

Etude géoélectrique des cours d'eau interglaciaires à l'Ouest de la ville de Fribourg (Suisse)

Autor(en): **Marescot, Laurent / Liaci, Sandro / Chapellier, Dominique**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **96 (2003)**

Heft 2

PDF erstellt am: **03.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-169020>

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 géoélectrique des cours d'eau interglaciaires à l'Ouest de la ville de Fribourg (Suisse)

LAURENT MARESCOT^{1,2}, SANDRO LIACI³ & DOMINIQUE CHAPPELLIER⁴

Key words: geophysical prospecting, geoelectrical methods, resistivity imaging, resistivity tomography, resistivity sounding, Quaternary, interglacial stream, Sarine, Glâne

Mots clés: prospection géophysique, méthodes géoélectriques, imagerie électrique, tomographie électrique, sondage électrique, Quaternaire, cours interglaciaire, Sarine, Glâne

RESUME

La compréhension des structures tourmentées du Quaternaire, avec la présence d'anciens chenaux fluviaux étroits et profonds, fut de tout temps un grand problème pour les géologues. L'apparition et les progrès de l'imagerie électrique (aussi appelée pseudosection ou tomographie électrique), combinée aux méthodes géoélectriques traditionnelles (traîner et sondage électriques), permettent de résoudre une bonne partie de ces difficultés. Cette combinaison de moyens fut mise en œuvre dans une zone à la géologie très complexe, à l'W de la ville de Fribourg (Suisse occidentale), afin de cartographier le toit de la Molasse et les sédiments quaternaires. Cette étude a mis en évidence une série de sillons quaternaires étroits et profonds représentant des anciens cours de la Sarine et de la Glâne, permettant ainsi de clore un débat, presque centenaire, sur la géologie de la région. Ce travail illustre également la nature et les limites des informations que le géologue peut espérer tirer de données géoélectriques effectuées dans ce type de milieu à la géologie complexe.

ABSTRACT

The understanding of complex Quaternary structures has always been a major problem for geologists. The creation and development of electrical imaging (also named electrical pseudosection or tomography) methods, combined with more traditional geoelectrical methods (vertical electrical sounding and resistivity mapping), enable us to solve an important part of these problems. This work takes place in a very heterogeneous Quaternary setting, west of the city of Fribourg (western Switzerland). Various electrical techniques were used to obtain a good overview of the molassic bedrock and Quaternary sediments. The results have enabled us to discover narrow and deep channels (interglacial streams) of the Sarine and Glâne in the molassic bedrock and to close an old and famous debate concerning the geology of the area. This work also points out the nature and limitations of the information that the geologist can gain from geoelectrical measurements in this type of complex geological setting.

1. Introduction

Dès la fin du XIX^{ème} siècle, de nombreux affleurements furent reconnus un peu partout le long des rivières qui drainent le Plateau Suisse, montrant les successions stratigraphiques quaternaires. Très tôt, les géologues mirent en évidence l'existence de paléo-vallées comblées dont les tracés ne correspondent pas aux cours actuels. De nos jours, le géologue ou le géotechnicien n'a souvent qu'une vision très restreinte de ces chemins masqués par une épaisse couverture morainique. Il doit se baser sur les quelques rares forages, tranchées ou affleurements fournissant une information très localisée et peu appropriée à la compréhension globale du phénomène. Les méthodes géophysiques semblent par contre bien adaptées lorsque l'on désire mettre en évidence et imager ces vallées en-

fouies. Elles fournissent en effet rapidement une information plus continue et moins onéreuse qu'une série de forages.

Depuis presque un siècle, les plus célèbres géologues suisses, tels que Gilliéron (1885) ou Schardt (1918), se sont penchés sur l'énigme des anciens cours de la Sarine et de la Glâne à l'W de la ville de Fribourg. Leurs excellentes observations géologiques ne permettent toutefois pas d'élucider de manière définitive le problème posé par les tracés de ces anciens chenaux à l'W de la ville de Fribourg. Différents travaux récents ont été consacrés à l'étude des anciennes vallées au S de la ville de Fribourg (Pugin 1989; Thierrin 1990; Signer et al. 2000). Toutefois, l'extension vers le NW des anciens cours reste encore peu connue. Cette étude propose donc d'appliquer les méthodes géoélectriques traditionnelles (traîner, son-

¹ Institut de Géophysique, Université de Lausanne, 1015 Lausanne, Suisse. E-mail: Laurent.Marescot@ig.unil.ch

² Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Division Reconnaissance et Mécanique des Sols, BP 4129, 44341 Bouguenais Cedex, France. E-mail: Laurent.Marescot@lcpc.fr

³ Rue du Grand-Verger 14, 1920 Martigny, Suisse

⁴ Institut de Géophysique, Université de Lausanne, 1015 Lausanne, Suisse. E-mail: Dominique-Marie.Chapellier@ig.unil.ch



Fig. 1. Carte de la Suisse et localisation de la région étudiée, au SW de la ville de Fribourg.

dage) et plus récentes (pseudosection, aussi appelée tomographie) à la résolution d'un problème géologique en milieu quaternaire complexe. Il s'agit plus précisément d'exposer les différentes étapes d'une étude géoélectrique dans le but d'imager les paléo-vallées étroites de la Sarine et de la Glâne et d'évaluer la nature et les limites des informations que le géologue peut obtenir des données géoélectriques dans ce type de milieu.

Le terrain étudié (Fig. 1 et 2) s'étend à l'W de la ville de Fribourg, de Villars-sur-Glâne à Avry-sur-Matran et, du S au N, de Grangeneuve à Corninboeuf (coord. 572'000/180'000, 572'000/184'000, 576'000/184'000, 576'000/180'000). A l'E coule la Sarine. La Glâne subdivise la surface étudiée en deux parties alors que la Sonnaz en frôle l'extrémité N-W. De nombreux affluents de ces rivières strient la région, offrant les meilleures conditions d'affleurement pour les levés géologiques. Relevons que la région est passablement urbanisée ce qui peut être un obstacle lors d'une étude géophysique.

2. Problématique

Les anciens talwegs qui nous intéressent ici sont principalement ceux de la Sarine et de la Glâne. Parmi les affleurements les plus intéressants et les mieux connus figure celui du méandre de la Sarine, sous Posieux, au lieu-dit de la Tuffière, coord. 574'350/178'690 (Fig. 2). On peut y observer des dépôts de remplissage de deux vallées représentant les cours anciens de la Sarine. Ces dépôts datent probablement de la progression du premier glacier sarinien, au début du Würm précoce (Weidmann sous presse).

Du barrage de Rossens à la ville de Fribourg, le cheminement pouvant être attribué à la Sarine interglaciaire Riss-Würm est bien connu et ne pose pas de problème particulier quant à sa définition (Fig. 2). En effet, de nombreuses études ont été menées dans la région en raison de la complexité hydrogéologique, dont les sources de la Tuffière ne sont que l'ex-

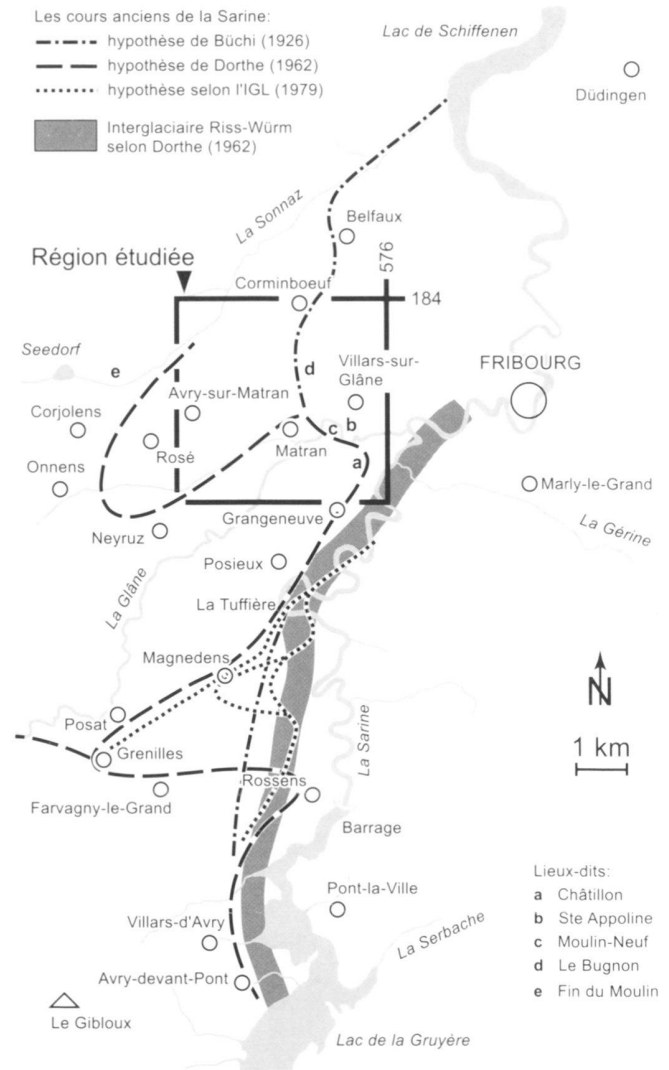


Fig. 2. Les cours d'eau interglaciaires Riss-Würm et plus anciens au SW de la ville de Fribourg selon divers auteurs.

