

# Étude géophysique de la prolongation orientale de quelques structures liées au Mormont (VD)

Autor(en): **Gex, Pierre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **84 (1996-1997)**

Heft 3

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-288001>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



## **Etude géophysique de la prolongation orientale de quelques structures liées au Mormont (VD)**

*par*

*Pierre GEX<sup>1</sup>*

*Abstract.*—GEX P., 1997. Geophysical study of the eastern extension of the Mormont anticline (Vaud, Switzerland). *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 84.3: 275-297.

The Mormont is a faulted anticline of Cretaceous limestone of the jurassian domain. This complex horst structure dominates the Molassic Tertiary plain and disappears from view in the northeast due to a transverse fracture, the «Cristallin fault». The strong resistivity contrast between the Secondary limestone and the Tertiary sandstones allows the application of the audio-magnetotelluric method (AMT) by vertical soundings and 8 Hz resistivity profiling. With this method, the prolongation of the structure and the plunge of the axis can be followed over 6 km towards the northeast. The results of a quantitative interpretation with 1D modeling are in good agreement with geological and drill hole data of the 1963 Essertines oil well. The southeastern continuation of the «Cristallin fault» was studied using eleven different geophysical methods carried out on two test profiles. Resistivity and electromagnetic conductivity methods give the best results and clearly delineate the boundaries of the fracture zone covered by Quaternary deposits. Other geophysical methods such as VLF (tilt angle) and magnetics lead to more ambiguous responses, depending above all on variations of the overburden thickness.

*Key words:* Mormont anticline, audio-magnetotelluric soundings, audio-magnetotelluric 8 Hz profiling, fault detection, resistivity methods, electromagnetic methods, magnetics.

*Résumé.*—GEX P., 1997. Etude géophysique de la prolongation orientale de quelques structures liées au Mormont (VD). *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 84.3: 275-297.

L'étude de cette région du Plateau vaudois décrit la mise en évidence par la méthode audio-magnétotellurique (AMT) du tracé d'une structure tectonique profonde subjurassienne, suite de l'anticlinal crétacé complexe du Mormont, ainsi que les possibilités d'études géophysiques d'une faille importante, la faille du Cristallin, recouverte dans sa prolongation orientale par les formations quaternaires. La méthode AMT permet de

<sup>1</sup>Institut de Géophysique, Université de Lausanne, CP, CH-1015 Lausanne.

suivre, grâce au contraste marqué de résistivité entre les calcaires crétacés et la série molassique, la position en surface de l'axe de l'anticlinal sur une distance d'environ 6 km ainsi que d'apprécier son approfondissement jusqu'aux environs du village d'Essertines où le toit du Secondaire a été atteint à 337 m de profondeur lors du forage pétrolier de 1963. Un essai d'interprétation quantitative de l'évolution en profondeur de cette structure fournit des résultats satisfaisants même à partir d'une modélisation simplifiée 1D.

Par l'application d'une dizaine de méthodes géophysiques le long de deux profils, l'étude systématique d'un segment d'une zone de fracture liée à la faille du Cristallin montre clairement l'efficacité des méthodes de résistivités et de conductivités électromagnétiques pour la cartographie de ces importants traits structuraux. D'autres méthodes plus légères telles que le VLF et le magnétisme notamment donnent des résultats parfois moins nets, trop dépendants des variations d'épaisseur de la couverture quaternaire.

*Mots-clés:* Mormont, anticlinal, méthode audio-magnétotellurique, AMT, zone de fracture, méthodes de résistivité, méthodes électromagnétiques, géophysique appliquée.

## 1. INTRODUCTION

A l'origine, les méthodes géophysiques ont été imaginées et patiemment expérimentées par les prospecteurs miniers ou pétroliers, désireux de prolonger leur vision là où la couverture de mort-terrain empêchait l'observation géologique directe. Tirant parti de propriétés particulières à certains minerais par rapport aux roches encaissantes, les premières méthodes mettaient à profit l'action à distance de certains champs physiques comme le magnétisme, la pesanteur ou encore l'électricité naturelle. Après plusieurs décennies d'une intense activité presque exclusivement minière entraînant de nombreux développements, un changement de point de vue montra que la géophysique appliquée pouvait souvent également jouer le rôle d'outil géologique, d'aide à la reconnaissance de certains faciès, de structures profondes ou simplement cachées par les formations superficielles. L'étude présentée décrit la mise en évidence par la méthode audio-magnétotellurique (AMT) du tracé d'une structure tectonique profonde, suite de l'anticlinal complexe du Mormont, ainsi que les possibilités d'études géophysiques d'une faille importante, la faille du Cristallin, recouverte dans sa prolongation orientale par les formations quaternaires. Notre étude présente un intérêt méthodologique par la diversité des techniques géophysiques engagées et tente de proposer la stratégie la plus rapide et la plus économique pour une étude ultérieure des nombreuses grandes fractures de cette région du Plateau molassique. La région étudiée s'étend de l'extrémité E du Mormont en direction du NE, jusqu'aux environs du village d'Essertines (fig. 1).

## 2. CADRE GÉOLOGIQUE

Longue colline allongée en forme de chevron, le Mormont est à la fois paradis botanique et curiosité géologique. Sa nature calcaire liée à une basse altitude favorise en effet la présence d'espèces subméditerranéennes assez rares. Un inventaire minutieux en a été dressé par KISSLING (1984). Cette colline de calcaires du Crétacé inférieur (Hauterivien et Barrémien) émergeant des terrains tertiaires, séparant la plaine de l'Orbe au N du bassin de la Venoge au S, est

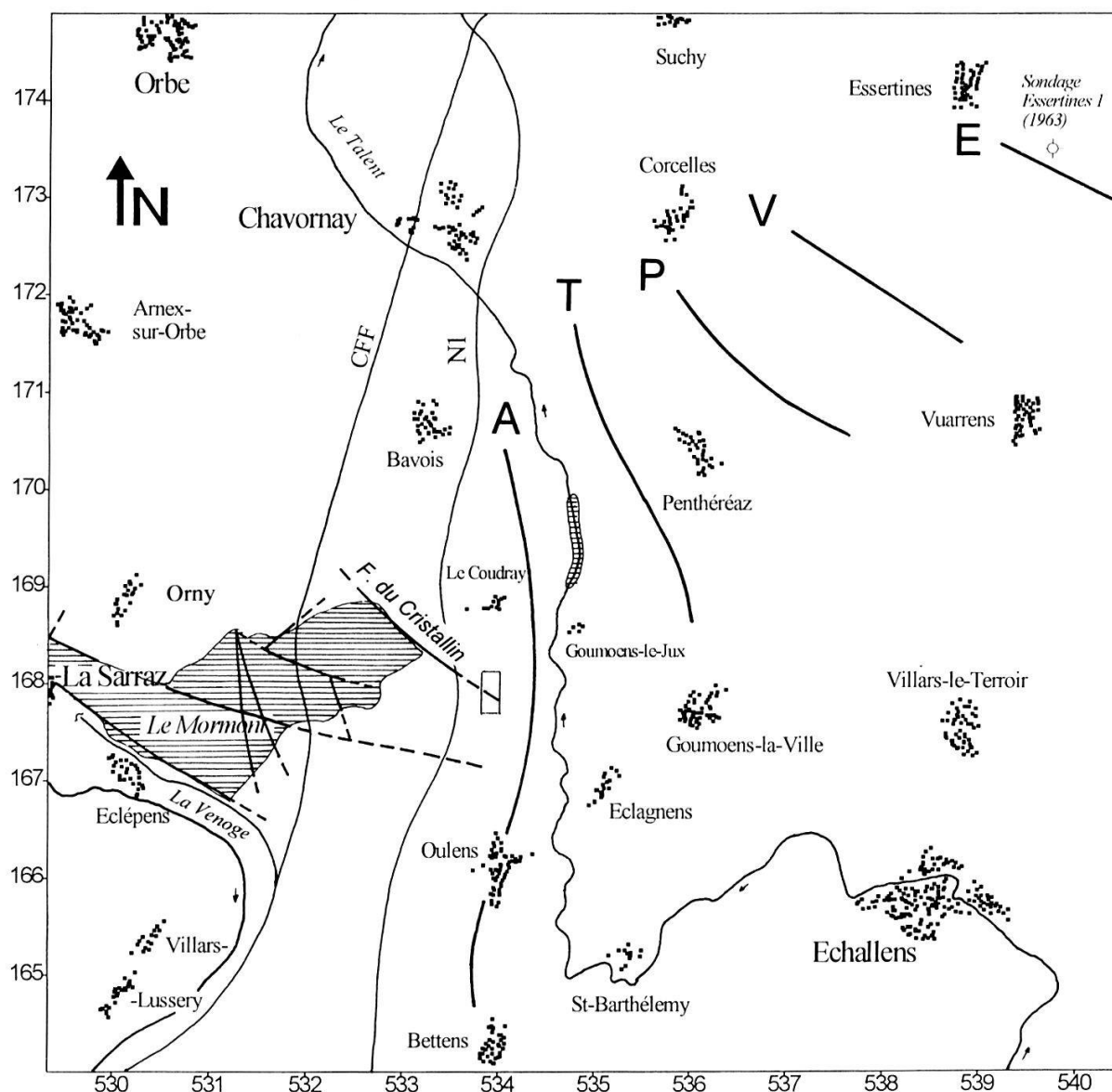


Figure 1.—Carte générale de la région étudiée et esquisse tectonique du Mormont. En hachures horizontales, les affleurements du Secondaire. Le Tertiaire sous couverture morainique est laissé en blanc. Les emplacements des profils de résistivité audio-magnétotelluriques (AMT) sont notés A, T, P, V et E et la zone d'étude de la faille du Cristallin est repérée par un cadre à son extrémité SW. Les coordonnées sont celles de la Carte nationale de la Suisse.

une «anomalie» dans le paysage géologique, formé par les dépôts de la Molasse d'eau douce inférieure (grès et marnes du Chattien). Ses falaises claires dominant la plaine de plus de 100 m contrastent fortement avec la morphologie typiquement molassique des environs. Son orientation perpendiculaire à la chaîne jurassienne soulève déjà quelques questions alors que sa structure même ne peut s'expliquer que par un horst qui prolonge à l'E le graben du Nozon. CUSTER (1928) le décrivait déjà comme: «[...] une ride anticlinale du Jura, un pli détaché de la chaîne et qui s'avance dans le plateau molassique. Cet anticlinal surélevé par des failles longitudinales est coupé par plusieurs failles secondaires qui le font s'affaisser en paquets vers l'E où il disparaît sous la molasse».

Des études plus récentes ont montré que la structure du Mormont est beaucoup plus complexe. Par exemple, de nombreuses failles montrent une composante décrochante importante. La faille du Cristallin, accident le plus oriental du Mormont, présente ainsi un coulisage dextre déplaçant l'axe de l'anticlinal de près de 200 m vers le SE. Le schéma tectonique présenté à la figure 1 n'en montre que les traits principaux. On en trouvera une description plus détaillée dans WEIDMANN (1980). La tectonique de la région située au NE du Mormont est maintenant bien connue notamment par les données de sismique pétrolière dont JORDI (1990, 1993, 1994) a donné une synthèse.

