suit:

$$\rho = K \frac{\Delta V_{MN}}{i} \quad (2)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (3)$$

Le facteur  $2\pi$  provient de l'intégration des lignes de courant à travers une demi-sphère (espace demi-infini), conformément aux calculs que nous rappelons ci-dessous:

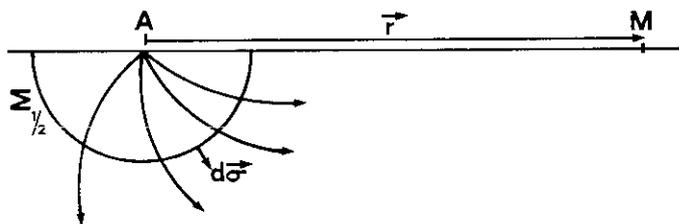


Fig. 2 Allure du potentiel autour d'une électrode d'émission A.

$$\int_{\Sigma_{1/2}} \vec{j} \cdot d\vec{\sigma} = i \quad |\vec{j}| = \frac{i}{2\pi r^2} \quad (4, 5)$$

$$\vec{E} = \rho \vec{j} = \frac{\rho i}{2\pi r^2} [\vec{j}] \quad (6)$$

$$V_{M(A)} = \int_A^M \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_A^M \frac{\rho i}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho i}{2\pi r} = \frac{\rho i}{2\pi} \cdot \frac{1}{(AM)} \quad (7)$$

Pour un dispositif AMNB, le principe de superposition donne:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho i}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (8)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (3)$$

Si les électrodes d'émission et de réception sont noyées dans le milieu, et non plus à la surface de celui-ci, l'intégration se fera sur une sphère entière (espace infini), et le facteur K deviendra:

$$K = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (9)$$

soit le double du K précédent. Nous y reviendrons au sujet des dispositifs immergés au fond du lac.

Signification des symboles:

$\rho$	résistivité du terrain homogène
$i$	intensité du courant
$\vec{j}$	vecteur-densité du courant
$\Sigma$	sphère de centre A ou B
$d\vec{\sigma}$	élément de surface de la sphère
$\vec{E}$	vecteur-champ électrique
$V_M$	potentiel en M
$\Delta V_{MN}$	différence de potentiel entre M et N

### Terrains inhomogènes (stratifiés):

Si le sous-sol n'est plus un terrain homogène, mais une suite de terrains de résistivités respectives  $\rho_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) et d'épaisseurs respectives  $h_i$ , on définit une résistivité apparente

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{i} \quad (10)$$

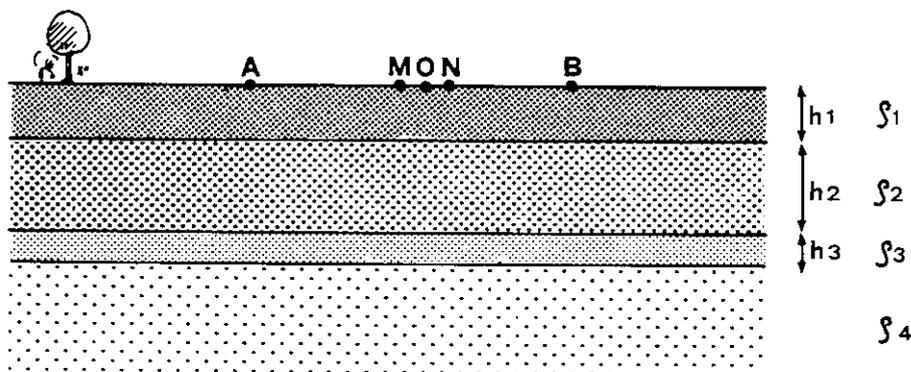


Fig. 3 Modèle de sondage électrique sur terrain stratifié.

Cette résistivité apparente est une moyenne non simple des diverses résistivités rencontrées par les lignes de courant. Elle dépendra du nombre de terrains traversés (donc, dans un cas donné, de l'écartement des électrodes) et des épaisseurs et résistivités respectives de ces terrains. Elle est calculable, à condition de connaître ces différents éléments. On part de la distribution des potentiels dans un milieu stratifié, distribution devant satisfaire dans chacun des milieux à l'équation de Laplace:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (11)$$

Moyennant quelques transformations judicieuses, et en tenant compte des conditions aux limites, on aboutit à une expression de la résistivité apparente

$$\rho_a(r) = \rho_l \left[ 1 + 2r^2 \int_0^\infty K(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda \, d\lambda \right] \quad (12)$$

où  $K(\lambda)$  est la fonction caractéristique de Stefanescu,  
et  $J_1$  la fonction de Bessel du premier ordre.

Disons d'emblée que les calculs numériques sont fastidieux et quasiment impensables sans l'emploi d'un ordinateur, dès que le nombre de terrains dépasse trois. Ils permettent d'obtenir les résistivités apparentes pour un modèle géologique donné et partant, des courbes de sondages électriques, base de l'interprétation des sondages. Nous renvoyons pour le détail aux excellents exposés de *Keller et Frischknecht* (1966) et de *Gilliand* (1970).

Ajoutons qu'en prospection électrique, c'est le problème inverse qui se pose: obtenir les résistivités  $\rho_j$  et les épaisseurs  $h_j$  à partir de résistivités apparentes mesurées à la surface.

### Trainé et sondage électriques

Pratiquement, pour les mesures sur des terrains hétérogènes, on utilise le même dispositif AMNB, ainsi que le facteur géométrique  $K$ . La mesure s'effectue comme si le terrain était homogène. La résistivité obtenue sera précisément cette résistivité apparente que nous avons déjà définie. L'espacement AB joue un rôle prépondérant comme facteur de la profondeur d'investigation.

Si cet espacement reste constant, et que le dispositif est déplacé à la surface du sol, la profondeur d'investigation reste relativement constante. C'est le principe des profils de résistivités, ou "*trainé électrique*". Le trainé permet de suivre une formation géologique et de la délimiter en étendue.

Si au contraire, on écarte systématiquement AB à partir d'un point central O, on réalise un *sondage électrique*. Le sondage électrique est représenté par une courbe donnant  $\rho_a$  mesuré en fonction de OA (= AB/2). L'étude d'une telle courbe donnant permet à l'interpréteur, dans les cas favorables (couches assez épaisses et offrant de bons contrastes de résistivités) de déterminer les épaisseurs  $h_j$  et les résistivités vraies  $\rho_j$  de ces couches, donc de connaître la nature et la position de ces dernières dans le sous-sol.

La notion de profondeur d'investigation que nous avons utilisée est assez imprécise. Tout au plus peut-on dire que lorsqu'un niveau du sous-sol commence à apporter une contribution significative à cette moyenne complexe qu'est la résistivité apparente, il est compris dans la profondeur d'investigation. Confondre cette profondeur d'investigation systématiquement avec un tiers ou un quart de la longueur AB est une simplification commode, pour fixer les idées. Il ne faudrait toutefois pas en faire une loi. Certains auteurs utilisent d'ailleurs une définition différente de cette profondeur d'investigation (*Roy et Apparao*, 1971).

## MESURES ÉLECTRIQUES A LA SURFACE DU LAC

Le dispositif de surface est l'adaptation, sans modification de principe, des méthodes électriques terrestres aux mesures lacustres. Seul le matériel sera différent, comprenant: bateau, câble flottant multiconducteur, source de courant constant, le potentiomètre de mesure ou éventuellement un enregistreur continu.

Comme conducteurs d'émission et de réception, nous utilisons des câbles multiconducteurs (26 conducteurs généralement), enfilés dans des tuyaux en plastique souple de 18 mm de diamètre extérieur. Les électrodes sont constituées par de petits tubes en cuivre entourant le tuyau. Alors que le volume d'air du tuyau suffit à assurer la flottabilité du câble, le poids des électrodes tend à immerger celles-ci localement, assurant ainsi un bon contact avec l'eau. Un tel câble, même long de plusieurs centaines de mètres, peut facilement être transporté sur un bateau aux dimensions réduites.



Fig. 4 Mise en place d'un câble flottant de 500 m. en eaux peu profondes.

Une source de courant constant, développée dans notre laboratoire, permet de régler le courant sur la valeur de  $K$  (éventuellement un multiple ou sous-multiple simple), ce qui rend le calcul de la résistivité apparente très simple. Par contre, nous avons abandonné pour le moment l'enregistrement continu, qui nous limitait à une seule longueur de ligne, au profit du potentiomètre.

Les mesures se font depuis un bateau à moteur équipé de l'appareillage électrique, d'un écho-sondeur, et de la radio. Un commutateur donne accès aux différentes électrodes d'émission et de mesure de potentiel. D'où possibilité de faire plusieurs mesures quasi simultanées en un point, voire tout un sondage électrique. Pour les sondages, un petit bateau de type Zodiac suit la queue du câble, pour ancrer celle-ci pendant le temps des mesures. Par lac calme, cet ancrage n'est pas même nécessaire, la dérive restant alors insignifiante pendant les quelques minutes que dure l'exécution d'un sondage électrique.

Dans de bonnes conditions, une équipe rôdée peut ainsi couvrir, selon la densité des mesures, 10 à 30 km de profils de résistivités, ou encore effectuer une vingtaine de sondages électriques par jour.

On voit que la méthode de surface est rapide et économique. Elle a donné, comme nous le verrons au prochain chapitre, des résultats intéressants le long des rives. Elle comporte cependant quelques fâcheux inconvénients. Ses principales faiblesses sont les suivantes:

- L'investigation porte d'abord sur une certaine épaisseur d'eau, soit un premier terrain électriquement homogène, inintéressant pour le géologue.
- Dès que cette épaisseur d'eau devient importante (à partir du quart environ du dispositif AB, éventuellement avant déjà pour de faibles contrastes de résistivités entre l'eau et le fond), la résistivité du fond lacustre n'est plus guère décelable. Or, c'est précisément le but de nos investigations.
- Les mesures de résistivités apparentes, et par conséquent les cartes qui en sont déduites, manifestent donc les variations de la profondeur de l'eau, et on ne saurait les interpréter sans disposer de mesures bathymétriques précises.
- La solution consistant à allonger le dispositif de mesure, pour augmenter la profondeur d'investigation, se heurte à quelques difficultés d'ordre pratique: Un câble flottant de 1000 mètres est difficile à manier et demande une surveillance constante. Mais les problèmes sont surtout d'ordre théorique: Les couches de faible épaisseur par rapport à la profondeur de l'eau, ou de faible contraste de résistivité passent vite inaperçues (principe de suppression), et la localisation de structures discontinues de faibles dimensions (poches de graviers par exemple) est impossible.

En conclusion, la méthode des mesures de surface est rapide. Elle peut convenir en eaux peu profondes dans le cas de bons contrastes de résistivité pour des structures géologiques de grandes dimensions. Mais la mise en évidence de bancs peu épais ou de structures très locales est impossible. De plus, les problèmes de dérive du câble et de contact entre l'eau et les électrodes en limitent l'emploi aux jours de lac calme.

## **LE DISPOSITIF IMMERGÉ: TECHNIQUES DE CALCUL ET D'INTERPRÉTATION**

La solution aux difficultés énoncées ci-dessus consiste à enlever la tranche d'eau sus-jacente, et à effectuer les mesures électriques au contact du fond. Alors que la réalisation d'un sondage au fond du lac ne pose que des problèmes d'ordre technique, la suppression de l'influence de l'eau n'est possible que par le calcul.

Une solution exacte à ce problème peut être obtenue en reprenant les équations donnant la distribution des potentiels (Laplace), pour aboutir à une solution analytique tenant compte

des nouvelles conditions aux limites. On peut alors calculer un catalogue de courbes-modèles pour le cas où le dispositif de mesure repose au fond du lac. Les paramètres connus seront :

- la résistivité vraie de l'eau,
- l'épaisseur de cette tranche d'eau,
- la résistivité apparente globale.

Les autres paramètres, soit les  $\rho_i$  et les  $h_i$  des couches géologiques, pourront être variés.

La confection d'un tel catalogue, quelque peu complet, est évidemment une oeuvre de très longue haleine. Le calcul de quelques courbes-modèles peut se justifier dans certains cas particuliers, par exemple lorsqu'on peut faire des hypothèses plausibles sur les résistivités possibles des terrains rencontrés.

Nous nous sommes contentés d'une solution approchée à ce problème, solution faisant appel à des approximations, certes, mais d'un emploi rapide. Comme nous avons utilisé cette méthode approchée pour l'élaboration de nos profils sous-lacustres, nous allons en exposer les principes avec quelque détail.

Considérons d'abord un dispositif de mesure situé à la surface de séparation de deux milieux homogènes (c'est-à-dire deux espaces semi-infinis), de résistivités respectives  $\rho_1$  et  $\rho_2$ .

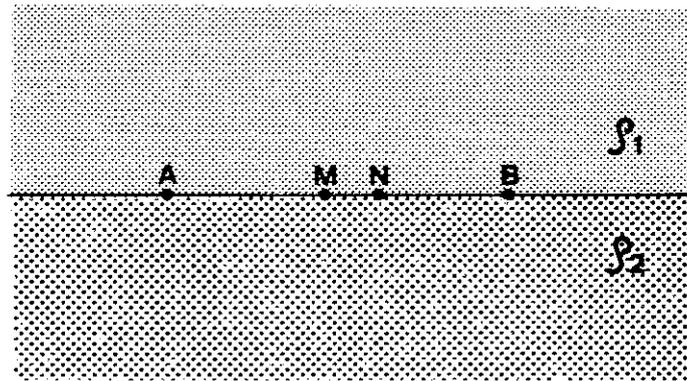


Fig. 5 Dispositif Schlumberger à l'interface de deux milieux, ici l'eau  $\rho_1$  et la roche  $\rho_2$ .

On démontre que la résistivité apparente (mesurée) est donnée par

$$\rho_a = \frac{2}{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}} \quad (13)$$

Ce cas se présente lorsqu'un dispositif de mesure est situé au fond du lac, dans les conditions suivantes :

- la profondeur de l'eau et l'épaisseur du premier terrain doivent être suffisamment importantes, compte tenu de la longueur du dispositif employé, pour pouvoir être assimilées à des couches infinies ;
- ces deux couches doivent être électriquement homogènes, de résistivités  $\rho_1$  et  $\rho_2$ .

Dans la pratique, on pourra mesurer  $\rho_1$  (eau) et  $\rho_a$ . La résistivité du sous-sol lacustre pourra s'en déduire par le calcul inverse:

$$\rho_2 = \frac{\rho_a \cdot \rho_1}{2\rho_1 - \rho_a} \quad (14)$$

Comme autre exemple d'application (de type plutôt académique, il est vrai, mais intéressant comme cas limite), on peut considérer un dispositif de surface comme étant à la séparation de deux milieux, air - eau ou air - terre, suivant le cas. La résistivité de l'air étant infinie, celle du terrain envisagé  $\rho_2$ , on trouverait

$$\rho_2 = \frac{\rho_a \cdot \infty}{2\infty - \rho_1} = \frac{1}{2}\rho_a \quad (15)$$

Cette division par 2 se fait en réalité automatiquement dans la pratique des mesures électriques terrestres, le facteur K étant pris égal  $2\pi \cdot c$ , au lieu de  $4\pi \cdot c$  pour un espace infini.

Lors des mesures réelles, les choses sont plus complexes que dans les cas particuliers étudiés ci-dessus: Les épaisseurs de l'eau et du premier terrain sous-jacent sont rarement suffisantes pour être considérées comme infinies par rapport à un espacement OA donné. Il faudrait, pour permettre cette approximation, que le rapport  $h/OA$  soit supérieur à 2. En réalité, les choses se présentent comme suit:

- Au-dessus du dispositif on a, d'une part, une certaine épaisseur d'eau H, connue, et dont la résistivité, supposée homogène, peut être mesurée; d'autre part, il y a l'air, de résistivité infinie. La partie supérieure seule donnerait donc une résistivité apparente  $\rho_{a1}$  que l'on peut obtenir au moyen d'un abaque deux-terrains (Abaque No 1, fig. 7).
- En-dessous du dispositif, il y a les différentes couches géologiques, dont la résistivité apparente, mesurée en l'absence de l'eau, serait  $\rho_{a2}$ .

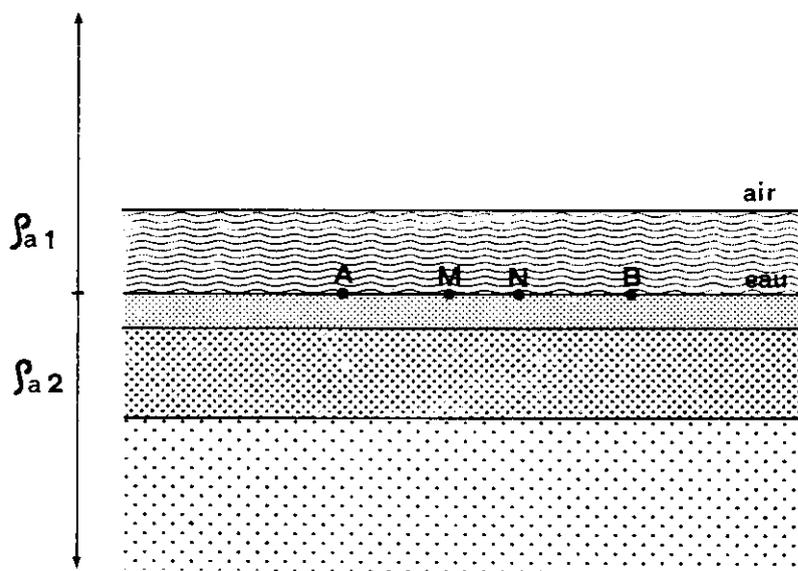


Fig. 6 Modèle d'un dispositif de mesure des résistivités à l'intérieur d'un milieu stratifié.

