



DOCUMENT PUBLIC

*Caractérisation géométrique et hydrodynamique du
casse de Bonifacio (Corse) à partir d'une synthèse
des connaissances géologiques et hydrogéologiques
et par méthodes géophysiques*

Étude réalisée dans le cadre du projet CPER - U3M, thème du pôle B1 « Eaux souterraines »
du programme « Biodiversité » et du module du projet de recherche 2002-EAU-R01
« Structure et fonctionnement des systèmes karstiques »

septembre 2002
BRGM/RP-51860-FR





DOCUMENT PUBLIC

*Caractérisation géométrique et hydrodynamique du
casse de Bonifacio (Corse) à partir d'une synthèse
des connaissances géologiques et hydrogéologiques
et par méthodes géophysiques*

Étude réalisée dans le cadre du projet CPER - U3M, thème du pôle B1 « Eaux souterraines »
du programme « Biodiversité » et du module du projet de recherche 2002-EAU-R01
« Structure et fonctionnement des systèmes karstiques »

N. Dörfliger, J. Ferrandini, M. Ferrandini, F. Mathieu

septembre 2002
BRGM/RP-51860-FR



Mots clés : Corse, Bonifacio, Géologie, Miocène, Structure du réservoir, Hydrogéologie, Karst, Géophysique, Sondages électriques, Sondages RMP, Ressources en eau.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Dörfliger N., Ferrandini J., Ferrandini M, Mathieu F. (2002) - Caractérisation géométrique et hydrodynamique du causse de Bonifacio (Corse) à partir d'une synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques et par méthodes géophysiques. BRGM/RP-51860-FR, 134 p., 24 fig., 7 tabl., 4 photos, 6 ann..

© BRGM, 2002, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre du CPER-U3M, et plus spécifiquement dans celui des thèmes du pôle B1 « Eaux souterraines » du programme « Biodiversité » et du module « Structure et fonctionnement des systèmes karstiques » du projet de recherche 2002-EAU-R01, une synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques ainsi qu'une reconnaissance géophysique, à finalité hydrogéologique, a été réalisée sur le causse de Bonifacio (Corse-du-Sud) par le laboratoire des Sciences de la Terre de l'université de Corse, l'unité EAU/RMD ainsi que l'unité ARN/MRS du BRGM.

L'objectif et l'intérêt de ce projet de recherche appliquée est de caractériser la géométrie et l'hydrodynamisme du bassin sédimentaire d'âge miocène, formant le causse de Bonifacio. La finalité de cette étude est d'apprécier les potentialités en eau souterraine de ce bassin sédimentaire pour une exploitation future visant à couvrir, en partie, les besoins AEP de l'extrême Sud de la Corse.

Cette caractérisation a été effectuée à partir d'une synthèse des connaissances géologiques concernant le bassin sédimentaire (corrélations litho-stratigraphiques, géométrie supposée), des connaissances hydrogéologiques (formations aquifères, propriétés hydrodynamiques, exutoires, bilan hydrologique et inventaire des forages existants) ainsi qu'une reconnaissance géophysique (sondages électriques et sondages RMP).

• Synthèse des connaissances géologiques

Le causse de Bonifacio se rattache au vaste bassin miocène qui se développe au niveau des Bouches de Bonifacio, à l'est comme à l'ouest. La série sédimentaire marine comble une paléotopographie accusée au niveau des granites du batholite hercynien. On distingue deux formations, la formation de Cala di Labra à la base d'âge burdigalien supérieur, surmontée par la formation de Bonifacio, d'âge burdigalien terminal à langhien inférieur. Le causse de Bonifacio admet un léger pendage d'ensemble vers le SE, comme le montre le drainage des eaux souterraines actuel. L'épaisseur de la série sédimentaire est fonction de la paléomorphologie du substratum acquise avant la transgression du Miocène inférieur ; elle évolue de quelques mètres à 250 m environ. L'épaisseur maximale de cette série sédimentaire est supposée ; elle n'a pas été vérifiée par sondages électriques ou par forages, la profondeur des quelques 45 ouvrages recensés variant en moyenne de 5 à 145 m. L'ensemble des données géologiques permet néanmoins de supposer que la géométrie du bassin de Bonifacio est asymétrique avec une limite NW abrupte.

• Synthèse des connaissances hydrogéologiques

Du point de vue hydrogéologique, la lithologie suggère la présence de deux aquifères séparés l'un de l'autre par un niveau imperméable ou semi-perméable, d'épaisseur

décamétrique au maximum qui correspond à l'unité U4 de la formation de Cala di Labra. L'aquifère inférieur est constitué d'une succession d'arènes et de sables encadrés par des récifs. La présence de chenaux dans le substratum granitique pourrait constituer des zones à bonne transmissivité. Des transferts d'eau du socle granitique vers l'aquifère inférieur sont probables. L'aquifère supérieur est constitué par un ensemble de grès et de biocalcarénites comprenant le sommet de la formation de Cala di Labra (récif) et la totalité de la formation de Bonifacio. Le causse de Bonifacio présente peu d'exutoires terrestres ; des exutoires sous-marins sont supposés mais non inventoriés. Les propriétés hydrodynamiques ne peuvent être décrites faute d'essais de pompage en nombre suffisant à l'échelle du causse. Le résultat du bilan hydrologique sommaire effectué à partir des données climatologiques indique un débit d'écoulement total de 100 l/s. Le débit moyen des exutoires les plus importants situés dans le domaine marin est de l'ordre de 50 à 75 m³/h.

• Investigations de la géométrie du bassin par méthodes géophysiques

32 sondages électriques grande ligne (1 000 < AB < 2 000 m) ont été effectués sur l'ensemble du causse pour appréhender la géométrie du bassin sédimentaire et la morphologie de son substratum granitique.

13 sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) ont été réalisés pour essayer d'apprécier certains paramètres hydrodynamiques des différents aquifères.

Les résultats de cette reconnaissance géophysique sont les suivants :

- la morphologie du substratum granitique est révélée par la réalisation d'une carte en courbes isobathes. La présence de trois paléovallées, orientées NNE-SSW, dont une majeure, entaillant le toit du granite, ont été mises en évidence ;
- le remplissage sédimentaire du bassin est matérialisé par des cartes en courbes isopaques. Il est constitué de deux unités géoélectriques présentant un contraste de résistivité important (> 10). L'unité résistante correspond à la formation de Bonifacio à laquelle est intégré le sommet de la formation de la Cala di Labra. L'unité conductrice est représentée par la partie inférieure de la formation de Cala di Labra. Le niveau marneux séparant ces deux unités et conditionnant la présence de deux réservoirs n'a pu être caractérisé par sondages électriques (épaisseur trop faible compte tenu de sa profondeur) ;
- dans l'axe de la principale paléovallée, le remplissage sédimentaire atteint une épaisseur de 265 m (158 m pour l'unité résistante et 107 m pour l'unité conductrice) ;
- trois horizons aquifères ont été mis en évidence. L'aquifère principal, situé dans la tranche 0-40 m (formation de Bonifacio) possède les caractéristiques hydrodynamiques moyennes suivantes : teneur en eau = 7 % et perméabilité = 3×10^{-5} m/s. Les deux autres aquifères (base de la formation de Bonifacio et formation de Cala di Labra) ont des caractéristiques hydrodynamiques plus défavorables : teneur en eau = 2 % et perméabilité = 3×10^{-7} m/s.

• Perspectives

Au terme de cette étude, il apparaît qu'un certain nombre de travaux complémentaires s'avèrent nécessaires pour caractériser plus précisément ce bassin sédimentaire tant du point de vue de sa géométrie que du point de vue de ses caractéristiques hydrodynamiques afin d'évaluer les potentialités en terme de ressource d'eau souterraine de cet hydrosystème que constitue le causse de Bonifacio :

- Une reconnaissance par forage profond atteignant le socle. Cet ouvrage permettrait d'une part d'étalonner les sondages électriques et d'autre part de procéder à une étude géologique et pétrophysique détaillée des carottes ou cuttings (comparaison des observations d'affleurement des formations et au niveau de forages) ainsi qu'à des essais de pompages pour caractériser les propriétés hydrodynamiques des aquifères. Deux propositions de sondage de reconnaissance sont données au vu des résultats des sondages électriques. La première se situe dans l'axe de la paléovallée PV1 au niveau du SE 29 et la deuxième dans l'axe de PV2 sur le sondage électrique SE 02.
- Une caractérisation hydrochimique et isotopique des eaux (prélèvements au niveau de points de surface, de forages AEP et particuliers) permettrait d'identifier une alimentation du causse par les eaux du socle.
- Campagne piézométrique à partir des forages individuels pour déterminer si possible des axes de drainage souterrains et des zones de gradient hydraulique.
- L'implantation de piézomètres à proximité du ou des forages implantés afin de suivre les évolutions piézométriques des deux aquifères (mise en évidence de la drainance).
- L'identification de l'importance des exutoires sous-marins à partir d'interprétation de photos aériennes infrarouges et des profils de salinité.
- Une densification des sondages électriques apporterait un complément d'information dans certaines zones importantes comme :
 - . la partie amont de la paléo-vallée PV1 entre SE 05 et SE 13 et au-delà de SE 13 ;
 - . la zone de connexion entre PV1 et PV2, c'est-à-dire entre SE 25, SE 21 et SE 23 ;
 - . sur la bordure NW du causse pour confirmer la présence de la paléovallée PV3.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. Cadre du projet.....	11
1.2. Démarche méthodologique.....	12
1.3. Contexte géographique et géomorphologique.....	13
2. Synthèse géologique	15
2.1. Les formations géologiques.....	15
2.2. Style tectonique et géométrie du causse.....	17
3. Synthèse hydrogéologique	23
3.1. Contexte hydrogéologique général.....	23
3.2. Phénomènes hydrogéologiques.....	25
3.3. Inventaires des forages d'eau.....	27
3.4. Bilan hydrologique.....	28
4. Investigations géophysiques	31
4.1. Méthodes et moyens.....	31
4.1.1. Sondages électriques (SE).....	31
4.1.2. La Résonance Magnétique Protonique (RMP).....	33
4.2. Travaux réalisés.....	43
4.2.1. Acquisition des mesures et compilation.....	43
4.3. Résultats de la campagne géophysique.....	48

4.3.1. Sondages électriques (SE)	48
4.3.2. Sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP)	59
5. Conclusions et perspectives	67
Références bibliographiques	69

Liste des figures

Fig. 1 - Localisation du causse de Bonifacio (Corse), extrait de la carte IGN Bonifacio Santa Teresa à 1/50 000.	14
Fig. 2 - Carte géologique du causse de Bonifacio, extrait de la minute de la carte géologique Sotta - Bonifacio à 1/50 000.....	16
Fig. 3 - Log synthétique de la série miocène de Bonifacio. U1 à U5 correspondent aux unités lithologiques. R1, R2 et R3 indiquent la position des constructions récifales.	18
Fig. 4 - Carte géomorphologique et structurale du causse de Bonifacio. Contour en vert, limite des affleurements du Miocène ; traits noirs simples, linéaments ; traits noirs doubles, filons ; traits rouges, tracé supposé des failles de socle.....	19
Fig. 5 - Coupe semi-interprétative du bassin de Bonifacio montrant l'importance de la paléotopographie pour expliquer la variation des épaisseurs des dépôts du Miocène.	20
Fig. 6 - Carte de localisation des sources et des forages.....	21
Fig. 7 - Modèle conceptuel du système hydrogéologique de Bonifacio	23
Fig. 8 - Principe du sondage électrique.....	32
Fig. 9 - Principe de mesure RMP.	34
Fig. 10 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.....	35
Fig. 11 - Équipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS » sur site.....	35
Fig. 12 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.....	36
Fig. 13 - Résultats d'inversion des données théoriques.	38

Fig. 14 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie.	40
Fig. 15 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP	42
Fig. 16 - Localisation des sondages géoélectriques et des sondages RMP.	46
Fig. 17 - Détermination de la résistivité vraie des granites. Sondage électrique SE 24.	50
Fig. 18 - Détermination de la résistivité vraie de la base de la formation de Cala di Labra. Sondage électrique SE 11.	51
Fig. 19 - Altitudes du toit du substratum granitique.	54
Fig. 20 - Carte des isocontours du substratum granitique	55
Fig. 21 - Épaisseur de la formation sédimentaire conductrice. Base de la Fm de Cala di Labra.	56
Fig. 22 - Relation entre la profondeur du toit du granite et l'épaisseur de la formation conductrice.	58
Fig. 23 - Altitudes de la base de la formation sédimentaire résistante. Fm de Bonifacio + partie supérieure de la Fm de Cala di Labra.	60
Fig. 24 - Épaisseurs de la formation sédimentaire résistante. Fm de Bonifacio + partie supérieure de la Fm de Cala di Labra.	61
Fig. 25 - Coupes géoélectriques	62

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Présentation de la démarche méthodologique retenue pour la caractérisation et la détermination de la géométrie du causse de Bonifacio.	12
Tabl. 2 - Liste des sources principales du causse de Bonifacio.	26
Tabl. 3 - Données statistiques de la pluviométrie des stations Météo France de Bonifacio, Figari et de Porto Vecchio.	29
Tabl. 4 - Principales caractéristiques des sondages électriques.	43
Tabl. 5 - Principales caractéristiques des sondages RMP.	47
Tabl. 6 - Synthèse des résultats des sondages électriques.	52
Tabl. 7 - Synthèse des résultats des sondages RMP.	63

Liste des photos

Photo 1 - Phare de la Madonetta, marquant l'entrée du port de Bonifacio, et position de la grotte de Sdragonato (flèche).....	24
Photo 2 - Grotte située au niveau du Capo Pertusato.....	24
Photo 3 - Panorama du flanc ouest et position de la source (flèche).	26
Photo 4 - Source Cala di Labra, située à un mètre au-dessus du niveau de la mer.....	27

Liste des annexes

Ann. 1 - Inventaire des forages implantés par M. Clementz de Porto Vecchio.....	71
Ann. 2 - Inventaire des forages de la BSS	75
Ann. 3 - Organisation pratique de la campagne géophysique	79
Ann. 4 - Sondages électriques. Modélisation 1D.....	83
Ann. 5 - Tableaux récapitulatifs de l'interprétation des sondages électriques	117
Ann. 6 - Données et résultats d'interprétation des sondages RMP avec un modèle à nombre de couches égal au nombre de pulses	123

1. Introduction

1.1. CADRE DU PROJET

Dans le cadre du CPER - U3M, et plus spécifiquement dans le cadre des thèmes du pôle B1 « Eaux souterraines » du programme « Biodiversité » des projets de recherche inscrits au CPER pour la période 2000 - 2006, des travaux de recherche à vocation hydrogéologique sont menés en partenariat entre le laboratoire des Sciences de la Terre de l'université de Corse et le BRGM (Service géologique régional Corse avec l'appui des ingénieurs des services EAU et ARN du BRGM).