Notre étude se propose d'une part de suivre en profondeur par géophysique et sur environ 6 km la prolongation de l'anticlinal de calcaires crétacés vers le NE, en direction des villages de Penthéraz et d'Essertines où un forage pétrolier a été exécuté en 1962/63 (fig. 1). D'autre part, diverses méthodes géophysiques ont été expérimentées pour tenter de mettre en évidence et poursuivre vers le SE l'une des grandes failles transversales de l'anticlinal, celle dite du Cristallin, du nom du ruisseau qui emprunte le profond ravin qui lui est associé. Les failles longitudinales liées à la structure en horst, qui doivent vraisemblablement se prolonger également dans la molasse vers l'E, feront l'objet d'une étude ultérieure. Tous ces accidents sont masqués par les terrains quaternaires partout présents sur cette partie du Plateau et constitués essentiellement de moraines rhodaniennes. L'épaisseur de celle-ci est cependant relativement faible dans la région d'étude, souvent inférieure à une dizaine de mètres. CUSTER (1928) mentionne à ce propos que la profondeur des puits à eau sur le plateau d'Oulens n'excède pas 15 m.

### 3. MÉTHODES GÉOPHYSIQUES MISES EN ŒUVRE

#### 3.1 *Choix des méthodes*

Dans la zone d'étude, les roches en présence se limitent essentiellement au calcaire barrémien (faciès urgonien coralligène) et à la molasse chattienne (grès plus ou moins argileux). La résistivité des calcaires, de quelques centaines à plusieurs milliers d'ohm-m selon leur faciès et leur degré de fissuration, présente un bon contraste avec celle de la série molassique, voisine de 30 ohm-m en moyenne, et permet l'application des méthodes électriques et électromagnétiques. La couverture quaternaire n'affecte que rarement les mesures, par son épaisseur réduite et sa résistivité souvent peu différente de celle des terrains molassiques. Quelques essais préliminaires avaient montré que les failles affectant la molasse peuvent se repérer également par ces méthodes: la résistivité des zones fracturées y est plus élevée par suite d'une augmentation de la porosité associée vraisemblablement à une désaturation en eau. Mentionnons enfin que le contraste de densité entre la molasse ( $d=2.4$ ) et les calcaires crétacés ( $d=2.7$ ) semblait permettre une étude gravimétrique en liaison avec le problème du rejet d'une faille profonde mise en évidence par SCHNEGG *et al.* (1986). Leur interprétation concluait à l'existence de deux failles subparallèles de direction NW-SE, l'une («W-fault») sans rejet, l'autre présentant un rejet du soubassement calcaire évalué à 75 m («E-fault»), avec le compartiment abaissé vers le SW. Un profil test exécuté sur la base de ce modèle structural n'ayant pas montré l'anomalie gravimétrique attendue, la méthode a été aban-

donnée dans le cadre de nos recherches. L'étude mériterait cependant d'être reprise ultérieurement sur une échelle plus systématique.

Les méthodes géophysiques appliquées dans notre région ont été les suivantes: la méthode audio-magnétotellurique (AMT), le VLF, le VLF-R, la résistivité en traîné Schlumberger et pôle-dipôle, les conductivimètres EM-31 et EM-34, le magnétisme et la polarisation spontanée (PS). Le lecteur peu familier de certaines méthodes trouvera ci-dessous un bref rappel de leurs principes de base et de leur mise en œuvre sur le terrain.

### 3.2 Rappels théoriques

#### *Méthode AMT*

La méthode audio-magnétotellurique (AMT) mesure la résistivité électrique du sous-sol à l'aide des champs électromagnétiques naturels émis par les orages, principalement ceux des zones équatoriales. Ces champs électromagnétiques alternatifs, (dont on peut avoir une idée par les craquements et sifflements captés par un poste de radio ordinaire, réglé dans la gamme des ondes longues, à l'approche d'une zone orageuse), parcourent des distances considérables par réflexions successives dans les hautes couches de l'ionosphère. La mesure simultanée du champ électrique à la surface du sol et du champ magnétique horizontal qui lui est perpendiculaire permet d'obtenir une valeur de la résistivité du sous-sol. Une propriété fondamentale des champs alternatifs réside dans l'effet pelliculaire ou skin effect: pour une résistivité donnée, un champ magnétique ou électrique pénètre d'autant plus dans le sous-sol que sa fréquence est plus basse. Ainsi, par le choix judicieux des fréquences (de 1 à 5000 Hz pour l'appareil utilisé), il est possible, dans certaines limites, de faire porter l'investigation à la profondeur désirée. Deux possibilités s'offrent à l'utilisateur. Premièrement, laissant fixe le dispositif, on mesure la résistivité apparente selon une suite de fréquences décroissantes réalisant ainsi un «sondage AMT», analogue à un sondage électrique classique, où l'investigation se porte selon la verticale. La deuxième technique consiste à choisir une fréquence de travail, suivant la profondeur d'investigation voulue, et à déplacer le dispositif entier de stations en stations le long d'un profil ou sur une région. L'investigation porte alors selon une tranche de terrain horizontale, d'épaisseur plus ou moins constante suivant l'importance des variations latérales des résistivités.

Les avantages de la méthode sont multiples: profondeur d'investigation courante jusqu'à plusieurs centaines de mètres, légèreté et faible encombrement de l'appareillage, installation rapide. La mise en œuvre ne nécessite qu'un opérateur et se borne à l'installation d'une ligne tellurique de quelques dizaines de mètres et d'un capteur magnétique perpendiculaire. Les inconvénients de la méthode proviennent essentiellement de sa grande sensibilité aux signaux parasites d'origines industrielles tels que les courants vagabonds du réseau à 50 Hz, ceux des lignes CFF (16 2/3 Hz, omniprésent), et les fuites dues aux lignes à haute tensions. Mentionnons encore, lors de notre étude, les perturbations importantes liées à l'émetteur de Sottens, par sa proximité et sa puissance de 500 kW.

#### *Conductivimètres EM-31 et EM-34*

Le conductivimètre Geonics EM-31 met en jeu un champ magnétique primaire à 9.8 kHz produit par une petite bobine fixée à l'une des extrémités d'une perche rigide de 4 m de longueur tenue à horizontale. A l'autre extrémité, une bobine réceptrice reçoit le champ magnétique secondaire issu des courants induits dans le sous-sol par le champ primaire. Le signal reçu se divise en une composante réelle (en phase), proportionnelle à la susceptibilité magnétique du sous-sol, et une composante imaginaire (hors phase) directement traduite par l'appareil en une valeur de conductivité exprimée en milliSie-

mens par mètre (mS/m). Cette unité est simplement l'inverse de la résistivité exprimée en ohm-m et multipliée par commodité par un facteur 1000. L'appareil est porté par un seul opérateur à environ 1 m au-dessus de la surface du sol. Dans la position normale, les bobines sont horizontales et coplanaires, le champ magnétique produit est vertical et l'investigation, maximale, porte à environ 6 m de profondeur. Par une rotation de 90 degrés de l'appareil, le champ magnétique devient horizontal et la profondeur d'investigation diminue de moitié.

Fondé sur le même principe de base, le conductivimètre EM-34 se distingue par la longueur plus grande et variable de son dispositif. Ici les deux bobines, d'un diamètre de l'ordre du mètre, sont reliées par un câble et manœuvrées chacune par un opérateur. Trois séparations sont possibles (10, 20 ou 40 m) suivant la profondeur d'investigation souhaitée, celle-ci valant 1.5 ou 0.75 fois environ l'écartement des bobines, suivant leur disposition horizontale ou verticale. La fréquence de travail est variable selon l'écartement choisi: 6400, 1600 et 400 Hz, cette dernière valeur correspondant à la plus grande distance émetteur-récepteur. Dans cet appareil, la composante en phase est ignorée et seule la conductivité est affichée.

Les conductivités mesurées par ces deux appareils sont des conductivités vraies si le sous-sol est homogène et isotrope. Dans le cas contraire, on parle de conductivités apparentes.

### *Traîné Schlumberger AB 40 m*

La méthode des résistivités électriques consiste à injecter un courant  $I$  dans le sol au moyen de deux électrodes A et B et à mesurer la différence de potentiel  $\Delta V$  apparaissant entre deux autres électrodes M et N centrales, en ligne avec les précédentes. Le rapport  $\Delta V/I$ , multiplié par un coefficient dépendant de la configuration géométrique des électrodes, fournit une valeur de la résistivité du sous-sol (en ohm-m). Celle-ci est dite résistivité vraie si le sous-sol est homogène et isotrope aux environs de la mesure et résistivité apparente dans le cas contraire. La profondeur d'investigation est proportionnelle à la longueur du dispositif. Celui mis en œuvre dans cette étude est long de 40 m et l'investigation porte sur une profondeur de l'ordre de la dizaine de mètres. Sur le terrain, tout le dispositif AMNB est déplacé le long de profils avec un pas de mesure choisi selon la résolution désirée.

### *Pseudo-coupe pôle-dipôle*

Egalement méthode de résistivité, le dispositif pôle-dipôle est formé de 3 électrodes en ligne AMN. L'électrode B est rejetée «à l'infini», soit suffisamment loin pour minimiser son influence directe sur la mesure du potentiel. La mise en œuvre pratique est la suivante: l'électrode d'émission A est laissée momentanément fixe alors que le dipôle MN (long de 4 m dans notre cas) s'éloigne de A à chaque mesure selon un pas de 4 m. Après 5 mesures, l'électrode A est déplacée de 4 m dans le sens du profil et le cycle recommence. En résumé, chaque position de A fournit 5 valeurs de résistivité apparente avec une profondeur d'investigation croissante par suite de l'allongement du dispositif. L'ensemble des résultats est représenté sur une coupe portant, en abscisses, la progression de l'électrode A et, en ordonnées, les valeurs de résistivité selon une échelle de profondeur arbitraire. En effet, chaque mesure intéressant un certain volume de terrain, il n'est pas possible d'assigner à chacune un point réellement significatif selon la profondeur. Cette représentation fournit donc bien une pseudo-coupe, image commode et parlante de la répartition des résistivités en profondeur mais sans rapport réel avec la forme des structures du sous-sol.