Si l'on connaissait la contribution exacte de chacun des terrains sous-jacents dans le calcul de cette résistivité (autrement dit, si l'on connaissait ces différents terrains en épaisseur et en résistivité, ce qui est le cas lorsqu'on se donne des modèles), il serait possible de calculer la résistivité apparente globale  $\rho_a$ . Le problème inverse par contre n'a pas de solution univoque. Une certaine résistivité apparente peut être obtenue par une infinité de combinaisons de couches d'épaisseurs et de résistivités diverses. L'interprétation se ramène donc pour les sondages au calcul et à l'examen de très nombreuses courbes modèles. Un tel calcul, long et fastidieux, ne se justifie pas pour l'interprétation des traînés sous-lacustres qui, rappelons-le, fournissent des valeurs de  $\rho_a$  pour des longueurs de ligne AB fixes. C'est pourquoi, lors de l'interprétation de ces traînés, nous nous sommes contentés d'une analyse simplifiée, grâce à la formule (14) où  $\rho_1$  et  $\rho_2$  sont remplacés par  $\rho_{a1}$  et  $\rho_{a2}$ . Ces résistivités apparentes caractérisent respectivement ce qui est au-dessus et ce qui est au-dessous du dispositif de mesure.

$$\rho_{a2} = \frac{\rho_a \cdot \rho_{a1}}{2\rho_{a1} - \rho_a} \quad (16)$$

Afin d'éviter ces calculs fastidieux, nous avons confectionné un deuxième abaque (Abaque No 2, fig. 7), représentant  $\rho_{a2}$  cherché en fonction d'une valeur mesurée  $\rho_a$ , et d'une valeur déterminable ( $\rho_{a1}$ ) à l'aide de l'abaque No 1. Lorsque le nombre de mesures est important, ces calculs de correction, même à l'aide d'abaques, deviennent longs. Aussi les avons-nous traités par ordinateur. Les abaques restent utiles sur le terrain: ils nous permettent, au cours des travaux, de tenir immédiatement compte des résultats obtenus.

*En résumé*, pour obtenir, grâce à un traîné sous-lacustre, des valeurs de résistivités apparentes comparables à celles obtenues sur terre ferme, il faut:

- mesurer  $\rho_a$  en tenant compte du fait que la valeur de K est double par rapport à un dispositif Schlumberger habituel;
- déterminer la résistivité de l'eau par un petit dispositif de surface, ou au moyen d'une sonde de résistivité, telle que la sonde Braissant. On pourra admettre que cette résistivité  $\rho_{eau}$  reste la même sur un espace assez vaste;
- déterminer la profondeur H au point de mesure (écho-sondeur ou bonne carte topographique sous-lacustre);
- déterminer la résistivité apparente significative  $\rho_{a2}$  au moyen des corrections obtenues par les deux abaques.
- On peut dès lors traiter le problème comme un problème terrestre ordinaire.

$\rho_{a2}$  qui représente la résistivité *apparente* du fond du lac est analogue au  $\rho_a$  des mesures électriques terrestres. Le résultat sera semblable à celui obtenu si on avait vidé le lac avant de faire la mesure. L'interprétation pourra se faire avec les moyens usuels et bien connus.

Rappelons cependant que le passage de la formule (14) à la formule (16) constitue une approximation. Une étude systématique du degré d'approximation à partir de nombreux exemples théoriques calculés par ordinateur n'est pas encore faite. Cependant, nous avons testé la méthode sur modèles réduits dans plusieurs cas simples de sondages électriques et de profils de résistivités. Ces essais ont confirmé la validité de la méthode, aux erreurs de mesure près. Nous donnerons ci-après un exemple d'essai en cuve.

Ajoutons encore que l'introduction d'une approximation nouvelle en géoélectricité n'est en définitive pas forcément catastrophique. Les terrains homogènes, les couches horizontales, les épaisseurs constantes ou infinies... sont déjà autant d'approximations courantes et parfois téméraires. Une méthode se justifie finalement par les résultats et les conclusions géologiques qu'elle apporte.

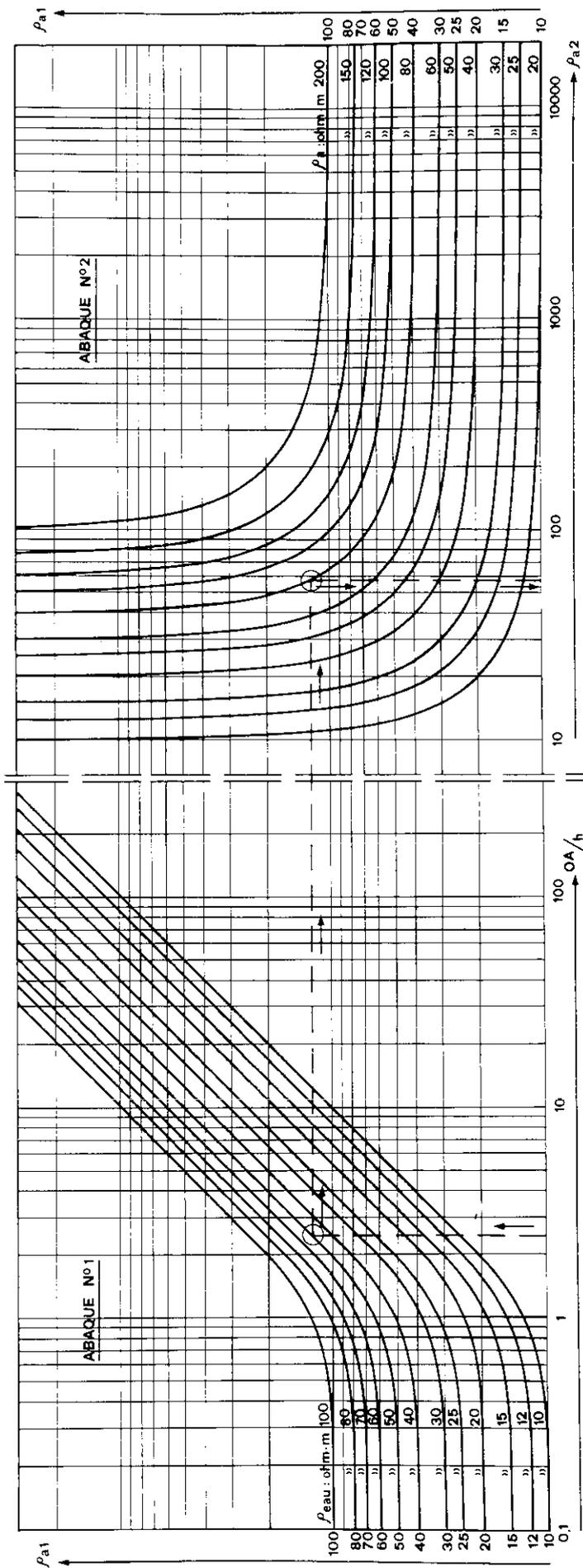


Fig. 7 Abaque destiné à éliminer l'effet de l'eau située au-dessus du dispositif de mesure.

Pour être efficace et relativement rapide, l'emploi de notre méthode simplifiée n'est pas exempt de certaines difficultés:

- L'examen de la formule (16) (ou de l'abaque No 2 qui en représente les variations) montre que le dénominateur peut devenir très petit, ce qui peut amener des incertitudes critiques. D'autre part, comme les valeurs  $\rho_{a1}$  et  $\rho_a$  reviennent quatre fois dans cette formule, les erreurs s'en trouvent augmentées d'autant. On voit l'importance qu'il y a d'effectuer les mesures avec beaucoup de soin, notamment pour les sondages électriques, où de petites incertitudes peuvent conduire à des erreurs d'interprétation importantes.
- On voit aussi qu'une connaissance précise de la profondeur est également indispensable. On a donc avantage à orienter le dispositif de mesure parallèlement aux courbes de niveau. Dans le cas de profils de résistivités (traîné), où l'on peut quelquefois se contenter de valeurs approchées, la connaissance de la profondeur peut être moins précise. Une bonne carte bathymétrique peut à la rigueur suffire, si l'on ne dispose pas d'autres moyens.
- Enfin, les limitations connues et les principes établis pour les sondages électriques classiques (couches non horizontales, terrains électriquement inhomogènes, principes d'équivalence et de suppression...) restent évidemment valables pour des mesures sous-lacustres. Nous rejoignons alors les problèmes bien connus de l'interprétation de sondages.
- Il faut noter que, par rapport aux traînés de surface, lors de mesures au fond du lac, les lectures de  $\Delta V$  restent cependant plus stables, le câble est plus facilement maintenu en place et les mesures ne sont pas perturbées par les vagues. Leur principal avantage réside évidemment dans l'élimination de toute la masse d'eau. La connaissance des terrains sous-lacustres en devient beaucoup plus précise.
- Les abaques ont été établis pour des résistivités de l'eau variant de 10 à 100 ohms.m. ce qui correspond aux valeurs que nous rencontrons sur les lacs suisses. Il est évident qu'un simple décalage des échelles d'une puissance entière de 10 suffit à les adapter à n'importe quelles autres résistivités.

## DISPOSITIF IMMERGÉ: TECHNIQUE DE MESURE

Les techniques de mesure restent dans l'ensemble les mêmes que pour un dispositif de surface. Le câble est un câble marin multiconducteur, analogue à une flûte sismique. Les sorties étanches vers les électrodes sont disposées conformément aux exigences du sondage électrique, soit grosso-modo en progression géométrique à partir du centre du dispositif.

Pour le traîné, nous utilisons aussi des câbles à 4 ou 8 conducteurs autoporteurs (fils de cuivre et acier), supportant une forte traction, sans être lourds ni rigides. L'isolation doit être telle que les effets capacitifs entre l'eau et les conducteurs ne viennent pas trop gêner les mesures. Ce problème se pose surtout pour des câbles longs.

Enfin, suivant la nature du fond et la longueur du câble, le déplacement peut occasionner quelques difficultés, ce qui rend les opérations en général un peu plus lentes que dans le cas du câble flottant.

En faisant les mesures, il faut s'assurer que tout le dispositif, c'est-à-dire les 4 électrodes utilisées, reposent bien au fond. Il est indispensable, après un déplacement, d'attendre quel-

ques instants. De plus, la partie du câble allant de l'électrode la plus proche du bateau jusqu'à la surface, doit être assez longue. Le triple de la profondeur maximale à laquelle on travaille est, d'après nos expériences, une marge de sécurité suffisante.

Lorsqu'on opère sur un lac agité, ce qui est possible pour le dispositif sous-lacustre, il est recommandé de fixer le câble au bateau-tracteur par l'intermédiaire d'un gros flotteur, capable d'annuler les variations de traction verticale du câble sur le bateau. Ce flotteur fut, dans notre cas, une petite barque remorquée, servant en même temps au transport du câble.

### POUVOIR DE RÉOLUTION DU DISPOSITIF IMMERGÉ, COMPARÉ AU DISPOSITIF DE SURFACE. UN EXEMPLE SUR MODÈLE RÉDUIT

Nous donnons ci-après les résultats d'un essai en cuve. Le modèle était un bloc de molasse de résistivité  $119 \pm 5$  ohms.m. dans l'eau à 28,5 ohms.m. Ce modèle était destiné à simuler un sillon graveleux au fond du lac Léman. Le contraste de résistivité entre le sillon et le milieu entourant (environ 4 : 1) correspond aux contrastes que l'on peut espérer trouver dans la nature, compte tenu des connaissances acquises en milieu lacustre.

Les dimensions du modèle, ainsi que la longueur des dispositifs de mesure sont indiquées sur les schémas et graphiques correspondants. Le dispositif de surface de 50 cm est celui qui donnerait théoriquement la résistivité apparente la plus élevée de tous les dispositifs de surface, compte tenu de l'épaisseur et de la profondeur du bloc, ainsi que du contraste de résistivité de 4 : 1 (Abaques C. G. G.). En fait, les valeurs mesurées sont un peu inférieures aux valeurs théoriques du fait des dimensions latérales du bloc par rapport à la longueur du dispositif. Si bien que le dispositif de surface optimal doit se situer entre 40 et 50 cm. Nous reproduisons la courbe obtenue avec  $AB = 40$  cm.

Signalons encore qu'un dispositif immergé d'assez petite dimension passant au ras du bloc donne, après correction, la résistivité vraie de celui-ci. C'est ce que nous avons obtenu avec les dispositifs de 10 et 20 cm, toujours aux erreurs près. Comme prévu, les variations de potentiel à la limite du bloc se font nettement sentir avec les dispositifs de plus de 15 cm.

Sur les figures 10 à 13, les courbes en traits pleins sont celles obtenues en recoupant le sillon dans un déplacement du dispositif parallèle à lui-même; celles en traitillés ont été obtenues en déplaçant le dispositif selon son axe.

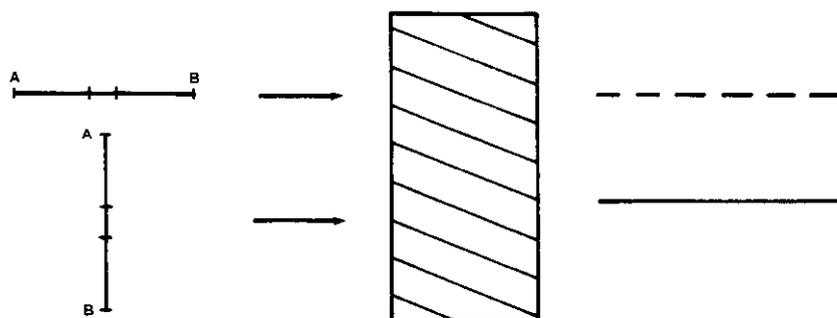
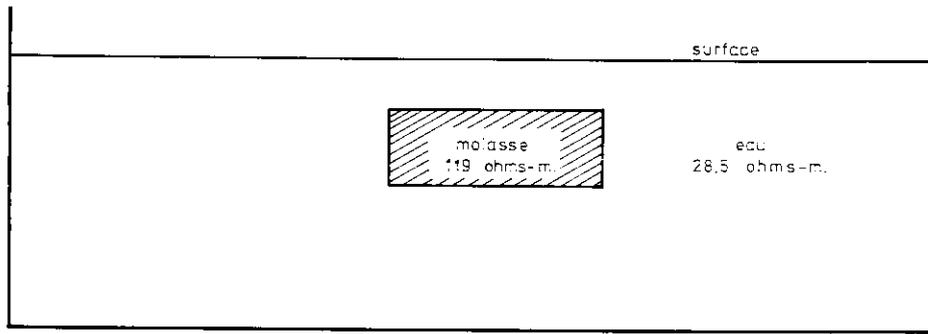


Fig. 8 Modes de passage des dispositifs de mesure sur le modèle réduit.



Echelle :

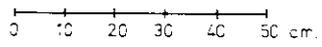


Fig. 9 Schéma du modèle réduit.

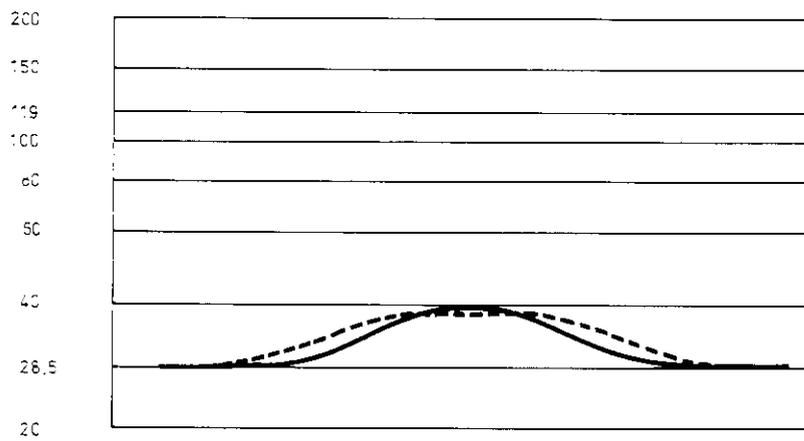


Fig. 10 Profils de résistivités avec une ligne d'émission A-B = 40 cm déplacée à la surface de l'eau.

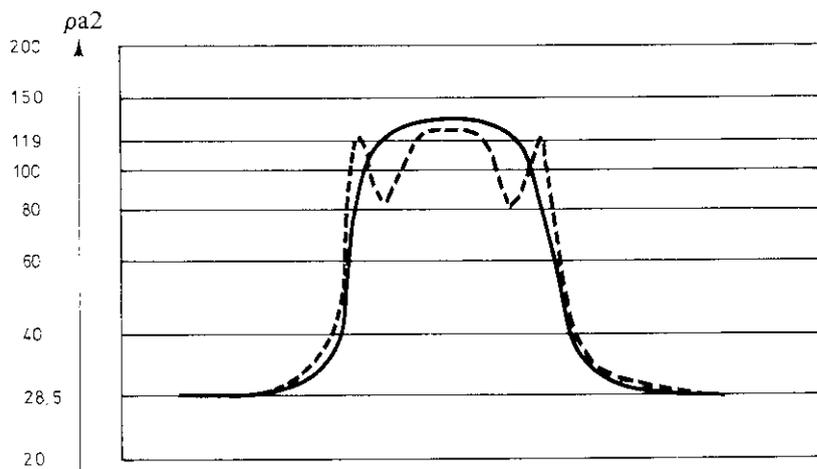


Fig. 11. Profils de résistivités avec une ligne d'émission A-B = 20 cm déplacée à 10 cm sous le niveau.

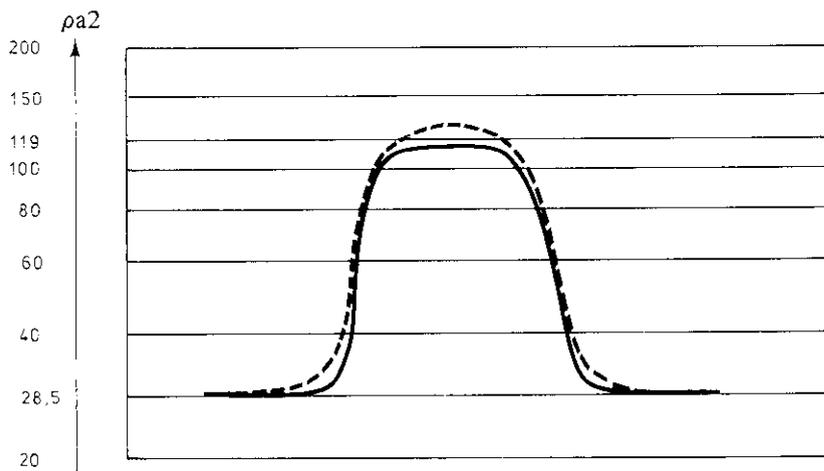


Fig. 12 Profils de résistivités avec une ligne d'émission A-B = 10 cm déplacée à 10 cm sous le niveau.