Ce projet de recherche concerne l'évaluation des ressources en eau du causse de Bonifacio ainsi que la définition de sa géométrie.

L'objectif et l'intérêt de ce projet de recherche appliquée sont de caractériser le causse de Bonifacio en terme de réservoir d'eau souterraine et d'apprécier ses potentialités pour une exploitation future pour couvrir une partie des besoins en AEP de l'extrême Sud de la Corse ou comme ressource de substitution.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de déterminer dans un premier temps la géométrie de ce réservoir.

Ce projet comprend six phases principales, avec :

- (1) État de synthèse des connaissances géologiques (lithostratigraphie, carte géologique, et structurale, modalités de mise en place des formations géologiques (rôle des processus tectoniques et eustatiques), géométrie du substratum cristallin).
- (2) État de synthèse des connaissances hydrogéologiques (exploitation des données en BSS, inventaire d'autres forages particuliers non recensés).
- (3) Caractérisation de la géométrie du causse et de son substratum à l'aide de méthodes géophysiques : sondages électriques pour déterminer la géométrie du substratum et des sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) pour déterminer la limite entre la zone non saturée et la zone saturée et apprécier certains paramètres hydrodynamiques de l'aquifère si possible.
- (4) Réalisation d'un ou deux forages carottés pour calibrer les résultats de la géophysique et pour effectuer une analyse pétrophysique (porosité), sédimentologique, paléomagnétique, ainsi que pour dater les formations rencontrées.
- (5) Réalisation d'essais de pompages pour déterminer les paramètres hydrodynamiques des aquifères.
- (6) Campagne hydrochimique, voire isotopique, de caractérisation globale des eaux souterraines pour déterminer l'origine des eaux et mettre en évidence d'éventuels apports du socle fissuré vers l'aquifère grésocarbonaté.

Les trois premières phases de ce projet, synthèse géologique et hydrogéologique et reconnaissance géophysique (sondages électriques et sondages RMP) font l'objet de ce rapport.

1.2. DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

La démarche méthodologique retenue pour caractériser la ressource en eau souterraine du causse de Bonifacio est calquée sur celle généralement mise en oeuvre pour l'étude des aquifères karstiques (tabl. 1). L'accent est principalement mis sur la détermination de la géométrie de l'aquifère, puis sur une première identification de la ressource basée sur les résultats d'essais de pompages. Les méthodes géophysiques (sondages électriques et RMP) permettent de caractériser la géométrie du réservoir et d'identifier la limite entre zone non saturée et zone saturée. La caractérisation hydrochimique et isotopique de l'aquifère permettra d'approcher la compréhension de son fonctionnement. La finalité de cette démarche est une évaluation de la ressource en eau souterraine dont le terme ultime pourrait être une modélisation. Cette dernière fera l'objet d'une étude ultérieure.

Cette démarche peut être résumée dans le tableau 1.

Étapes	Méthodes mises en oeuvre	Données nécessaires	Résultats fournis
Géométrie	Géologie	Bibliographie	Géométrie de l'aquifère
	Analyse litho-stratigraphique	Relevés de terrain	
	Analyse structurale	Photo interprétation	
	Géophysique (électricité)	Acquisition de terrain	
Identification	Inventaire des points d'eau	Données de la BSS et enquête sur le terrain	Niveau piézométrique, logs de forage
	Géophysique (RMP)	Acquisition de terrain	Limites ZS et ZNS ; porosité du réservoir
	Forages	Analyse des carottes	Pétrophysique, sédimentologie, datations, analyses .
	Forages	Essai de pompage	Paramètres hydrodynamiques, fonctionnement de la ZNS ; validation et interprétation de la géophysique
Caractérisation	Hydrochimie	Analyses chimiques	Transferts de masse
	Géochimie isotopique	Analyses isotopiques	Temps de séjour des eaux
Évaluation	Modélisation	Suivi de l'exploitation Suivi des rabattements Pluviométrie - recharge	Mode d'exploitation

Tabl. 1 - Présentation de la démarche méthodologique retenue pour la caractérisation et la détermination de la géométrie du causse de Bonifacio.

Dans le cadre de ce projet, la synthèse géologique a été effectuée à partir de relevés de terrain, de références bibliographiques et de la finalisation de l'établissement de la carte géologique du secteur (la numérisation de la minute géologique du secteur a été effectuée dans le cadre de ce projet de recherche). La synthèse hydrogéologique a été effectuée d'une part à partir de documents bibliographiques relatifs à des études de recherche en eau antérieures sur le causse, à partir de la consultation de la Banque de données du Sous-Sol (BSS), des visites de terrain et consultation d'entreprises de forages. Les objectifs du volet géophysique de ce projet sont :

- caractérisation de la géométrie du causse de Bonifacio et de la morphologie de son substratum granitique. Pour répondre à cet objectif, une reconnaissance par sondages électriques grande ligne ($1000 < AB < 2000$ m) a été effectuée sur l'ensemble du causse ;
- caractérisation hydrodynamique des formations sédimentaires constituant le causse de Bonifacio.

Pour ce faire, des sondages de Résonance Magnétique Protonique ont été mis en œuvre pour essayer de déterminer la limite entre la zone non saturée et la zone saturée ainsi que pour apprécier certains paramètres hydrodynamiques des différents aquifères. Compte tenu de l'appareillage utilisé et du contexte électromagnétique de la zone d'étude, la profondeur d'investigation ne pourra pas être supérieure à une centaine de mètres.

1.3. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

Le causse de Bonifacio est situé à l'extrémité méridionale de la Corse entre la plage de Balistra au nord-est et Cala di Paraguanu au sud-ouest. Il couvre une superficie de 25 km² (fig. 1). Il est constitué par des bio-calcarénites subhorizontales du Miocène inférieur à moyen reposant sur le substratum granitique hercynien. Du point de vue morphologique, le causse de Bonifacio, de part sa définition, forme une structure tabulaire de 80 m NGF d'altitude moyenne. Actuellement deux cours d'eau de très faible débit interannuel traversent le causse de l'ouest vers l'est. Il s'agit du ruisseau de Canettu et de Canali (fig. 1). Au nord-ouest du causse, le ruisseau de Parmentile, à écoulement temporaire, circule à la limite entre le socle et la couverture miocène. Il se dirige vers le nord-est pour se jeter dans le ruisseau de Franculu.

L'observation de la carte topographique montre que le causse de Bonifacio est traversé par au moins deux systèmes hydrographiques fossiles :

- Le premier, et probablement le plus ancien, correspond à une paléovallée empruntée par la nationale 198. Ce drain est souligné par la présence d'un paléoméandre en amont du site préhistorique de l'Araguina.
- Le second correspond à toute une série de vallées sèches d'orientation N90 à 110° E, qui traversent le causse. Ces vallées sèches témoignent de l'enfoncement de circulations de surfaces. Localement ces vallées forment de petits poljés, comme par exemple à Funtanaccia (fig. 1). En bord de mer, ce réseau se trouve en position perchée, comme le montre la vallée située immédiatement au sud du sémaphore de Pertusato. Ce paléoréseau constitue un indice du fonctionnement karstique du causse. L'organisation de ce réseau n'est pas liée à des fractures de même orientation mais à une adaptation à la morphologie de substratum granitique sous-jacent.

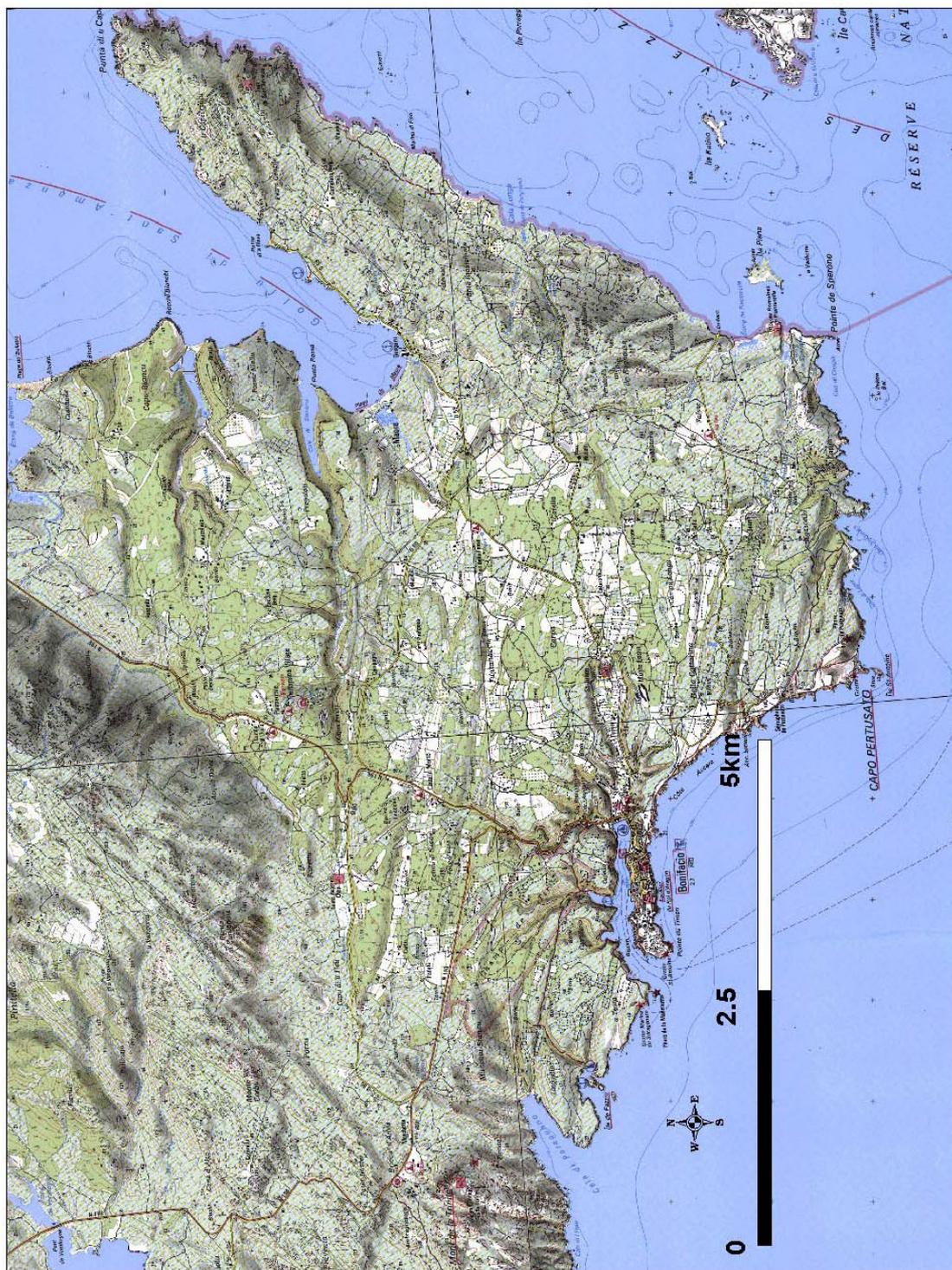


Fig. 1 - Localisation du cause de Bonifacio (Corse), extrait de la carte IGN Bonifacio Santa Teresa à 1/50 000.

2. Synthèse géologique

Les travaux géologiques concernant le Miocène du cause de Bonifacio sont relativement peu nombreux (Orzag-Sperber F. et Pilot M.-D., 1976, Monleau C. *et al.*, 1996). Le regain d'intérêts pour ce secteur est lié d'une part au développement des études du Miocène en mer et d'autre part aux recherches appliquées comme l'hydrogéologie des aquifères carbonatés.

Le cause de Bonifacio se rattache au vaste bassin miocène qui se développe largement en mer, dans les Bouches de Bonifacio, à l'est comme à l'ouest. Les série miocènes reposent essentiellement sur les granites du batholite hercynien (fig. 2) L'épaisseur des dépôts miocènes est fonction de la paléomorphologie du substratum. Elle évolue de quelques mètres à 250 m environ. Cette paléomorphologie du substratum a été acquise avant la transgression du Miocène inférieur. En effet des études par traces de fission sur apatites (Jakni *et al.*, 2000) montrent que cette région du Sud de la Corse est soumise aux phénomènes de la géodynamique externe depuis au moins l'Éocène.

2.1. LES FORMATIONS GEOLOGIQUES

Localement, on observe quelques affleurements de tufs ignimbrétiques (Balistra, Maora) (Bellon H., 1976, Ottaviani-Spella M.-M., 2001), de surface très réduite, reposant sur le substratum granitique ou sur une série continentale rubéfiée. Il s'agit de témoins, préservés de l'érosion, de coulées pyroclastiques. Ces roches sont maintenant datées de l'Aquitaniens supérieur à terminal (21 Ma) (Gattacceca J., 2001).

La série sédimentaire marine comble une paléotopographie accusée qui conditionne la répartition des différents faciès. Deux formations sont distinguées (fig. 3) : la formation de Cala di Labra à la base, surmontée par la formation de Bonifacio (Ferrandini M. *et al.* 2002).

a) La formation de Cala di Labra

Elle est visible le long de la côte et à la périphérie du bassin. Elle se caractérise par la présence de 3 épisodes récifaux en onlap côtier (R1, R2, R3) (Galloni *et al.* 2001). La base de la série repose sur le granite par l'intermédiaire d'une surface d'érosion. Localement, la série débute par une bioconstruction de scléactiniaires (R1 de l'unité 1), de quelques mètres d'épaisseur. Ce récif est recouvert par 20 m de sables grossiers felsdpathiques et micassés (unité 2). Viennent ensuite 4 à 5 m de grès carbonatés fossilifères (unité 3). La série se poursuit par 3,5 m de silts grésos-carbonatés argileux riches en microfaune planctonique (unité 4). Des calcaires grésos-silteux bioclastiques de 5 m d'épaisseur (unité 5) terminent la formation de Cala di Labra. A l'échelle du bassin de Bonifacio, on observe des passages latéraux de faciès : le stade récifal R2 est corrélé avec la base de U4 et R3 avec la partie supérieure de U5. Nous attribuons la base de la série sédimentaire (U1) au Burdigalien moyen, avec un âge numérique compris entre 19 et 18,5 Ma, ce qui permet de chiffrer entre 1,5 et 2 Ma la période d'érosion des coulées volcaniques. Le récif R3 (U5) peut être daté du Burdigalien supérieur avec un âge numérique compris entre 17,5 et 16,5 Ma (Ferrandini J. *et al.* soumis).