### *Méthode magnétique*

La méthode magnétique consiste à mesurer le champ magnétique terrestre et ses variations locales, elles-mêmes dues à la variation d'une propriété physique des roches et des

terrains appelée susceptibilité magnétique. Celle-ci est fonction essentiellement de la teneur en magnétite, oxyde de fer de composition  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . L'appareil utilisé pour cette étude, un magnétomètre à protons, mesure l'intensité du champ total sans égard à sa direction, avec une résolution de 0.1 nanoTesla (nT). Bien que le champ magnétique terrestre varie en intensité et en direction selon l'emplacement à la surface du globe, on peut le considérer comme constant à l'échelle kilométrique, et dans la zone étudiée sa valeur est voisine de 46850 nT. Enfin, il existe également une variation journalière du champ d'une amplitude d'environ 30 nT sur quelques heures et dont on tient compte lors de levés de précision ou se déroulant sur plusieurs jours. Dans notre cas, la faible longueur des profils ainsi que la rapidité de la mesure elle-même (quelques secondes par station) a permis de renoncer à cette correction.

### *Méthode VLF*

L'abréviation VLF provient du jargon de la radio-électricité (Very Low Frequency) et désigne une bande de fréquences utilisées pour les communications radio à grandes distances et notamment celles utilisées pour les sous-marins en plongée. De puissants émetteurs militaires disposés autour du globe fournissent ainsi un champ magnétique primaire entre 15 et 30 kHz que les prospecteurs géophysiciens ont détourné à leur profit dès le début des années 1960. Un tel champ primaire, issu d'une grande antenne verticale, se propage facilement à plusieurs milliers de kilomètres et peut se représenter par un vecteur normalement horizontal à la surface du sol. Si le sous-sol présente un conducteur convenablement orienté, masse de minerai métallique ou zone aquifère par exemple, le champ primaire y crée un champ secondaire induit. En surface, la résultante des deux champs se manifeste par un vecteur incliné, indice d'un conducteur en profondeur. La mise en œuvre de la méthode se borne ainsi à la mesure de cet angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale («tilt angle») au moyen d'un récepteur approprié, léger et maniable, consistant pour l'essentiel en une bobine de détection associée à un dispositif d'accord de fréquence. La profondeur d'investigation est tributaire de l'effet pelliculaire propre aux champs alternatifs. Plus concrètement, dans le contexte molassique, passablement conducteur, de l'étude de la faille du Cristallin, on peut estimer que l'investigation porte sur une dizaine de mètres de profondeur. L'inconvénient principal de la méthode est la nécessité de disposer d'un vecteur champ magnétique à peu près perpendiculaire à l'allongement de la structure étudiée. Mentionnons encore le risque d'interruption de l'émetteur durant le levé.

### *Méthode VLF-R*

La méthode VLF-résistivité met en jeu les mêmes émetteurs de radiocommunication que ceux décrits plus haut. La mesure simultanée du champ magnétique et du champ électrique perpendiculaire qui lui est associé fournit une valeur de la résistivité du sous-sol ainsi que celle du déphasage entre ces mêmes champs. Ce déphasage vaut normalement  $45^\circ$  sur un terrain homogène et isotrope. Un déphasage supérieur à  $45^\circ$  est l'indice d'une augmentation de la conductivité du sous-sol avec la profondeur, d'une diminution dans le cas inverse. Le champ électrique est capté par deux électrodes distantes de 10 m et disposées dans le sens du profil tandis que le champ magnétique est mesuré par une petite bobine orientée perpendiculairement à la ligne tellurique. De même que dans le cas du VLF tilt, la profondeur d'investigation n'est pas contrôlable par l'opérateur et dépend de l'effet pelliculaire.

### *Polarisation spontanée*

Les potentiels électriques qui prennent naissance spontanément dans le sous-sol ont deux origines principales. La première est liée à la présence de certains minerais métalliques conducteurs enfouis dans le sol. La seconde, qui concerne notre étude, met en jeu les phénomènes d'électrofiltration où la percolation de l'eau dans les terrains poreux et perméables joue le rôle principal. L'apparition de ces faibles courants élec-



triques est due à des interactions complexes entre les ions présents dans l'eau, les forces électrostatiques et la nature physico-chimique des parois des pores. Mentionnons encore les potentiels de membrane et ceux de jonction liquide qui peuvent occasionnellement s'ajouter aux précédents et qui traduisent des variations aussi subtiles qu'obscurées des caractéristiques du sol. Les mesures sur le terrain se font simplement à l'aide d'un millivoltmètre relié à deux électrodes impolarisables où le contact avec le sol se fait par l'intermédiaire d'un élément poreux imbibé d'une solution de  $\text{CuSO}_4$ . Cette précaution est indispensable pour éviter la création de potentiels parasites créés par des prises métalliques directement fichées dans le sol. L'électrode de référence est fixée à l'origine du profil tandis que l'électrode de mesure se déplace à intervalle régulier le long du profil. L'amplitude des potentiels naturels mesurés dans le contexte de notre étude est de l'ordre de la dizaine de mV.

#### 4. ETUDE DE L'ANTICLINAL PAR LA MÉTHODE AMT

L'ossature du Mormont est constituée, nous l'avons vu, d'une voûte anticlinale de Crétacé et dont les flancs ne présentent qu'un faible pendage, de l'ordre de  $10^\circ$  ou moins. La structure visible est brusquement interrompue par un accident NW-SE, la faille du Cristallin, pour disparaître sous la molasse en direction du NE. Les affleurements de calcaires urgoniens ne réapparaissent qu'une seule fois, 2 km plus loin, dans le lit du Talent dont les méandres s'interrompent durant la traversée des calcaires en cluse pour reprendre aussitôt après (fig. 1). Au delà, la position de l'axe de l'anticlinal n'est visible qu'indirectement par les faibles changements de pendages dans la molasse qui n'affleure d'ailleurs que rarement (JORDI 1994). CUSTER (1928) mentionnait déjà une inversion des pendages en un point situé non loin de la route cantonale, environ à mi-chemin entre les villages d'Essertines et de Vuarrens.

##### 4.1. Carte des résistivités AMT à 8 Hz

Dans la région immédiatement au NE de la faille du Cristallin, l'anticlinal a été étudié sur une zone large de 2 km, s'étendant du N de Bettens jusqu'à environ 2 km au N du hameau du Coudray. La structure étant formée de calcaires électriquement résistants présentant un bon contraste de résistivité avec la série molassique sus-jacente conductrice (résistivités de l'ordre de 20 à 30 ohm-m), l'application de la méthode AMT se révèle favorable. Une série de 20 sondages a été réalisée ainsi qu'une carte de résistivités apparentes comprenant 90 stations de mesure à 8 Hz. Cette fréquence permet une bonne profondeur d'investigation qu'on peut estimer à plusieurs centaines de mètres dans le contexte local des résistivités en présence. En plus, les signaux naturels disponibles à cette fréquence sont souvent d'un niveau élevé. La carte des résistivités apparentes à 8 Hz est présentée à la figure 2 sous forme d'une représentation en 3D. L'anticlinal apparaît de façon spectaculaire mais il faut se garder d'y voir une coupe ou un écorché au sens géologique. Il ne s'agit en fait que d'une pseudo-coupe en résistivités apparentes et l'image donnée par la structure n'a qu'une valeur «qualitative» pourrait-on dire.

Dans la même zone, l'implantation de 20 sondages AMT a permis une approche plus quantitative de la structure étudiée. Malgré certaines difficultés apparues lors des mesures (liées aux courants vagabonds issus principalement de la cimenterie d'Eclépens ainsi qu'à la présence d'une importante ligne à

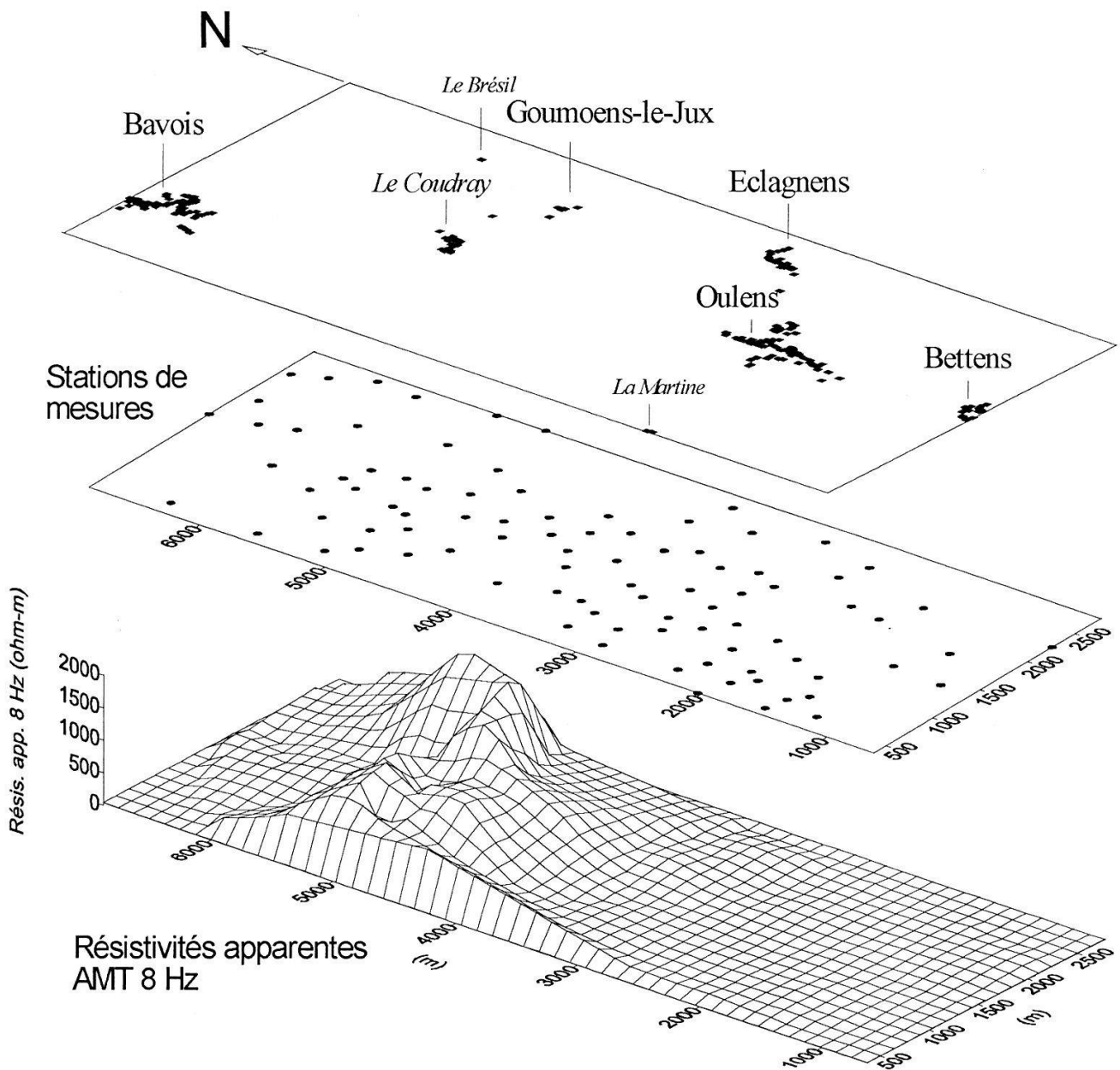


Figure 2.—Représentation 3D des résistivités apparentes AMT à 8 Hz mesurées sur l'anticlinal de calcaires crétaqués dans la zone Oulens-Le Coudray.