## TECHNIQUE DE REPÉRAGE

Lorsqu'on effectue une mesure au large, il est essentiel de pouvoir en reporter la valeur sur carte et, au besoin, retrouver pour d'éventuelles mesures complémentaires l'endroit précis où cette valeur a été obtenue. Une bonne localisation du bateau et du dispositif de mesure s'impose.

La géophysique "off-shore" connaît des moyens de repérage électronique précis, tels que les systèmes Marquardt (sonar à effet Doppler), Lorac, Toran, etc. Ces systèmes sont en général trop lourds et trop coûteux pour nos moyens.

Parmi les méthodes "légères", adaptées à nos besoins, nous avons d'abord utilisé la méthode par intersection de deux droites, grâce à deux théodolites postés sur la rive en deux points connus. Elle exige une bonne synchronisation par radio, entre le bateau-laboratoire et les deux opérateurs-géomètres. De plus, ces derniers sont astreints à se déplacer lorsque les conditions angulaires deviennent défavorables. C'est là le principal inconvénient de la méthode. En outre, elle exige évidemment deux instruments, deux opérateurs et deux véhicules, ce qui rend le repérage finalement assez coûteux.

D'autres moyens, utilisant des télémètres, ont finalement été adoptés:

- Lorsque les profils de mesure longent les rives, jusqu'à 500 mètres environ de la côte, il est possible de se repérer depuis le bateau grâce aux cartes topographiques et un télémètre léger, de 50 cm de base. En prenant chaque fois deux ou trois distances par rapport à des points significatifs (débarcadères, angles d'immeubles, embouchures...) on arrive à une bonne précision par recoupements de distances. C'est la méthode la mieux adaptée pour de longs profils longeant les rives. Elle permet de ramener l'équipe lacustre à deux hommes: un navigateur-topographe et un opérateur-géophysicien. L'équipe à terre, ainsi que la liaison radio, sont supprimées. De plus, puisque les distances à mesurer ne dépassent jamais le kilomètre, une parfaite visibilité n'est pas indispensable.
- Pour les mesures au large, nous avons utilisé un télémètre d'artillerie de 3 mètres de base, de portée théorique de 25 km (don de l'armée). En fait, tant pour des questions de précision que de visibilité, l'utilisation en est limitée à une distance d'envi-

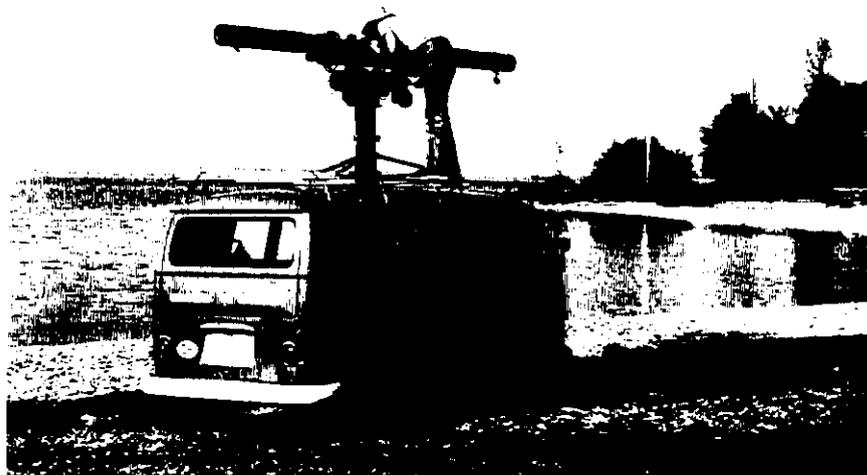


Fig. 13 Repérage télémétrique du bateau-laboratoire lors de mesures sous-lacustres à plusieurs kilomètres au large.

ron 5 km. Il permet la lecture de la distance et de l'angle par rapport à une direction de référence. Ce télémètre, monté sur Bus VW et convenablement posté, permet de suivre le bateau dans un domaine très étendu. La liaison radio est indispensable, mais le repérage peut se faire par un seul opérateur.

Une remarque avant de clore ce paragraphe: On repère évidemment un bateau, et non le centre 0 du dispositif de mesure. En reportant les valeurs de résistivité sur carte, on doit tenir compte de ce décalage. Pour un dispositif de surface, cette correction ne pose guère de problèmes, si ce n'est pour l'évaluation d'un éventuel effet de dérive du câble flottant. Il en va autrement pour des mesures sous-lacustres, où le câble n'est pas visible. L'écart entre le dispositif de mesure et le bateau est fonction non seulement de la longueur du câble et de la profondeur du lac, mais encore de la courbure du câble entre le fond du lac et le bateau, courbure qui dépend à son tour de la tension de ce câble et de la dérive du bateau. On est donc forcément amené à faire une certaine estimation, pouvant entraîner des incertitudes de plusieurs dizaines de mètres. Comme les mesures électriques ne sont pas ponctuelles, mais englobent des volumes considérables, cette incertitude est cependant rarement vraiment gênante.

#### IV. QUELQUES RÉSULTATS DE LA PROSPECTION ÉLECTRIQUE

##### POSSIBILITÉS ET LIMITES DE L'ÉTUDE GÉOÉLECTRIQUE DANS LE LAC LÉMAN

Nous avons vu au chapitre précédent que la géoélectricité a pour objectif de mettre en évidence et de situer des formations qui se distinguent des formations environnantes par leur résistivité électrique. Examinons donc d'abord les valeurs que nous pouvons rencontrer dans notre région et dans le lac:

	Valeur moyenne en ohm.m	Valeurs usuelles en ohm.m
Molasse chattienne	30	20 - 40
Molasse aquitanaïenne	60	50 - 70
Molasse burdigalienne	110	80 - 150
Moraines	50	20 - 80
Sédiments fins, vases		15 - 40
Flysch		très variable
Poudingues		plus de 150
Sables		100 - 150
Graviers aquifères		120 - 250
Graviers "secs"		250 - 1.000
Roches carbonatées		500 - 10.000
Eau du lac	50	45 - 53

Ces résultats sont basés sur de nombreuses observations faites ces dernières années par l'Institut de Géophysique. Pour les Molasses, nous renvoyons aux études statistiques de *Favini* (1966 et 1970) et de *C. Meyer de Stadelhofen* (1965).

On notera certaines fluctuations assez importantes, notamment pour les moraines qui sont d'autant plus conductrices qu'elles sont plus argileuses, alors que leur résistivité augmente avec la teneur en sable et en graviers. Une semblable remarque vaut pour les sédiments lacustres.

Pour les roches carbonatées, la gamme des résistivités est très étendue, avec des valeurs fortes pour les roches compactes, et faibles pour celles qui sont fracturées ou altérées. Ces résistivités descendent cependant rarement en-dessous de 400 ohm.m.

La résistivité de l'eau du lac Léman se situe autour de 50 ohm.m. Nous savons qu'elle est fonction de la salinité et de la température, donc sujette à des variations locales et saisonnières. Certaines rivières se distinguent ainsi nettement de l'eau du lac. Mais cette différenciation s'estompe rapidement au large de l'embouchure. Quant aux variations saisonnières dues surtout aux changements de températures, elles restent toujours assez superficielles.

Le tableau des résistivités que nous avons donné indique d'ores et déjà certaines limitations de la méthode électrique. On voit par exemple qu'une accumulation graveleuse se distinguera facilement de la molasse chattienne, alors que cette distinction deviendra difficile ou impossible sur un sous-bassement calcaire.

D'autre part, nous nous sommes donné à nous même, pour des raisons budgétaires, une autre limitation. En n'utilisant pas de câble d'émission plus long que 500 mètres, nous avons

volontairement, et peut-être provisoirement, restreint l'investigation à 100 ou 150 mètres de profondeur environ.

Enfin, il faut rappeler qu'une bonne part de nos résultats sont représentés sous forme de cartes de résistivités. Ces cartes sont une représentation des résistivités apparentes, pour une longueur de ligne donnée, et non des résistivités vraies. La résistivité apparente ne se confond avec la résistivité vraie que si la formation est subaffleurante et assez grande en extension comme en profondeur par rapport à l'espacement du dispositif de mesure, et enfin, lorsqu'il s'agit de mesures de surface, si l'eau est peu profonde.

Ces remarques étant faites, nous pouvons à présent examiner les résultats. Nous commencerons par les études générales de reconnaissance, pour terminer par quelques problèmes plus détaillés et plus locaux.

Notons que parmi ces travaux, nous avons repris et développé certains résultats obtenus dans le passé par des collaborateurs de l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne. Parmi ces chercheurs, il faut mentionner nos amis J.C. Favini, H. Lazreg et P. Corniche.

## RECONNAISSANCE PROFONDE DES RIVES: TRAÎNÉ DE SURFACE AB 500 M.

Dans le but de situer d'abord les anomalies ou discontinuités relativement importantes, nous avons entrepris une reconnaissance générale le long des rives, tout autour du lac, ainsi que plusieurs traversées du Petit Lac. Le contraste entre l'eau et le fond du Petit Lac s'étant avéré faible, sauf sur les bords, nous avons omis la représentation de ces derniers résultats, peu significatifs.

Au total, ce traîné de reconnaissance de surface représente quelque 200 kilomètres de profils, le plus souvent en plusieurs longueurs de ligne simultanément. Ce qui totalise environ 500 points de mesure. La grande carte du Léman (voir planche annexée) donne les résultats de cette campagne pour un dispositif de AB = 500 mètres.

Sur la même carte figurent les sondages électriques, tant terrestres (SE) que lacustres (SL) que nous avons effectués comme mesures complémentaires. De plus, nous avons parfois rassemblé plusieurs valeurs obtenus par traîné, de façon à reconstituer un sondage électrique ou "pseudo-sondage" (PS). Ces derniers, bien que moins précis et moins facilement interprétables, donnent cependant des indications utiles et permettent des estimations de profondeurs.

A l'ouest de Lutry pour la côte suisse, de Thonon pour la côte française, nous touchons essentiellement la Molasse chattienne, avec ses valeurs caractéristiques inférieures à 40 ohm.m. Quelques exceptions intéressantes cependant: Les deltas de la Promenthouse, de l'Aubonne et de l'Hermance, bien que peu profonds, se marquent encore en valeurs supérieures à 50, voire 60 ohm.m. On pouvait espérer trouver une semblable influence graveleuse vers l'embouchure de la Venoge. Nous n'y avons pourtant pas rencontré de delta marqué. Il semblerait que la Molasse elle-même y présente une résistivité un peu plus élevée qu'à l'ordinaire. D'autres anomalies, du même ordre de grandeur que celles des deltas mais de formes différentes, sont associées à des dépôts graveleux côtiers, à rattacher à l'"Alluvion ancienne". (Corsier, Chevrens, Excenevex)

Le passage devant la Paudèze se marque légèrement. S'agit-il de quelques apports récents de gravières ou du fameux Thalweg préwürmien étudié par *Bersier* (1947)? Ce problème mériterait une étude plus détaillée, car il pourrait être significatif d'un niveau de base inférieur au niveau actuel du lac.

Notons en passant l'absence de valeurs de type Aquitanien devant Ouchy. Cette absence est confirmée par plusieurs sondages électriques lacustres.

Dans la région côtière de Lausanne à Montreux, nous pouvons constater la progressive augmentation des résistivités. On voit apparaître les Poudingues du Pèlerin, séparés des formations préalpines par la Molasse rouge de Vevey, qui se marque par des basses résistivités.

Quant aux anomalies de Rolle, de Genève BIT et de la pointe d'Anthy, électriquement zones résistantes encadrées par les basses résistivités typiques du Chattien, nous en reparlerons dans le cadre d'études de détail. Il en est de même pour la côte française, que nous abordons maintenant.

## LA CÔTE FRANÇAISE

En partant d'Excenevex en direction du Bouveret – toujours sur la carte des profils AB = 500 m – la pointe d'Anthy d'abord, mais bien plus l'immense et profond delta graveleux de la Dranse se marquent, comme il fallait s'y attendre, en valeurs très élevées. L'étude morphologique à elle seule permet d'attribuer aux graviers de la Dranse une épaisseur de quelque 200 mètres. Nos sondages n'ont pas pu en toucher le fond. L'étude géophysique du Chablais, encore en cours, apportera peut-être quelques précisions.

A partir d'Amphion, les valeurs augmentent rapidement, pour dépasser les 100 ohms.m devant Evian. Faut-il y voir déjà un substratum autre que molassique, ou s'agit-il simplement, comme le suggéreraient les connaissances géologiques actuelles, d'épais matériaux glaciaires graveleux ? Nos "pseudo-sondages" n'ont pas pu résoudre ce problème, leur profondeur d'investigation étant insuffisante. C'est pourquoi, malgré de grandes difficultés d'exécution, nous avons effectué deux sondages électriques profonds sur la rive (SE 101 et SE 102, voir planche annexée).

Le premier donne un substratum de 100 ohms.m sous une couverture de 8 mètres de graviers, le second une centaine de mètres de graviers (en relation avec la gravière de Lugrin) sur un substratum à 70 ohms.m. Nous n'avons donc, dans la région d'Evian, aucun indice permettant de supposer la présence de Molasse chattienne, aux profondeurs touchées par nos mesures électriques.

Essayant alors d'éviter autant que possible l'influence des dépôts quaternaires côtiers, nous avons effectué un profil sous-lacustre, en suivant les rives de Meillerie à Nernier, entre 500 et 1000 mètres au large, avec un dispositif AB = 400 m, sous-lacustre. La situation de ce profil, ainsi que les résultats sont donnés par la figure 14 (Léman Côte Sud).

Ce profil sous-lacustre confirme, en les précisant, les résultats du traîné 500 mètres des rives: Les deltas d'Anthy et de la Dranse se font sentir assez fortement encore à plusieurs centaines de mètres au large. Pourtant on devine la Molasse sous-jacente, qui réapparaît jusqu'à Amphion. A partir de là, les résistivités apparentes passent brusquement à plus de 100 ohms.m; elles atteindront 200 ohms.m après Lugrin.

Une discontinuité majeure entre Amphion et Evian se trouve ainsi confirmée. La Molasse chattienne disparaît pour faire place à une formation différente. Il est difficile de dire, faute d'une bonne connaissance électrique du Flysch, si les résistivités élevées que l'on rencontre dès 1,5 km à l'est d'Amphion, sont à attribuer toutes aux roches carbonatées préalpines; il se peut que ces dernières soient bordées par un Flysch électriquement résistant.

# LÉMAN CÔTE SUD

PROFIL DE RÉSISTIVITÉS  
 APPARENTES EN ohms - m  
 A - B 400 m SOUS LACUSTRE

## LÉGENDE

DE 100 A 200  
ohms - m



DE 50 A 100  
ohms - m



DE 25 A 50  
ohms - m



ÉCHELLE :  
 1000m 1000m 1000m 1000m 1000m

● — ● — TRACÉ DU PROFIL

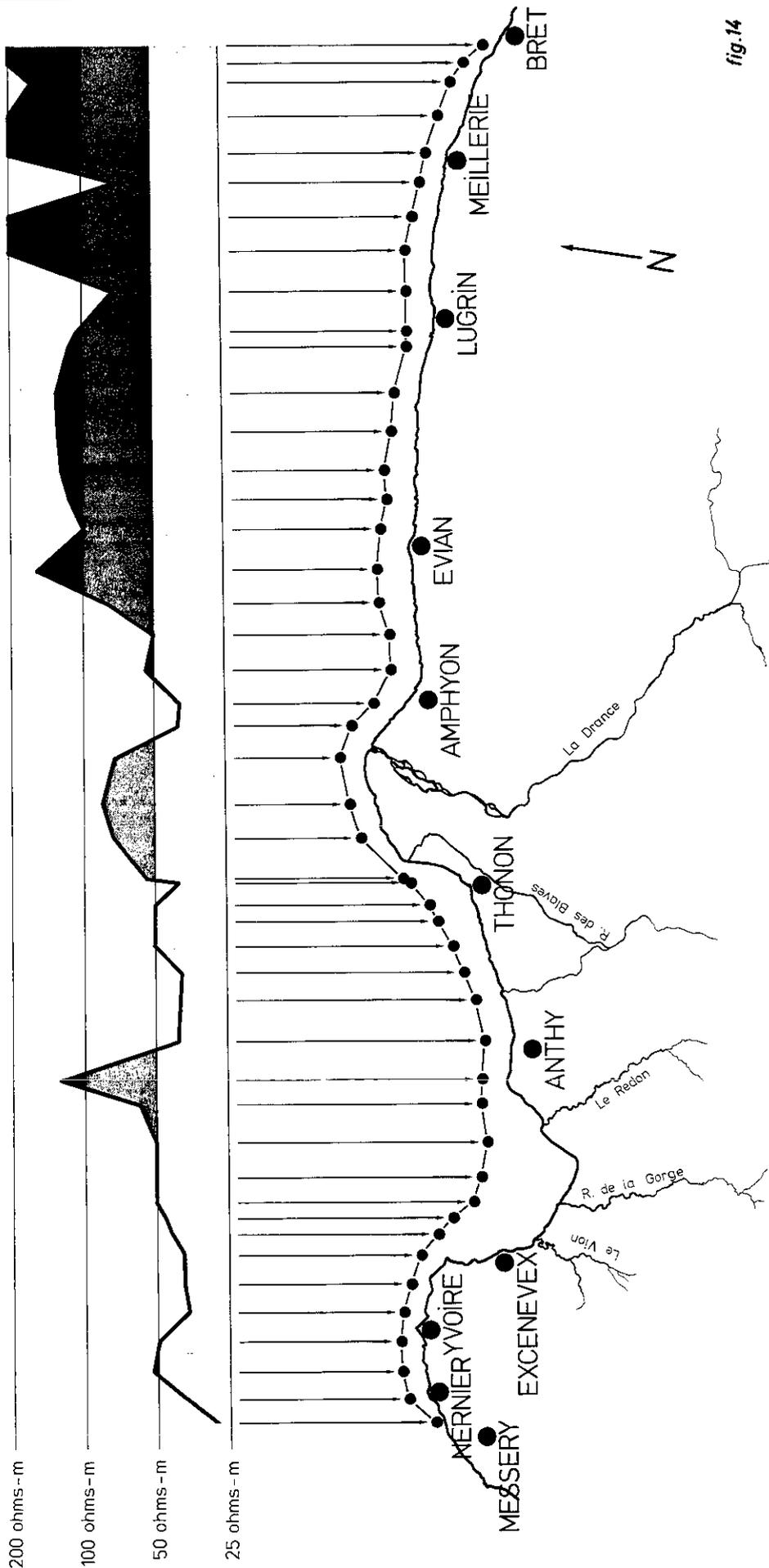


fig.14

## PROFILS SOUS-LACUSTRES A TRAVERS LE PETIT-LAC

La sismique-réflexion de ces dernières années nous a fourni d'assez bons renseignements sur les fonds du Petit Lac. Il paraissait intéressant de compléter ces connaissances par quelques profils électriques qui, tout en donnant de moins bonnes indications que la sismique sur la position des diverses formations géologiques, sont susceptibles dans bien des cas d'en mieux préciser la nature. Un des problèmes électriques dans le Petit Lac est le manque de différenciation, en résistivités, entre la Molasse et les vases lacustres, toutes deux de bons conducteurs. Par contre, les moraines et les formations graveleuses sont faciles à discerner.