pression externe. Citons parmi celles-ci les travaux de l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne (IGL 1979), la thèse de Thierrin (1990) ou encore le travail de Signer (1996). Ce cours fait son apparition à Avry-devant-Pont, se poursuit par Villars-d'Avry, Rossens et continue par Posieux et Grangeneuve. De là, son parcours se confond approximativement avec celui de la Sarine actuelle (Dorthe 1962; Signer 1996). On remarquera que la paléo-Sarine interglaciaire semble continuer en direction de la ville de Fribourg. La présence de graviers sariniens (interglaciaires) au niveau de la ville de Fribourg appuie cette hypothèse. Il est à relever que d'autres bras se connectent au sillon principal entre Rossens et Posieux par exemple. Ces tronçons sont l'expression des divagations du cours d'eau et ne sont pas forcément synchrones (IGL 1979; Signer 1996).

Parallèlement à cette paléo-Sarine interglaciaire Riss-Würm, les auteurs (Büchi 1926; Dorthe 1962) distinguent également un sillon plus ancien qu'ils qualifient de pré-rissien. On notera toutefois que la documentation actuellement disponible ne permet pas de déterminer avec certitude par quelle rivière ou glacier et à quelle période fut creusée cette ancienne vallée (Weidmann sous presse). Son tracé au S de la Tuffière est lui aussi bien connu (Fig. 2), à l'exception de la zone entre Rossens et Posieux où l'enchevêtrement des bras interglaciaires masque sa progression et ne laisse place qu'à des suppositions hasardeuses. En effet, les bonnes conditions d'affleurement offrent un éventail de données que nombre de géologues ont su exploiter pour interpréter la géologie régionale (Gilliéron 1885; Aeberhart 1907; Schardt 1918; Dorthe 1962). Dorthe (1962) décrit le tracé suivant: «jusqu'à la hauteur de Rossens, il suit approximativement le paléo-talweg interglaciaire. Là, il semblerait qu'il divague en direction de l'W pour exécuter une boucle à la hauteur de Grenilles et Posat, pour repartir ensuite en direction de Magnedens et Posieux où il retrouve le cours interglaciaire».

Par contre, la progression de cet ancien cours dans la partie N reste encore mal connue et ceci de par le manque d'affleurements mettant à nu le creusement. Il existe malgré cela quelques affleurements intéressants qu'il vaut la peine de relever, notamment à Ste Appoline (Dorthe 1962). Les travaux de géologie ayant conduit à des hypothèses, parfois contradictoires, sur cette extension ne manquent donc pas (Schardt 1918; Sieber 1959; Crausaz 1959; Dorthe 1962). Toutefois ces hypothèses demeurent incertaines, car aucune preuve géologique n'a encore pu être avancée (Python 1996).

Gilliéron (1885) fut l'un des premiers à émettre des théories à ce sujet. Mais ce fut Schardt qui proposa en 1918 une première solution du tracé de cette paléo-vallée sarinienne (Fig. 2). Il suggère un trajet rectiligne (S-N) par Ecuwillens (La Tuffière), Moulin-Neuf, pour aboutir, par Corminboeuf, jusqu'à Belfaux où il rejoint ensuite le cours actuel de la Sonnaz. Pour Büchi (1926) il en va de même. Se confondant avec le cours interglaciaire jusqu'à la hauteur de la gravière de Châtillon, le sillon bifurque vers le N en droite ligne par Moulin-Neuf, Le Bugnon et Corminboeuf où il vient se confondre avec la vallée de la Sonnaz. Sieber (1959), dans sa thèse effectuée sur la partie N du terrain étudié, infirme l'hypothèse de Schardt et Büchi en déclarant n'avoir observé aucune trace du sillon en question ni d'un éventuel remplissage pouvant servir d'indice. Dans son travail de thèse, Dorthe (1962) reprend le problème des anciens cours et propose un tracé quelque peu innovateur et plus sinueux de la paléo-Sarine. De La Tuffière à Ste Appoline elle se confond approximativement à l'interglaciaire. Puis elle bifurque vers l'W en passant par Moulin-Neuf puis par Rosé-Corjolens vers la dépression du Seedorf. Il est à relever qu'à ce sujet Dorthe souligne le caractère incertain de cette hypothèse.

La Glâne a produit elle aussi des sillons. L'un des tracés passait au N de Posieux et rejoignait l'ancienne Sarine en passant par Grangeneuve. D'autres tracés devaient approximati-

vement se confondre avec le cours actuel mais avec quelques divagations.

3. Contexte géologique

3.1 *Le substratum molassique*

Le substratum du terrain étudié se situe uniquement dans la Molasse marine supérieure (OMM, *Obere Meeresmolasse*) et plus précisément dans la formation des Couches de la Singine (Schöpfer 1989). On peut décrire cette formation comme étant composée de grès feldspathique à ciment argilo-calcaire. La Molasse du Plateau possède en général une tectonique simple, basée essentiellement sur une suite d'anticlinaux et de synclinaux à larges rayons de courbure. La Molasse de la région ne déroge pas à cette règle (Python 1996; Weidmann sous presse).

3.2 *Les formations quaternaires*

Sur le terrain étudié, l'enregistrement des événements qui ont marqué la période quaternaire commence principalement avec la glaciation rissienne, bien que des sédiments déposés durant un cycle antérieur à celui du Riss ne soient pas exclus (Weidmann sous presse). Les dépôts qui nous intéressent ici sont liés aux situations climatiques qui ont prévalu durant cette période, à savoir les glaciations et les périodes d'optimum climatique (les interglaciaires). Durant les glaciations, une forte érosion ainsi que le dépôt de matériel sous forme de moraine dominant. De même, les interglaciaires sont caractérisés par une forte érosion locale due aux cours d'eau ainsi que par les dépôts de ce matériel dans le lit des rivières et les plaines alluviales. Durant le Würm, les glaciers de vallée se sont rencontrés à plusieurs reprises sur le Plateau Suisse. Plus au S, vers le Lac de la Gruyère, les glaciers du Rhône et de la Sarine confluaient (Pugin 1989; Signer 1996). On notera que la moraine rissienne ainsi que les sédiments fluviatiles, glacio-lacustres ou fluvio-glaciaires n'ont pu échapper au pouvoir abrasif des glaces würmiennes que dans les canyons des cours d'eau actifs durant l'interglaciaire Riss-Würm.

Les paléo-vallées sont essentiellement remplies de sédiments fluvio-glaciaires surmontés par des tills (Signer 1996). Sur l'ensemble du territoire concerné par les anciens cours, des bassins surcreusés par les glaciers, occupés temporairement par des lacs, ont pu être mis en évidence. Le remplissage en devient donc glacio-lacustre voire même «vraiment lacustre» (Dorthe 1962). La lithostratigraphie des dépôts quaternaires (Fig. 3) est parfaitement illustrée par l'affleurement de Pré-d'en-Bas, à la Tuffière (Mornod 1947, p. 28; Signer 1996).