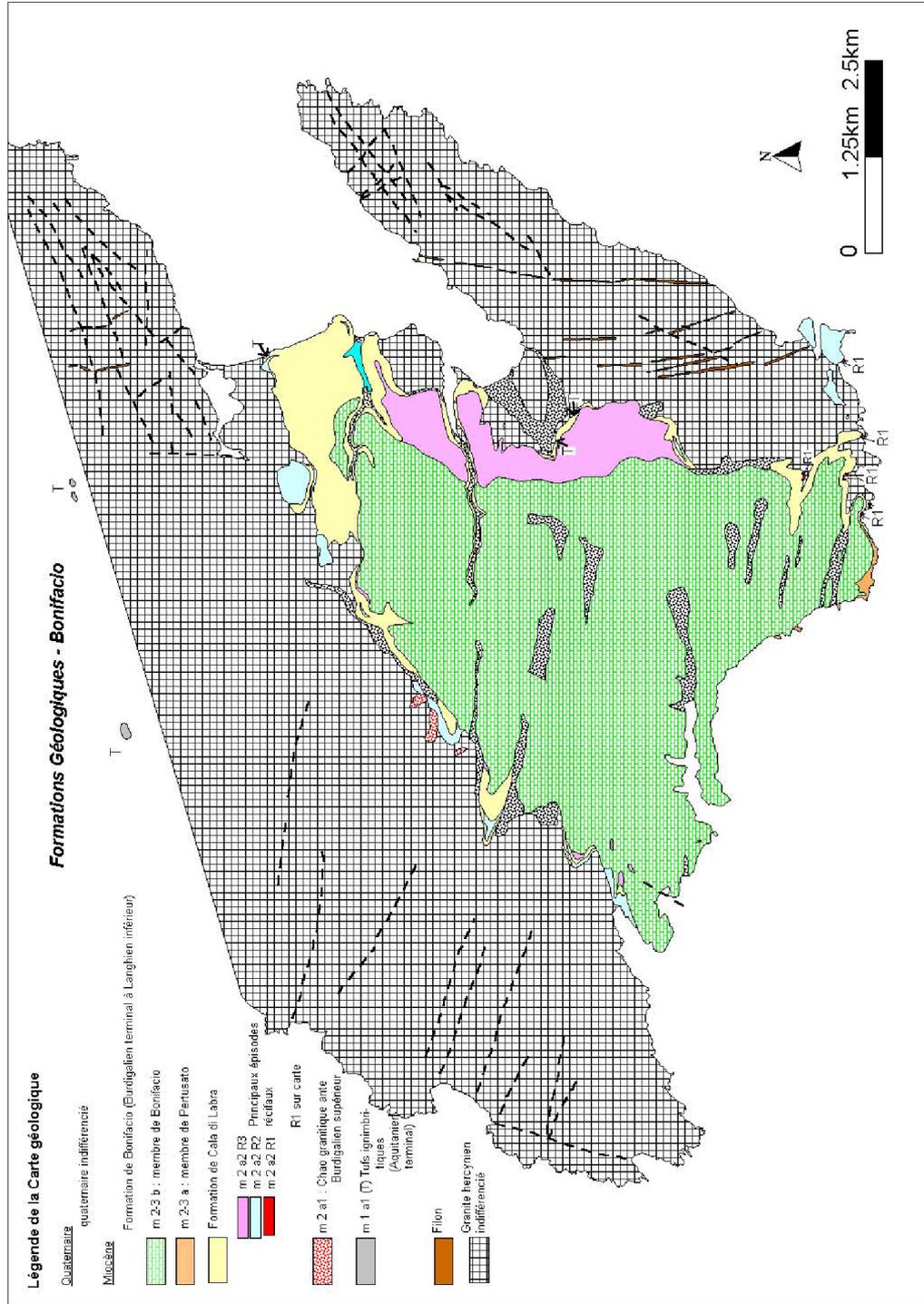


Fig. 2 - Carte géologique du cause de Bonifacio, extrait de la minute de la carte géologique Sotta - Bonifacio à 1/50 000.

b) La formation de Bonifacio

Elle correspond aux calcarénites blanches qui forment les falaises éponymes. Cette formation peut être divisée en deux membres principaux : membre de Pertusato et membre de Bonifacio. Le membre de Pertusato, constitué de calcarénites grossières, est localisé, dans la partie méridionale, entre Cala di Labra et les Anciennes Batteries (fig. 3). Il correspond à un corps sédimentaire complexe qui se biseaute vers l'est et vers le nord. On observe des surfaces de ravinement, générées en milieu aquatique par des glissements en masse de sédiments. Le membre de Bonifacio est formé par un empilement de dunes hydrauliques en mode érosion-dépôt progradantes.

Le sens dominant de courant est dirigée vers le sud-ouest. Ce membre est constitué par des grès et des calcarénites. On note un enrichissement en carbonate vers le sommet de la série. Le dépôt de la formation de Bonifacio s'est effectué pendant le Burdigalien terminal et/ou le Langhien inférieur (15 Ma).

2.2. STYLE TECTONIQUE ET GEOMETRIE DU CAUSSE

Le batholite du Sud Corse est affecté par des accidents tardi-hercyniens orientés NE-SW (fig. 4). Sur le terrain, ils sont soulignés par une cataclase du granite et des faciès différents de part et d'autre de l'accident. Ils ont guidés l'acquisition du modelé d'érosion caractéristique de cette région, avec en particulier le creusement de dépressions limitées par des épaulements de failles (fig. 5).

Ce dispositif conditionne, en particulier, la bordure nord-ouest du causse. Les processus d'érosion ont préservé des reliefs qui sont restés émergés ou tardivement ennoyés au Miocène comme le montre le secteur nord du Golfu di Sant'Amanza. Le causse de Bonifacio n'est pas affecté par le jeu de ces accidents hérités. Les failles rencontrées présentent des rejets très faibles et certaines sont clairement liées à des phénomènes de tassement.

De manière générale, le causse de Bonifacio admet un léger pendage d'ensemble vers le SE comme le montre le drainage actuel. Dans le détail, le Miocène présente des ondulations à grand rayon de courbure, d'axe probable NNE-SSW, visible en observant la côte depuis la mer. On distingue un antiforme entre le cap Pertusato et la pointe de Spérone, puis un synforme entre le cap Pertusato et la calanque de Paraguanu. L'axe de ce synforme passe par la sortie du port de Bonifacio (fig. 4).

La seule étude de géophysique pour rechercher le toit du substratum granitique a été réalisée par la CGC en 1972. Il a été identifié à une profondeur supérieure à 120 m, à partir de l'interprétation de 20 sondages électriques effectués au niveau de la vallée du Canali en direction de Cala di Stentinu (fig. 6). Ces résultats impliquent la présence d'une série miocène de 200 m d'épaisseur environ. De plus, une légère ondulation du substratum conducteur peut être observée sur les coupes interprétatives de cette étude.

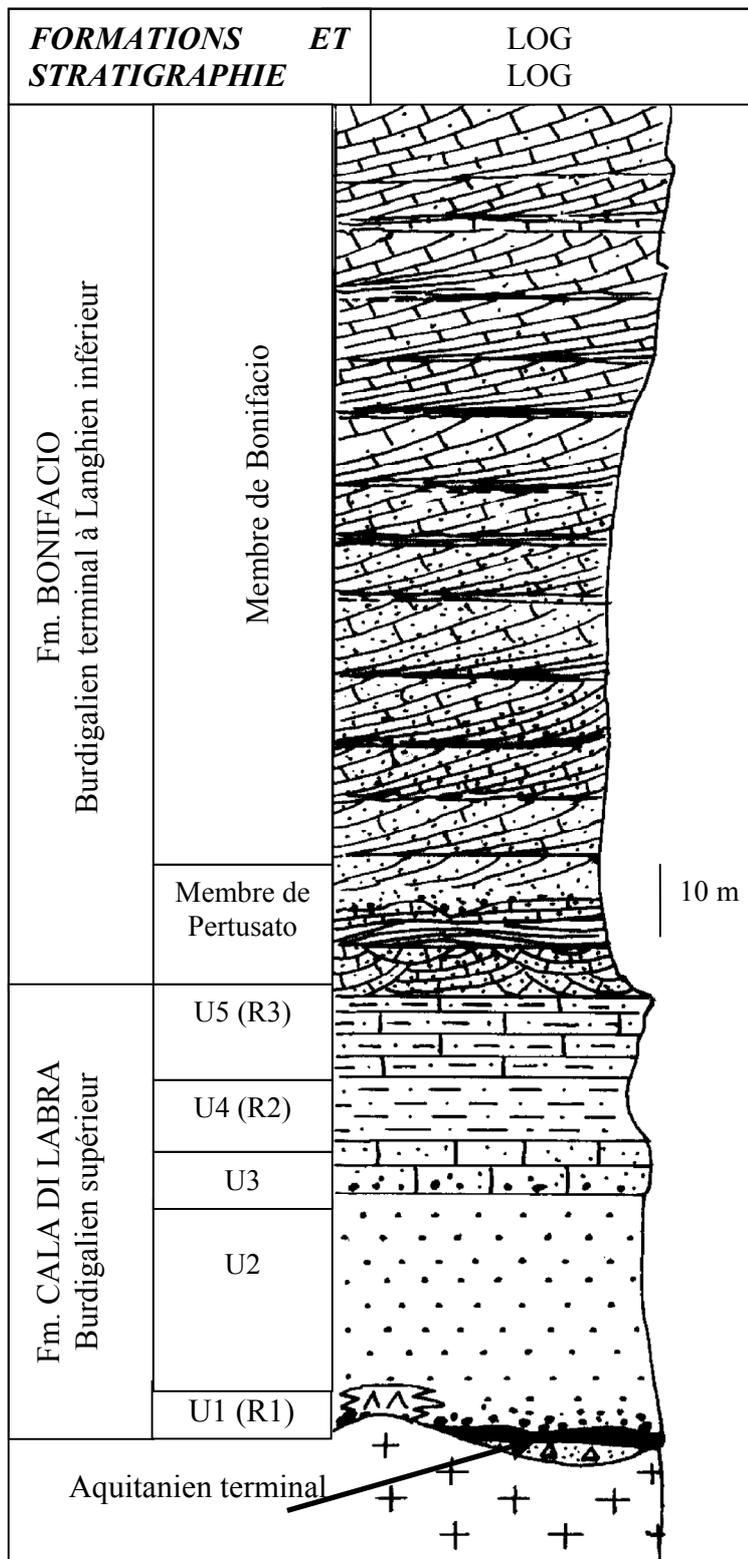


Fig. 3 - Log synthétique de la série miocène de Bonifacio.
 U1 à U5 correspondent aux unités lithologiques. R1, R2 et R3 indiquent la position des constructions récifales.

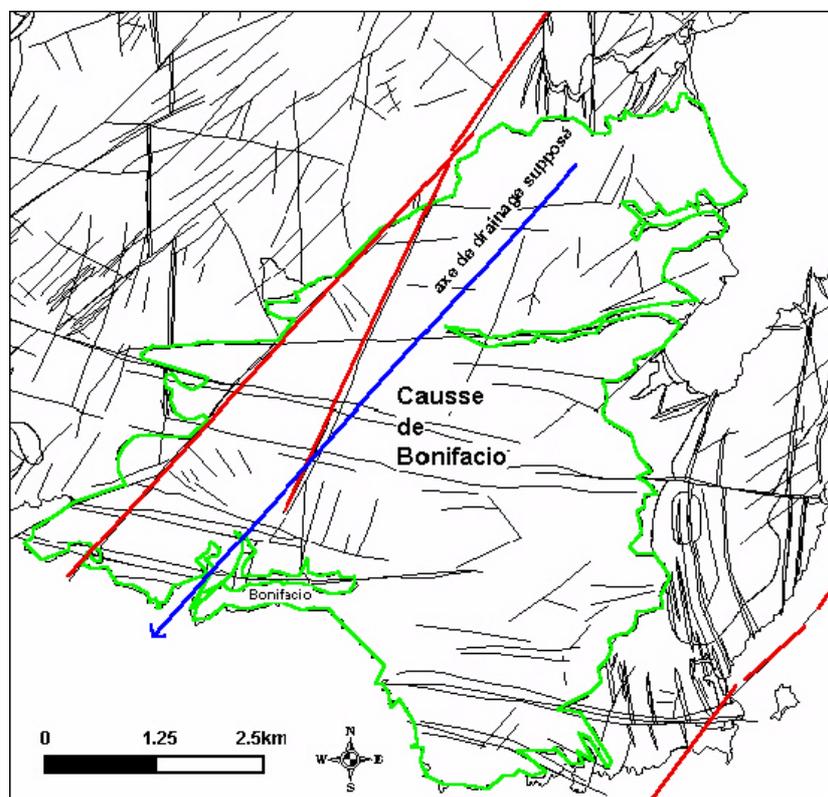


Fig. 4 - Carte géomorphologique et structurale du cause de Bonifacio.

Contour en vert, limite des affleurements du Miocène ; traits noirs simples, linéaments ; traits noirs doubles, filons ; traits rouges, tracé supposé des failles de socle.

La profondeur des quelques 45 ouvrages recensés (fig. 6) dans la Banque de données du Sous-Sol, varie en moyenne entre 5 et 140 m. Aucun ouvrage ne recoupe la totalité de la série sédimentaire pour atteindre le socle. Seul le récent sondage du Fazzio (fig. 6) de 148 m de profondeur a traversé des calcarénites puis des sables et des arènes sans atteindre le substratum granitique.

L'ensemble des données permet de montrer que le bassin de Bonifacio est asymétrique avec une limite NW brusque, héritée d'un paléoépaulement de faille. Vers l'est, le substratum remonte par une succession de paléoreliefs.