haute tension traversant le N de notre terrain), l'interprétation quantitative des sondages a pu être faite de manière satisfaisante, sur la base d'un modèle à deux couches, la première représentant l'épaisseur de la molasse et la deuxième figurant le calcaire sous forme d'un substratum résistant. Un exemple de sondage AMT est présenté à la figure 3. La résistivité apparente est représentée logarithmiquement en ordonnées en fonction de la période (inverse de la fréquence). Chaque valeur de résistivité est la moyenne arithmétique d'une dizaine de mesures, affectée d'une barre d'incertitude représentant l'écart-type. La mesure des signaux électromagnétiques naturels, souvent capricieux, nécessite en effet cette approche statistique. La synthèse des interprétations a permis l'établissement d'une coupe de l'anticlinal le long d'un profil N-S pas-

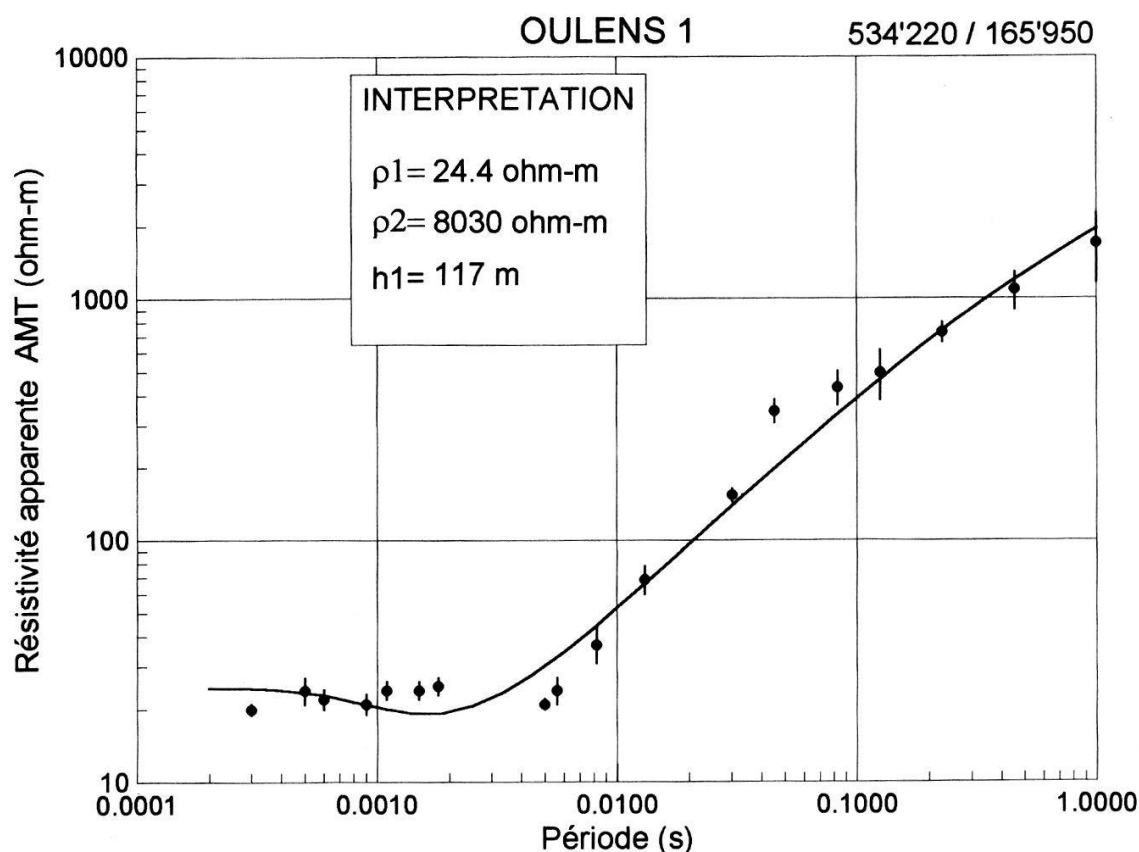


Figure 3.—Exemple de sondage AMT. Les valeurs expérimentales sont figurées avec une barre d'incertitude et la courbe représente le modèle calculé avec les valeurs indiquées dans le cartouche.

sant par Le Coudray et Oulens (profil A, fig. 1). Sur le profil A (fig. 4) ont été également représentées pour le même profil les valeurs de résistivités apparentes à 8 Hz ainsi qu'à 565 Hz pour illustrer l'importance du choix des fréquences. Les mesures à 8 Hz mettent fortement en évidence le bombement de l'anticlinal avec une résistivité apparente maximale voisine de 2000 ohm-m, indice d'un substratum résistant peu profond, de l'ordre de 50 m environ à cet endroit. Par contre, la fréquence de 565 Hz est nettement affectée par l'effet pelliculaire, sa pénétration dans le sous-sol est faible puisque les résistivités apparentes maximales relevées sur le sommet de l'anticlinal, surtout influencées par les terrains molassiques conducteurs, n'atteignent que 80 ohm-m environ. La structure est cependant encore décelable avec une telle fréquence mais le rapport signal-bruit devient médiocre. Sa détection deviendrait impossible à une profondeur plus grande.

#### 4.2 Prolongation de l'anticlinal vers le NE

Les 4 profils de résistivité apparente AMT 8 Hz exécutés en direction du NE, dont la situation est donnée à la figure 1 (profils T, P, V et E), permettent de délimiter avec une bonne précision le passage de l'axe de l'anticlinal (fig. 5). Comme il a été dit plus haut, le choix de la fréquence de 8 Hz est essentiellement dicté par la nécessité d'une profondeur d'investigation suffisante ainsi que par la stabilité du signal naturel. Les résultats, sous forme de profils sériés, montrent également clairement l'effet de l'approfondissement de la structure

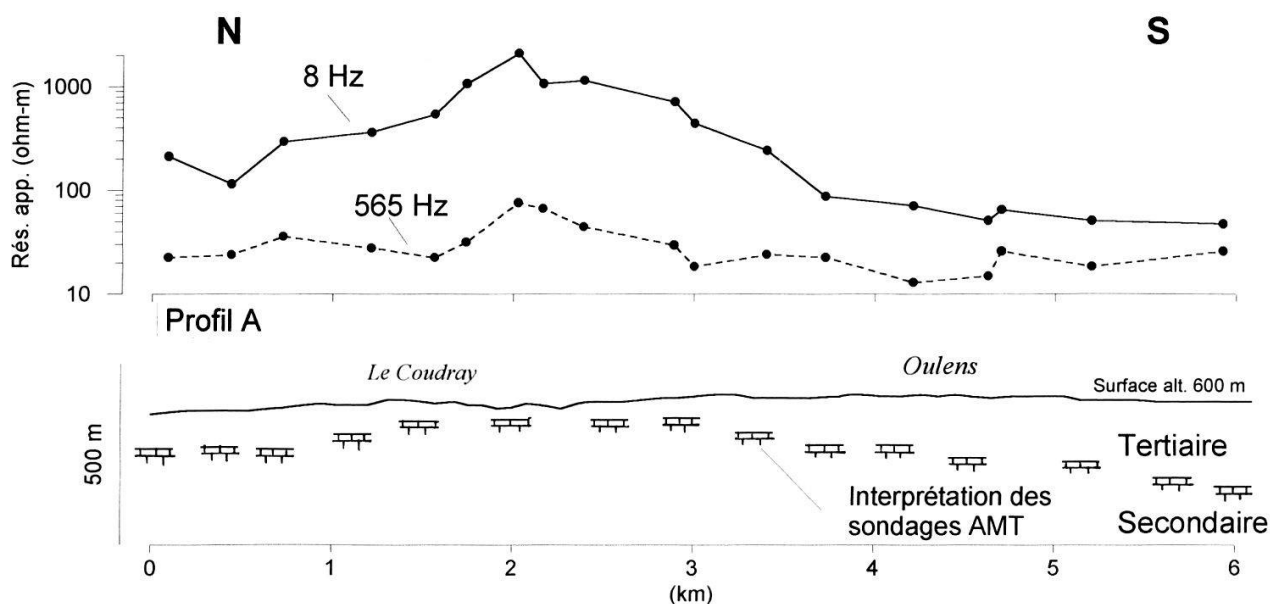


Figure 4.—Profil A des résistivités 8 Hz et 565 Hz dans la région Le Coudray-Oulens avec la coupe de l'anticlinal interprétée à l'aide des sondages AMT.

vers le NE par l'atténuation progressive de l'anomalie dont le maximum s'abaisse de 640 ohm-m pour le profil T à seulement 90 ohm-m pour le profil E. Aux environs d'Essertines, le toit du Crétacé (atteint en forage à 337 m sous la surface) se marque encore par une très légère montée de la résistivité apparente mais ici la fréquence de 8 Hz montre ses limites.

#### Essai d'interprétation quantitative

Un anticlinal long est par définition une structure à deux dimensions (2D). Cependant, dans notre cas, les pendages des flancs sont suffisamment faibles ( $\leq 10^\circ$ ) pour tenter une interprétation quantitative approchée à l'aide d'un modèle 1D, beaucoup plus facile à calculer. Le graphique de la figure 6 montre la relation entre la valeur de la résistivité apparente  $\rho_a$  à 8 Hz à l'aplomb de l'axe de l'anticlinal en fonction de sa profondeur  $h$ . Cet abaque a été construit à l'aide d'un modèle à 2 terrains, le premier représentant la série molassique chattienne avec une résistivité moyenne  $\rho_1$  de 30 ohm-m, valeur courante pour cette formation dans la région, et le second,  $\rho_2$ , égal à 1500 ohm-m, valeur moyenne pour les calcaires urgoniens, tirée de la série de sondages AMT exécutés pour la même étude. L'interprétation des 4 profils à l'aide de l'abaque donne les résultats suivants:

Profil	Anomalie max. (ohm-m)	Profondeur interprétée (m)
T	640	70
P	340	130
V	260	160
E	90	350

Une confirmation peut être donnée en deux points: pour le profil E, les résultats concordent bien avec la profondeur du toit des calcaires crétacés de 337 m donnée par le forage d'Essertines. Pour le profil T, la différence entre l'altitude du centre du profil de mesure (environ 600 m) et celle des derniers