Des dispositifs de plusieurs longueurs, de 30 à 400 mètres, ont simultanément ou successivement été utilisés. Sur la grande carte du Léman (planche annexée), nous avons figuré les mesures obtenues avec un AB = 100 mètres.

Les valeurs molassiques, et plus précisément chattiennes (moins de 35 ohms.m) apparaissent partout vers la côte suisse, où la couverture est de faible épaisseur. On retrouve ces valeurs dans le secteur des Hauts-Monts de Corsier, résultat qui confirme leur nature molassique. Ces faibles résistivités se rencontrent à nouveau devant Messery - Nernier.

Les fortes valeurs de Corsier et de la Pointe d'Yvoire confirment les résultats du traîné de surface; elles sont associées à la présence de graviers.

Aucune trace de chenal graveleux n'apparaît dans l'axe du Petit Lac: Nous restons partout dans les valeurs morainiques. Quelques résistivités devant Versoix dépassent légèrement 50 ohms.m. La densité de mesures n'y est pas suffisante pour traduire ce léger contraste en termes lithologiques.

Cette absence de chenaux graveleux sous-lacustres mérite réflexion: Dans l'hypothèse d'une origine glaciaire du lac, l'existence de la barre de Promenthoux impliquerait un important stade d'arrêt du glacier. Un tel stade, accompagné de mouvements temporaires d'avance et de reculs, s'accompagne ailleurs généralement de volumineux dépôts de graviers fluvio-glaciaires. Ces dépôts n'ont pas été décelés dans le Petit Lac. Nous disposons donc là d'un argument nouveau, négatif certes, contre la théorie du surcreusement.

## BAIE D'EXCENEVEX – POINTE D'ANTHY

Nous avons représenté sur la carte "Baie d'Excenevex" (fig. 15) un profil de résistivité longeant les rives depuis le fond de la baie jusqu'au-delà des Balises (Pointe d'Anthy). La représentation des valeurs obtenues en trois longueurs de ligne (200, 300 et 500 mètres), correspondant à des investigations de plus en plus profondes, a été faite de manière à rendre compte de ces profondeurs d'investigation, à une échelle arbitraire. Il ne s'agit ni d'une coupe géoélectrique au sens habituel, encore moins d'une coupe géologique. Cette coupe en résistivités apparentes est cependant suffisamment parlante pour délimiter des zones caractéristiques:

Les sables d'Excenevex peu épais reposent sur un substratum conducteur, sans doute molassique. A partir de Coudrée, on passe à des graviers encore superficiels, qui iront en s'approfondissant jusqu'à la pointe d'Anthy, où l'épaisseur des graviers atteint une quarantaine de mètres au PS 4, et 60 à 80 mètres au SE Anthy 1. Nous remarquerons encore qu'aucune rivière n'aboutit en ce point, mais que le Redon et le Pamphiot encadrent cet ancien delta. Notons encore la dissymétrie de ce dernier, étalé en surface jusque vers le fond de la baie.



Action intéressante de l'érosion sur l'autre versant de la baie: La moraine côtière d'Exce-nevex et de la pointe d'Yvoire a été partiellement délavée. Les sondages SL Y 1 à 8 et SL P 1.1 donnent une idée de l'importance de ce phénomène.

## LES CÔTES DU LÉMAN: CARTES DE RÉSISTIVITÉS DE SURFACE

Nous avons décrit au chapitre III les possibilités et les faiblesses du traîné de surface. Rappelons que c'est, en petites longueurs de ligne, le moyen de reconnaissance de détail idéal en eaux peu profondes. Nous nous sommes donc limités généralement pour ce travail aux côtes à flancs peu abrupts, c'est-à-dire à l'ouest d'une ligne Lausanne - Evian. Les planches "Côtes du Léman" sections A à J en représentent les résultats obtenus sous forme de cartes de résistivités. Ces cartes sont suffisamment parlantes par elles-mêmes pour n'avoir besoins que de quelques brefs commentaires:

Partout on s'aperçoit que les valeurs tendent vers les résistivités de l'eau, soit environ 50 ohms.m, dès que celle-ci devient profonde. L'interprétation doit donc tenir compte de la bathymétrie. On évitera ainsi d'attribuer aux courbes une signification géologique qu'elles n'auraient pas.

Ceci dit, commençons par regarder en détail un exemple précis et typique: Le delta de la Promenthouse actuelle (côtes du Léman, section C: fig. 17) apparaît à peine lorsque les mesures sont faites avec une ligne de 100 mètres. Il se marque mieux sur les cartes en 50 et surtout en 25 mètres, non reproduites ici. Les dépôts y sont donc peu épais. Par contre, nous trouvons à 1 km à l'est de l'embouchure actuelle un delta remarquable. Au sondage SL R8, on trouve une épaisseur de gravier d'environ 25 mètres. En nous déplaçant encore vers l'est, on trouve un troisième delta, faiblement marqué en AB 25 mètres, parce qu'il est à peu près entièrement émergé. (Voir à ce sujet la carte des équirésistivités terrestres AB 100 mètres de la région de Rolle. Figure 25.) La Promenthouse constitue ainsi un exemple significatif de changements des cours des rivières et d'abaissements successifs du niveau de base du lac, abaissements qui sont à l'origine de l'existence de terrasses.

En parcourant les cartes de résistivités, on retrouve ainsi plusieurs deltas anciens, généralement situés à l'est des cours d'eau actuels. Citons la Versoix (Section A, fig. 16), l'Aubonne (Section D, fig. 18), ainsi qu'un delta ancien à l'est de St. Prex (ancien Boiron?). Nous ne mentionnerons pas les deltas de moindre importance, dont certains n'apparaissent déjà plus en longueur de ligne de 100 mètres. Nous ne ferons pas davantage d'hypothèse sur d'éventuels mouvements tectoniques de faible amplitude qui auraient pu produire ces changements de cours presque systématiques vers l'ouest. Par contre, les abaissements par à-coups du niveau du lac sont ainsi confirmés une fois de plus.

La Venoge actuelle n'a pas de delta graveleux. Mais là encore, la géoélectricité a mis en évidence plusieurs taches de graviers à des niveaux supérieurs aujourd'hui émergés, qui pourraient représenter des deltas fossiles.

Avant de passer à la côte française, observons encore au passage l'anomalie électrique du BIT, à Genève, dont il sera question plus loin (fig. 16).

Les seules mesures électriques lacustres ne permettent pas dans tous les cas de trancher entre une origine fluviale, fluvio ou glacio-lacustre, ou encore morainique des graviers. Aussi les éléments remarquables de la côte française se comprennent-ils mieux en relation avec leurs prolongements à terre. La carte géoélectrique du Chablais n'étant pas encore publiée (Buchli, Paquin, à paraître), nous nous contenterons de noter que les différentes taches graveleuses (Corsier, Chevrens, pointe d'Yvoire, pointe d'Anthy, et surtout la Dranse)

se raccordent avec de toujours importantes formations similaires à terre. Seul à Hermance, où l'on a affaire à un dépôt récent, ce prolongement est vraiment minime.

Les Hauts-Monts apparaissent, comme le laissait prévoir le traîné sous-lacustre en AB 100 mètres, en valeurs molassiques (chattien). On retrouve de telles valeurs entre Hermance et Nernier, où par place des vases argileuses conductrices surmontent la molasse.

A partir de la Dranse, les apports fluvio-glaciaires sont davantage entremêlés et plus épais. Le substratum est, de plus, résistant et – ennui majeur pour des mesures de surface en courte longueur de ligne – les versants sont plus raides. L'interprétation dès lors devient plus aléatoire. Seule une étude fine et détaillée pourrait apporter des confirmations là où les courbes d'équirésistivités ne font que suggérer les transitions.

# CÔTES DU LÉMAN

COURBES D'ÉQUIRÉSISTIVITÉ  
APPARENTE EN ohms - m  
A-B 100 m DE SURFACE

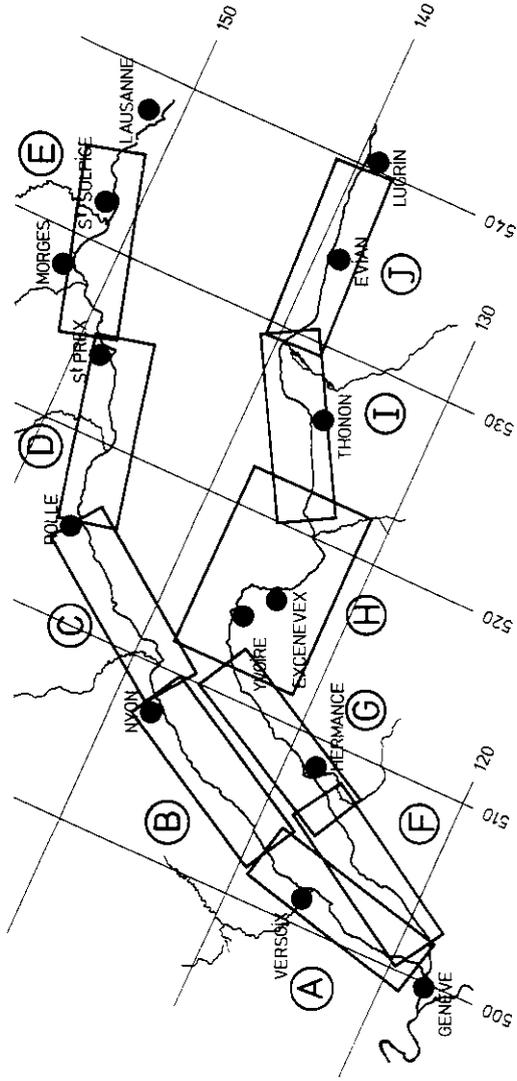
## LÉGENDE

	MOINS DE 30 ohms - m		DE 70 A 100 ohms - m
	DE 30 A 50 ohms - m		DE 100 A 200 ohms - m
	DE 50 A 70 ohms - m		PLUS DE 200 ohms - m

ÉCHELLE : 500m 500m 500m

# PLAN DE SITUATION DES SECTIONS

ÉCHELLE : 5 km 5 km 5 km



# SECTION A

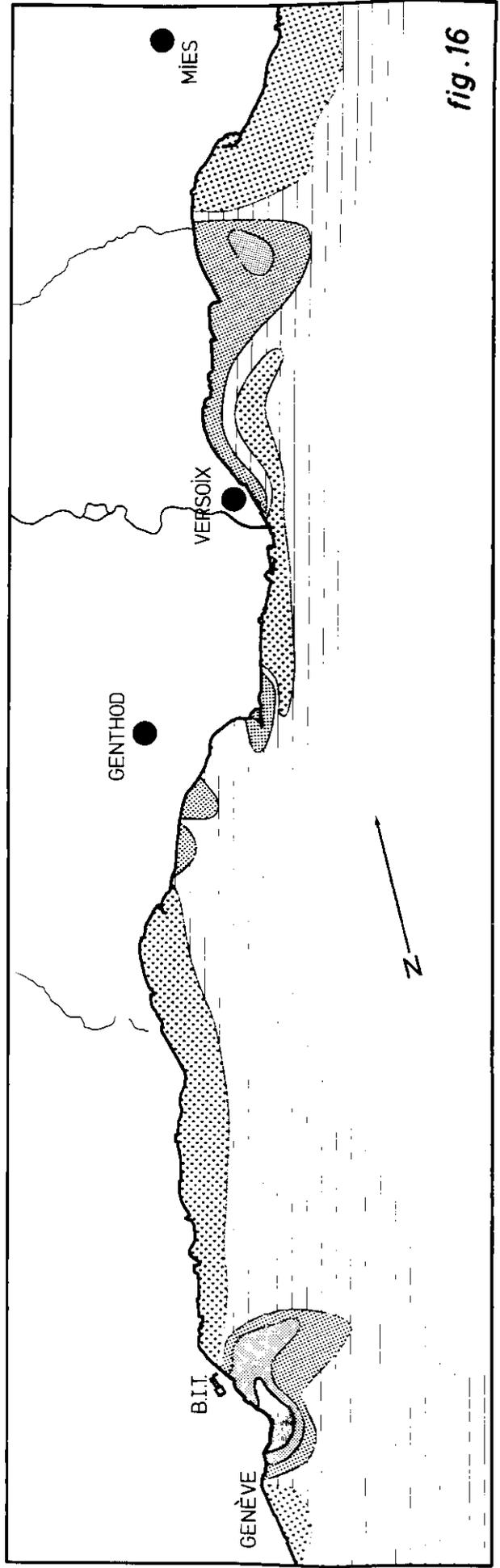
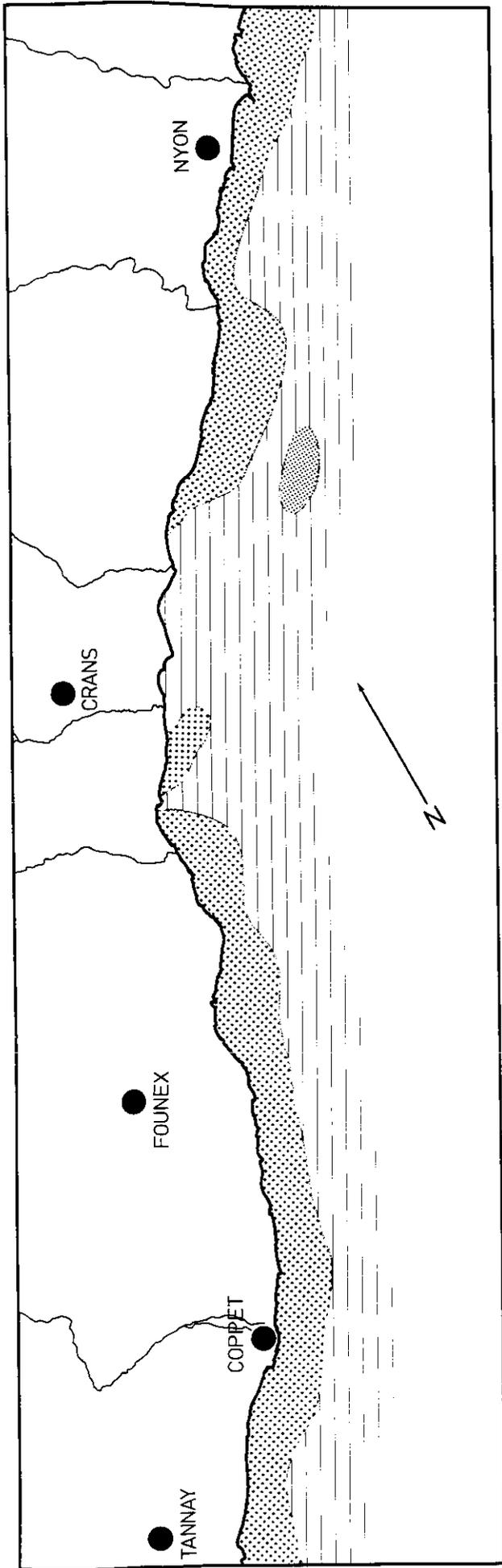