Décrivant la morphologie de ces paléo-vallées, les anciens auteurs parlent de canyons profonds et de largeur variable en fonction de la nature du soubassement dans lequel ils sont taillés. Dans l'OMM inférieure (formée essentiellement de grès peu durs), ils ont pu divaguer au gré des variations du régime hydrique et creuser un réseau complexe (Dorthe 1962). Il faut donc s'attendre à rencontrer plusieurs sillons dont la mor-

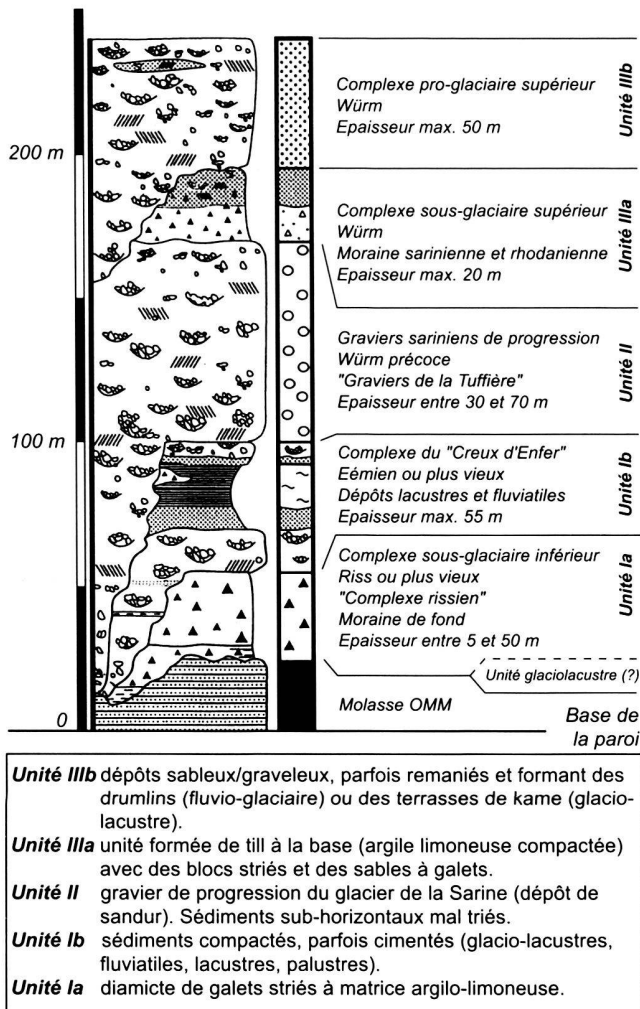


Fig. 3. Stratigraphie schématique des formations tertiaires et quaternaires de la région de Fribourg d'après Signer (1996). La description des unités stratigraphiques est tirée de Weidmann (sous presse).

phologie devrait rester sensiblement constante et dont la profondeur peut atteindre une centaine de mètres. Une comparaison avec les morphologies actuelles de la Glâne et de la Sarine confirme l'hypothèse de canyons profonds.

4. Méthodes géophysiques

Trois méthodes géoélectriques complémentaires ont été mises en œuvre durant cette étude, à savoir le traîné électrique, le sondage électrique et la pseudosection en 2D (deux dimensions) ou tomographie électrique. L'implantation des dispositifs géoélectriques est représentée sur la figure 4. On remarque également sur cette figure que les affleurements et les forages ne fournissent que peu d'information sur la morphologie quaternaire de la région.

4.1 Le traîné électrique

La carte de traîné constitue l'étape préliminaire indispensable à toute prospection géoélectrique bien menée (Chapellier 1980). Elle permet d'évaluer les variations horizontales de la résistivité apparente pour une épaisseur de terrain approximativement constante. La profondeur des sillons pouvant atteindre 50 à 100 m, il était impératif d'avoir une profondeur d'investigation suffisante. La longueur de ligne nécessaire fut donc déterminée en fonction des différents sondages électriques préexistants effectués à la Tuffière (IGL 1979), ainsi que sur la base des études de Thierrin (1990). Une longueur de ligne de 200 m et un dispositif Schlumberger se sont rapidement imposés comme étant le meilleur choix en considérant les difficultés de mise en œuvre sur le terrain (constructions anthropiques, voie ferrée, autoroute, etc). Le pas de mesure fut tout d'abord de 120 m puis, dans le but de cerner au mieux les anomalies, ramené à 75 m.

4.2 Le sondage électrique

Le sondage électrique se positionne parallèlement aux anomalies décelées sur la carte de traîné. Cette méthode permet, via une méthode d'interprétation (Koefoed 1979), de déterminer la résistivité vraie du sous-sol ainsi que la profondeur de chaque couche pour un modèle tabulaire (en un point et en une dimension). L'utilisation du sondage électrique peut parfois être problématique de par l'étroitesse des structures étudiées (effets latéraux).

4.3 L'imagerie électrique 2D

L'imagerie électrique 2D (tomographie) permet de résoudre ce type de problème en se plaçant perpendiculairement aux anomalies de la carte de traîné. Une fois les mesures de résistivités apparentes effectuées, un algorithme d'inversion itératif (optimisation par moindres carrés, Loke & Barker 1996) nous permet d'obtenir un modèle de la répartition des résistivités dans le sous-sol. Le résultat possède une résolution plus élevée que le sondage ou le traîné électrique. L'acquisition en tomographie s'effectue de manière automatique à l'aide d'un câble multiconducteur, d'un résistivimètre et d'un ordinateur portable afin d'effectuer, dans un temps raisonnable, un grand nombre de mesures. Contrairement au sondage électrique dans lequel le modèle tabulaire obtenu est discret, la tomographie présente des structures géoélectriques aux limites plus progressives. Ce lissage, inhérent à la méthode utilisée pour stabiliser le processus d'inversion, rend difficile toute détermination précise de la profondeur basée uniquement sur ce type de résultat.

4.4 Remarques sur l'interprétation

Relevons également que les interprétations obtenues par ces méthodes sont soumises au principe d'équivalence. Selon ce

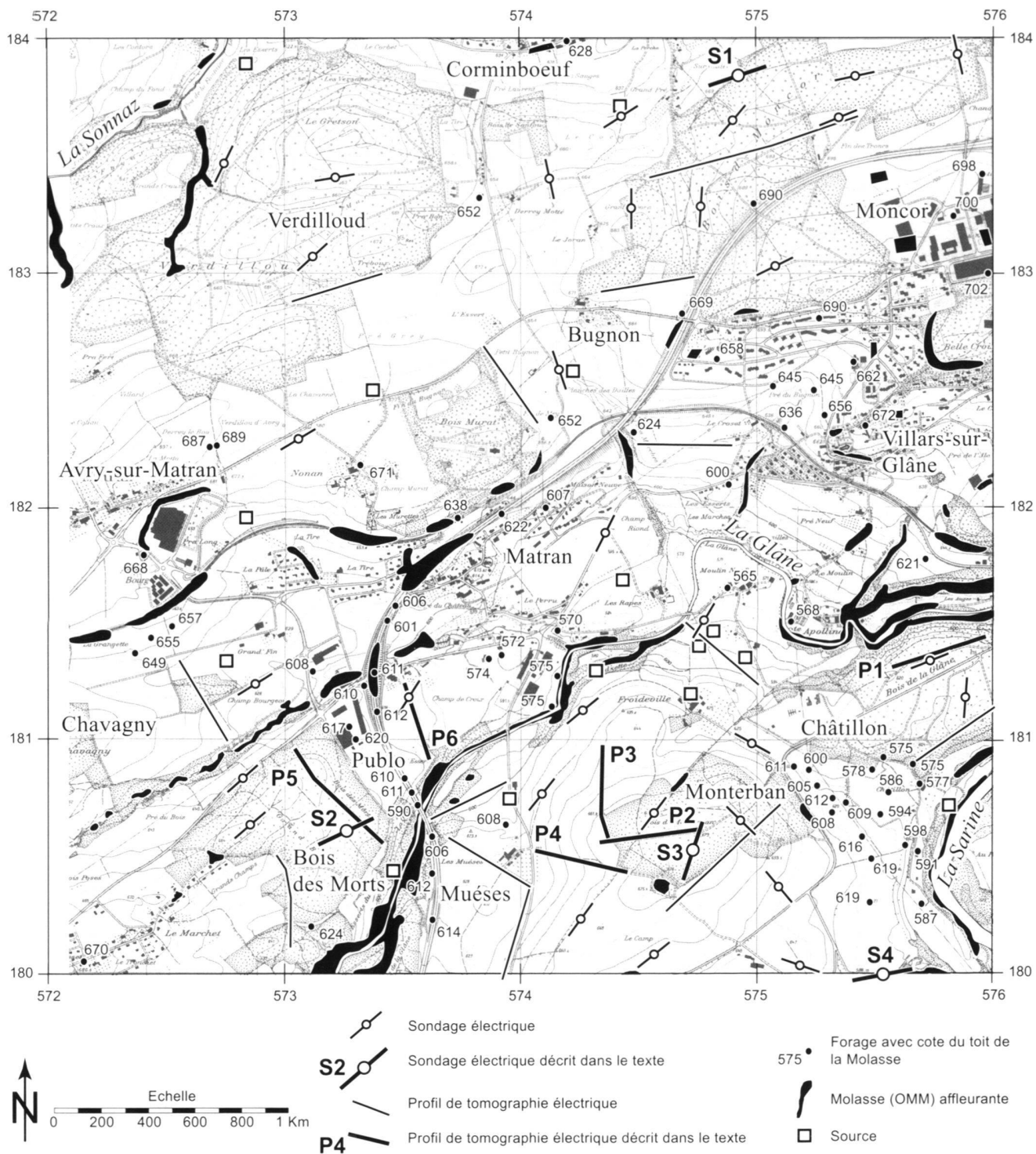


Fig. 4. Localisation des dispositifs de mesures géophysiques, des forages, des sources et des affleurements (fond topographique reproduit avec l'autorisation du Service Cantonal du Cadastre et de la Géomatique du Canton de Fribourg, autorisation SCCG 21120).