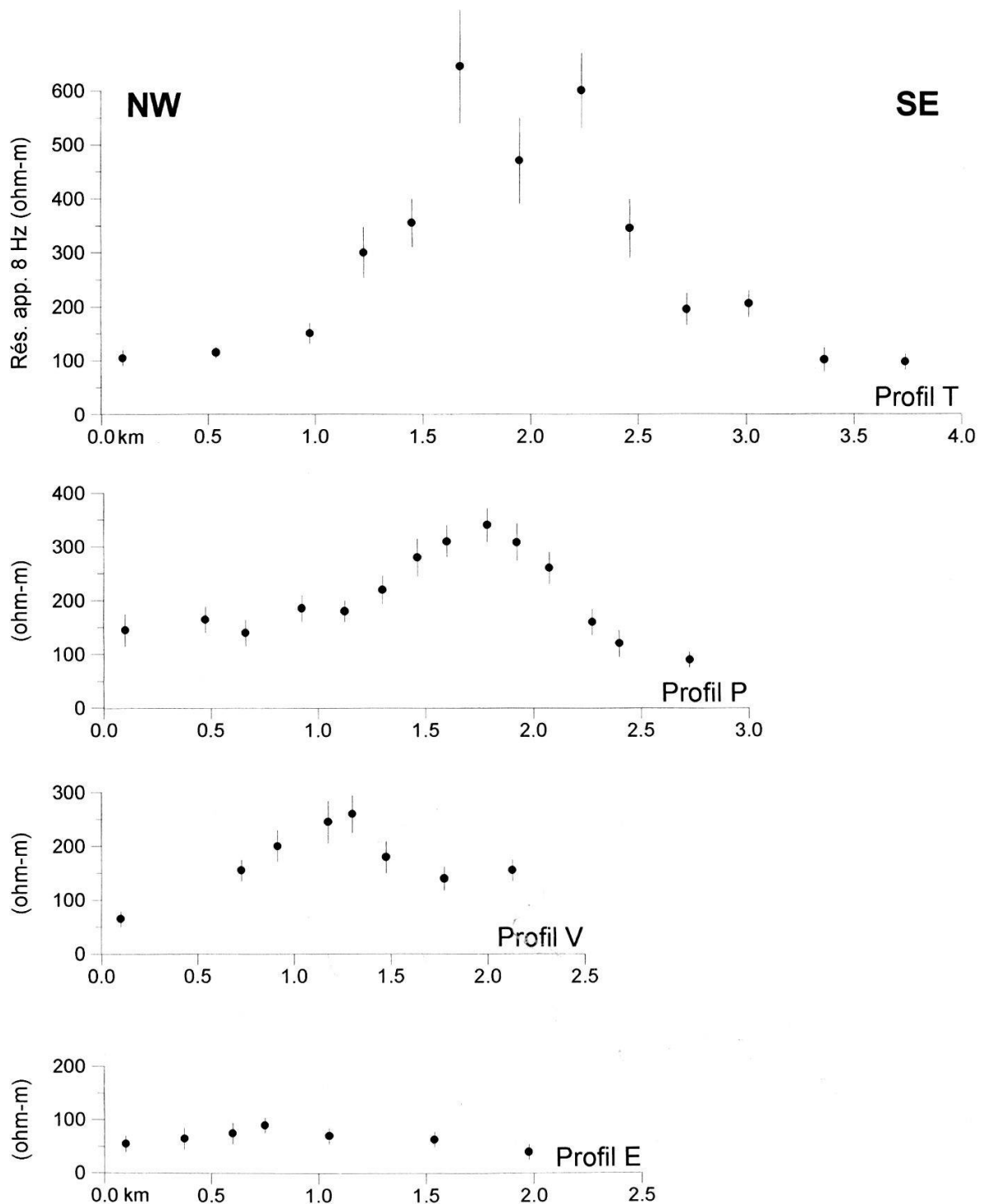


Figure 5.—Série des 4 profils de résistivités AMT 8 Hz entre les environs de Penthérez et Essertines. Leurs emplacements sont représentés à la figure 1. L'atténuation de l'anomalie en fonction de l'approfondissement de l'anticlinal vers le NE est bien visible. L'affaiblissement de l'anomalie est en accord avec la valeur de 70 m déduite de l'abaque. Sur ce dernier profil, l'influence du plongement axial (environ 200 m sur 6 km) reste faible, le profil T n'étant situé qu'à environ 600 m au NE de la gorge du Talent.

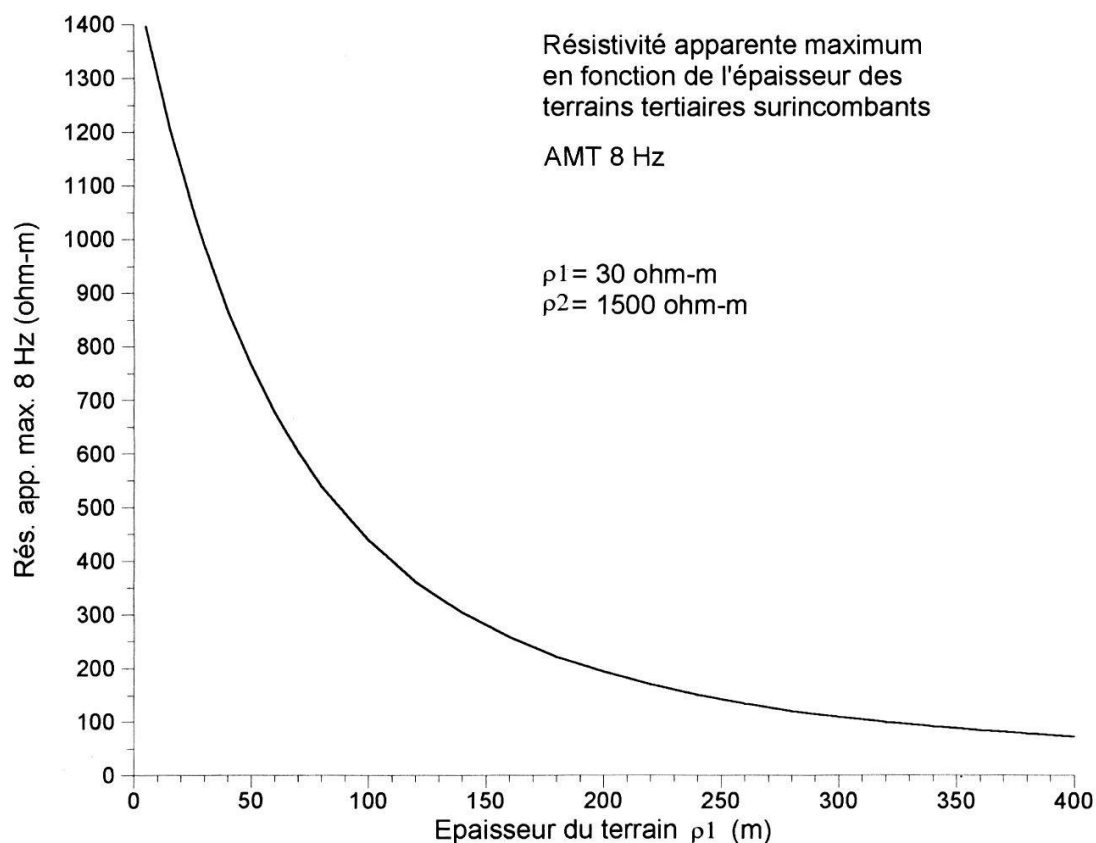


Figure 6.—Variation de la résistivité apparente (AMT 8Hz) maximale en fonction de l'épaisseur du Tertiaire surmontant l'axe l'anticlinal calcaire.

##### 5. ETUDE D'UN SECTEUR DE LA FAILLE DU CRISTALLIN

Le problème des failles et de leur prolongation à l'E du Mormont est complexe. La rareté des affleurements ne permet pas l'observation directe et leur tracé exact ne peut être le plus souvent qu'hypothétique. Si l'on compare certains tracés proposés par CUSTER (1935), BERSIER (1952) ou encore RIGASSI (1983), on perçoit la difficulté du problème. Dans la zone comprise entre Oulens et Bettens, SCHNEGG *et al.* (1986) ont étudié le problème par VLF-R et surtout AMT. Au point de vue géophysique, la détection des failles est délicate dans ce contexte puisqu'elles n'affectent qu'une seule série, sans que l'on puisse compter sur un changement pétrophysique d'un compartiment à l'autre. On peut s'attendre néanmoins à une variation lithologique dans la zone de fractures elle-même, probablement très hétérogène et large de plusieurs dizaines de mètres au minimum. La fracturation entraînant essentiellement une augmentation de la porosité, liée elle-même à une certaine désaturation en eau, il s'ensuit généralement une augmentation de la résistivité électrique. Ces zones de broyage peuvent aussi montrer un comportement hydrologique particulier pour les eaux météoriques, par exemple une perméabilité plus grande pouvant favoriser le lessivage de certains minéraux ou éléments de la roche, induisant notamment des variations de susceptibilité magnétique de la zone. Pour l'étude systématique d'une zone fracturée «témoin», notre choix s'est porté sur un segment de la faille du Cristallin situé à environ 600 m au SE de son tracé sûr cartographié par BERSIER (1952). Son emplacement est encadré à

la figure 1 par un petit rectangle. Notre zone se trouve ainsi à 300 m à l'E de l'autoroute N1 dont l'étude géologique du tracé avait pleinement confirmé le passage de la fracture sous forme d'une zone broyée.

### *Résultats et discussion*

Deux profils pratiquement N-S et subparallèles, longs d'environ 350 m et distants l'un de l'autre d'une cinquantaine de mètres, ont permis l'application de 11 méthodes ou techniques géophysiques différentes pour le premier (P1) et de 7 méthodes pour le second (P2). L'exécution d'un profil parallèle à quelque distance du premier permet de confirmer les diverses anomalies et de diminuer le risque d'interpréter une anomalie ponctuelle ou purement locale comme caractéristique de la zone faillée. Les résultats sont présentés sous forme de profils superposés, avec la même origine, sur les figures 7 et 8.

#### *Profil P1*

La topographie de ce profil P1 est pratiquement plane et son recouvrement morainique est faible, de quelques mètres au maximum. Non loin de son extrémité nord, on voit en effet affleurer quelques bancs gréseux dans un petit ravin. Pour sa partie sud, un test de petite sismique-réfraction au marteau a révélé un mort-terrain d'environ 2 m d'épaisseur.

Le simple examen visuel des anomalies relevées par les diverses méthodes ou techniques géophysiques appliquées sur ce profil permet rapidement l'évaluation des meilleure mises en œuvre pour l'étude de cette zone de fractures. Cependant, la réponse ou le comportement particulier de certaines méthodes méritent quelques brefs commentaires.

#### *Résistivité Schlumberger AB 40 m*

La plus simple des méthodes électriques, du point de vue de l'appareillage, permet de dessiner l'anomalie avec précision, surtout avec un pas d'échantillonnage si court (8 m). La largeur de la zone permettrait d'ailleurs l'économie d'une mesure sur deux. La longueur de ligne choisie est adéquate et encore facilement maniable dans le terrain. Cependant cette méthode est la plus coûteuse en personnel puisqu'elle nécessite un opérateur et trois aides. Il est encore possible de travailler à trois personnes mais l'expérience montre que la progression est beaucoup plus lente et laborieuse.