fig. 16



SECTIONS B et C

ÉCHELLE: 500 m 500 m 500 m

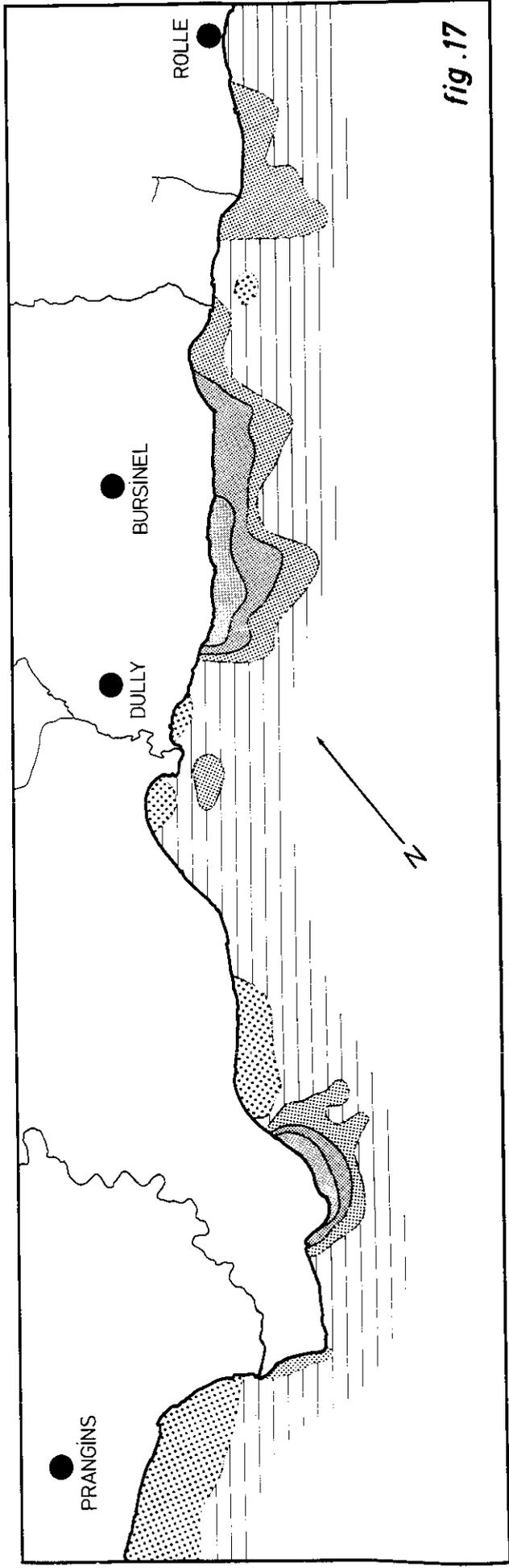
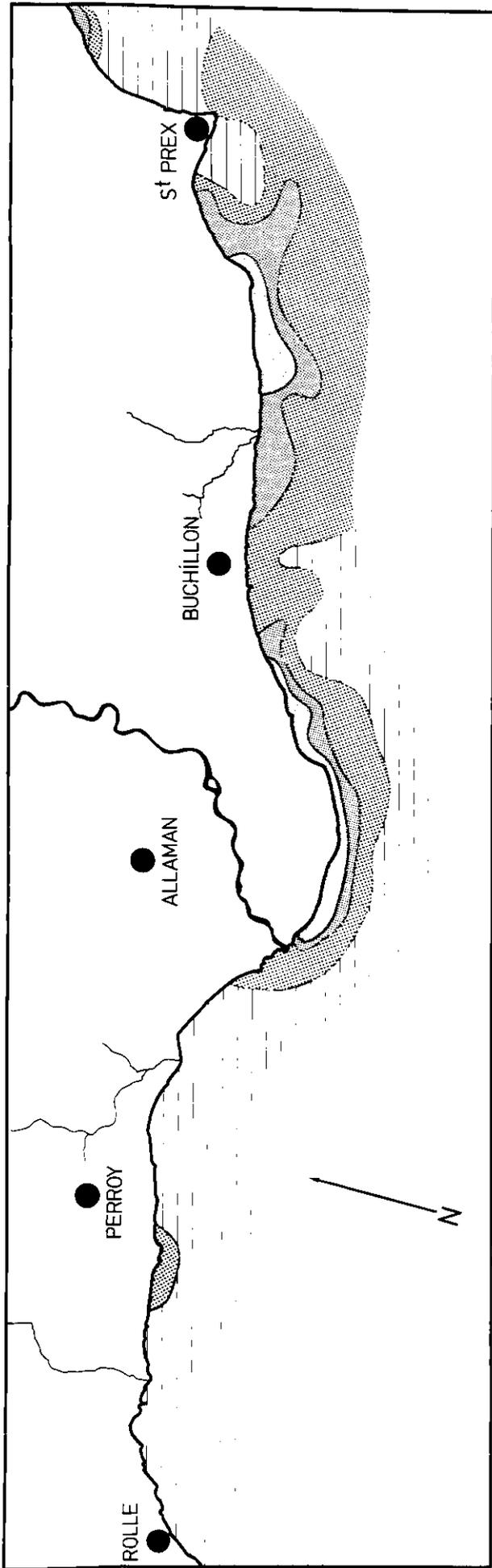


fig .17



SECTIONS D et E

ÉCHELLE : 500 m 500 m 500 m

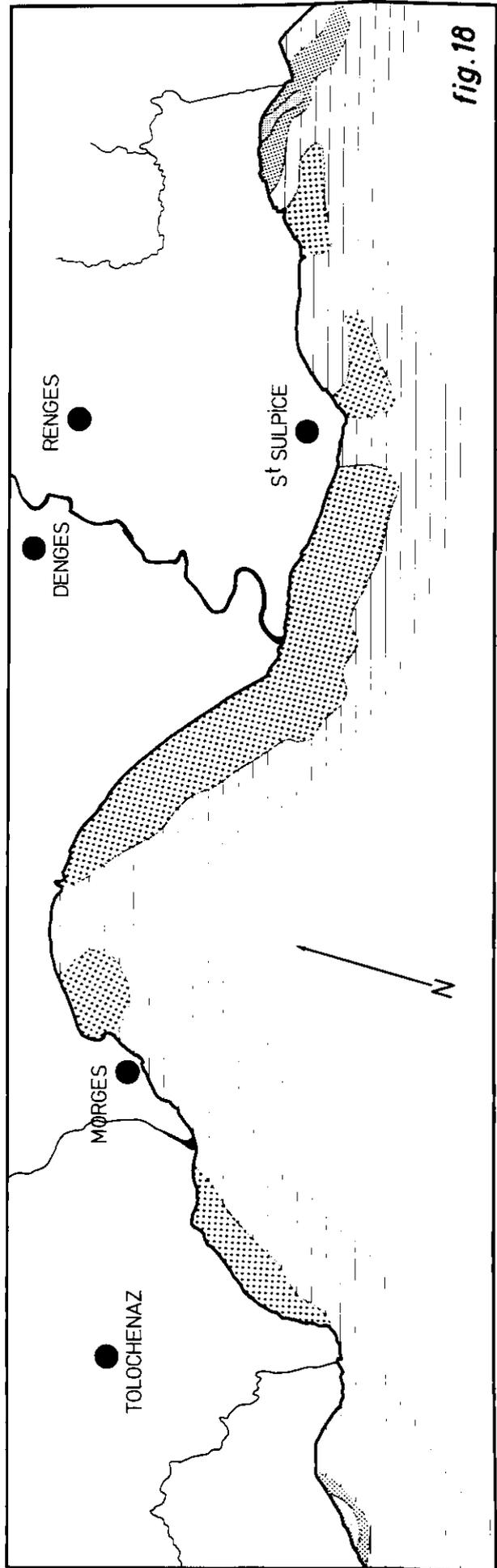
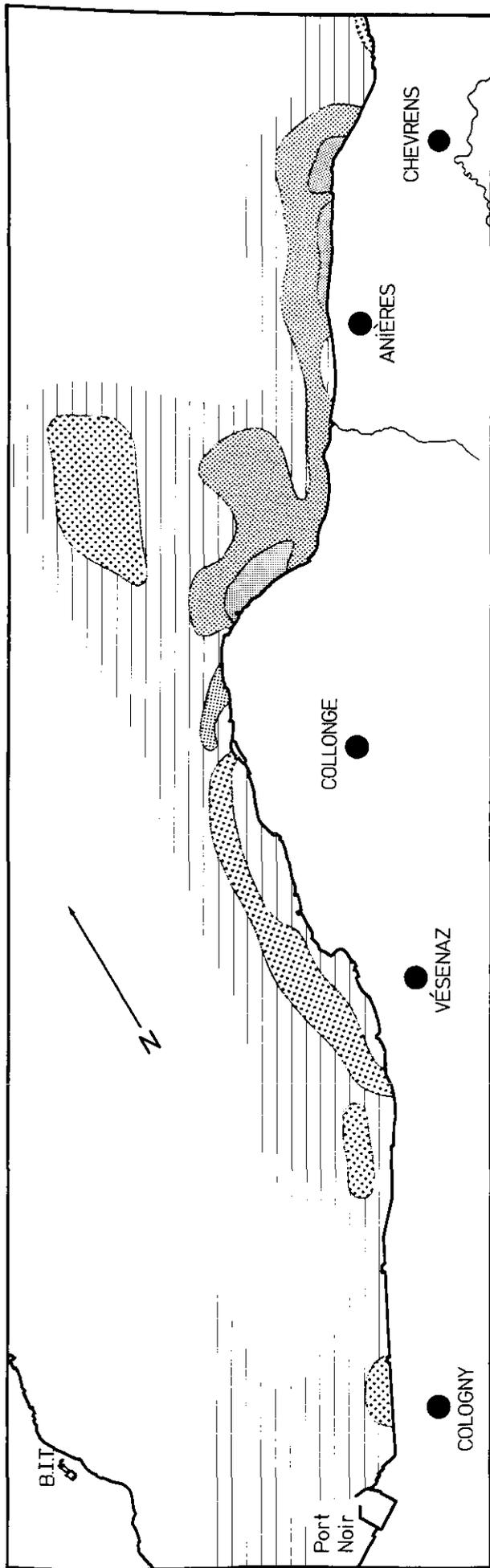
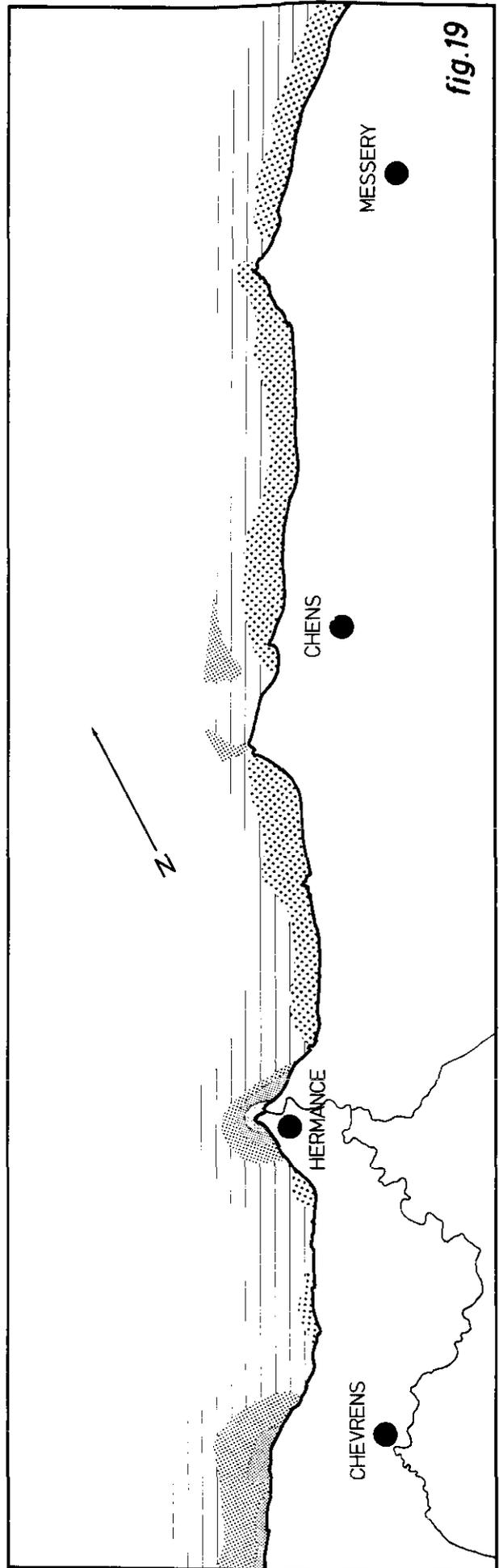


fig. 18



SECTIONS F et G

ÉCHELLE: 500 m 500 m 500 m



SECTION H

ÉCHELLE: 500 m 500 m 500 m

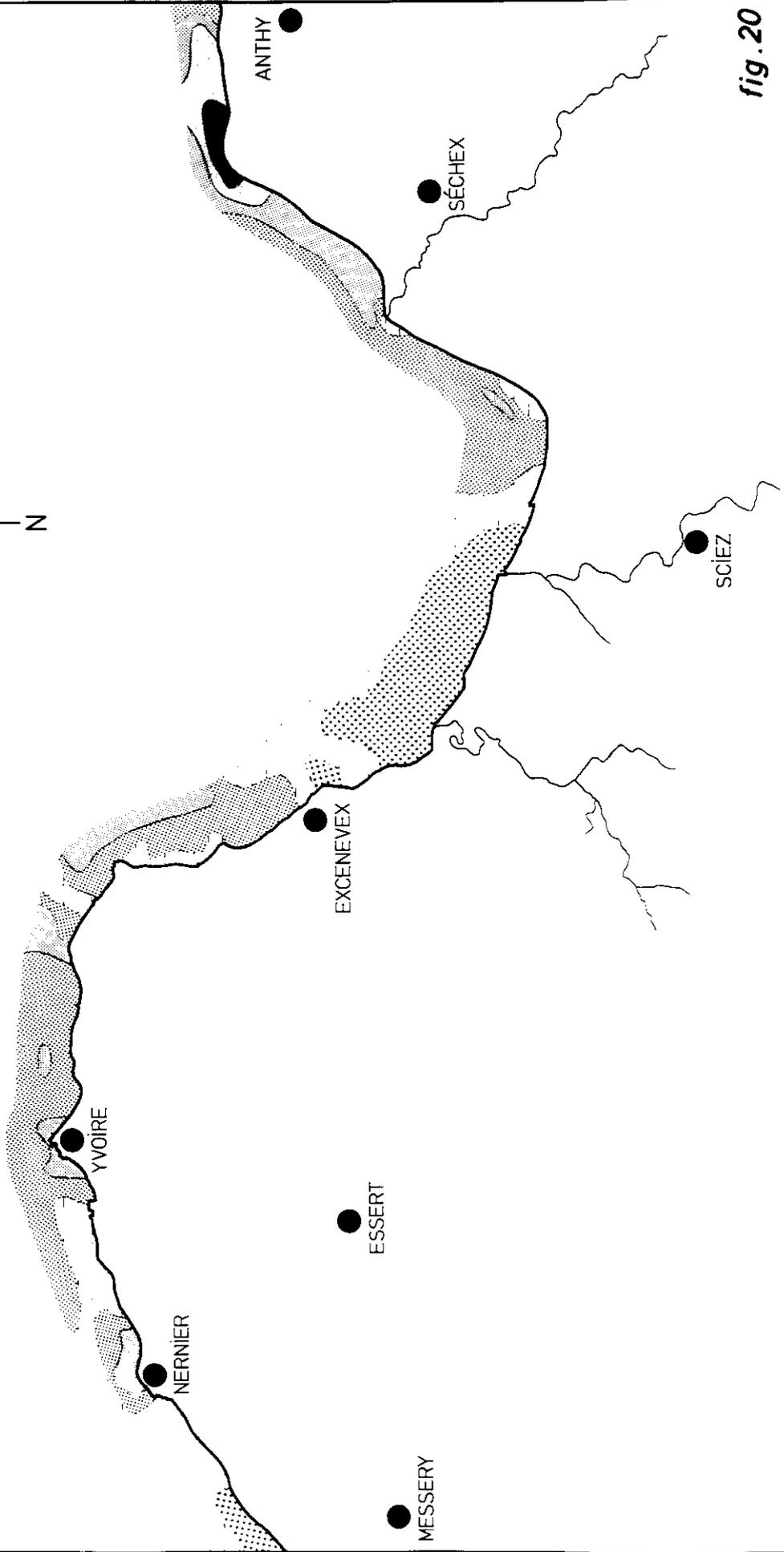
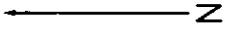
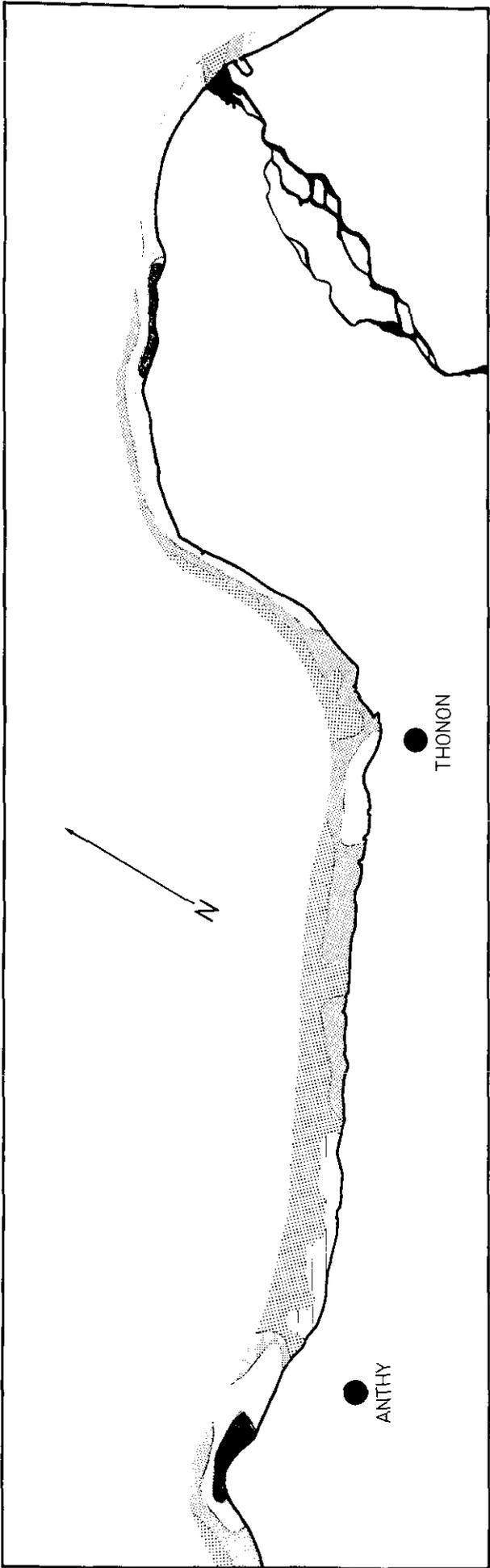


fig. 20



SECTION I et J

ÉCHELLE : 500 m 500 m 500 m

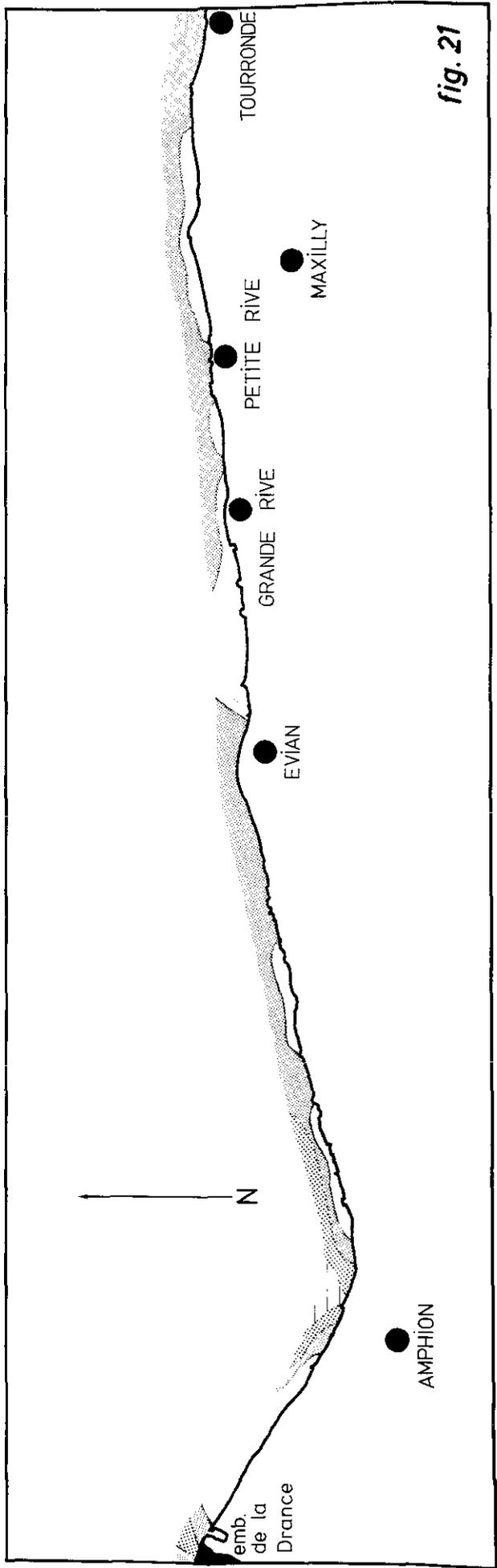


fig. 21

## RÉGION DE L'EMBOUCHURE DU RHÔNE

Trois cartes "Léman Sud-Est" (fig. 22 à 24) représentent les résultats obtenus dans la région de l'embouchure du Rhône avec des dispositifs sous-lacustres. La densité des points de mesure, pour cette étude, s'étendant sur 26 km<sup>2</sup>, est faible: 10 points environ par km<sup>2</sup>. De plus, certaines incertitudes sont inhérentes à une imparfaite connaissance de la profondeur du dispositif, dans cette région à la topographie sous-lacustre tourmentée. Enfin, Rhône, Vieux Rhône, Grand Canal et Eau Froide alimentent le lac en eaux de résistivités fort différentes. Considérer l'eau du lac comme un milieu électriquement homogène constitue dans cette région une approximation. C'est dire qu'il ne peut s'agir que d'une étude de dégrossissage, et que le détail des courbes peut être sujet à caution.