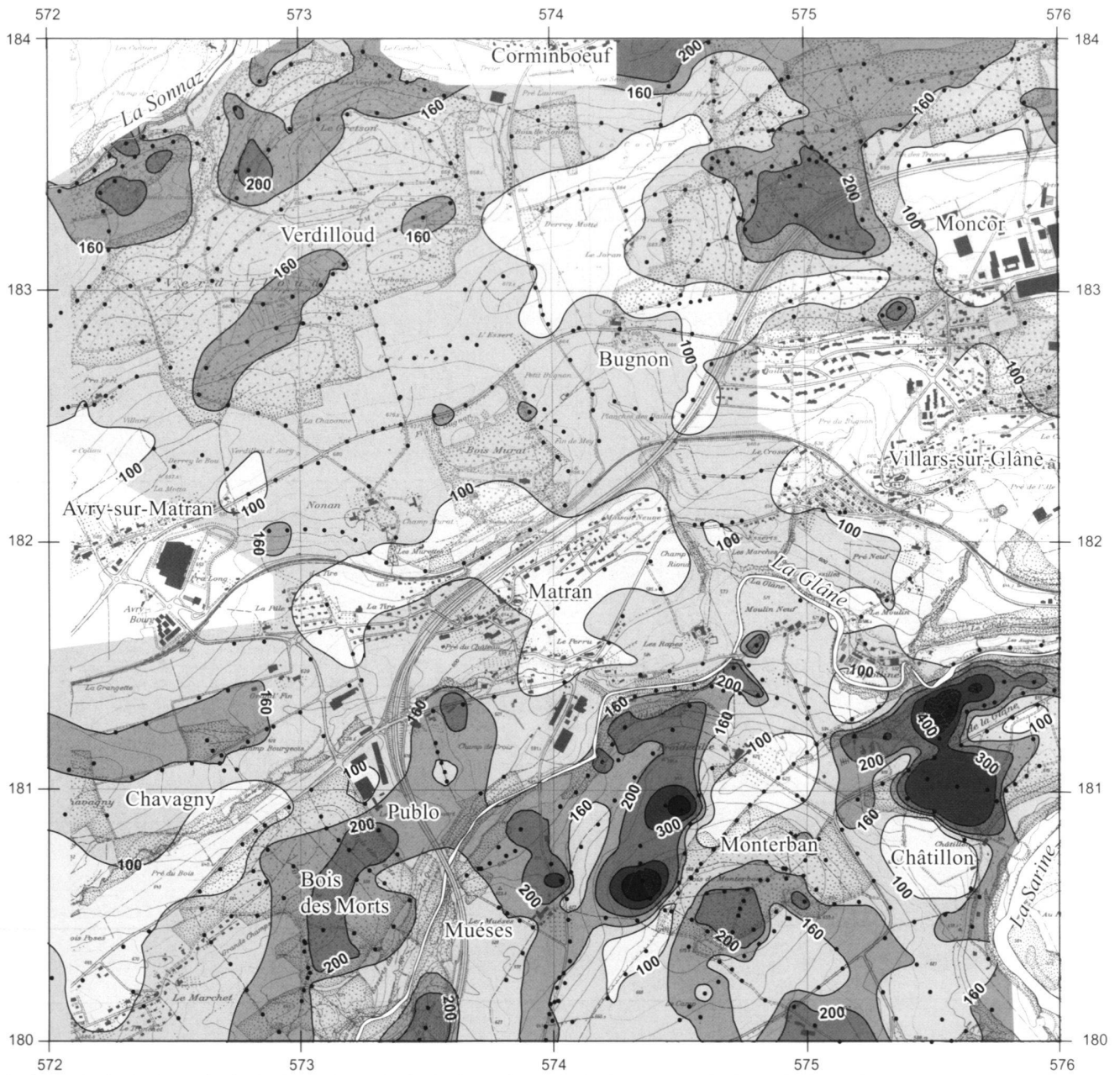


Fig. 5. Carte de traînée électrique (fond topographique reproduit avec l'autorisation du Service Cantonal du Cadastre et de la Géomatique du Canton de Fribourg, autorisation SCCG 21120).

principe, plusieurs modèles peuvent expliquer des mesures entachées d'erreurs. L'introduction d'information a priori (données paramétriques, contraintes géologiques) permet de sélectionner le modèle le plus plausible. Dans le cas de l'imagerie électrique, des algorithmes spéciaux peuvent être utilisés pour tester la fiabilité des modèles inversés (Marescot et al. sous presse).

5. Résultats géophysiques

5.1 Données paramétriques

Pour obtenir la résistivité vraie de la Molasse, nous avons réalisé deux sondages électriques sur deux sites différents dont la géologie est connue. Le premier dans la région d'Avry-sur-Matran où la Molasse affleure sous quelques mètres de couverture morainique (coord. 573°050/182°310). Le second en dehors du périmètre d'étude, à proximité d'un forage dont la lithostratigraphie est claire (coord. 571°030/182°690, région de La Fin du Moulin, Fig. 2). Les deux sondages donnent une résistivité vraie de 115-125 Ωm pour l'OMM, ce qui est en accord avec les données de la Tuffière (IGL 1979) et les résultats de Favini (1966). Les résistivités des remplissages semblent par contre plus variables (entre 30 Ωm et 1000 Ωm , Thierrin 1990) ce qui peut causer des problèmes de contraste avec le substratum molassique.

5.2 Traîner électrique

Au terme de notre acquisition en traîner, près de 680 valeurs de la résistivité apparente ont été mesurées dans la région (Fig. 5). La comparaison des figures 4 et 5 nous montre déjà de manière frappante que la carte de traîner nous apporte une toute nouvelle vision (plus globale) de la problématique.

5.2.1 Le résultat du traîner

Les régions de basses résistivités peuvent se situer sur des culminations comme à Villars-sur-Glâne, ou au contraire dans des dépressions comme à Matran. Pour nombre de ces régions, fortement urbanisées, seule une acquisition en périphérie fut possible. Néanmoins, les informations géologiques ainsi que les forages et autres études géotechniques laissent à penser que la Molasse est subaffleure, confirmant ainsi la carte de traîner. La valeur moyenne des conducteurs est de 100 Ωm .

La partie S du terrain (Fig. 5) semble receler un grand nombre de structures. La région de Châtillon révèle des anomalies résistantes, probablement provoquées par le même gravier que celui exploité jadis dans la gravière adjacente. La valeur moyenne des résistivités apparentes est ici d'environ 350 Ωm mais peut atteindre 1140 Ωm , caractérisant vraisemblablement des graviers secs. A l'E de ces structures résistantes, une anomalie plus conductrice laisse supposer une remontée du substratum molassique qui est attestée par les affleurements de la Sarine actuelle. Un peu plus à l'W, la colline de Monter-

ban contient des corps résistants à son sommet et sur ses versants. La valeur moyenne des résistivités apparentes est d'environ 220 Ωm au centre, atteint 170 Ωm sur le versant SE et plus de 400 Ωm au NW. Ces anomalies sont séparées par une bande conductrice SW-NE où la Molasse affleure. Plus à l'W nous trouvons ensuite une anomalie résistante longeant le cours actuel de la Glâne dont la résistivité apparente peut atteindre 240 Ωm . Cette anomalie vient du SW, passe par le Publo, puis traversant la Glâne au N du plateau des Muéses, rejoint l'anomalie du versant NW de la colline de Monterban. Elle s'estompe ensuite, les sédiments ayant été probablement érodés par la Glâne actuelle. Dans la région du Bois de Chavagny, un peu plus au NW, la valeur moyenne des résistivités apparentes est de 173 Ωm . Selon les données, cette anomalie se cantonnerait dans une petite dépression topographique d'orientation E-W. Etant donné que notre dispositif de traîner était toujours parallèle à la structure supposée, cette anomalie est de faible intensité. Le même cas de figure semble d'ailleurs se présenter sur la plateau des Muéses, entre la Glâne actuelle et la colline de Monterban.