#### *VLF-R*

Ici le pas de mesure est de 10 m, correspondant à la distance entre les électrodes de mesure du champ électrique. L'anomalie est encore détaillée, avec l'ébauche d'un pic secondaire sur son flanc sud, et son amplitude est semblable à celle du Schlumberger AB 40 m. De part et d'autre de l'anomalie, on retrouve également les valeurs de basse résistivité, de 20 à 25 ohm-m, caractéristique de la série molassique saine.

### *Résistivité AMT 1110 Hz*

Même si l'anomalie est parfaitement dessinée par la méthode et la fréquence choisie de 1110 Hz, avec une confirmation du petit pic sud, sa progression dans le terrain pour des stations si rapprochées (10 m) est lente et pénible pour un seul opérateur. D'un point de vue pratique, la méthode est peu adaptée à un levé détaillé où le temps de déplacement et d'installation du dispositif (ligne tellurique et capteur magnétique) devient long par rapport au temps d'acquisition des mesures.

### *Conductivimètre EM-34*

Avec la configuration des bobines verticales et coplanaires (dipôles magnétiques horizontaux) la méthode, très mobile et rapide avec deux opérateurs, convient parfaitement à ce genre d'étude et la baisse des conductivités relevées sur la zone de fractures est parfaitement claire. L'écartement émetteur-récepteur de 20 m choisi permet, d'une part, une profondeur d'investigation suffisante d'environ 15 m (et une faible influence des variations d'épaisseur de la couverture), et d'autre part, son encombrement est réduit et son maniement aisé. Les valeurs de conductivité, traduites en ohm-m, montrent des valeurs d'environ 40 pour la zone centrale et 30 ohm-m pour l'encaissant.

La configuration avec bobines horizontales offre une profondeur d'investigation doublée avec le même écartement émetteur-récepteur. Cependant, l'anomalie est très nettement dégradée. Les variations irrégulières de la conductivité sont dues principalement aux écarts d'orientation des bobines par rapport à leur plan horizontal théorique. Cette disposition avec les dipôles verticaux est en effet très sensible à ces erreurs d'orientation, contrairement au dispositif précédent, beaucoup plus fréquemment utilisé pour ces raisons.

### *Conductivimètre EM-31*

Les conductivités mesurées avec cet appareil n'intéressent que les premiers mètres du sous-sol. Il est donc naturel que les valeurs du profil soient influencées par les variations d'épaisseur de la couverture ainsi que par les variations latérales des conductivités. Rappelons que la distance émetteur-récepteur n'est ici que de 4 m et que sa profondeur d'investigation est de 6 m au plus. En plus, l'appareil est très sensible et peut déceler nettement des changements de conductivité de quelques pour-cents. Malgré ces limitations, la zone fracturée apparaît nettement sur le profil par un minimum de conductivité.

### *EM-31 (in phase)*

L'anomalie de la composante en phase (proportionnelle à la susceptibilité magnétique) levée sur notre profil est très spectaculaire et parfaitement univoque. Sa forme est d'ailleurs très semblable à l'anomalie en EM-34 avec dipôles horizontaux. On remarquera encore que les variations sont objectivement très faibles (quelques fractions de pour-milles) mais très cohérentes. Cette composante en phase, souvent négligée par les utilisateurs lorsqu'ils ne prospectent pas de cibles métalliques, apparaît pourtant très intéressante et, dans notre cas, moins influencée par la couverture que la conductivité elle-même.



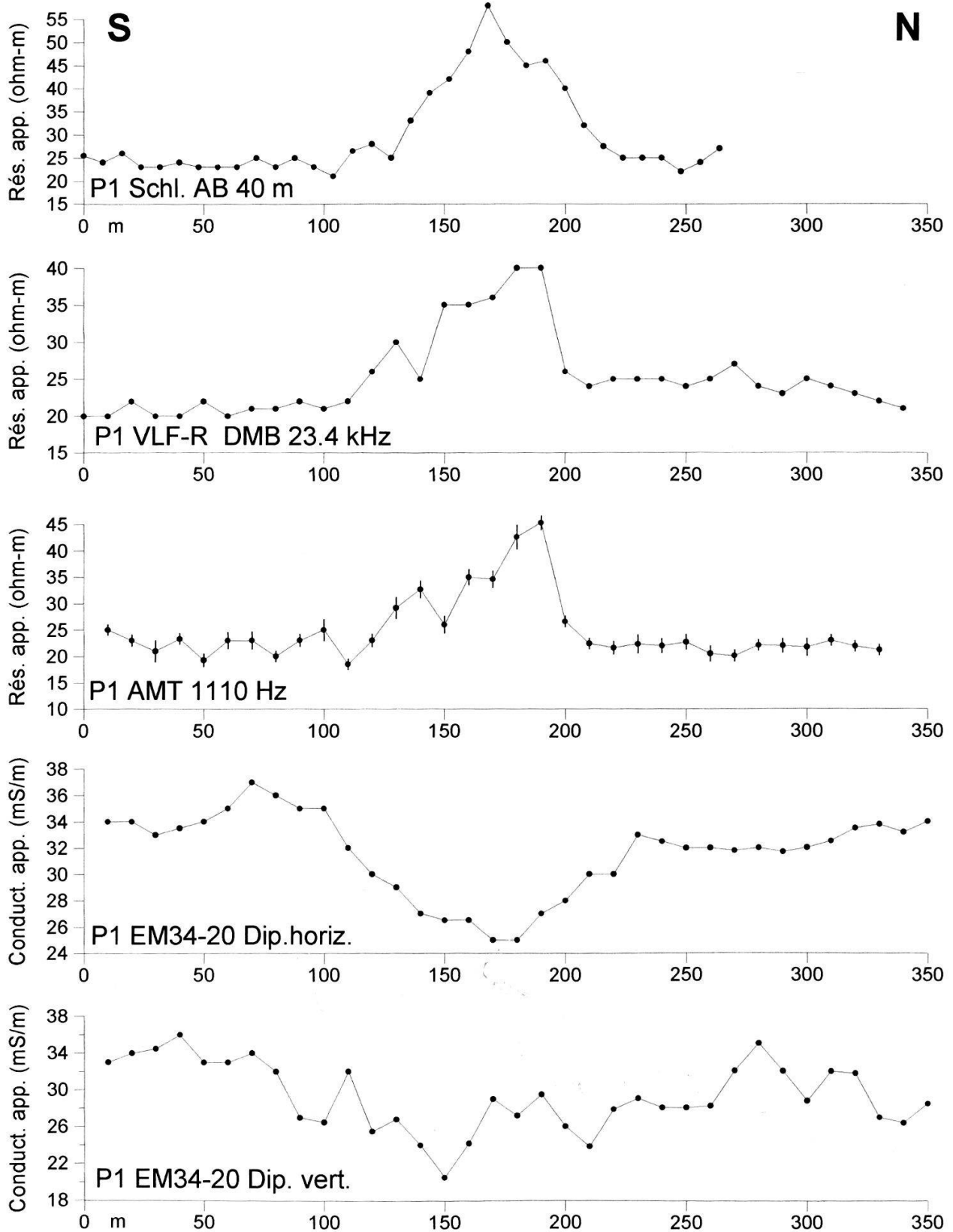
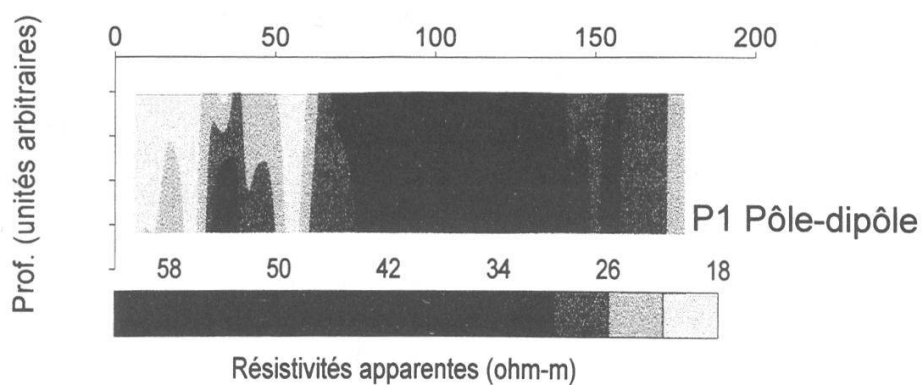
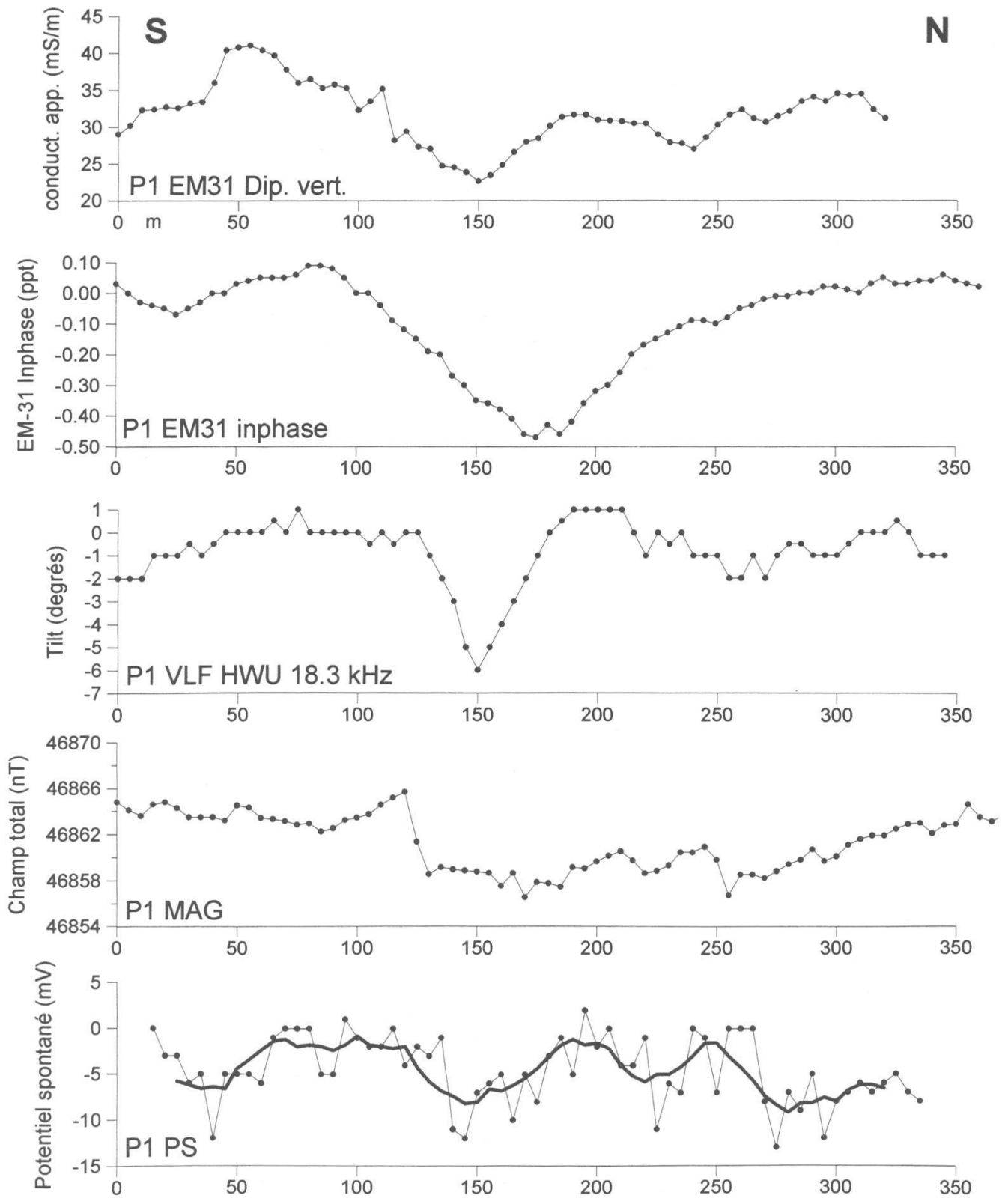


Figure 7.—Profil P1 dans la zone de la faille du Cristallin et réponses géophysiques des différentes méthodes mises en œuvre. Distances en mètres.