Finalement, quelques grandes zones intéressantes s'en dégagent cependant: Les dépôts du Rhône actuel se marquent en valeurs fortes aux environs de son embouchure. La comparaison des cartes d'équirésistivités en 100 et 200 mètres d'une part, avec celle de 400 mètres et la carte de traîné de surface (500 mètres) d'autre part donne une idée de l'extension des graves en profondeur. On voit que les dépôts entre le Rhône et le Grand Canal sont relativement superficiels. Nous retrouvons des valeurs élevées devant le Bouveret. Peut-être est-ce la trace d'un Rhône antérieur à l'éboulement des Evouettes qui a pu en détourner le cours. Il subsiste de même entre le Grand Canal et Villeneuve quelques vestiges d'une embouchure ancienne. D'autres zones de fortes résistivités apparaissent dans la zone côtière de Chillon (calcaires), et devant Montreux (prolongement sous-lacustre du delta de la Baye de Montreux). Quant à la zone conductrice partant de l'embouchure de l'Eau Froide, on peut l'attribuer à des limons, imbibés peut-être d'une eau sulfatée.

## LA DÉPRESSION DE ROLLE

Nous avons là un cas typique où l'étude du lac a contribué à une meilleure connaissance de la géologie régionale, avec en plus une incidence possible pour l'économie hydrologique.

Lors de notre étude de reconnaissance en traîné 500 mètres, nous avons mesuré des valeurs élevées par rapport à la molasse environnante, dans une zone située entre Rolle et la Dullive. Un deuxième profil, plus au large, confirma ces mesures (voir planche annexée).

La comparaison avec la carte de résistivités terrestre, élaborée dans le cadre de l'étude hydrologique vaudoise, ne permit pas de rattacher immédiatement cette zone à l'un des anciens cônes reconnus de la Promenthouse ou de la Dullive. Le sillon graveleux s'avancant en direction ouest-est de Coinsins à Gland ne paraissait pas relié au lac (voir la carte des courbes d'équirésistivités apparentes terrestre, en 100 et 60 mètres, fig. 25).

Une série de sondages électriques (SE B1 à SE B11, planche annexée) permit alors de retrouver ce sillon, masqué en surface par des éléments plus argileux, à une profondeur plus grande. Ces sondages terrestres furent complétés par une dizaine de sondages lacustres entre Rolle et la Promenthouse. L'axe de la dépression fut ainsi localisé et sa profondeur estimée à environ 70 mètres.

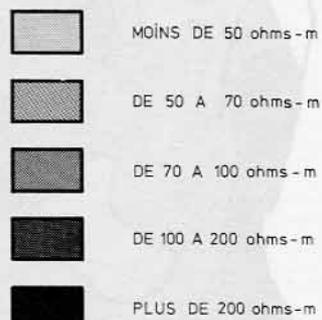
De plus, ces sondages électriques nous ont facilité le choix d'une longueur de ligne optimale pour les profils de résistivités. Un traîné avec AB = 200 mètres a finalement permis d'une part de rattacher en profondeur cette dépression au sillon Coinsins - Gland, d'autre part de la suivre dans le lac jusqu'à trois kilomètres au large. Ces résultats apparaissent sur la carte des équirésistivités pour AB = 200 mètres (figure 26).

S<sup>t</sup> GINGOLPH

# LÉMAN SUD EST

COURBES D'ÉQUIRÉSISTIVITÉ  
APPARENTE EN ohms - m  
A - B 100m SOUS LACUSTRE

## LÉGENDE



ECH.  500 m 500 m 500 m

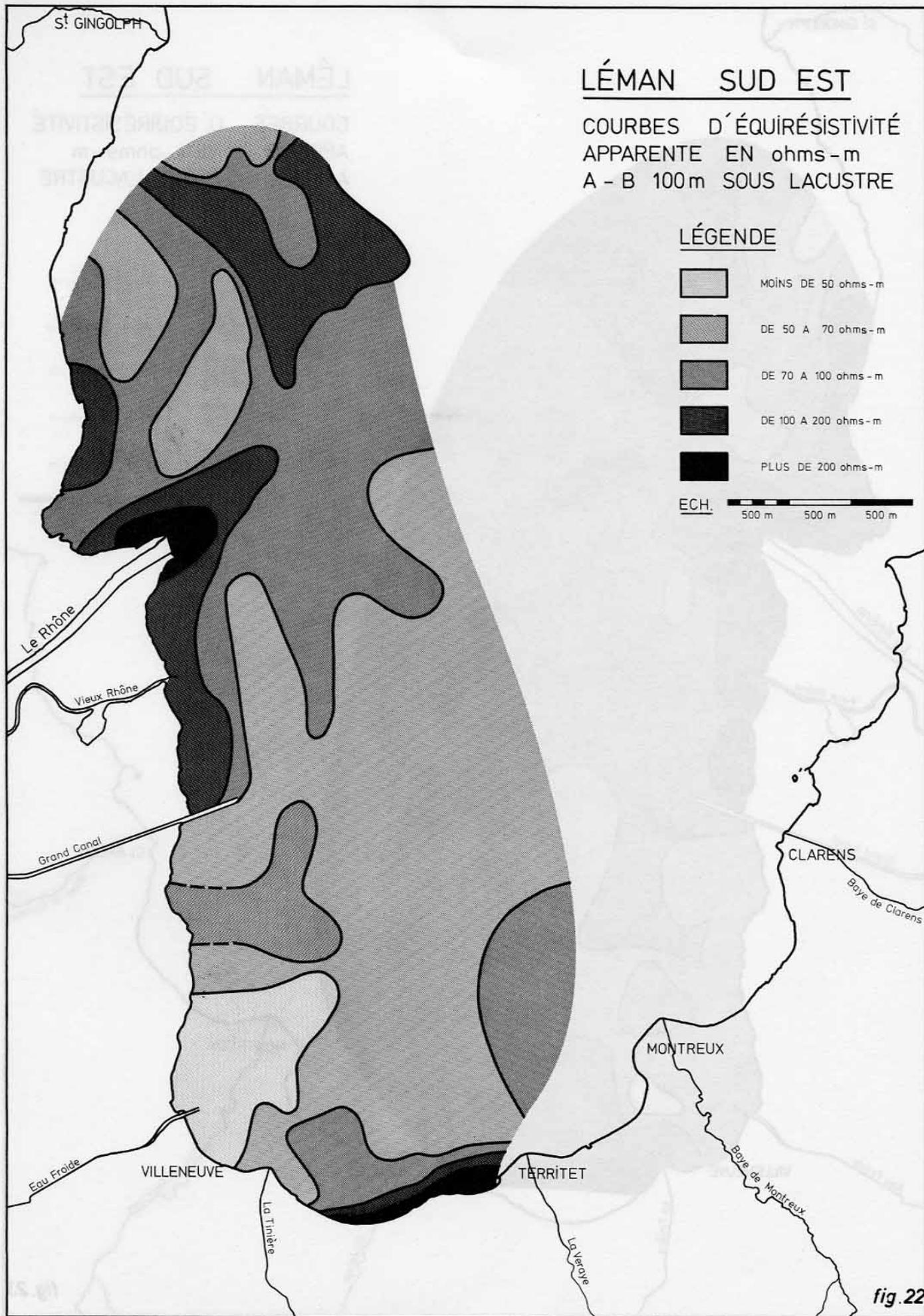
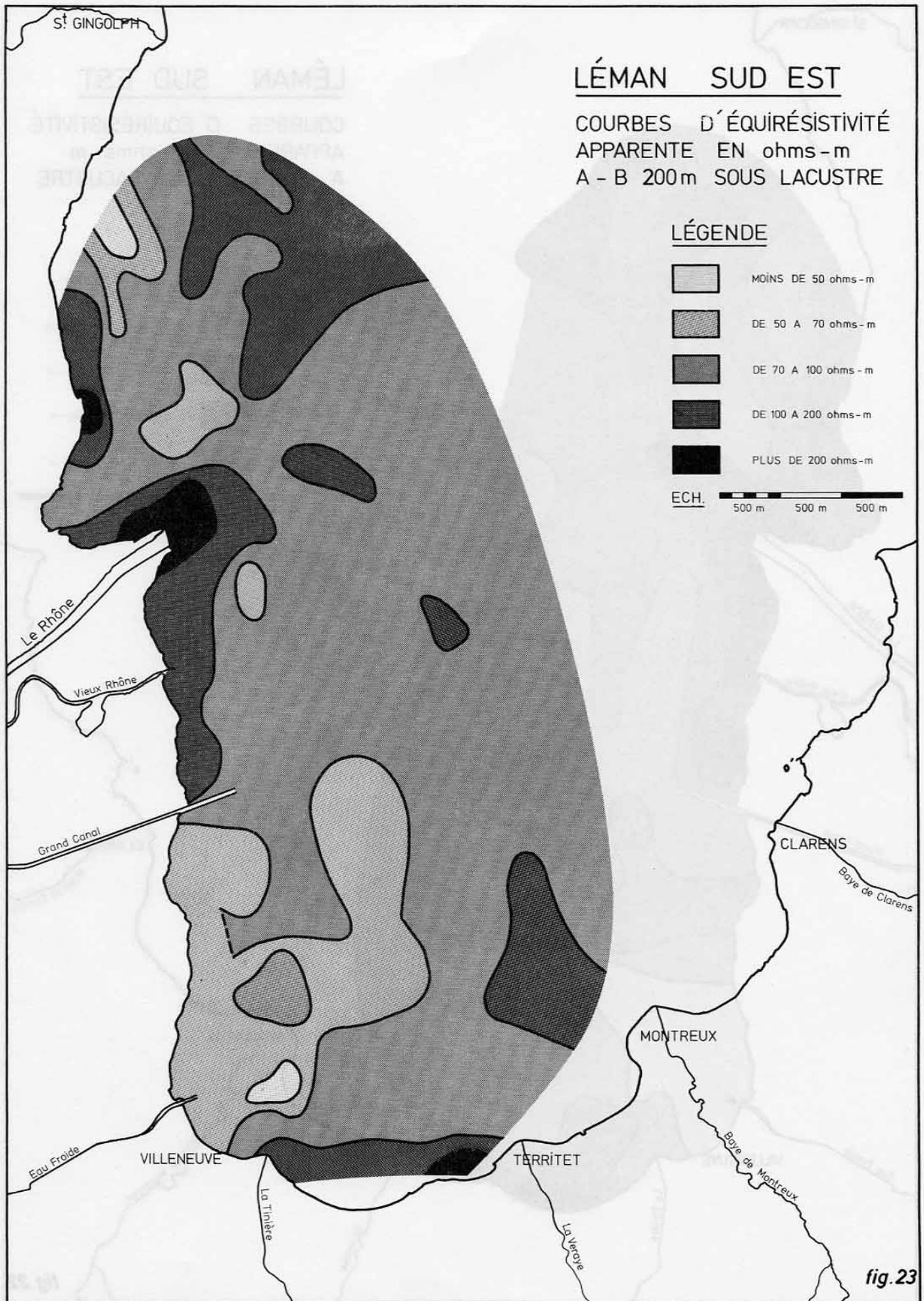