La partie N du terrain présente également quelques structures intéressantes. On trouve, au milieu du bois du Verdilloud, une anomalie faiblement résistante dont la valeur moyenne tourne autour de 170 Ωm . Une autre anomalie s'étend le long de la rive droite de la Sonnaz. La valeur moyenne de cette dernière est de 195 Ωm avec un maximum à 252 Ωm . Elle s'interrompt au niveau du petit ruisseau se jetant dans la Sonnaz à l'endroit où la Molasse affleure. Ce petit ruisseau a de toute évidence coupé et érodé ce remplissage. La région du Bugnon possède de petites anomalies, difficilement interprétables, qui caractérisent probablement un ensemble de corps étroits. Tout ceci crée un milieu peu favorable à une grande longueur de ligne. La dernière anomalie résistante, dans le Bois de Moncor, présente une branche se prolongeant vers le NE. Cette dernière a une résistivité apparente moyenne de 180 Ωm alors que le cœur peut atteindre 268 Ωm . L'anomalie se situe dans une dépression formée par une remontée topographique plus au S.

5.3 Sondages électriques

Les 35 sondages électriques ont été implantés dans l'axe des anomalies obtenues par traîner, nous permettant ainsi de confirmer l'existence de sillons (marqués par les fortes résistivités) et d'obtenir des cotes du toit de la Molasse ainsi que des informations sur les remplissages tout au long de ces supposées dépressions. Tous les sondages ont été orientés parallèlement aux structures révélées par la carte de traîner électrique afin de minimiser les effets latéraux.

5.3.1 Le résultat des sondages électriques.

Nous présentons ici des sondages caractérisant les divers remplissages quaternaires rencontrés (Fig. 6). Ces quatre différents types de sondages sont essentiellement le fruit des situa-

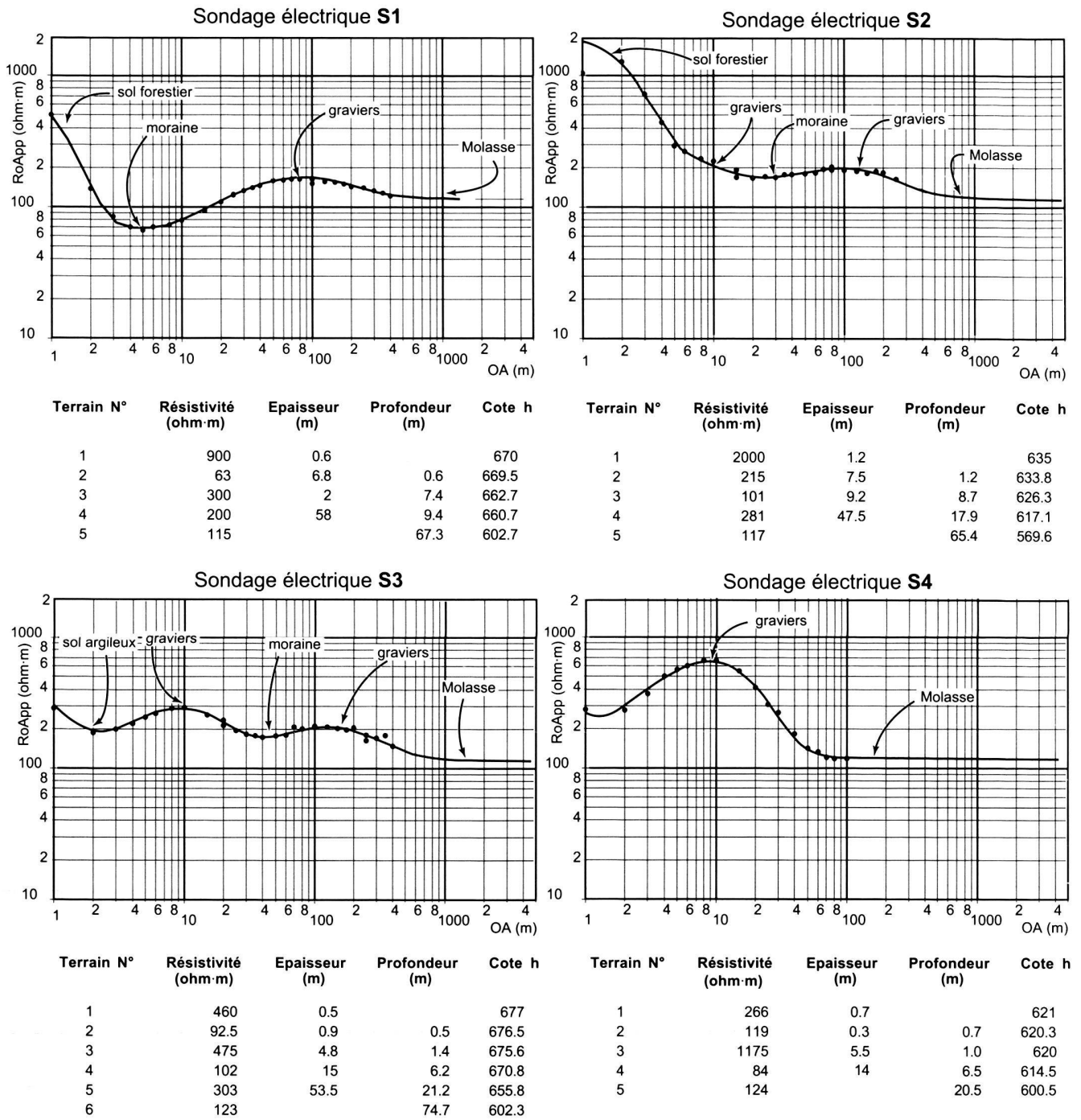


Fig. 6. Exemples de sondages électriques interprétés effectués sur le terrain étudié. La distance OA désigne la longueur d'un demi dispositif de mesure. Les modèles prennent en compte les informations a priori (données paramétriques, affleurements, forages) afin de limiter les domaines d'équivalence.

tions érosives variables dans un même milieu stratigraphique. On remarquera que le sondage électrique est un outil précieux pour le géologue du Quaternaire, car il permet de bien préciser la stratigraphie (nature, épaisseur) des sédiments.

Le type «creux-bosse-creux» (sondage S1) se caractérise par un conducteur bien marqué en début de sondage, suivi d'un résistif, et enfin à nouveau d'un conducteur. Ce qui distingue ce sondage du suivant est la présence bien marquée du

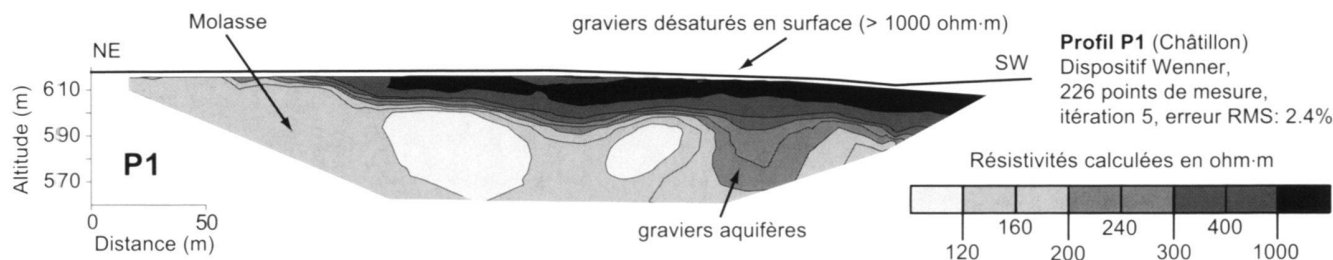


Fig. 7. Tomographie électrique inversée P1 et interprétation géologique.

conducteur en début de sondage. L'interprétation donne la succession lithologique suivante: sol / moraine würmienne / sédiment sablo-graveleux / Molasse.

Le type «plat-bosse-creux» (sondage S2) se définit par un résistant suivi d'un conducteur en surface, puis d'un résistant, et enfin d'un conducteur terminal. Le plat au début du sondage marque la présence des dépôts post-würmiens (graviers-sables) surmontant la moraine würmienne. La forte résistivité apparente en début de sondage est le fruit du sol forestier aéré. L'interprétation est la suivante: sol (forestier) / gravier et sables post-würmiens / moraine würmienne / sédiments sablo-graveleux / Molasse.