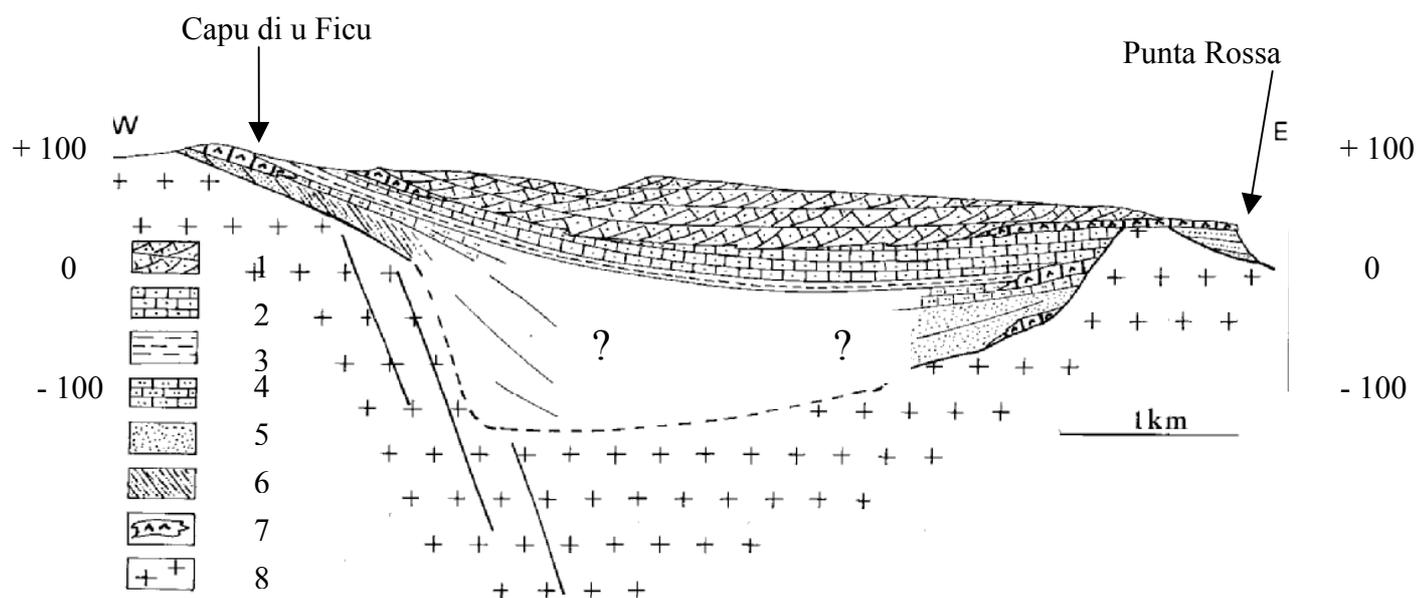


Fig. 5 - Coupe semi-interprétative du bassin de Bonifacio montrant l'importance de la paléotopographie pour expliquer la variation des épaisseurs des dépôts du Miocène.

1 : calcarénites à litages obliques, 2 : calcarénites à lits plans, 3 : silts, 4 : calcarénites grossières, 5 : grès peu indurés, 6 : grès argileux à litages sigmoïdes, 7 : récif, 8 : socle granitique.

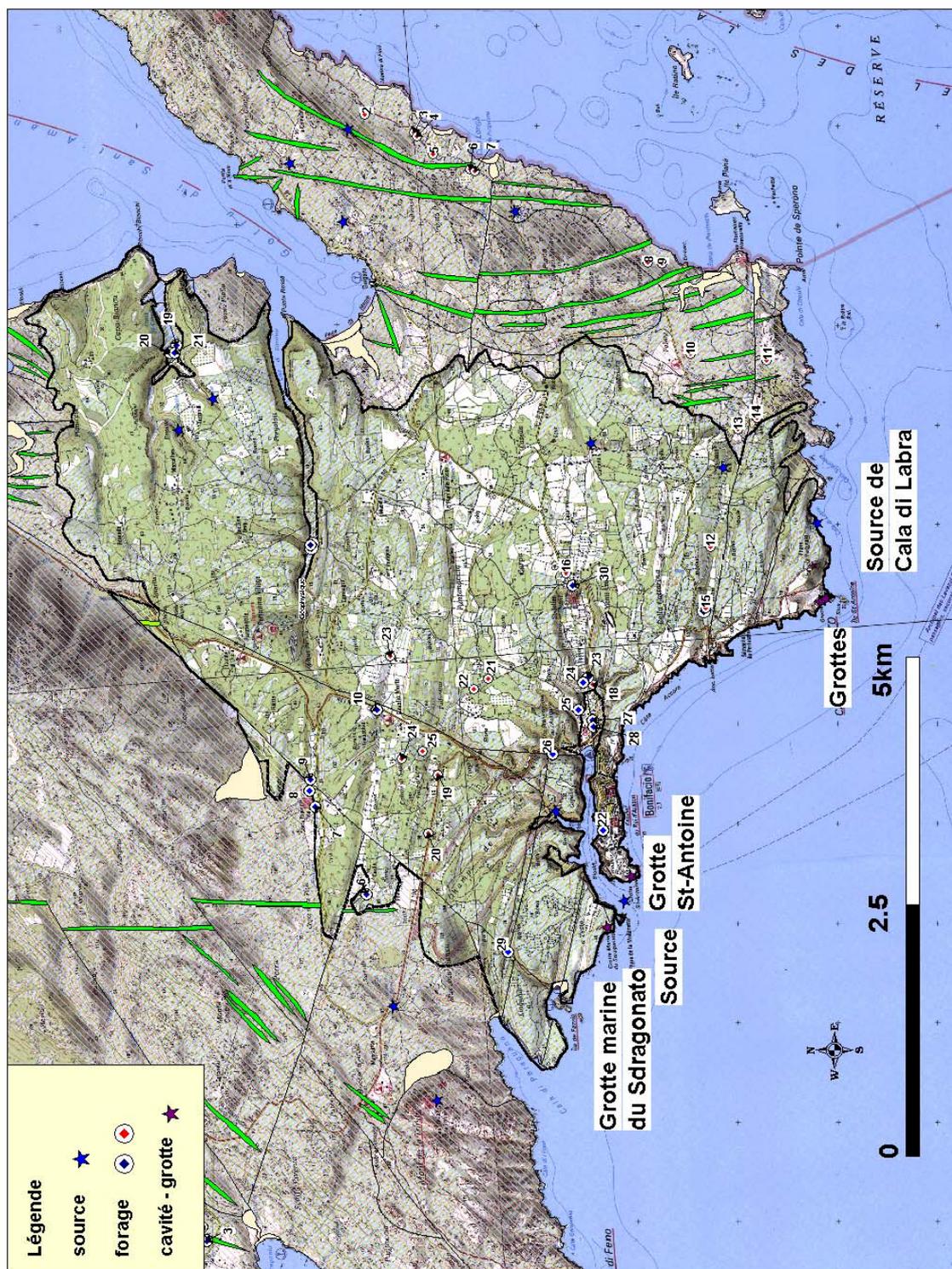


Fig. 6 - Carte de localisation des sources et des forages.

3. Synthèse hydrogéologique

3.1. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE GENERAL

Du point de vue hydrogéologique, la lithologie suggère la présence de deux aquifères (fig. 7) séparés l'un de l'autre par un niveau imperméable ou semi-perméable, d'épaisseur décamétrique au maximum, qui correspond à l'unité 4 de la formation de Cala di Labra.

L'aquifère inférieur est constitué par une succession d'arènes et de sables avec des récifs échelonnés dans les dépôts (récifs R1 et R2). La présence de chenaux dans le substratum granitique pourrait constituer des zones à bonne transmissivité. Compte tenu de la morphologie du réservoir, des transferts d'eau du socle granitique vers l'aquifère inférieur sont probables.

L'aquifère supérieur est constitué par un ensemble de grès et de biocalcarénites comprenant le sommet de la formation de Cala di Labra, associé au récif R3, et la totalité de la formation de Bonifacio. Le sommet de cette formation présente une teneur en carbonate élevée.

Le socle granitique est affecté par une densité de fracturation très importante. Il est parcouru par de nombreux filons de roches acides et basiques. Les forages de recherche d'eau dans le socle pour des particuliers sont souvent productifs. On peut donc envisager la présence d'aquifères fissurés et de possibles échanges avec les aquifères poreux (fig. 7).

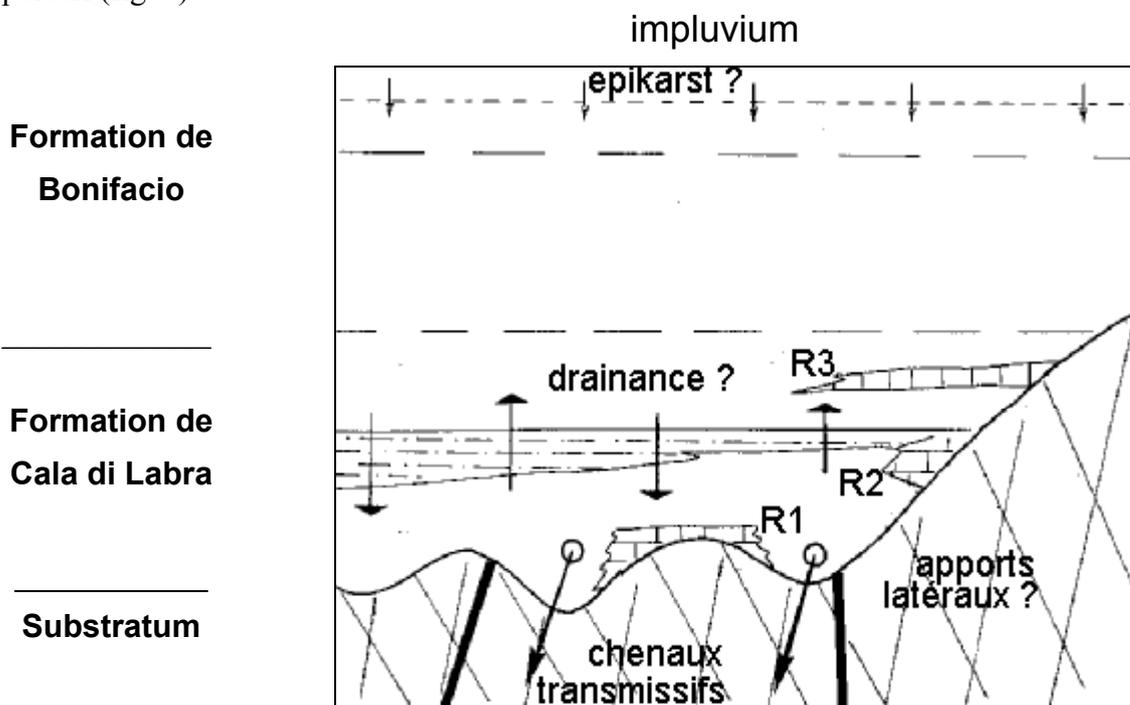


Fig. 7 - Modèle conceptuel du système hydrogéologique de Bonifacio



Photo 1 - Phare de la Madonetta, marquant l'entrée du port de Bonifacio, et position de la grotte de Sdragonato (flèche).

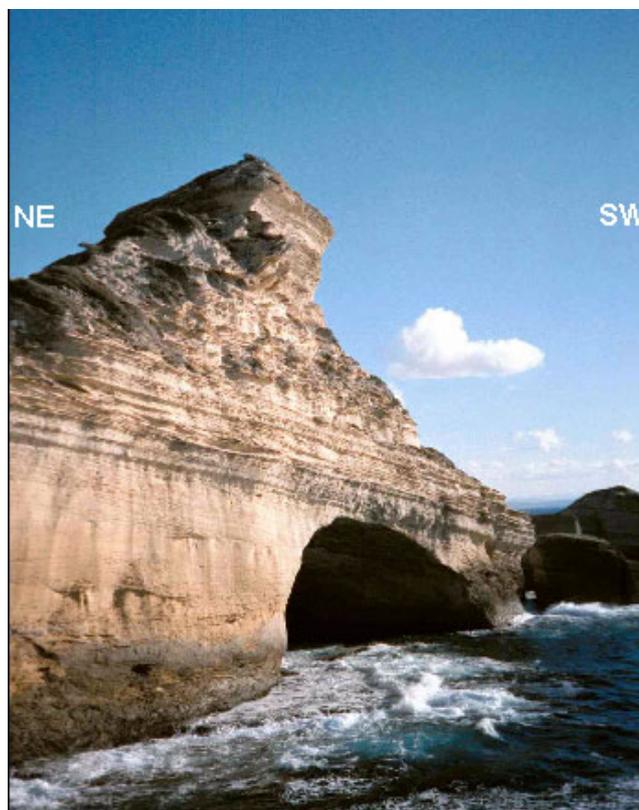


Photo 2 - Grotte située au niveau du Capo Pertusato.

Cet hydrosystème présente peu d'exutoires terrestres qui peuvent être rapportés à des sources d'écoulement local (ex. source captée de Pattava, proche du ruisseau du Canettu). Des exutoires sous-marins sont supposés mais non inventoriés. Un de ces exutoires se trouverait à la sortie du port de Bonifacio au pied du phare de la Madonetta dans l'axe du synforme.

La surface du cause correspond actuellement à une surface d'érosion. La karstification a pu se développer à la faveur des baisses du niveau marin, en particulier au Messinien (Miocène supérieur) et pendant les périodes de baisses glacio-eustatiques quaternaires. Pendant ces épisodes, le niveau marin était à environ 120 m plus bas qu'actuellement ce qui entraîna à plusieurs reprises l'exondation du détroit de Bonifacio. De récents levés bathymétriques et sonar montrent la poursuite en mer de la formation de Bonifacio avec des indices de karstification.

3.2. PHENOMENES HYDROGEOLOGIQUES

• Indices de karstification

L'ensemble du cause est recouvert d'une végétation caractéristique de type maquis qui ne facilite pas les observations de la morphologie de surface. Néanmoins, un modelé karstique est présent, mais peu développé, à cause de la nature grésocalcaire des dépôts miocènes.

De manière générale, les indices de karstification se trouvent préférentiellement dans la formation de Bonifacio :

- La morphologie du cause est marquée par des vallées sèches d'orientation W-E à E-SE - W-NW qui correspondent à d'anciens axes de drainage.
- Le long du littoral, la karstification de la formation de Bonifacio est soulignée par la présence de cavités (grottes du Capo Pertusato (photo 2), de Saint-Antoine, et du Sdragonato). La grotte la plus importante est celle de Sdragonato à proximité du phare de la Madonetta, signalant l'entrée du port de Bonifacio (photo 1). Cette grotte est une vaste cavité pénétrable en bateau, elle comprend une salle de quelques 50 m de long se poursuivant par une galerie d'une trentaine de mètres (Gilly E., 2001). Aucune venue d'eau n'est visible au niveau de cette grotte, cela n'exclut pas l'existence de venues d'eau douce sous-marine dans ce secteur comme celle située au pied du phare de la Madonetta (communication orale de plongeurs). La présence de grottes au niveau littoral pourrait correspondre à l'amplification de cavités initiées dans la masse des calcarénites et amenées au niveau de la mer par le phénomène de recul de falaise.