fig.22



**fig. 23**

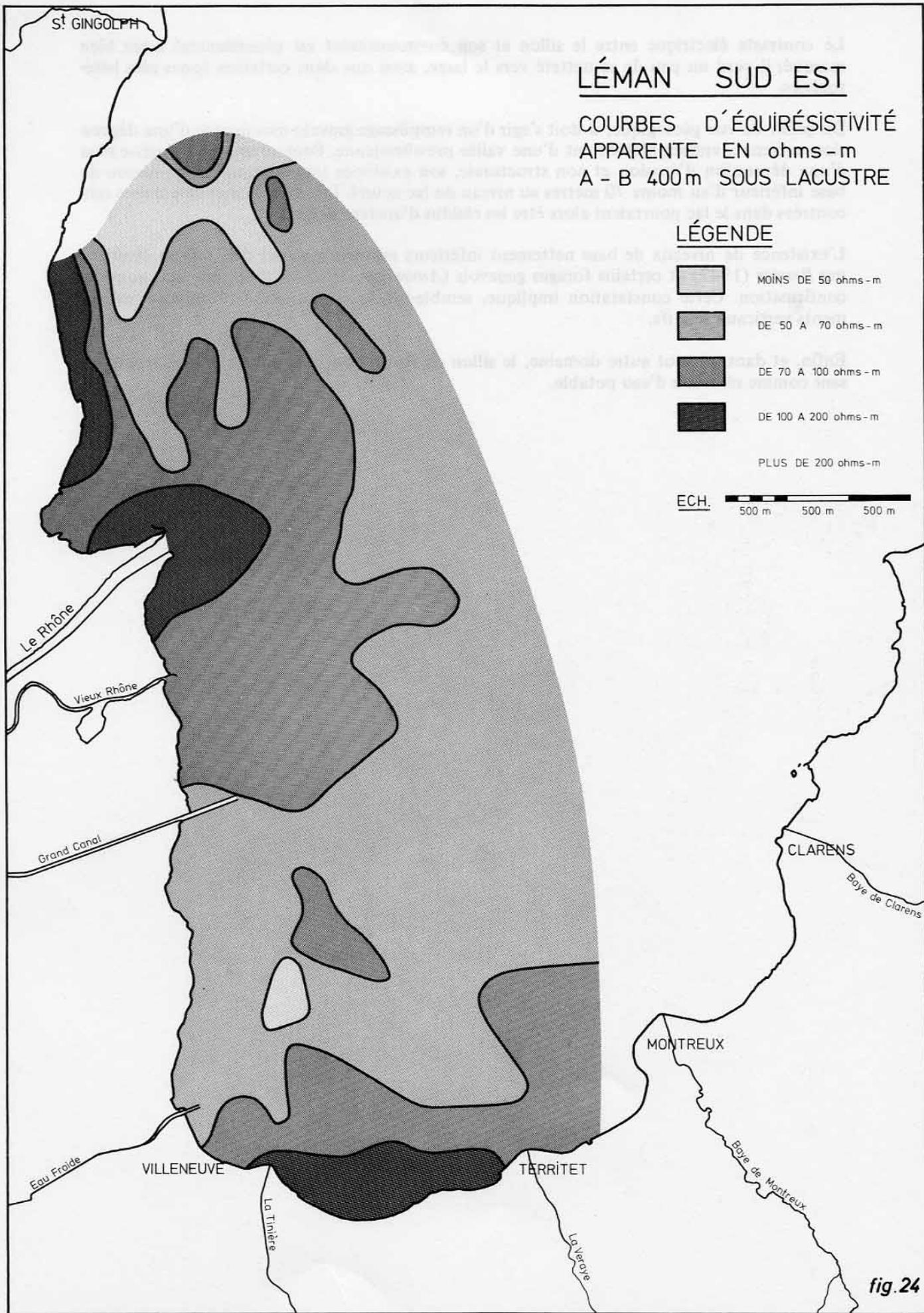


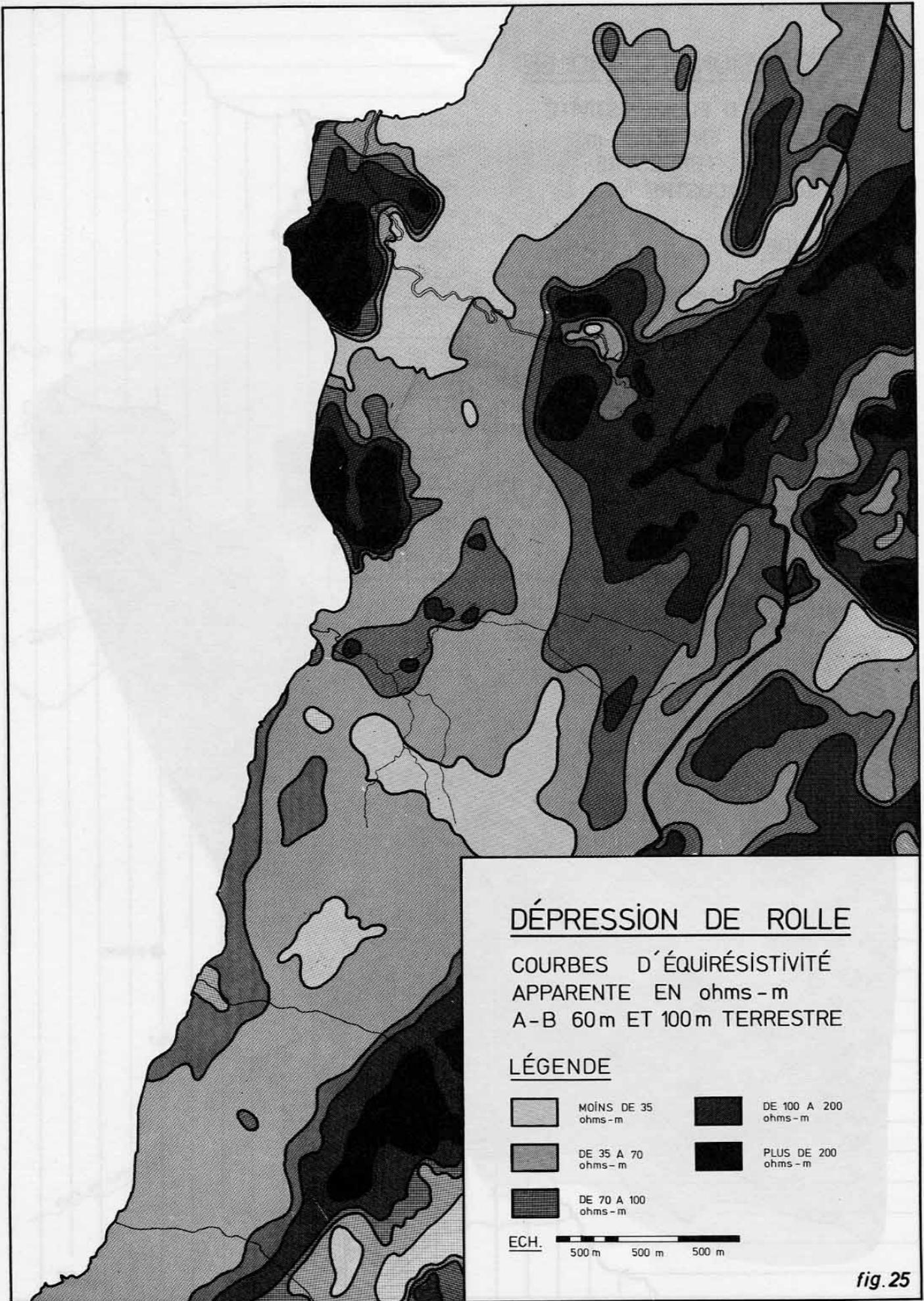
fig.24

Le contraste électrique entre le sillon et son environnement est généralement assez bien marqué; il perd un peu de sa netteté vers le large, ainsi que dans certaines zones plus hétérogènes.

Du point de vue géologique, il doit s'agir d'un remplissage gravelo-morainique d'une dépression ancienne, vraisemblablement d'une vallée préwürmienne. Pour autant qu'il s'agisse bien d'une dépression d'érosion et non structurale, son existence implique un ancien niveau de base inférieur d'au moins 70 mètres au niveau du lac actuel. Les deux taches de graviers rencontrées dans le lac pourraient alors être les résidus d'anciens deltas.

L'existence de niveaux de base nettement inférieurs au niveau actuel déjà mis en évidence par *Bersier* (1947) et certains forages genevois (*Amberger*, 1969) trouve ainsi une nouvelle confirmation. Cette constatation implique, semble-t-il, la continuation récente de mouvements verticaux relatifs.

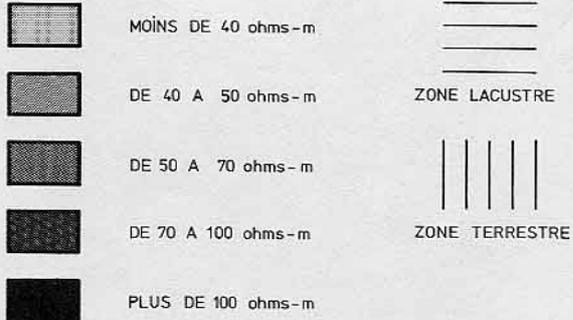
Enfin, et dans un tout autre domaine, le sillon de Rolle - Bursinel pourra se révéler intéressant comme réservoir d'eau potable.

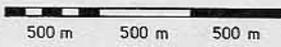


# DÉPRESSION DE ROLLE

COURBES D'ÉQUIRÉSISTIVITÉ  
APPARENTE EN ohms - m  
A - B 200m TERRESTRE  
ET SOUS LACUSTRE

## LÉGENDE



ECH.   
500 m 500 m 500 m

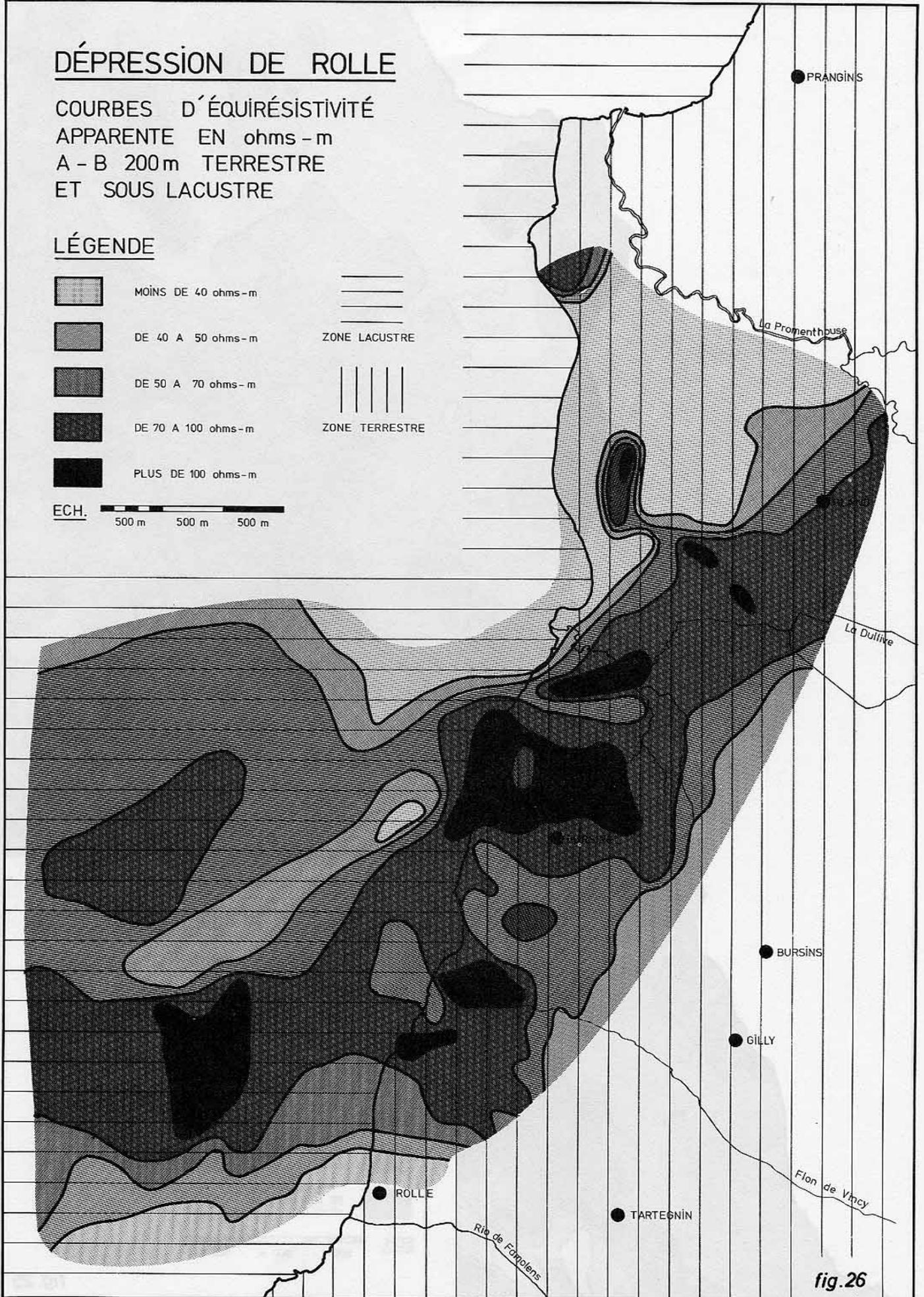


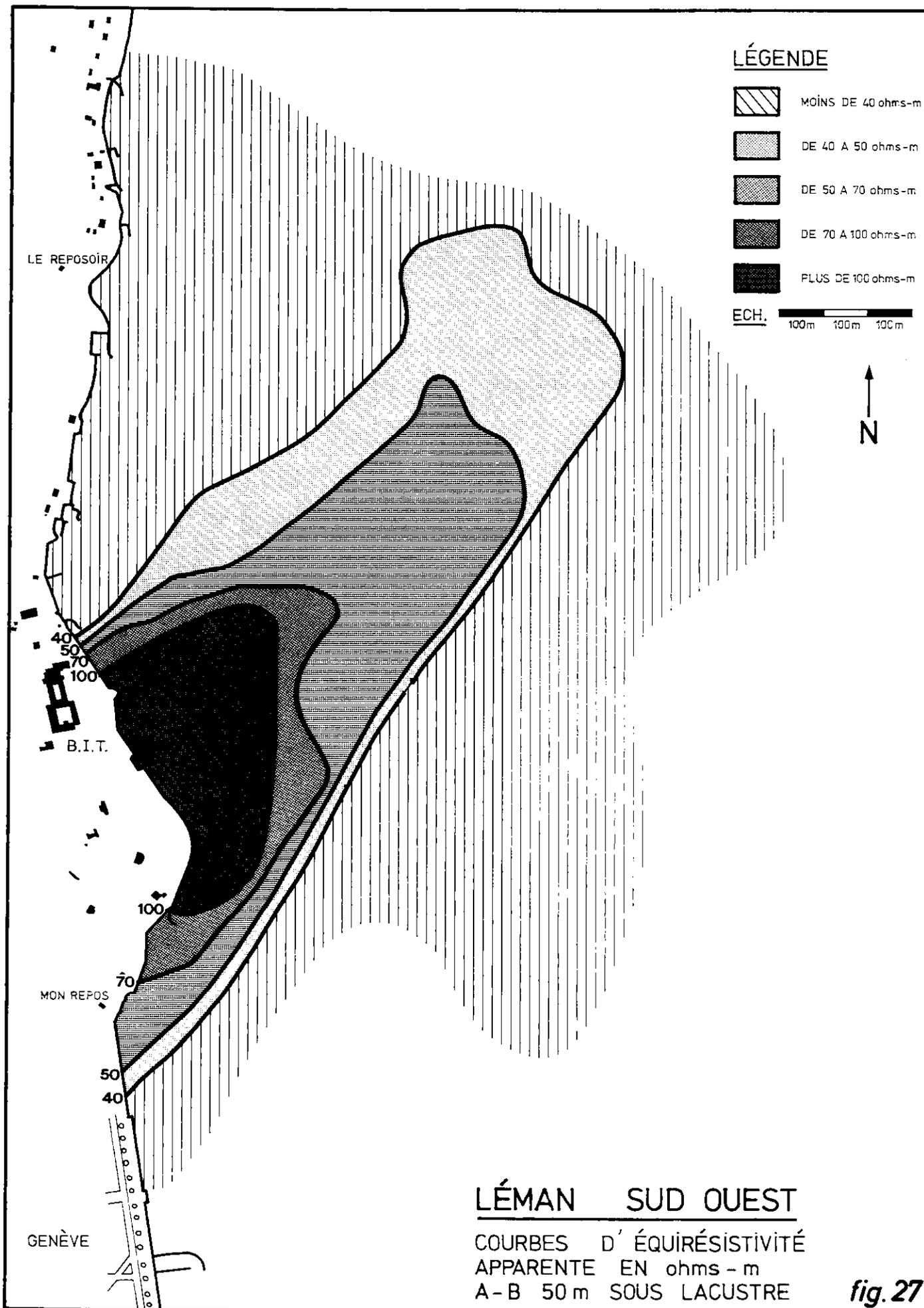
fig.26

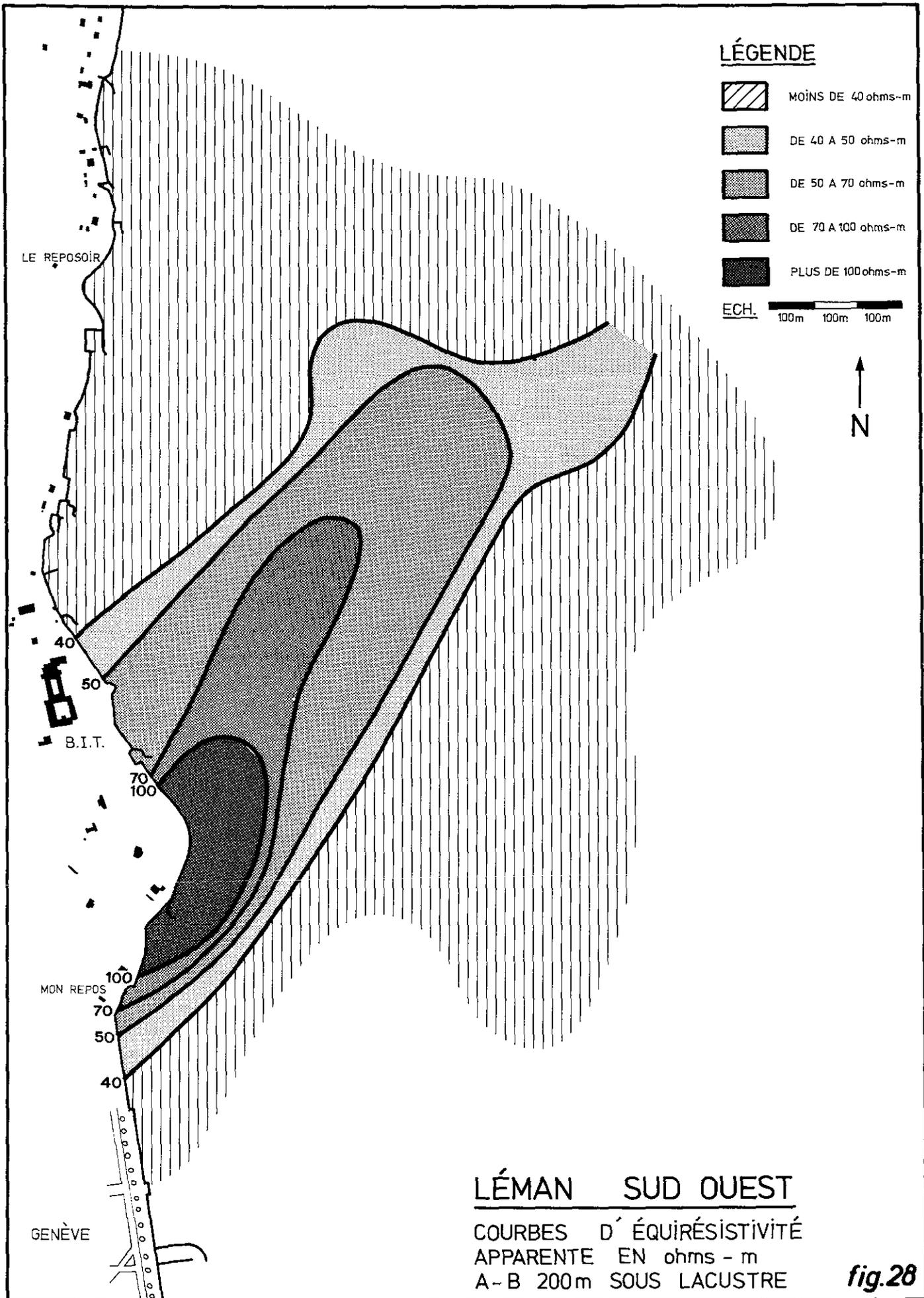
## LE SILLON DE GENÈVE - BIT

L'existence d'un sillon et d'une nappe souterraine traversant la ville de Genève en direction BIT - Cornavin - Pont Butin... est assez bien connue par les forages et observations géologiques. Notre but était d'en étudier les prolongements dans le lac avec plus de précision.

Les mesures de surface (voir carte Côtes du Léman, section A, fig. 16) donnent dans ce secteur des valeurs bien contrastées. Mais une délimitation précise ne pouvait être réalisée qu'au moyen d'un dispositif immergé. Nous avons donc entrepris une étude avec une grande densité de mesures, plus de 30 points par km<sup>2</sup>, simultanément en quatre longueurs de ligne (30, 50, 100 et 200 mètres).

Les cartes Léman Sud-Ouest (fig. 27 et 28) donnent les résultats pour les dispositifs de 50 et de 200 mètres. On constate que la zone vraiment graveleuse est localisée près du rivage. Les valeurs de résistivité diminuent ensuite progressivement, soit parce que des éléments de plus en plus fins se substituent aux graves, soit parce que l'épaisseur des graviers diminue. On trouve les dernières traces du sillon à quelque 1500 mètres au large.





## CONCLUSIONS

Comme tout travail scientifique, notre étude résout, nous semble-t-il, un certain nombre de problèmes et conduit à se poser un nombre plus grand encore de questions. En guise de conclusion, nous voudrions rappeler ici succinctement certains résultats et indiquer par quels moyens on pourra peut-être un jour répondre à quelques-unes des questions en suspens.