Le type «bosse-creux-bosse-creux» (sondage S3) reflète, incontestablement, la stratigraphie complète du Quaternaire de la région telle qu'elle a été décrite plus haut. Signalons toutefois que le «Complexe rissien» (Fig. 3 et Mornod 1947, p. 28), reposant toujours directement sur la Molasse, n'apparaît jamais sur ces sondages. Il est d'ailleurs souvent difficile de trancher entre «Complexe rissien» et Molasse altérée, le contraste de résistivité étant faible. De plus, son épaisseur souvent réduite (car fortement érodée) ainsi que sa position profonde ne contribuent pas à sa mise en évidence. Dans ce sondage nous avons les caractéristiques suivantes: un résistant en surface suivi d'un conducteur, puis à nouveau un résistant et enfin le conducteur qui nous ramène à la Molasse. L'interprétation est la suivante: sol / graviers post-würmiens / moraine würmienne / remplissage graveleux / Molasse.

Le type «bosse-creux-plat» (sondage S4) illustre le cas où l'on rencontre un seul corps résistant reposant directement sur la Molasse ou sur la moraine surmontant la Molasse sous-jacente. Ce type de sondage présente une couche résistante à faible profondeur (post-würmien ou interglaciaire) suivie d'un niveau conducteur (moraine ou Molasse directement) qui termine le sondage. L'interprétation est la suivante: sol / graviers post-würmiens / (moraine) / Molasse.

5.4 Tomographies électriques

Au terme de notre période d'acquisition, 20 profils ont été mesurés. Certains profils ont été effectués avec un dispositif Wenner, d'autres en Wenner-Schlumberger, ces termes désignant différents agencements d'électrodes.

5.4.1 Le résultat de la tomographie

Nous ne présentons ici que quelques profils caractéristiques des principales anomalies rencontrées.

Le profil P1 (Fig. 7), se situe dans la forêt comprise entre la Glâne actuelle, la Sarine actuelle et la gravière de Châtillon. Les résistivités du remplissage en surface sont relativement élevées de par la désaturation des graviers (>1000 Ω m). Le substratum molassique présente, quant à lui, des résistivités inférieures à 160 Ω m. Le toit de la Molasse du profil P1 se situe à la cote d'environ 600 m et présente un surcreusement jusqu'à une cote d'environ 570 m. Ce dernier, de résistivité inférieure à 300 Ω m, pourrait être le siège de circulation d'eau. On notera à ce sujet que les sources (coord. 575'800/180'720, Fig. 4) décrites par Dorthé (1962) et aboutissant dans la Sarine actuelle se situent à une altitude d'environ 580 m. Les forages effectués dans la région semblent de plus confirmer cette altitude. On peut donc voir ici la trace d'un éventuel aquifère connectant la Glâne et la Sarine actuelles.

Les profils P2 à P4 (Fig. 8) sont tous situés sur la colline de Monterban et sur ses versants. Le profil P2 présente une anomalie allongée dont la base se situe à environ 630 m et possède une résistivité d'environ 300 Ω m. Epais d'une quarantaine de mètres, ce niveau est chapeauté par de la moraine würmienne conductrice (entre 5 et 10 m). On notera la présence d'un éperon molassique dont l'extension est bien visible en traînant (Fig. 5). Le profil P4 présente à son extrémité E un corps conducteur correspondant à l'éperon molassique du profil P2. On remarque au bas de la pente les graviers tardiglaciaires du plateau des Muéses. Le profil P3 présente à son extrémité S un corps résistant à 400 Ω m et à environ 640 m d'altitude qui correspond bien aux graviers des profils P2 et P4. On distingue également deux autres corps résistants recouverts de moraine würmienne. Le corps résistant à l'extrême N du profil semble descendre bien en dessous de 580 m.

Les deux profils P5 et P6 (Fig. 8) font partie d'une même anomalie. Ils présentent un ensemble de chenaux recouverts de moraine würmienne (de 10 m à 15 m) et de gravier de retrait (0 à 10 m). La cote de la Molasse varie entre 580 m et 575 m voire beaucoup moins. La résistivité des chenaux varie de 300 Ω m à plus de 400 Ω m.

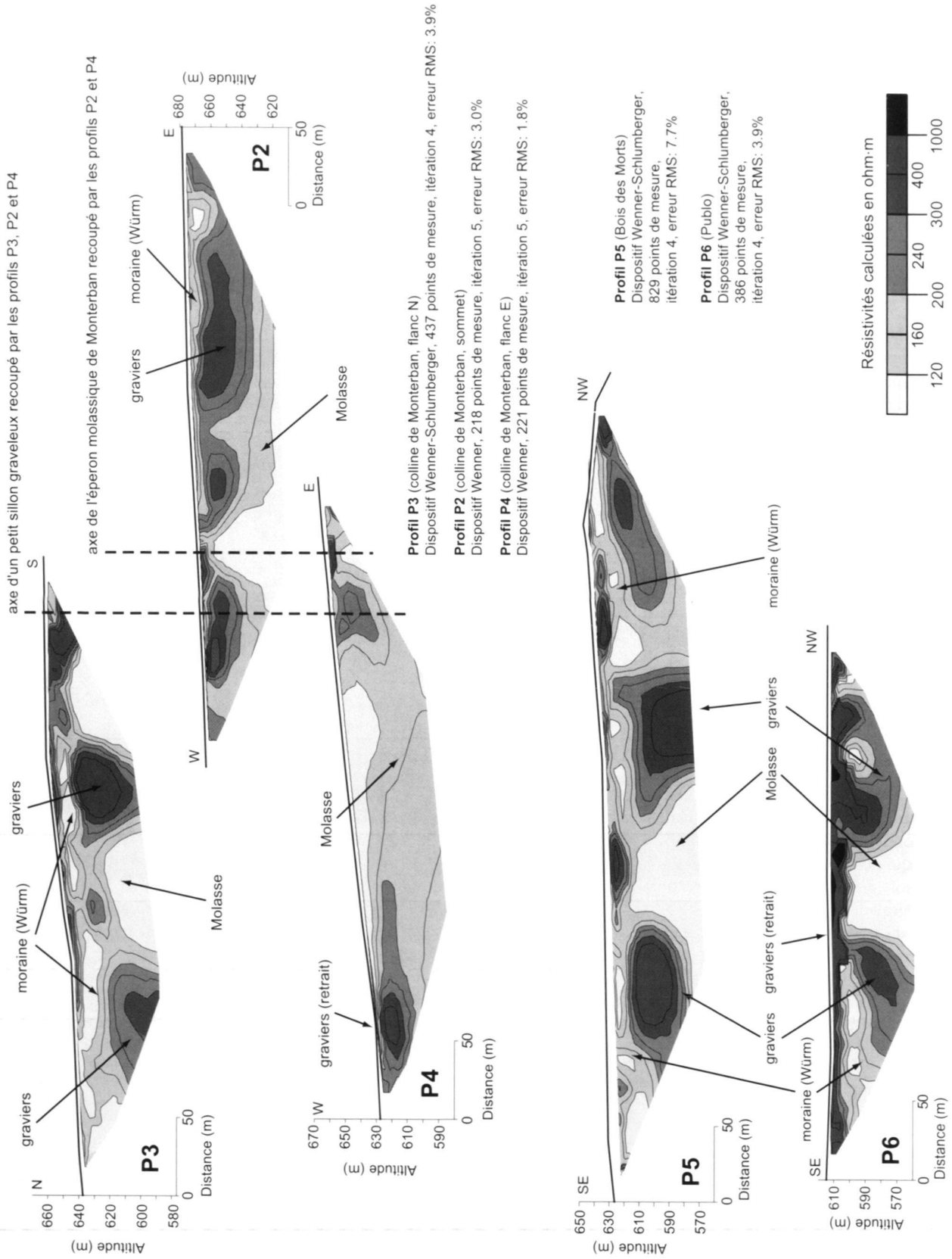


Fig. 8. Tomographies électriques inversées P2, P3, P4, P5 et P6 et interprétation géologique.