Au niveau du cause de Bonifacio, on dénombre moins de 10 sources (tabl. 2), dont 2 au niveau du littoral (sources de Cala di Labra et de Capello) et une sous-marine (phare de la Madonetta à la sortie du port. (cf. photo 1).

N°	Dénomination de la source	Coordonnées X	Coordonnées Y	Altitude [m NGF]
1	Source de Cala di Labra (photos 3 et 4)	572 980	4 120 210	01,5 m
2	Source sous-marine (port de Bonifacio)	569 200	4 122 120	- x m (?)
3	Source de Capello	570 100	4 122 820	2
4	Font de Saint-Jean	573 550	4 121 160	70
5	Font de Corcone	573 790	4 122 460	70
6	Source de Pregolosi	574 240	4 126 240	40
7	Source de Terzanili	573 940	4 126 590	25
8	Source de Maora	574 020	4 124 620	35

Tabl. 2 - Liste des sources principales du causse de Bonifacio.

Il est à noter la présence de 5 sources émergant du socle granitique à la périphérie du causse. Dans l'ensemble, il s'agit de sources à faible débit dont le régime n'est pas connu. Les sources feront l'objet d'une caractérisation chimique lors de l'étude générale des eaux souterraines du causse de Bonifacio.



Photo 3 - Panorama du flanc ouest et position de la source (flèche).



Photo 4 - Source Cala di Labra, située à un mètre au-dessus du niveau de la mer.

La structure du cause de Bonifacio suggère la présence de plusieurs exutoires en mer situés à proximité du trait de côte ou plus au large. Pour répondre à cette question, il serait nécessaire de réaliser une campagne de profils de salinité et de photographies aériennes thermographiques (infrarouge). Pour tenir compte des contrastes de températures entre les eaux souterraines et l'eau de mer, cette campagne serait à réaliser à la fin du mois d'août.

3.3. INVENTAIRES DES FORAGES D'EAU

Environ 20 forages/sondages (fig. 6 ; ann. 1), implantés dans le cause de Bonifacio, sont répertoriés dans la Banque de données du Sous-Sol. Récemment quelques 25 forages réalisés pour le compte de particuliers par l'entreprise Espace Vert de Porto Vecchio [M. Clementz] ont été localisés par GPS et archivés dans la Banque de données du Sous-Sol.

Les forages pour les particuliers livrent des indications fragmentaires. Les seules informations disponibles sont la profondeur des ouvrages, leur débit d'exploitation et les formations géologiques concernées (Miocène ou/et socle). De manière générale, les données piézométriques sont absentes.

3.4. BILAN HYDROLOGIQUE

Dans l'état actuel des connaissances, l'établissement d'un bilan hydrologique détaillé n'est pas réalisable en l'absence de données précises concernant les termes d'entrée et de sortie.

Concernant les termes d'entrée [précipitations efficaces, écoulement de surface venant de l'amont, alimentation latérale souterraine en provenance du socle], seule une estimation des précipitations efficaces globales peut être conduite à partir des données de précipitations de la station Météo France de Bonifacio et d'une appréciation de l'évapotranspiration mesurée à la station d'Ajaccio. Il n'y a pas de données climatologiques pour les stations proches du secteur d'étude (aéroport de Figari, Bonifacio et Porto Vecchio).

Concernant les termes de sorties [évaluation des volumes exploités par forages, estimation des débits d'exhaure au niveau des sources sous-marines], ces deux composantes ne peuvent être déterminées.

Ne disposant pas de chroniques piézométriques représentatives du ou des aquifères du bassin sédimentaire du causse de Bonifacio, un modèle global de type réservoir en cascade, permettant de déterminer la composante liée à la recharge de l'aquifère, ne peut être utilisé dans le cas présent.

Ainsi, seul un bilan hydrologique sommaire de l'hydrosystème que constitue le causse de Bonifacio a été effectué.

Le bilan peut être formulé comme suit :

$$PE = QT \quad (1)$$

où PE = apport fourni par les précipitations efficaces
QT = débit de l'écoulement total.

La répartition entre infiltration efficace et ruissellement à partir des précipitations efficaces ne peut être effectuée. De plus, l'écoulement total ne prend pas en compte le terme négatif lié à l'exploitation de l'aquifère par les forages d'eau (AEP et individuels). Seule une estimation des précipitations efficaces peut être réalisée.

Les précipitations moyennes annuelles du secteur d'étude sont de 459 mm. Cette valeur a été calculée à partir des données de pluviométrie journalière des cinq dernières années des stations Météo France de Bonifacio, Porto Vecchio et de l'aéroport de Figari. Les précipitations moyennes annuelles de ces stations sont respectivement de 459, 507 et 567 mm (tabl. 3). Les écarts types autour des moyennes journalières de la station de Bonifacio varient de 2,8 à 4,6. L'écart type de la moyenne annuelle est de 98 mm.

Station Météo France de Bonifacio				
Année	Précipitation journalière moyenne (mm)	Ecart type	Précipitation moyenne annuelle (mm)	Ecart type
1997	1,30	4,09	475	
1998	1,27	3,87	462	
1999	1,22	4,56	444	
2000	1,47	4,64	537	
2001	0,76	2,83	279	
2002	1,52	5,61	554	
1997-2002	1,23	4,22	459	98

Station Météo France de Porto Vecchio				
Année	Précipitation journalière moyenne (mm)	Ecart type	Précipitation moyenne annuelle (mm)	Ecart type
1997	1,28	3,82	467	
1998	1,62	4,89	590	
1999	1,42	4,61	519	
2000	1,40	4,92	510	
2001	1,11	4,58	406	
2002	1,50	6,36	548	
1997-2002	1,38	4,57	507	64

Station Météo France de Figari Aéroport				
Année	Précipitation journalière moyenne (mm)	Ecart type	Précipitation moyenne annuelle (mm)	Ecart type
1997	1,47	5,12	537	
1998	1,62	4,89	590	
1999	1,56	5,21	570	
2000	1,97	6,99	719	
2001	1,34	4,54	491	
2002	1,35	4,20	494	
1997-2002	1,58	5,26	567	84

Tabl. 3 - Données statistiques de la pluviométrie des stations Météo France de Bonifacio, Figari et de Porto Vecchio.

Au vu des variations de précipitations entre les trois stations, la valeur de 500 mm a été retenue pour l'estimation du bilan hydrologique de la zone d'étude.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) mesurée selon la méthode de Penmann n'est renseignée qu'à la station Météo France d'Ajaccio. L'ETP moyenne annuelle est de 114 mm. La pluie efficace calculée est de 149 mm/an, en considérant une valeur réaliste pour le secteur de 50 mm de réserve utile du sol (< 70 mm) (Daum *et al.* 1997) et en considérant l'évapotranspiration réelle. Ainsi, la pluie efficace constitue les 26 % des précipitations totales de cette même station.

Les précipitations moyennes efficaces sont de l'ordre de 100 à 250 mm/an pour l'extrémité sud de la Corse où se situe la zone d'étude. Considérant le même rapport pluie totale et pluie efficace pour Ajaccio que pour la zone d'étude, on considère ainsi une valeur de 130 mm/an comme valeur moyenne de précipitations efficaces.

Faisant l'hypothèse que toutes les précipitations efficaces s'infiltrent et ne contribuent pas à du ruissellement, et sachant que la superficie du causse est de 25 km², le débit souterrain correspondant est de :

$$PE = QT \text{ [l/sec]}$$

$$(130 \text{ (l/an)} * 25 * 10^6) / (365 * 24 * 3600) = 103 \text{ [l/s]}$$

Ce débit a été estimé par Gilly E. (2001) dans le cadre d'une synthèse sur les sources karstiques sous-marines à 120 l/s.

Au vu des approximations pour établir ce bilan et de plus le débit souterrain étant à répartir entre les différents exutoires, le débit moyen par exutoire est de l'ordre de 15 à 20 l/s.

4. Investigations géophysiques

4.1. METHODES ET MOYENS

4.1.1. Sondages électriques (SE)

a) Principes généraux des méthodes électriques par courant continu

Le principe de la méthode consiste à injecter un courant d'intensité I entre deux électrodes A et B et à mesurer la différence de potentiel V entre deux électrodes M et N. Un tel dispositif d'émission et de réception est appelé quadripôle. La résistivité apparente du sol est définie comme la résistivité d'un sol homogène et isotrope qui, alors que le courant I est injecté entre les électrodes A et B, donnerait entre les électrodes M et N la différence de potentiel V , telle que :

$$\rho_a = K.V/I,$$

où K (appelé coefficient géométrique) est fonction des distances entre les différentes électrodes A, B, M et N.

La profondeur d'investigation augmente avec les dimensions du dispositif d'électrodes, mais diminue avec la résistivité des terrains. La résolution décroît avec la profondeur. Un terrain superficiel conducteur est généralement un inconvénient qui limite la profondeur d'investigation et la résolution ; il oblige à fortement augmenter la longueur de dispositif pour obtenir un résultat comparable à celui obtenu sur un terrain superficiel résistant.

b) Procédure d'acquisition des mesures par sondage électrique

Un sondage électrique consiste à établir la courbe de variation, en fonction de la profondeur, de la résistivité apparente des terrains, mesurée en surface à l'aide d'un dispositif à quatre électrodes ABMN. La profondeur d'investigation est réglée en faisant varier la distance entre les électrodes d'injection du courant A et B. La figure 8 illustre le fait que les filets de courant intéressent des couches de plus en plus profondes lorsque la distance AB augmente.

Le dispositif utilisé dans la présente étude est de type Schlumberger. Les quatre électrodes sont alignées et les centres O de AB et de MN sont confondus. Le rapport des distances AB/MN est maintenu aussi grand que possible. La distance MN est augmentée lorsque la mesure de la différence de potentiel V , qui est proportionnelle à la distance MN, devient trop difficile.

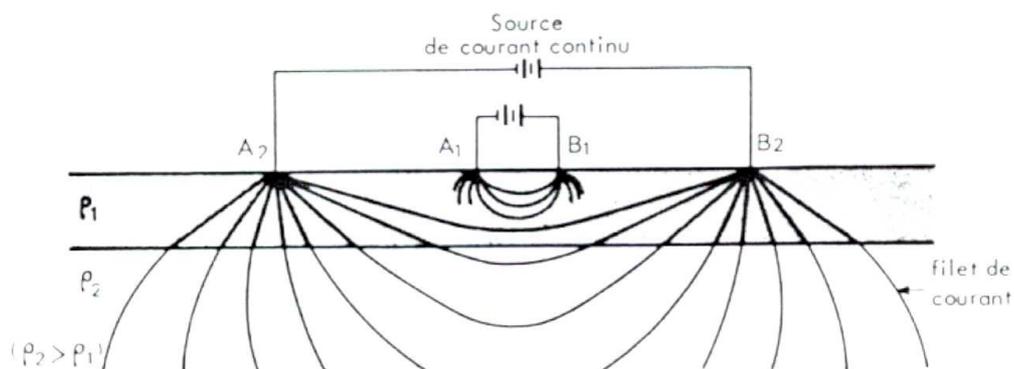


Fig. 8 - Principe du sondage électrique.

c) Modélisation et interprétation

• Modélisation 1D

La modélisation 1D des sondages électriques est réalisée avec le logiciel RESIX (INTERPEX). Le résultat de ces modélisations se présente sous la forme de logs de résistivité vraie qui permettent de construire des coupes géoélectriques et de tracer des cartes d'isorésistivité ou d'isoépaisseur (profondeur, altitude) des différentes unités géoélectriques mises en évidence.

• Conductance longitudinale

La conductance longitudinale (Cl) d'une couche est égale au rapport de son épaisseur (e) par sa résistivité (ρ) : $Cl = e/\rho$

• Résistance transversale

La résistance transversale (Rt) d'une couche est égale au produit de son épaisseur (e) par sa résistivité (ρ) : $Rt = e \cdot \rho$

• Principe d'équivalence

En sondage électrique, une couche intervient principalement par sa conductance longitudinale (e/ρ) si elle est conductrice par rapport aux couches encaissantes

En d'autres termes, des couches d'épaisseurs et de résistivités différentes peuvent être équivalentes en ce qui concerne leur effet sur un sondage électrique si leurs conductances longitudinales ou leur résistances transversales sont égales.

Quand cela est possible, un sondage électrique d'étalonnage à côté d'un forage ou d'un puits permet de réduire cette indétermination.

En fixant les épaisseurs des différentes couches données par le log lithologique on peut, en conséquence, définir les résistivités vraies des terrains.

En partant de l'hypothèse que, sur la zone d'étude autour du forage, les résistivités ne varient pas latéralement, on pourra déterminer au mieux les variations de profondeur en fixant ces résistivités.

- **Phénomène de disparition**

Lorsqu'une couche a une résistivité intermédiaire entre celles des couches encaissantes, elle peut ne pas être décelable sur les sondages électriques et disparaître.

- **Influence de la topographie**

La topographie a un effet non négligeable sur la répartition des lignes de courant lorsque la ligne AB est grande par rapport à la largeur des accidents topographiques : la densité de courant augmente sous les vallons, diminue sous les collines, ce qui entraîne respectivement une augmentation et une diminution de la résistivité apparente calculée.

4.1.2. LA RÉSONANCE MAGNÉTIQUE PROTONIQUE (RMP)

Les méthodes géophysiques traditionnelles d'exploration se fondent sur l'analyse d'anomalies de structures ou de paramètres physiques qui sont liés à différents facteurs qui ne sont pas eux-mêmes nécessairement liés de façon unique à la présence ou à l'absence d'eau dans le milieu étudié. Ainsi, par exemple, la conductivité électrique (inverse de la résistivité) des roches est proportionnelle à la conductivité électrique du fluide contenu et à une certaine puissance de la porosité (Archie, 1942), mais elle dépend également largement de la composition minéralogique et en particulier de la teneur en argile.