- Toute étude du lac, géologique ou géophysique, doit s'accompagner, pour être totalement fructueuse, de l'étude de tout le bassin lémanique.
- Les méthodes électriques peuvent être parfaitement adaptées à l'investigation des fonds lacustres. Elles peuvent fournir des indications de détail à faible profondeur et de plus générales à grande profondeur.
- Nulle part dans les zones investiguées nous n'avons trouvé d'Aquitaniens ni de Burdigaliens, mais tout le bassin n'a pas encore été investigué.
- Il n'y a pas de doute, nos mesures le confirment, que dans un passé récent (post-glaciaire) l'exutoire du Léman s'est abaissé. Il semble bien cependant que dans une phase antérieure, c'est la cuvette ou une partie de celle-ci qui s'est abaissée relativement à l'exutoire.
- Nous n'avons pas trouvé de trace d'un surcreusement glaciaire particulièrement important. En particulier, nous n'avons pas observé de chenaux graveleux périglaciaires dans le Petit Lac.
- Le cours aval des rivières se jetant dans le lac semble avoir pris diverses positions successives stables; on ne peut pas parler de divagation. Certains tracés semblent séparés, dans le temps, par des épisodes glaciaires.
- Des études électriques ultérieures pourront, pensons-nous, faire connaître la nature des molasses occupant les fonds du Léman. Cette connaissance permettra d'écarter ou d'étayer un certain nombre d'hypothèses quant à l'origine du lac.
- Des recherches sismiques et gravimétriques doivent encore contribuer à la connaissance du bassin lémanique à grande profondeur. Peut-être mettront-elles en évidence des fractures importantes non sans incidence sur l'architecture de la région.
- Les hypothèses faisant intervenir l'érosion (fluviale ou glaciaire) de façon prépondérante, doivent encore être testées par les méthodes électriques, et cela surtout dans le Petit Lac et au niveau de la barre de Promenthoux.

Ce bref répertoire de quelques-unes des questions – nous nous sommes bornés à la géophysique – posées par nos travaux, montre assez à quel point la collaboration de tous les chercheurs reste indispensable pour qu'on parvienne un jour à une bonne connaissance du Léman.

## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

ACERBONI E. & MOSETTI F.: Mesures électriques in situ au fond de la mer. *Boll. di geof. teor. appl.* Vol. 8, No 32, 243-246 (1966).

AMBERGER G.: Carte hydrogéologique du Canton de Genève. Cadastre, Genève 1969.

AMBERGER G.: Carte des isohypses du contact molasse - quaternaire. 1 : 25'000. Cadastre Genève (1971).

BADOUX H.: Atlas Géologique de la Suisse. Feuille 1264. 1/25'000e Montreux (1965). Schweiz. Geologische Kommission.

BADOUX H. & MERCANTON CH.-H.: Essai sur l'évolution tectonique des Préalpes médianes du Chablais. *Ecl. Geol. Helv.* Vol. 55 (1962).

BERSIER A.: Recherches sur la géologie et la stratigraphie du Jorat. *Mémoires de la soc. vaud. des sc. nat.* Vol. 6, 1938.

BERSIER A.: Un thalweg préwürmien de la Paudèze, affluent du Lac Léman; 1947. *Bull. soc. vaud. sc. nat.* Vol. 63, No 269, 1947.

BLAVOUX & DRAY: Les sondages dans le complexe quaternaire du bas Chablais et leurs enseignements stratigraphiques. *Revue de géogr. phys. et géol. dyn.* Vol. XIII. Paris 1971.

BUCHLI: Etude géoélectrique de la rive Sud du Léman (au sud de l'axe du Mont de Boisy. (A paraître)

BURRI M. & BERSIER A.: Les complications tectoniques du Mont Pélerin. *Ecl. Geol. Helv.* 65/1 p. 21-26. 1972.

C.G.G.: Abaques de sondage électrique. *Geophysical Prospecting.* Vol. III, suppl. No 3 (1955).

CORNICHE P.: Application des méthodes géophysiques à la recherche hydrogéologique. *Matériaux pour la géologie de la Suisse. Série Géophysique* No 13, 1973, 65 p.

DONZÉ A.: Etude gravimétrique de la rive Sud du Léman. (A paraître)

EUROPEAN ASS. OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS: Standard Graphs for Resistivity Prospecting. Rijkswaterstaat, Pays Bas. 1969.

FAVINI J.C.: La résistivité électrique des molasses. *Bull. soc. vaud. sc. nat.* Vol. 69, 1966.

FAVINI J.C.: Résistivité électrique et vitesse sismique des molasses de Suisse Romande et de Haute Savoie. Etudes statistiques par ordinateur CDC 3800. *Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. Ing.*, Vol. 36, 1970.

FOREL F.A.: Le Léman. Lausanne 1892-1904, 3 vol., Ed. Rouge, Lausanne.

GAGNEBIN E.: Les invasions glaciaires dans le bassin du Léman. Lausanne. *Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne* No 58, 1937.

GAGNEBIN E.: La géologie du Chablais. *Commentaires de la feuille Thonon 1:80'000* (1939).

GILLIAND P.A.: Etude géoélectrique du Klettgau (Suisse). *Matériaux pour la géologie de la Suisse. Série Géophysique* No 12, 1970.

GONET O.: Etude gravimétrique du Lac Léman à bord du mésoscaph "Auguste Piccard". *Matériaux pour la géologie de la Suisse, Série Géophysique* No 8, 1969.

HORN R.: Rôle de la sismique réflexion continue dans l'étude sédimentologique, géologique et structurale du lac Léman. *Bull. ARPEA*, mai 1971.

HOUBOLT J.J.H.C. & JONKER J.R.M.: Recent sediments in the Eastern part of the Lake of Geneva. (*Geol. Mijnbow.* vol. 47/2) 1968.

- JOUKOWSKY E.: La formation du Petit Lac (Léman). C.R. Séances Soc. phys. et d'Hist. nat. de Genève 39-41. Suppl. Arch. sc. phys. et nat. Geneve, 5<sup>e</sup> pér. vol. 2. 1920.
- KELLER G.V. & FRISCHKNECHT F.C.: Electrical Methods in Geophysical Prospecting. Pergamon Press 1966.
- KLINGELÉ E.: Contribution à l'étude gravimétrique de la Suisse Romande et des régions avoisinantes. Thèse fac. sc. Univ. Genève, 1972. Matériaux pour la géologie de la Suisse. Série Géophysique No 15, 1972.
- MEYER DE STADELHOFEN C.: Résistivités des molasses du plateau vaudois. Arch. des Sciences. Genève 1965, Vol. 18.
- MEYER DE STADELHOFEN C. & FAVINI J.C.: Exemple d'étude électrique du sous-sol lacustre. Bull. soc. vaud. sc. nat. Vol. 1968. Vol. 70, No 327.
- MEYER DE STADELHOFEN C. & RUSSY C.: Atlas des résistivités électriques apparentes du Moyen-Pays vaudois. Service cantonal vaudois de l'urbanisme, 1973.
- MEYER DE STADELHOFEN C., SIGRIST W., DONZÉ A.: Anomalie magnétique du Jorat. Bull. soc. vaud. sc. nat. Vol. 71, No 341, 1973.
- OLIVIER R.: Elaboration d'un système de traitement gravimétrique géré par l'ordinateur. Matériaux pour la géologie de la Suisse. Série Géophysique No 17, 1974.
- PACHOUD A.: Projet Geolem. La structure et les origines du Léman. BRGM. Orléans, 1970.
- PARKHOMENKO E.: Electrical Properties of Rocks. New York, 1968. Plenum Press.
- PAQUIN R.: Etude géoélectrique de la rive sud du Léman, au nord de l'axe du Mont de Boisy. (A paraître)
- RIGASSI D.: Le tertiaire de la région genevoise et savoissienne. Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. Ing., Vol. 24, 1957.
- RIGASSI D.: Carte inédite du plateau molassique 1:200'000 (1962).
- ROY A. & APPARAO A.: Depth of investigation in direct current methods. Geophysics Vol. 36 No 5; (oct. 1971), 943-959.
- DE SAUSSURE H.: La question du Lac. Genève 1880-1882. 2 Vol.
- SCHROEDER J.W.: Géologie du pays de Genève (1958). Mém. Soc. de Géographie: Le Globe T. 97. p. 37-100.
- SERRUYA C.: Les dépôts du lac Léman en relation avec l'évolution du bassin sédimentaire et les caractères du milieu lacustre. Arch. des Sciences, Vol. 22. Genève, 1969.
- SERRUYA C.: Quelques données nouvelles sur la structure profonde du lac Léman. Arch. des Sciences, Vol. 22, Genève, 1969.
- SERRUYA C., LEENHARDT O. & LOMBARD A.: Etudes géophysiques dans le lac Léman. Interprétation géologique. Arch. des Sciences, Vol. 19. Genève, 1966.
- SCHLUMBERGER C. & RENAUD: Etude géophysique sous-marine exécutée dans le port d'Alger. Paris 1933. Extrait des Annales des Ponts et Chaussées IV 1933.
- VERNET J.P.: La sédimentation lémanique. Bull. ARPEA Mai 1971.
- VERNET J.P. & HORN R.: Etude sédimentologique et structurale de la partie occidentale du lac Léman par sismique réflexion continue. Ecl. Geol. Helv. Vol. 64, No 2, 1971.
- WINNOCK E.: Sismique sur le Léman. Résultats obtenus avec le sparker. Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. Ing., Vol. 32, 1965.

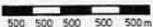
PUBLICATION N°16

CONTRIBUTION A L'ETUDE GEOPHYSIQUE  
DES FONDS DU LAC LEMAN

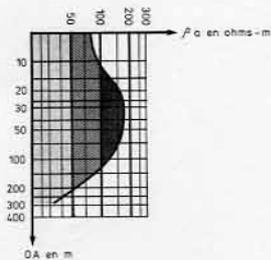
Par Walter Sigrist

1 PLANCHE DIVISEE EN 3 FEUILLES

ÉCHELLE :



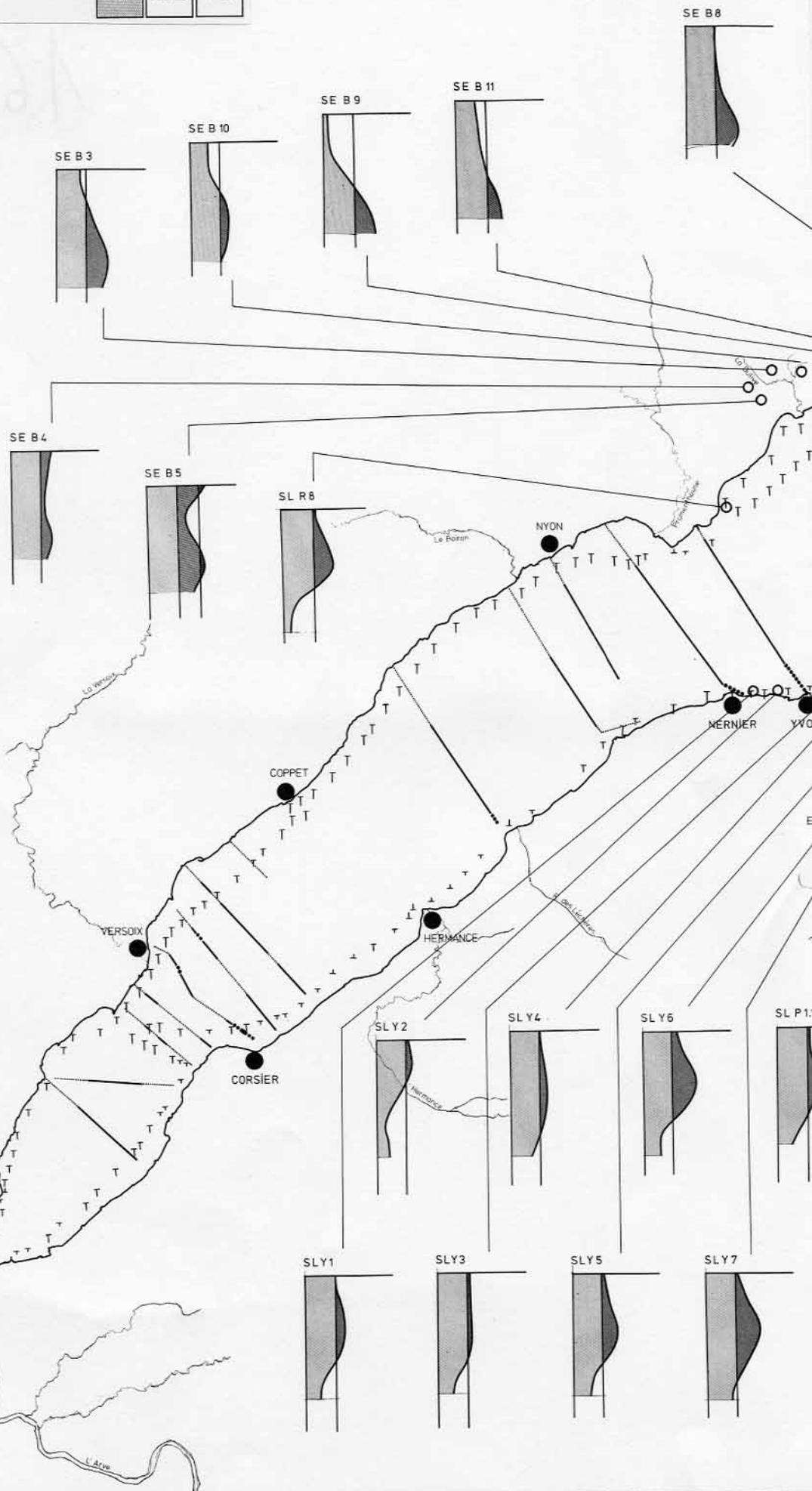
SONDAGES ÉLECTRIQUES

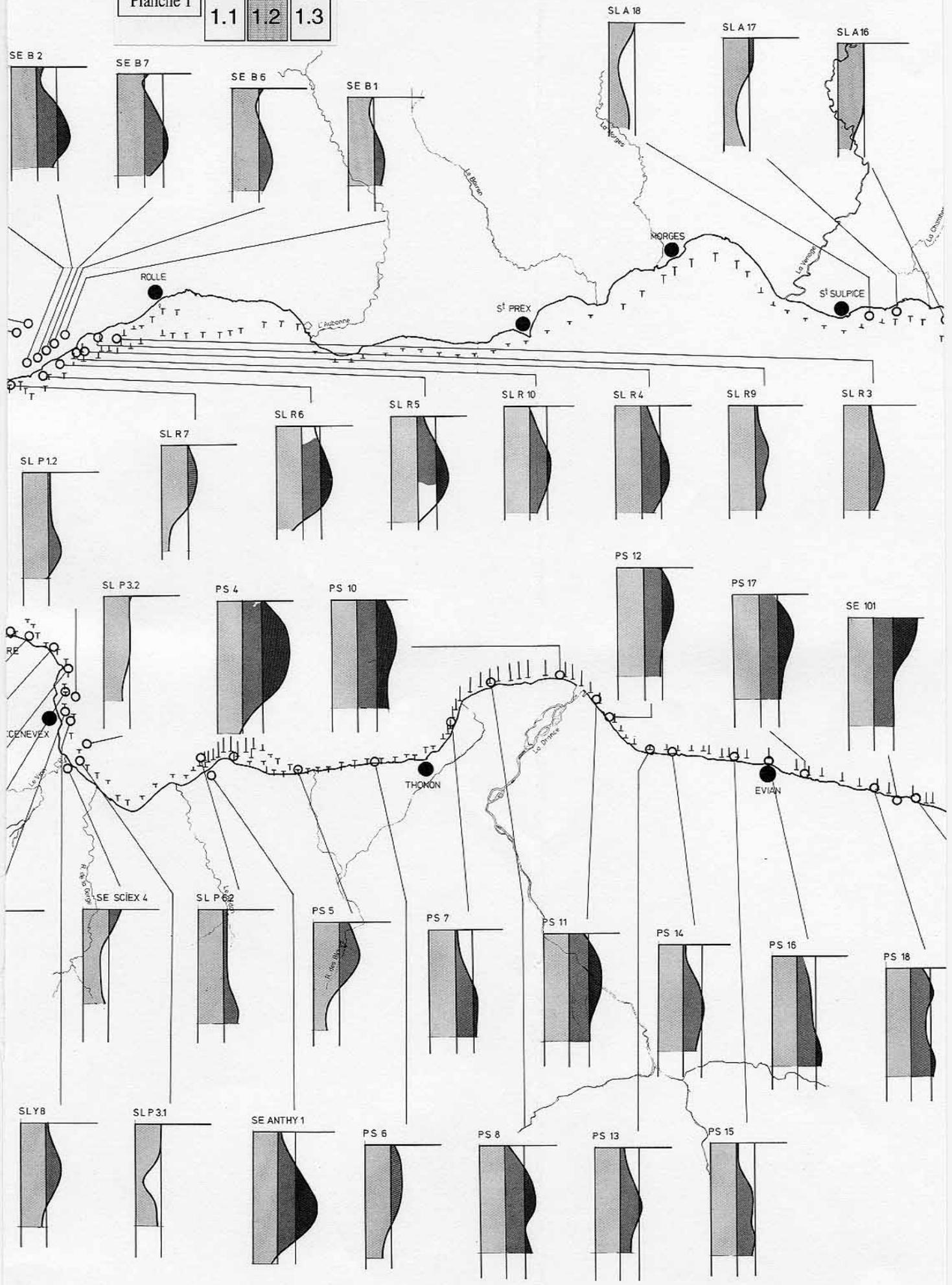


TRAINÉ SOUS-LACUSTRE

RÉSISTIVITÉ APPARENTE A-B 100m

- MOINS DE 35 ohms - m
- DE 35 A 50 ohms - m
- DE 50 A 70 ohms - m
- DE 70 A 80 ohms - m





# TRÂINÉ LACUSTRE

RÉSISTIVITÉ APPARENTE A-B 500 m

- | 150 A 200 ohms-m
  - | 120 A 150 ohms-m
  - | 100 A 120 ohms-m
  - | 80 A 100 ohms-m
  - | 60 A 80 ohms-m
  - + 50 A 60 ohms-m
  - + 40 A 50 ohms-m
  - T 30 A 40 ohms-m
  - T < DE 30 ohms-m
- ← Résistivité de l'eau du lac