*VLF (tilt)*

Malgré des variations de l'angle d'inclinaison faibles, de l'ordre de  $6^\circ$ , on peut observer nettement le passage de la zone résistante. Il faut mentionner cependant que la méthode est utilisée ici «à l'envers» et le sens des anomalies inversé: en effet, ce sont habituellement les courants induits dans un conducteur pris dans un encaissant résistant qui sont responsables de la variation d'inclinaison observée. Dans le cas de notre faille, l'anomalie est créée, le long du profil, successivement en quittant un conducteur (molasse saine) pour rentrer dans un résistant (zone de fracture) et pénétrer à nouveau dans une région conductrice (molasse saine de l'autre compartiment). Si les mesures VLF sont rapides et les récepteurs utilisés très légers et maniables, les lectures doivent être faites très soigneusement. On doit s'attendre en plus à ce que des variations latérales de conductivités, souvent fréquentes dans les terrains morainiques, puissent donner lieu à des anomalies du même genre. La prospection systématique de la prolongation des failles à l'aide de la méthode VLF est possible mais conduit souvent à des ambiguïtés qu'on ne peut lever que par l'application d'une autre méthode.

*Magnétisme*

L'anomalie magnétique, par un décrochement de la courbe d'une amplitude de quelques nT, semble souligner clairement la zone fracturée, d'une largeur de plus de 100 m. Les légères variations de susceptibilité magnétique induisent ici un signal de forme complexe dû principalement à l'inclinaison du champ magnétique terrestre ( $62^\circ$  à notre latitude), aux hétérogénéités des roches et de la couverture liées aux relations géométriques complexes entre les différentes propriétés du sous-sol. La méthode magnétique est certainement la plus économique et la plus rapide: quelques secondes suffisent par station à l'aide d'un appareil ne nécessitant ni orientation ni mise en station particulière. Le levé de longs profils est donc très rapide. Cependant, utilisée seule pour la détection des fractures, la méthode se heurte également à l'ambiguïté des anomalies. En effet, dans les dépôts morainiques rhodaniens, de nombreux galets de roches ignées ou métamorphiques (serpentinites notamment) présentent une susceptibilité magnétique élevée et leurs accumulations locales peuvent donner lieu à des anomalies parasites. Dans notre cas, le long d'un profil où passe certainement une zone de fracture, l'œil identifie clairement une anomalie qui lui est «nettement» reliée. Dans le cas d'un profil d'exploration long d'un kilomètre ou plus et comportant de nombreuses variations, comment identifier à coup sûr la «vraie» anomalie liée à la fracture que l'on recherche?

*Potentiels spontanés (PS)*

La perméabilité verticale des terrains fracturés étant plus élevée, on pouvait s'attendre à des phénomènes d'électrofiltration plus nets par rapport au terrain encaissant. L'examen de la courbe des mesures brutes est peu démonstratif. En filtrant l'anomalie par l'application d'une simple moyenne mobile de cinq termes, la nouvelle courbe (figurée en trait gris épais) fait apparaître une petite anomalie négative vers 150 m, centre de la zone clairement défini par les méthodes précédentes. Un petit pic secondaire est également présent vers 225 m et pourrait marquer la fin de la zone. Il semble qu'on puisse donc attribuer à la zone prospectée des propriétés légèrement différentes sur le plan des

potentiels électriques spontanés. Cependant, il est clair que cette méthode, malgré son application très simple et rapide, ne saurait être recommandée pour l'exploration systématique des fractures dans un contexte morainique souvent très argileux, où les phénomènes d'électrofiltration superficielle sont naturellement faibles.

#### *Pseudo-coupe pôle-dipôle*

Cette technique n'a été appliquée qu'à une portion du profil car sa progression est très lente et laborieuse, du moins avec le matériel simple mis en œuvre pour l'occasion. Elle ne saurait convenir à l'exploration de longs profils. Les résultats présentés ainsi sous forme d'imagerie sont très parlants et la zone résistante centrale apparaît très nettement avec quelques hétérogénéités. Cette image ne doit pourtant pas faire oublier qu'il s'agit de la représentation des résistivités *apparentes*, mesurées à partir de la surface et sans signification physique réelle en termes de géométrie précise. L'épaisseur réelle de la tranche de terrain étudiée ne peut être précisée, d'où les «unités arbitraires» figurées sur l'axe des profondeurs. On peut l'estimer de l'ordre de la dizaine de mètres.

#### *Profil P2*

Situé à environ 60 m parallèlement à P1, ce profil présente une différence de niveau d'environ 5 m sur sa longueur due vraisemblablement à une épaisseur plus grande du recouvrement morainique. Il longe en effet le sommet d'une petite butte cotée à 601 m sur le plan cadastral au 1:10'000 et où apparaissent dans la forêt quelques blocs erratiques de cristallin. Cette légère surépaisseur de mort-terrain suffit probablement à expliquer l'atténuation des anomalies relevées par certaines méthodes à profondeur d'investigation restreinte.

#### *Résistivité Schlumberger AB 40 m*

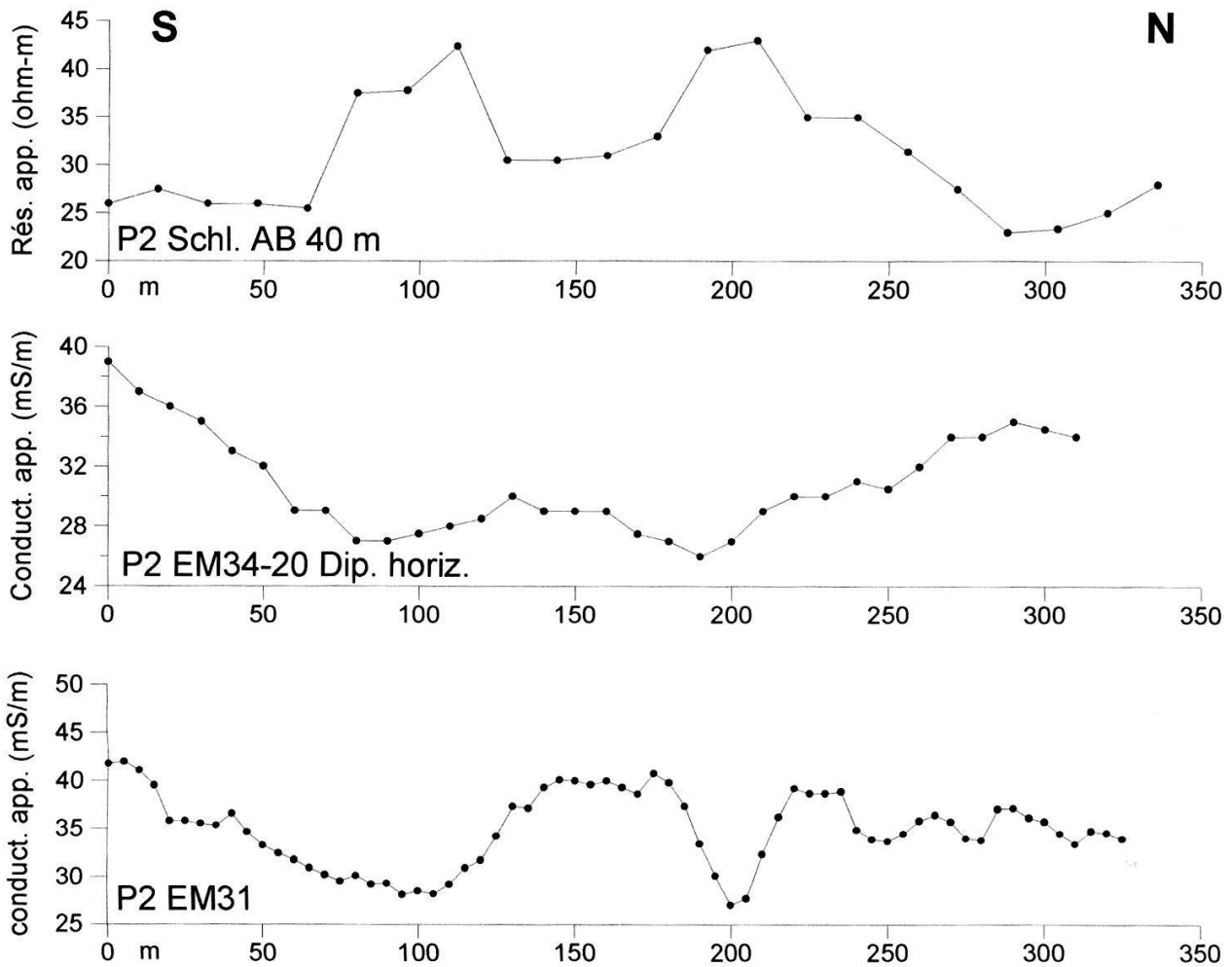
Malgré la relativement grande distance entre les stations (16 m), l'anomalie est très clairement mise en évidence comme pour le profil P1. On peut remarquer en plus que la zone résistante tend à se dédoubler par l'apparition de deux pics de résistivités. Ce dédoublement a été confirmé par BROMBACH (1996) qui a cartographié l'extension à l'E de cette zone par la méthode EM-31.

#### *Conductivimètre EM-34*

Seule la configuration avec bobine verticale coplanaire a été utilisée sur ce profil. Le dédoublement de l'anomalie apparaît également nettement sous forme de deux minima de conductivité. Une influence de la variation d'épaisseur de la moraine n'est pas perceptible, la profondeur d'investigation étant d'environ 15 m.

#### *Conductivimètre EM-31*

Le profil relevé par cette méthode est plus complexe et trahit ici au contraire les variations d'épaisseur de la moraine. On peut néanmoins déceler nettement deux zones de faible conductivité, asymétriques, dont les minima correspondent parfaitement à ceux décrits pour les méthodes précédentes.