Contrairement à ces méthodes géophysiques, l'information déduite d'un sondage de Résonance Magnétique Protonique (RMP) est directement liée à l'eau contenue dans le sous-sol.

Dans le cadre d'un accord de collaboration entre ICKC (Russie) et le BRGM, un équipement, nommé « NUMIS », fondé sur ce principe a été développé par IRIS Instruments et commercialisé début 1997.

a) Principe de la méthode

Schématiquement, le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique H_0 (tel que celui de la terre ou artificiel), possèdent des moments magnétiques qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal H_0 (fig. 9).

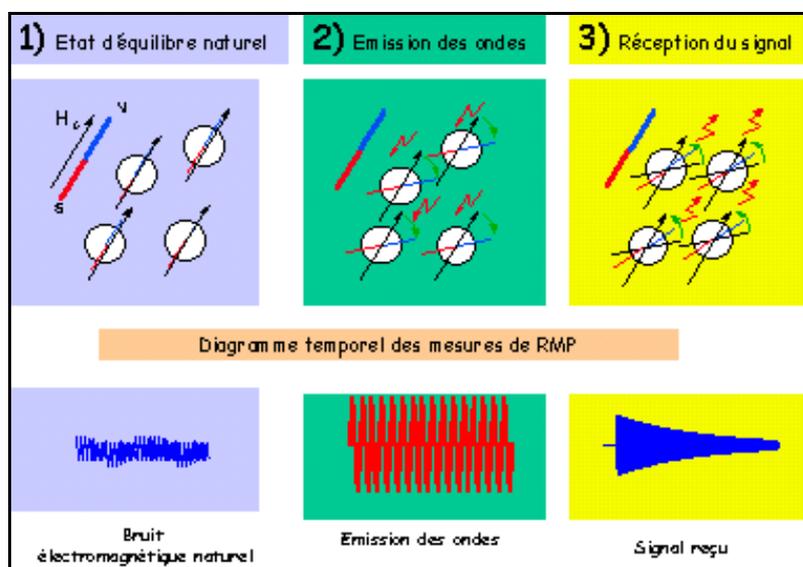


Fig. 9 - Principe de mesure RMP.

L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre naturel et provoque une précession de ces moments autour de la direction du champ magnétique naturel. Après coupure du champ excitateur, et en retour à l'état d'équilibre initial, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons et mesuré en surface, constituant ainsi la réponse RMP.

L'amplitude de ce champ est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, et donc que la teneur en eau est importante. La fréquence spécifique à laquelle les protons sont excités est caractéristique de l'atome d'hydrogène et assure ainsi que la méthode est sélective.

La très grande majorité des noyaux d'hydrogène présents dans le proche sous-sol provenant des molécules d'eau implique ainsi que la méthode RMP renseigne spécifiquement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

b) L'équipement « NUMIS »

L'équipement NUMIS se compose d'un générateur de courant alternatif, une unité réceptrice, un détecteur de signal RMP, une antenne et un microprocesseur (fig. 10).

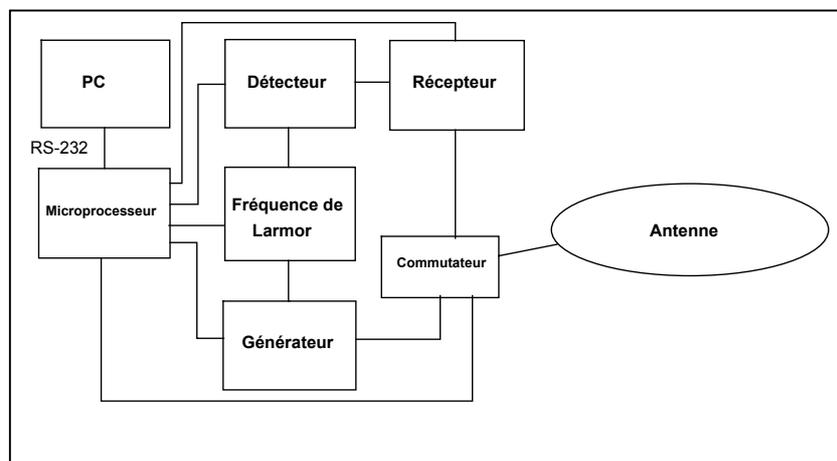


Fig. 10 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.

Le microprocesseur pilote la commutation de l'antenne du mode émission au mode réception. Il contrôle également la génération de la fréquence de référence égale à la fréquence de Larmor. Une enveloppe du signal provenant du détecteur synchrone est enregistrée par le microprocesseur sous forme digitale sur une durée programmable de 2 s au maximum. Un PC portable est utilisé pour le stockage sur disque et le traitement des données. Le poids total de l'ensemble est d'environ 100 kg (fig. 11).



Fig. 11 - Équipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS » sur site.

c) Le sondage RMP

Pour réaliser un sondage RMP, une antenne est déployée sur le sol, généralement selon un cercle ayant un diamètre compris entre 20 et 120 m, selon la profondeur des couches aquifères que l'on désire investiguer. Différentes géométries d'antennes sont prévues dans le logiciel d'acquisition de NUMIS, en particulier, l'antenne peut être déployée sous la forme d'un chiffre « huit » afin d'améliorer le rapport signal/bruit (Trushkin *et al.*, 1994). Une impulsion $i(t)$ d'un courant alternatif est émise dans la boucle :

$$i(t) = I_0 \cos(\omega_0 t), \quad 0 < t \leq \tau, \quad (1)$$

I_0 et τ caractérisent respectivement l'amplitude et la durée de l'impulsion. La pulsation du courant émis ω_0 correspond à la fréquence de Larmor, caractéristique des protons placés dans le champ géomagnétique $f_0 = \gamma H_0 / 2\pi$, avec H_0 l'amplitude du champ géomagnétique et γ le facteur gyromagnétique des protons (constante physique caractéristique). La valeur de cette fréquence est déduite de l'amplitude du champ géomagnétique du lieu considéré.

L'impulsion de courant entraîne une précession des protons autour du champ géomagnétique, qui crée à son tour un champ magnétique alternatif qui est détecté, après coupure de l'injection de courant, par la même antenne que celle qui est utilisée pour l'émission. En pratique, l'enregistrement de la réponse RMP n'est possible qu'après un délai instrumental (dit « temps mort ») de 40 ms dans le cas de la version actuelle de NUMIS. Le processus d'acquisition d'une mesure est schématisé sur la figure 12.

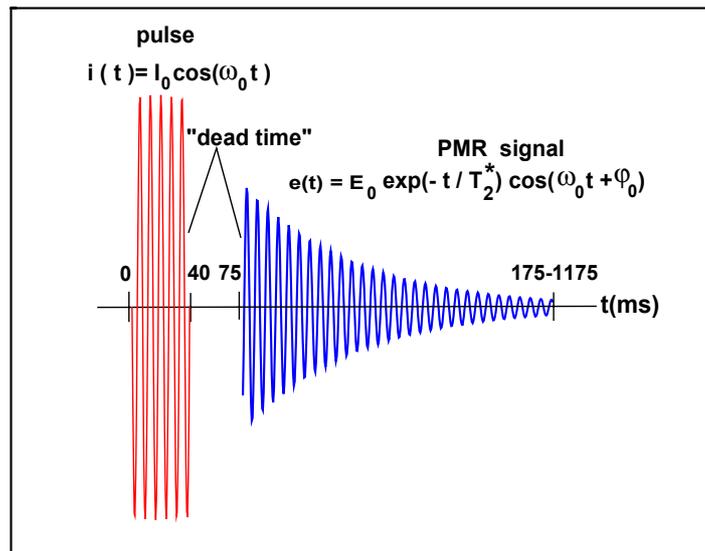


Fig. 12 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.

En oscillant à la fréquence de Larmor, le signal RMP $e(t, q)$ décrit une enveloppe de forme exponentielle décroissante qui dépend du paramètre d'excitation $q = I_0 \tau$

$$e(t, q) = e_0(q) \exp(-t / T_2^*) \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2)$$

avec $E_0(q)$ l'amplitude initiale RMP, T_2^* le temps de relaxation spin-spin, et φ_0 la phase du signal RMP.

En injectant deux pulsations consécutives au lieu d'une seule et mesurant la réponse RMP après chaque pulsation il est possible de mesurer la constante de relaxation T_1 . $E(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1(q)$ et $\varphi_0(q)$ sont les paramètres mesurés par l'antenne de réception en faisant varier le paramètre d'excitation q ; ce dernier paramètre agissant sur la profondeur d'investigation du sondage. Ces quatre paramètres sont ceux qui sont ensuite interprétés et qui renseignent sur l'eau contenue dans le sous-sol.

Les valeurs d'amplitudes peuvent varier de quelques dizaines de nanovolts à quelques microvolts suivant la teneur en eau du milieu considéré; le seuil de détectabilité de NUMIS se situant à environ 4 nV. Différents facteurs peuvent influencer l'amplitude des signaux RMP tels que par exemple, la magnitude et l'inclinaison du champ géomagnétique, la conductivité électrique des terrains, la taille et la géométrie de l'antenne utilisée (Legchenko *et al.*, 1997).

Un signal RMP provenant de l'eau contenue dans des argiles a un temps de décroissance ou de relaxation inférieur au délai instrumental et n'est ainsi pas détectable.

Le volume investigué lors d'un sondage est défini comme un cylindre vertical de diamètre égal à environ 1,5 fois le diamètre de la boucle, centré sur celle-ci et de hauteur égale à ce diamètre. La profondeur d'investigation maximale actuelle, en l'absence de terrains conducteurs, est de l'ordre de 120 m. La profondeur d'investigation est sensiblement diminuée lorsque la conductivité des terrains augmente et de manière significative pour des résistivités inférieures à 10 ohm.m. La durée de réalisation d'un sondage RMP est d'environ 2 h dans des conditions favorables de bruits électromagnétiques parasites d'origine naturelle ou anthropique.

d) Interprétation des données

Les algorithmes d'inversion des paramètres RMP sont décrits dans Legchenko *et al.* (1998). Ainsi un signal RMP non nul est directement lié à la présence d'eau dans le sous-sol. De plus, des informations complémentaires peuvent être obtenues à partir des courbes brutes enregistrées :

- l'inversion des données $E_0(q)$ fournit la profondeur, l'épaisseur et la teneur en eau de chaque couche saturée en eau. La teneur en eau fournie par RMP peut être définie telle que ci-après. Pour un volume d'investigation V , soit V_W le volume rempli d'eau et V_R le volume de roche ($V = V_W + V_R$). Le volume V_W peut être divisé en deux parties : l'eau soumise à un champ magnétique homogène et appelée eau libre V_{free} et l'eau soumise à un

champ magnétique inhomogène, appelée eau liée ; ainsi $V_W = V_{free} + V_{bound}$. Comme les très courts signaux correspondant à l'eau liée ne peuvent pas être mesurés par les équipements RMP disponibles aujourd'hui, la teneur en eau RMP, n est la part du volume investigué occupé par l'eau libre telle que $n = V_{free}/V$. Les deux cas limites sont $n = 0$ pour une roche sèche et $n = 100\%$ pour l'eau d'un lac ;

- les constantes de **temps de relaxation** $T_2^*(q)$ et $T_1(q)$ sont reliées à la taille moyenne des pores des formations aquifères (Shirov *et al.*, 1991 ; Chang *et al.*, 1997 ; Kenyon, 1997) ;
- la **phase** $\varphi_0(q)$ renseigne sur la distribution des conductivités électriques du sous-sol. Pour une estimation précise des profondeurs des différents aquifères, cette information doit être prise en compte lors de l'étape d'inversion des données RMP, quand les résistivités sont inférieures à 10 ohm-m.

Le problème inverse des sondages RMP est mal conditionné. Il n'a pas de solution unique. La capacité de résolution de la méthode est discutée par Legchenko et Shushakov (1998). Un exemple d'inversion des données théoriques est présenté sur la figure 13.

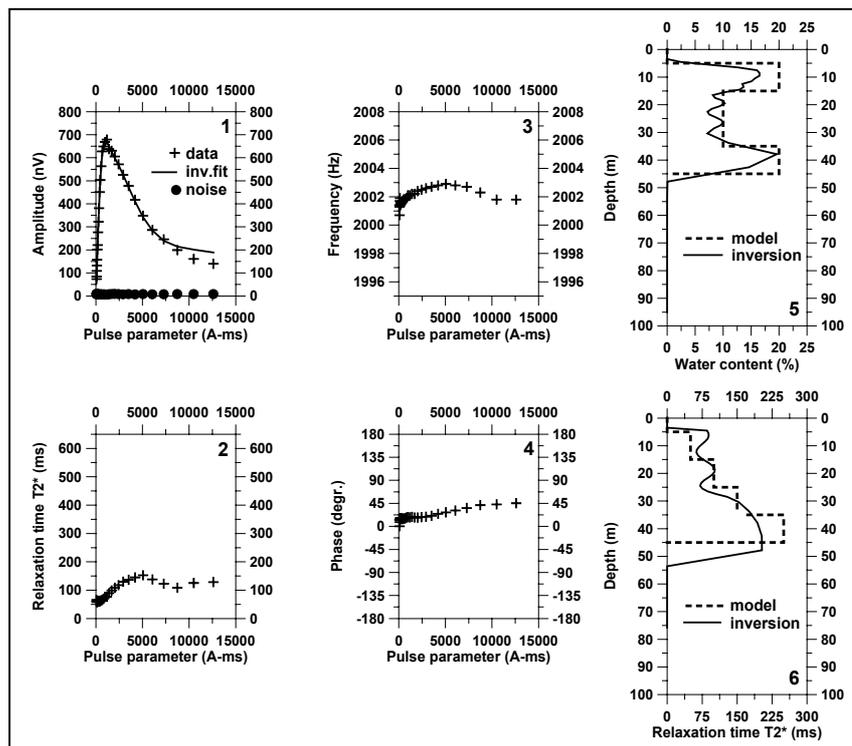


Fig. 8 - Résultats d'inversion des données théoriques.