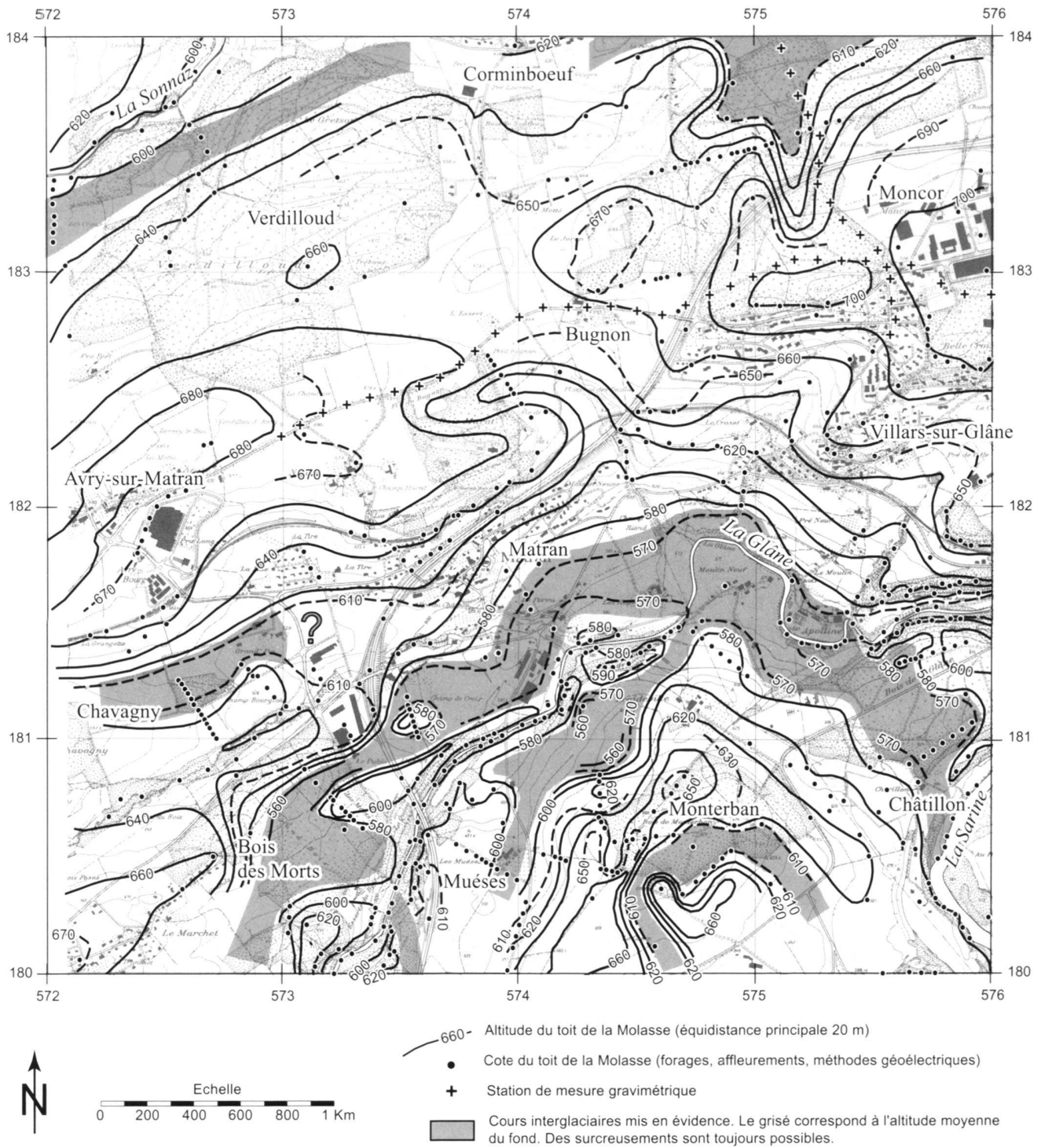


Fig. 9. Carte du toit de la Molasse et tracés des anciens cours d'eau de la Sarine et de la Glâne mis en évidence (fond topographique reproduit avec l'autorisation du Service Cantonal du Cadastre et de la Géomatique du Canton de Fribourg, autorisation SCCG 21120).

6. Interprétation

En combinant les données géophysiques, géologiques et géotechniques, plusieurs vallées entaillées dans le soubassement molassique peuvent être identifiées sur l'ensemble de la zone étudiée (Fig. 9). Afin de valider les résultats des méthodes géo-électriques, deux profils gravimétriques ont également été effectués dans la région du Bugnon et de Moncor. Nous pouvons remarquer la bonne corrélation entre les résultats obtenus (Fig. 9). A partir de ces données, nous pouvons proposer un modèle ou une interprétation en terme d'événements quaternaires et établir une carte du toit de la Molasse.

6.1 Au S du terrain

L'étude de la carte des résistivités apparentes, et les relations entre les anomalies et la topographie, nous a permis de rattacher les sillons s'étendant le long de la Glâne à la structure sarinienne parfaitement identifiée à Châtillon. En effet, tant altimétriquement que géométriquement cette interprétation se justifie. La géologie semble de plus étayer cette hypothèse par la présence d'une très vieille moraine à la base du ruisseau se jetant dans la Glâne actuelle en dessous du Bugnon (Dorthe 1962). Cette moraine très ancienne peut parfaitement constituer les restes de sédiments déposés sur les flancs d'un ancien sillon passant par Châtillon, la dépression de Matran et se dirigeant en direction du Publo. Toutefois, ceci ne signifie pas forcément qu'il s'agisse de la paléo-Sarine. Il pourrait très bien s'agir d'une paléo-Glâne qui confluaient avec l'ancienne Sarine dans la région de Châtillon. La position des sillons de la Glâne, parallèles à la rivière actuelle, suggère d'ailleurs une telle éventualité. Les profils P5 et P6 (Fig. 8) montrent des sillons parallèles dont l'origine peut être trouvée soit dans une divagation temporaire de l'un des cours, soit dans l'existence, synchrone ou pas, de cours bien distincts. La structure s'étendant sur le flanc NW de la colline de Monterban (altitude du fond <580 m), visible sur le profil P3 (Fig. 8), constitue soit un bras temporaire des sillons de la Glâne, soit la prolongation du petit sillon provenant des Muéses, soit les deux à des périodes distinctes. Une très bonne corrélation entre cette structure et les sources au N de la colline de Monterban peut être constatée. Le sillon des Muéses est très probablement un ancien cours de la Glâne qui doit se confondre plus au S avec la Glâne actuelle.

La structure semi-circulaire du flanc SE de la colline de Monterban est à rattacher à la grande structure sarinienne (sondage électrique S3, Fig. 6). Elle peut être interprétée comme une divagation ou comme l'un des bras temporaires de la paléo-Sarine faisant un méandre pour contourner l'obstacle que constituait Monterban. Son activité temporaire nous est suggérée par sa profondeur (altitude du fond env. 610 m) ce qui ne correspond évidemment pas aux altitudes obtenues le long de la Glâne actuelle.

Le sillon de Chavagny (altitude du fond env. 610 m) peut être interprété comme un ancien affluent du sillon de la Glâne ou un bras de cette dernière, dont la confluence se faisait dans

la région du Publo. Cet ancien cours suit la dépression qu'occupait un petit ruisseau, aujourd'hui disparu.

6.2 Au N du terrain

Les dépressions du soubassement mises en évidence au N du Bois de Verdilloud ainsi que dans le Bois de Moncor (sondage S1, Fig. 6) doivent être attribuées à la paléo-Sonnaz (altitude du fond env. 600 m). En effet, Sieber (1959) fait déjà mention de ce parcours d'W en E de l'ancienne Sonnaz. Confrontée au N à un éperon molassique, elle s'est vue contrainte d'emprunter un parcours plus aisé en direction de Corminboeuf, le Bois de Moncor pour ensuite continuer sa route en direction du NE. Le lien existant entre les anomalies du N du Bois de Verdilloud et celles du Bois de Moncor est suggéré par l'existence, relevée par Sieber (1959), d'un forage de 29 m n'ayant pas atteint la Molasse dans la région des Sauges vers Corminboeuf (coord. env. 574'300/183'800, alt. env. 635 m). Les anomalies résistantes apparaissant sur la carte de traîner au cœur du Verdilloud pourraient provenir de divagations temporaires de la Sonnaz.

La dépression décelée dans la région du Bugnon semble être une petite structure orientée globalement E-W. Elle ne représente pas la prolongation vers le N de la paléo-Sarine car nous n'avons pas réussi à mettre en évidence une quelconque connexion vers le N en direction du Bois de Verdilloud. Nous interprétons donc ce creusement dans la Molasse comme le témoin d'un cours d'eau issu d'une source située à l'W du Bugnon, aujourd'hui colmaté par des alluvions. La topographie en surface reflète d'ailleurs une telle structure.