Figures 8.—Profil P2 parallèle et situé 60 m à l'E de P1 avec réponses géophysiques des différentes méthodes mises en œuvre. Distances en mètres.

#### *EM-31 (in phase)*

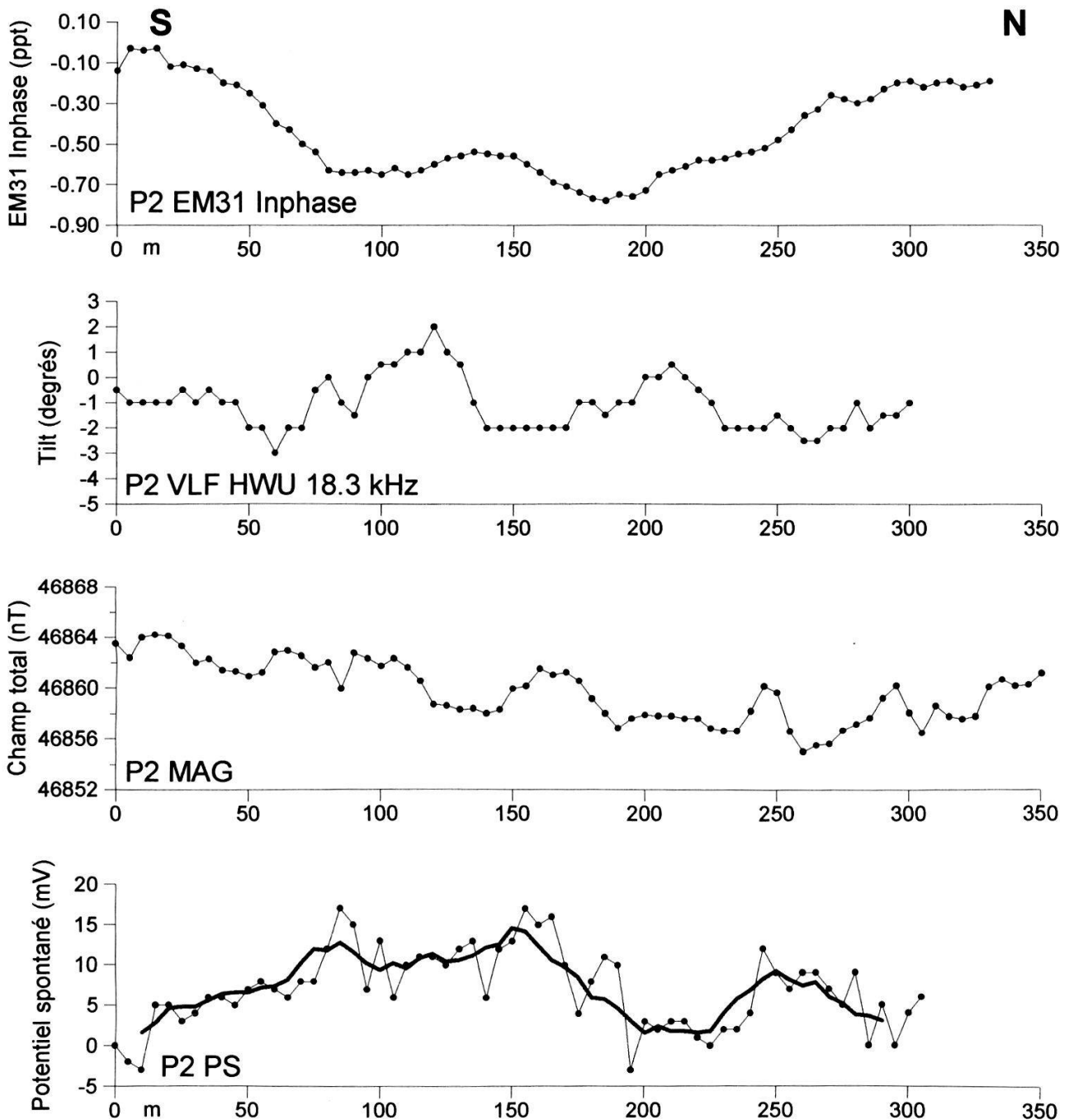
Ici encore, la composante en phase révèle parfaitement le dédoublement de la zone résistante. Notons aussi à nouveau la ressemblance frappante avec la courbe donnée par le EM-34, alors que l'écartement entre les bobines émettrice et réceptrice n'est que de 4 m pour l'appareil EM-31 contre 20 m pour le EM-34.

#### *VLF (tilt)*

Pour ce profil P2, les valeurs de «tilt angle» sont très faibles et exigent des mesures très précises. Néanmoins, les deux anomalies correspondent clairement aux deux zones résistantes caractéristiques du profil.

#### *Magnétisme*

Si on peut constater une tendance générale sous forme d'une large anomalie négative, le profil est trop court pour la confirmer. Par ailleurs, rien ne permet de déceler une corrélation quelconque avec les limites de la zone fracturée.



### Potentiels spontanés (PS)

D'une amplitude d'un dizaine de mV, une anomalie négative apparaît entre 150 et 250 m, plus facilement visible grâce au filtrage par moyenne mobile, également à cinq termes. Son emplacement semble correspondre à la baisse des conductivités du compartiment N. La plus faible anomalie apparaissant entre 90 et 150 m pourrait coïncider avec celle du côté sud révélée par les autres méthodes.

## 6. CONCLUSIONS

L'application de la méthode audio-magnétotellurique a permis la mise en évidence à peu de frais de la structure profonde de l'anticlinal au NE du massif du Mormont, que pratiquement seule la sismique-réflexion pourrait détecter, il est vrai avec beaucoup plus de détails et une capacité d'«imagerie» bien meilleure, mais également avec des coûts très supérieurs en matériel et en personnel. Une méthode électrique traditionnelle telle que le sondage Schlumberger serait possible mais au prix d'une lourde mise en œuvre (lignes d'émission de courant AB de l'ordre du kilomètre). La méthode AMT est d'une maniabilité sans égale par rapport à sa profondeur d'investigation. Cependant, l'acquisition des mesures AMT devient de plus en plus problématique au cours des années par suite de la prolifération des sources électromagnétiques parasites et des courants vagabonds (urbanisation, développement des lignes à haute tensions, nouveau matériel roulant des CFF, émetteurs radio, extension des installations électriques, etc.) Au cours d'environ dix ans de pratique de la méthode dans plusieurs régions du pays, nous avons pu constater la dégradation de la qualité des mesures. Certaines zones sont devenues simplement impraticables et d'intéressants compléments d'étude de certaines structures profondes de nos régions du Plateau sont maintenant pratiquement impossibles par cette méthode.

La mise en œuvre de nombreuses méthodes géophysiques à l'étude d'un segment de zone fracturée donne une idée plus précise de la stratégie à adopter pour des études futures des grandes failles de la région molassique. Nous n'avons pas eu l'occasion de tester sur nos profils la sismique-réflexion à haute résolution. Des essais réalisés quelques centaines de mètres plus à l'E de nos profils ont montré des résultats prometteurs (L. Levato, comm. pers.) Cependant sa mise en œuvre est relativement lourde et peu adaptée à l'exploration rapide sur de longs profils. Les méthodes de résistivité (ou de conductivité) restent les plus efficaces et leurs résultats sont le plus souvent très clairs. L'utilisation en particulier de l'EM-34 nous semble allier un encombrement minimum avec une bonne résolution des anomalies. En plus, la possibilité de varier facilement sa profondeur d'investigation permet de s'adapter dans une large mesure aux variations d'épaisseur de la couverture. Enfin, un opérateur et un aide seulement suffisent à sa progression dans le terrain. Suivant les conditions locales, d'autres méthodes plus légères et plus expéditives (EM-31, VLF, magnétisme) méritent également d'être testées: même sur plusieurs centaines de mètres de longueur, un profil d'essai ne demande que peu d'effort et peut révéler quelques surprises intéressantes, et en cas d'insuccès, la perte de temps reste minime.

## REMERCIEMENTS

C'est lors de discussions avec mon ancien collègue A. Robert que nous avons vu l'intérêt d'une étude dans la région et ensemble nous avons levé, il y a déjà plusieurs années, le profil gravimétrique test dans la région d'Oulens mentionné au début de l'article. Quelques personnes m'ont apporté l'aide indispensable à l'application de certaines méthodes, en particulier A. Fröhlich, F. Gass et T. Brombach. J'ai eu en outre de nombreuses et amicales discussions avec ma collègue L. Levato, qui a bien voulu s'intéresser, également sur le terrain, au problème des zones fracturées.

## BIBLIOGRAPHIE

- BERSIER A., 1952. Feuille 27 Jorat de l'Atlas géol. de la Suisse 1:25'000. Comm. géol. suisse.
- BROMBACH T., 1996. Etude géophysique du prolongement de la faille du Cristallin (Mormont, VD, Suisse). Travail de diplôme Univ. Lausanne. Inédit. 65 p.
- CUSTER W., 1928. Etude géologique du Pied du Jura vaudois. Matér. Carte géol. Suisse n.s. 59. 72 p.
- CUSTER W., 1935. Feuille 5 (300 Mont-la-Ville, 301 La Sarraz, 302 Montricher, 303 Cossonay) de l'Atlas géol. de la Suisse 1:25'000. Avec notice (rév. D. Aubert). Comm. géol. suisse.
- JORDI H.A., 1990. Tektonisch-strukturelle Uebersicht Westschweizerisches Molassebecken. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.* 56/130: 1-11.
- JORDI H.A. 1993. Tectonique du bassin molassique et de son substratum jurassique-crétacé dans la région Orbe-Yverdon-Grandson. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 82.3: 279-299.
- JORDI H.A., 1994. Feuille 1203 Yverdon-les-Bains de l'Atlas géol. de la Suisse 1:25'000, avec notice explicative. Serv. hydrol. et géol. national.
- KISSLING P., 1984. Le Mauremont: cartographie phyto-écologique dans l'étage colinéen jurassien. *Mém. Soc. vaud. Sc. nat.* 17.4: 161-225.
- RIGASSI D., 1983. Profils géologiques de trois décrochements jurassiens et subjurassiens (Vaud). Rapp. int. du Projet NEFF II 165 1B, Géothermie du Pied sud du Jura.
- SCHNEGG P.-A., FISCHER G., LE QUANG B.V., WEAVER J.T., 1986. Investigation of a buried fault with natural and controlled source AMT. *Annales Geophysicae* 4, B: 139-144.
- WEIDMANN M., 1980. Le Pont-Le Mauremont-Bercher-Lausanne-Vevey-Montreux. In: Geotraverse of Western Switzerland, Excursion N° II, p.159-161. In: Geology of Switzerland. A guide-book. Part B: Geological Excursions. TRÜMPY R. (Ed.) Schweizerische Geologische Kommission. Wepf & Co. Publishers, Basel, New York.

*Manuscrit reçu le 7 août 1997*