Le signal théorique a été calculé à partir du modèle :

Profondeur		Teneur en eau	T_2^*	Larmor frequency
de (m)	à (m)	(%)	(ms)	(Hz)
5	15	20	50	2000
15	25	10	100	2001
25	35	10	150	2002
35	45	20	250	2003

La mesure des caractéristiques de relaxation du signal RMP ($T_2^*(q)$ et $T_1(q)$), rend possible l'estimation des paramètres hydrodynamiques des aquifères. En référence à l'expérience acquise en diagraphies de Résonance Magnétique Nucléaire (Chang *et al.*, 1997 ; Kenyon *et al.*, 1997), la perméabilité pourrait être liée aux paramètres RMP en utilisant la relation empirique :

$$k = C_k \varphi^a (T_1)^b, \quad (3)$$

où k est la perméabilité, φ est la teneur en eau, T_1 est la constante du temps de décroissance, C_k et a , b sont des constantes définies empiriquement. En diagraphies RMN, différentes valeurs a , b sont utilisées. Sur la base de mesures réalisées avec l'équipement NUMIS au droit de forages de caractéristiques hydrogéologiques connues, les valeurs $a = 1$, $b = 2$ ont été retenues.

Pour des roches différentes, les constantes empiriques doivent être modifiées et des relations mieux adaptées peuvent être définies. La qualité de la relation empirique dépend alors de la qualité de la calibration. La définition des paramètres empiriques adaptés aux différents environnements est un travail de longue haleine mais déjà dans cette phase initiale de développement, NUMIS peut être utilisé efficacement pour définir les perméabilités des aquifères au moins en valeurs relatives.

L'inversion des données RMP mesurées avec l'équipement NUMIS produit les résultats suivants :

- 1) Distribution verticale de la teneur en eau.
- 2) Distribution verticale du temps de décroissance T_2^* .
- 3) Distribution verticale du temps de décroissance T_1 .
- 4) Distribution verticale de la perméabilité.
- 5) Distribution verticale de la transmissivité.

Un exemple de la comparaison des résultats RMP avec des données de forages et d'essais de pompages est présenté sur la figure 14.

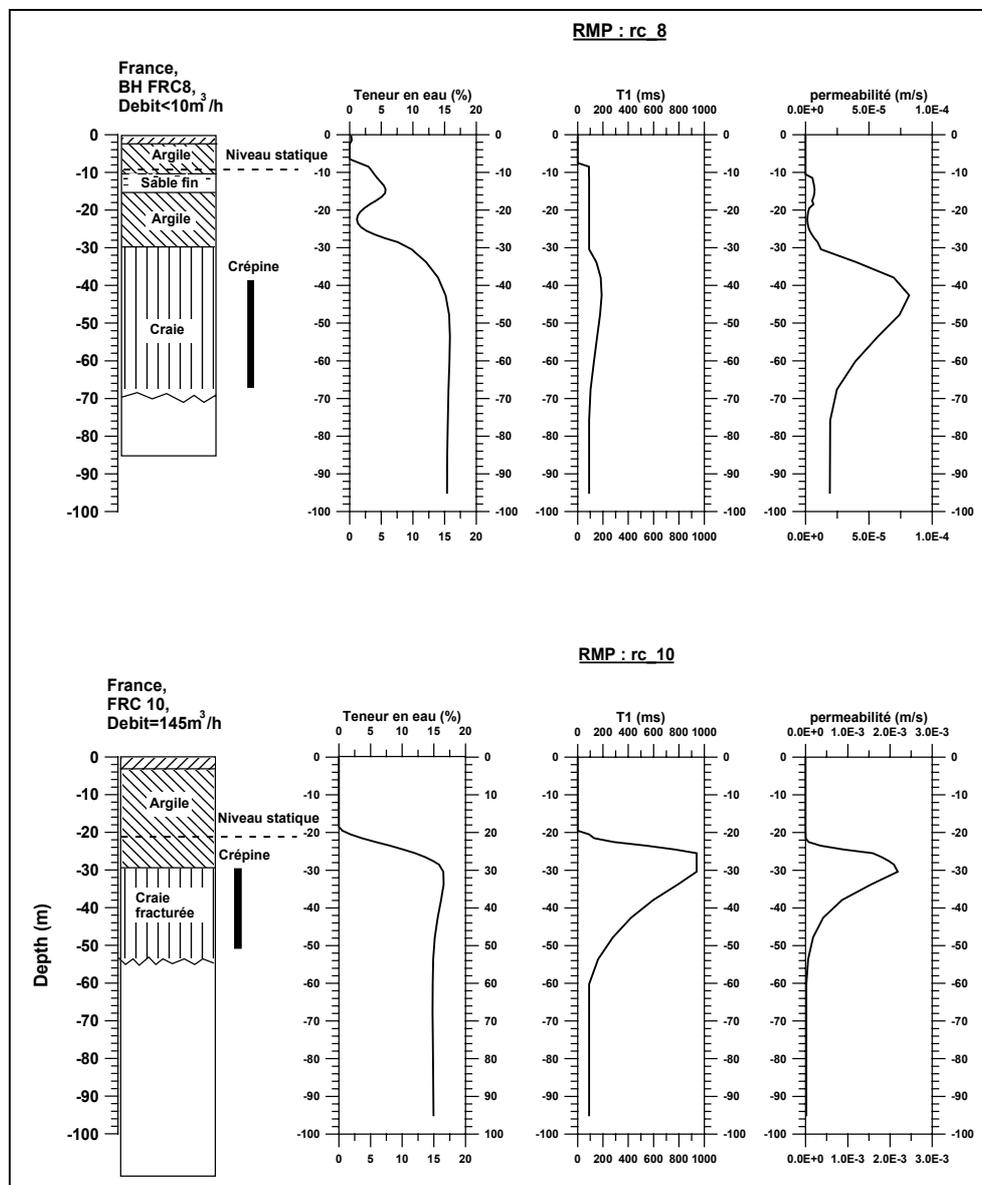


Fig. 14 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie.

e) Présentation des résultats d'un sondage fournis par le système NUMIS

Dans ce rapport les données et les résultats RMP sont présentés comme sur la figure 15. En tête de la feuille se trouve des informations générales sur le sondage et les paramètres d'interprétation. Les résultats graphiques sont :

- 1) Les signaux RMP $e(t, q)$ enregistrés pour chaque valeur du paramètre d'excitation, q (croissant de bas en haut du graphique) en fonction du temps.

- 2) Les amplitudes initiales des signaux RMP (FID1 et FID2) et l'amplitude moyenne du bruit ambiant en fonction du paramètre d'excitation.
- 3) Les amplitudes moyennes des signaux RMP (FID1 et FID2) et du bruit en fonction du paramètre d'excitation.
- 4) Le temps de relaxation, $T_1^*(q)$ en fonction du paramètre d'excitation.
- 5) Le temps de relaxation $T_2^*(q)$ en fonction du paramètre d'excitation.
- 6) La fréquence du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation.
- 7) La phase du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation.
- 8) Le bruit ambiant avant traitement mesuré pour les différents paramètres d'excitation.
- 9) La distribution verticale de la teneur en eau $w(z)$.
- 10) La distribution verticale du temps de relaxation $T_1^*(z)$.
- 11) La distribution verticale de la perméabilité $k_{mp}(z)$.
- 12) La distribution verticale de la transmissivité cumulée.

Site : CAUSSE DE BONIFACIO BON10

Loop: 4 - 37.5 Date: 04.04.2002 Time: 19:57

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon10.inp

matrix: C:\CORSE\MATRICE\Corse 37 mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination = 58 degr, magnitude = 45748.83 nT

filtering window = 199.1 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 4.23

fitting error: FID1 = 13.39 %; FID2 = 19.41 %

param. of regular. : modeling

permeability constant $C_p = 7.00^{-09}$

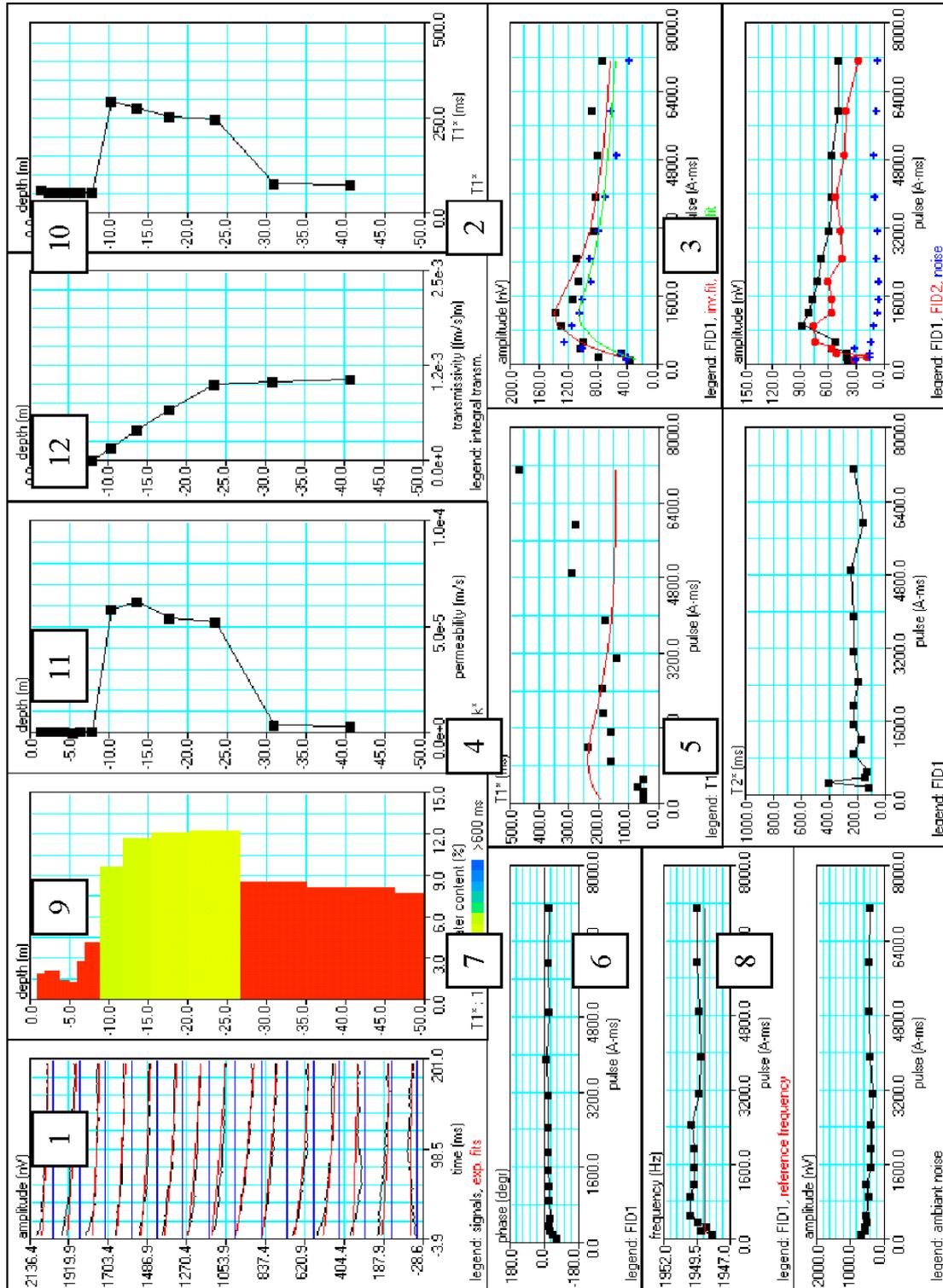


Fig. 15 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP.

4.2. TRAVAUX REALISES

4.2.1. Acquisition des mesures et compilation

a) Sondages électriques (tabl. 4)

Numéro du sondage électrique	X Lambert IV (m)	Y Lambert IV (m)	Z (m)	AB (m)	Orientation
SE01	573000	4121950	72	1100	E-W
SE02	572740	4120620	52	1200	WNW-ESE
SE03	573000	4121220	70	1200	WNW-ESE
SE04	572140	4123830	50	1200	E-W
SE05	571910	4124410	76	1200	E-W
SE06	573180	4124210	56	1200	NE-SW
SE07	570450	4125190	67	1200	WSW-ENE
SE08	570080	4124680	72	1000	E-W
SE09	570000	4124040	90	1200	WNW-ESE
SE10	569540	4124140	83	1000	WNW-ESE
SE11	569490	4125170	80	600	WSW-ENE
SE12	570800	4124020	67	1200	WNW-ESE
SE13	573450	4126100	73	1200	NE-SW
SE14	575060	4126460	52	600	ENE-WSW
SE15	569270	4123180	55	1200	WNW-ESE
SE16	568750	4123310	55	1200	WNW-ESE
SE17	573800	4124960	67	600	NE-SW
SE18	573330	4123440	67	600	NE-SW
SE19	571680	4125870	87	1200	NE-SW
SE20	572950	4124660	70	1200	E-W
SE21	572560	4123390	77	2000	NE-SW
SE22	572820	4123770	49	1200	NE-SW
SE23	571540	4123260	82	800	NE-SW
SE24	569080	4124230	78	1000	WNW-ESE
SE25	572940	4122480	64	1200	E-W
SE26	573720	4122180	75	600	N-S
SE27	574080	4123420	64	1000	NNW-SSE
SE28	573560	4124450	65	600	NW-SE
SE29	571380	4123910	59	1200	E-W
SE30	570190	4123460	78	1600	NW-SE
SE31	572110	4121970	77	1200	E-W
SE32	571360	4124520	75	1880	WNW-ESE

Tabl. 4 - Principales caractéristiques des sondages électriques.

Les conditions d'accessibilité sur le causse sont relativement défavorables du fait de la présence d'une végétation dense (maquis) et du nombre important de résidences privées entourées de murs pouvant atteindre 4 m de haut.

Par conséquent, les sondages électriques ont essentiellement été réalisés en utilisant les portions de routes ou de chemins à peu près rectilignes.

Les vallées sèches, de direction approximativement E-W et généralement occupées par de la prairie ont également été utilisées après accord des propriétaires ou des exploitants.

Certaines précautions ont été prises pour l'acquisition des mesures :

- mesure de huit à dix points par décade pour avoir une bonne définition de la courbe de résistivité ;
- les embrayages ont systématiquement été effectués sur deux points aux distances AB suivantes : 10 m ($MN = 2$ m), 60 m ($MN = 8$ m) et 200 m ($MN = 25$ m) ;
- les différences de potentiel (V_{MN}) ont toujours été maintenues au-dessus de 1 mV ;
- pour les grandes longueurs de lignes et les fortes résistances de prise, les mesures ont été effectuées en dissociant émetteur et récepteur, afin d'éliminer les phénomènes de couplage instrumental ;
- les valeurs de résistivité apparente ont été reportées en temps réel sur un graphe bilogarithmique afin de contrôler *in situ* la qualité du sondage électrique et de pallier certaines perturbations (conduites métalliques enterrées, câbles téléphoniques ou électriques enterrés, ...).

b) Résonance Magnétique Protonique (RMP)

L'expérience acquise lors de précédentes campagnes de mesures a permis d'établir une procédure de travail qui a été suivie pour cette acquisition.