7. Discussions et conclusions

7.1 Implications pour la géologie régionale

Schardt (1918) et Büchi (1926) étaient des partisans d'une prolongation plus ou moins rectiligne, vers le N, de la paléo-Sarine. Sieber (1959), qui effectua la cartographie de cette zone, infirmait cette hypothèse n'ayant observé aucun indice géologique d'une telle prolongation. Nos mesures corroborent l'affirmation de Sieber et résolvent ainsi l'énigme des anciens cours. En effet, il n'existe aucune connexion vers le N du sillon sarinien affleurant à Châtillon. L'hypothèse de Dorthe (1962), soit une prolongation par l'W de la paléo-Sarine par Matran, Rosé, Seedorf puis confluence avec la Sonnaz, semble plus en accord avec nos résultats. En effet, le sillon de la Glâne pourrait constituer la prolongation de cette paléo-Sarine dont la trace géologique est donnée par la gravière de Châtillon. Il pourrait toutefois également s'agir d'un cours de la paléo-Glâne.

Pour certaines structures, la corrélation régionale est relativement aisée à établir du fait de leurs géométries et de leurs positions par rapport aux autres structures bien identifiées. Pour le sillon de la Glâne, il faudrait par contre connaître avec précision le sens des pentes des fonds des paléo-vallées pour

établir l'appartenance à tel ou tel ancien cours d'eau. Les confluences cartographiques de deux vallées sont, elles aussi, des sources de doutes. A-t-on une confluence réelle (synchronisme) ou est-ce un artefact cartographique (asynchronisme, l'événement postérieur recoupe l'événement antérieur)? Cette interrogation ne peut être levée par nos moyens en l'absence de datations fiables de chaque remplissage.

7.2 Apports et limitations de la méthode

La complexité des formes dues aux agents érosifs (cours d'eau, glaciers, mouvements gravitaires, ...) rend l'interprétation de telles structures, à l'aide des seules méthodes géophysiques, extrêmement périlleuse sans le recours à d'autres sources d'information (géologie de surface, sondages géotechniques, hydrogéologie). Par contre, l'identification de ces vallées, leurs caractérisations ainsi que leurs relations géométriques avec les éléments structuraux avoisinants sont entièrement, voire même uniquement, du ressort de la géophysique, en l'absence de données géologiques. Le traîné donne une vision globale de la géologie (contrairement aux forages) ce qui permet de déceler une continuité dans les structures quaternaires. Le sondage électrique apporte de précieuses données sur la nature et l'épaisseur des remplissages mais peut être influencé par l'étréouissement des structures quaternaires. Il est en effet important de se rappeler que le terrain est en trois dimensions, ce qui peut ne pas correspondre aux hypothèses des méthodes d'interprétation dans le cas où les structures quaternaires sont étroites et tourmentées. La tomographie électrique, de part sa haute résolution, est particulièrement bien adaptée à l'étude des sillons étroits mais elle ne fournit pas de profondeurs très précises à cause des limites progressives des anomalies. Les principales limitations de ces méthodes sont inhérentes aux méthodes électriques (et à la géophysique en général). La diminution de la résolution avec la profondeur ainsi que l'équivalence électrique nous empêche d'imager correctement les formations de faibles épaisseurs («Complexe Rissien» par exemple) sises en profondeur. De plus, la limite entre les terrains compactés du Quaternaire et la Molasse altérée peut parfois être difficile à appréhender en l'absence d'un fort contraste de résistivité.

Remerciements:

Les auteurs tiennent à exprimer leur gratitude à M. Weidmann pour avoir partagé sa grande connaissance de la géologie régionale ainsi que pour la relecture attentive et les critiques constructives apportées au manuscrit. Les auteurs tiennent également à remercier pour leur disponibilité et leur aimable collaboration R. Plancherel et J.-P. Berger de l'Institut de Géologie de l'Université de Fribourg, F. Becker de l'Office Cantonal de Protection de l'Environnement du Canton de Fribourg ainsi que E. Blumer des Archives Géologiques Suisses (Berne). Les auteurs tiennent également à exprimer leur reconnaissance à toutes les personnes qui ont participé aux nombreuses campagnes de terrain et tout particulièrement à R. Olivier de l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne pour les mesures gravimétriques effectuées. Enfin, le manuscrit a bénéficié des relectures constructives de W. Wildi et J. Thierrin. Nous leur en sommes très reconnaissants.

BIBLIOGRAPHIE

- AEBERHART, B. 1907: Note préliminaire sur les terrasses d'alluvions de la Sarine occidentale. *Eclogae geol. Helv.* 10, 15–28.
- BÜCHI, O. 1926: Das Flussnetz der Saane und ihren Nebenflüsse während den Interglacialzeiten (ausgenommen die Sense). *Bull. Soc. frib. Sci. nat.* 28, 128–148.
- CHAPELLIER, D. 1980: De l'importance des cartes de résistivité. *Eclogae geol. Helv.* 74, 651–660.
- CRAUSAZ, C. U. 1959: Géologie de la région de Fribourg. *Bull. Soc. frib. Sci. nat.* 48, 1–117.
- DORTHE, J.-P. 1962: Géologie de la région au Sud-Ouest de Fribourg. *Eclogae geol. Helv.* 55, 327–406.
- FAVINI, G. C. 1966: La résistivité électrique des molasses. *Bull. Soc. vaud. Sci. nat.* 69, 253–260.
- GILLIERON, V. 1885: Description géologique des territoires de Vaud, Fribourg et Berne compris dans la feuille XII entre le lac de Neuchâtel et la crête du Niesen. *Mat. carte géol. de la Suisse* 18, 1–532.
- IGL, 1979: Etude géophysique d'anciennes vallées de la Sarine, région de la Tuffière (Corpataux). Rapport non publié de l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne.
- KOEFOD, O. 1979: *Geosounding Principles*. Elsevier, Amsterdam.
- LOKE, M. H. & BARKER, R. D. 1996: Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting* 44, 131–152.
- MARESCOT, L., LOKE, M. H., CHAPELLIER, D., DELALOYE, R., LAMBIEL, C. & REYNARD, E. (sous presse): Assessing reliability of 2D resistivity imaging in mountain permafrost studies using the Depth Of Investigation index method. *Near Surface Geophysics*.
- MORNOD, L. 1947: Sur les dépôts glaciaires de la vallée de la Sarine en Basse-Gruyère. *Eclogae geol. Helv.* 40, 15–35.
- PUGIN, A. 1989: Déglaciation dans la vallée préalpine de la Sarine en Gruyère: une analyse sédimentologique. *Eclogae geol. Helv.* 82, 285–324.
- PYTHON, C. 1996: Feuille 1185 Fribourg, avec notice explicative par Python, C., Berger, J.-P. & Plancherel, R. *Atlas géol. de la Suisse au 1:25'000*. Service hydrol.-géol. national, Berne.
- SCHARDT, H. 1918: Sur les cours interglaciaires et préglaciaires de la Sarine dans le canton de Fribourg. *Eclogae geol. Helv.* 15, 465–471.
- SCHÖPFER, P. 1989: Sédimentologie et stratigraphie de la Molasse marine supérieure entre le Gibloux et l'Aar. Thèse Fac. Sci. Univ. Fribourg, Impr. St Paul, Fribourg, 1–211.
- SIEBER, R. 1959: Géologie de la région occidentale de Fribourg. *Bull. Soc. frib. Sci. nat.* 48 (1958), 121–229.
- SIGNER, C. J. 1996: Géométrie sédimentaire des bassins glaciaires péri-alpins (Quaternaire, Suisse): étude par sismique réflexion haute résolution. *Publ. Dépt. Géol. et Paléont. Univ. Genève* 21, 1–236.
- SIGNER, C., GORIN, G.E., PUGIN, A. & WILDI, W. 2000: Investigation of a glacial outwash sequence on the Swiss Plateau using high resolution seismic reflection. *Quaternaire* 11, 207–217.
- THIERRIN, J. 1990: Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale). Thèse Fac. Sci. Univ. Neuchâtel, Centre d'hydrogéologie, 1–306.
- WEIDMANN, M. (sous presse): Feuille 1205 Rossens, avec notice explicative. *Atlas géol. de la Suisse au 1:25'000*. Service hydrol.-géol. national, Berne.

Manuscrit reçu le 19 février, 2002

Révision acceptée le 28 février 2003