Cette procédure est la suivante :

- visite du site de mesure prévisionnel et examen des conditions électromagnétiques apparentes (lignes électriques EDF, lignes téléphoniques, clôtures électrifiées, habitations, ...)
- recherche d'un nouveau site, en tenant compte des critères géologiques de sélection, si le site prévisionnel ne convient pas ;
- recherche du propriétaire ou exploitant de la parcelle pour autorisation d'accès et de mesure ;
- mise en place de la boucle selon une géométrie de carré de 75 m de côté ;
- mesure du champ magnétique terrestre ;

- mesure du bruit ambiant (bruit avant stack) et analyse de ce bruit :
 - . si celui-ci est relativement stable et se maintient sous la barre des 10 000 nV, le stacking sera efficace, l'acquisition peut donc être réalisée comme indiqué ci-dessous ;
 - . si celui-ci est supérieur à 10 000 nV ou s'il est très instable (présence de pics) la boucle est réinstallée selon une géométrie de huit carré de 37,5 m de côté et orientée selon la direction, *a priori*, la plus favorable.

La mesure est d'abord réalisée pour quelques numéros de pulse afin de vérifier la fréquence de Larmor.

L'acquisition complète du sondage est ensuite lancée avec un nombre de stacks supérieur ou égal à 75 et un maximum de temps d'acquisition de 7 heures, afin de permettre la mesure de deux sondages par jour.

Toutes les acquisitions ont été effectuées avec les paramètres suivants :

- boucle carrée de 75 m de côté ou huit carré de 37,5 m de côté ;
- nombre de pulses : 2 (mesure de T1) ;
- paramètre d'excitation, q : 1 à 16 ;
- puissance : 100 % pour le carré de 75 m et 65 % pour les huit carrés de 37,5 m ;
- noise : 240 ms ;
- P1 : 40 ms ;
- FID 1 : 240 ms ;
- D1 : 15 ms ;
- P2 : 42 ms ;
- FID 2 : 240 ms ;
- D2 : 0 ;
- optimisation du stack : oui ;
- filtre : 50 Hz : oui, si la fréquence de Larmor est décalée (au moins 6 Hz) par rapport à l'harmonique du 50 Hz ;
- nombre de stacks : 75 à 500.

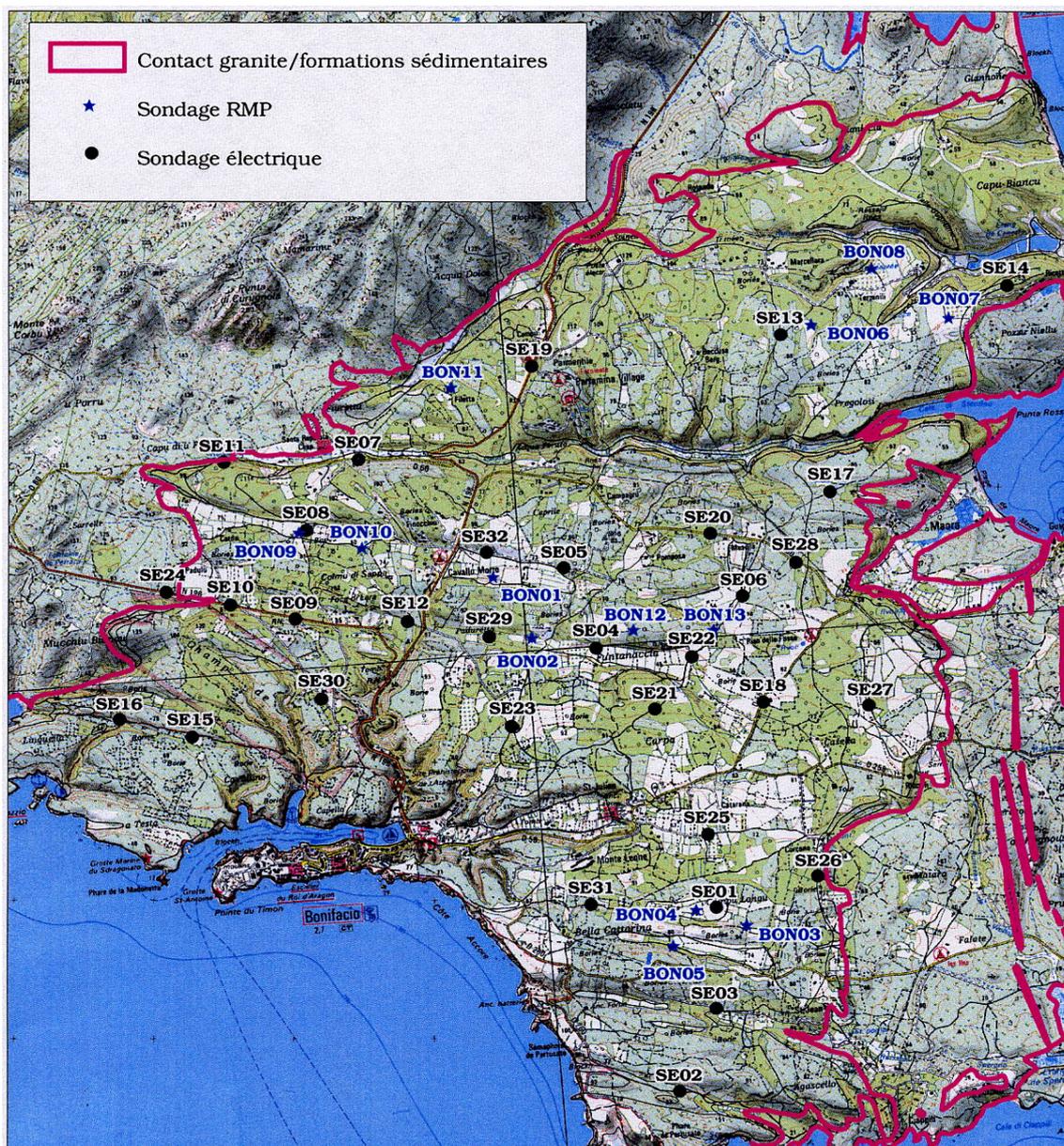


Fig. 16 - Localisation des sondages géoélectriques et des sondages RMP.

L'analyse de la qualité des mesures pour les treize sondages donne la répartition suivante

- inexploitable : 3 23 % ;
- médiocre : 2 15 % ;
- moyenne : 6 46 % ;
- bonne : 2 15 %.

• Inversions automatiques

Du fait de l'absence d'étalonnage sur l'ensemble de la zone d'étude (impossibilité de réaliser des mesures à l'aplomb d'un forage), les dix sondages RMP exploitables n'ont pu faire l'objet que d'une inversion automatique.

Certaines valeurs de q (pulse), pour lesquelles l'amplitude du signal RMP paraissait aberrante, n'ont pas été prises en compte pour l'inversion.

Le nombre de couches utilisé pour le modèle est calculé automatiquement par le logiciel. Les paramètres de régularisation (E , T_2^* et T_1^*) ont été augmentés par rapport aux valeurs calculées automatiquement, pour éviter des diminutions artificielles de la teneur en eau au centre de la colonne.

Après analyse des résultats de cette première inversion, le paramètre T_1^* a été ajusté manuellement, afin d'obtenir la meilleure convergence possible entre la courbe calculée et les mesures.

4.3. RESULTATS DE LA CAMPAGNE GEOPHYSIQUE

4.3.1. Sondages électriques (SE)

a) Détermination du modèle géoélectrique synthétique

Sur l'ensemble de la zone d'étude, aucun sondage ou forage n'a atteint le substratum granitique après avoir traversé les formations sédimentaires du causse.

En conséquence, les sondages électriques n'ont pu être étalonnés.

Pour atteindre le principal objectif qui est la détermination de la profondeur du substratum granitique, il est primordial de pouvoir contraindre la modélisation 1D des sondages électriques, afin de pallier les phénomènes d'équivalence. L'approche pour

déterminer le modèle géoélectrique applicable sur l'ensemble de la zone d'étude est la suivante :

- d'après les données géologiques disponibles, l'épaisseur des différentes formations sédimentaires constituant le causse de Bonifacio est un paramètre très variable d'un secteur à l'autre. Les contraintes ne pourront donc se faire que sur la résistivité des formations en présence ;
- la résistivité du substratum granitique a été appréhendée en réalisant quelques sondages électriques, atteignant une profondeur d'investigation importante, en bordure du bassin, c'est-à-dire là où l'épaisseur du recouvrement sédimentaire est la plus faible. Ces sondages électriques (SE 24, 7, 10 et 11) montrent que la résistivité vraie des granites est relativement faible et s'établit aux environs de 400 ohm.m (fig. 17) ;
- tous les sondages électriques mettent en évidence la présence d'une unité conductrice située au toit des granites. Pour déterminer la résistivité de ce conducteur, un sondage électrique (SE 11) a été effectué à proximité d'une carrière où cette unité conductrice, représentée par des grès très argileux à litage sigmoïdal (base de la formation de Cala di Labra), est affleurante sur une vingtaine de mètres de puissance.

La résistivité de cette formation serait d'environ 15 ohm.m (fig. 18).

Cette détermination ne repose que sur un seul sondage électrique, sur les autres sondages électriques le phénomène d'équivalence ne permet pas d'appréhender cette résistivité ;

- les différents membres de la formation de Bonifacio, ainsi que la partie supérieure de la formation Cala di Labra, ne peuvent être individualisés en résistivité. Le contraste de résistivité entre ces différentes unités n'est pas assez important.

La résistivité de cette formation s'établit statistiquement entre 200 et 650 ohm.m (moyenne 400 ohm.m).

Les sondages électriques situés sur la bordure du bassin (SE 11, 24, 26, 27, 28 et 14) où la formation de Bonifacio n'est pas représentée, montrent que la résistivité de la partie supérieure de la formation Cala di Labra est plus conductrice (50 à 180 ohm.m).

b) Résultats des modélisations 1D des sondages électriques

Tous les sondages électriques ont donc fait l'objet d'une modélisation 1D (ann. 4) en accord avec le modèle géoélectrique suivant :

- substratum granitique : $\rho = 400 \text{ ohm.m}$
- base de la formation Cala di Labra : $\rho = 15 \text{ ohm.m}$
- partie supérieure de la formation Cala di Labra + ensemble de la formation de Bonifacio : $200 < \rho < 650 \text{ ohm.m}$

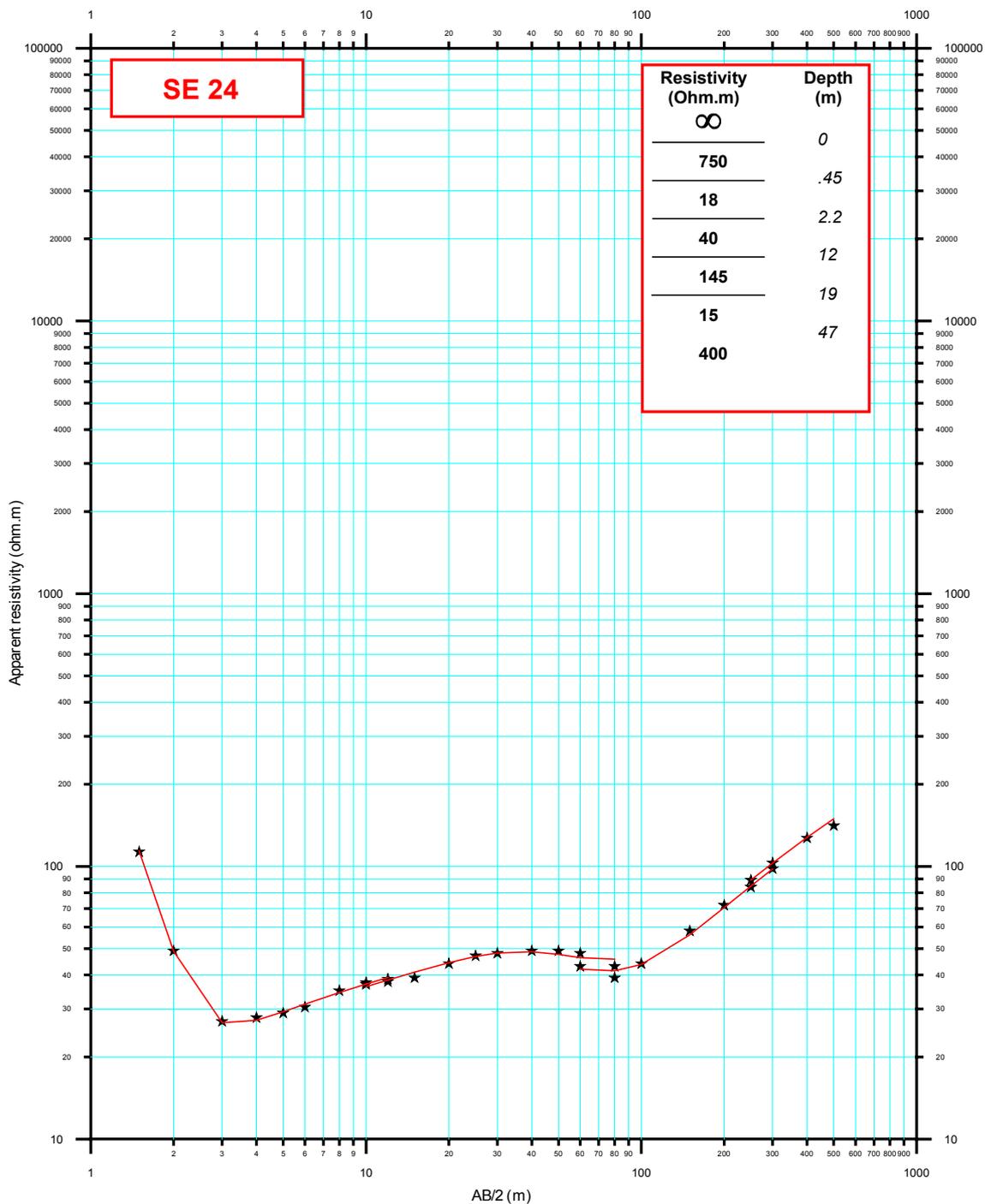


Fig. 17 - Détermination de la résistivité vraie des granites. Sondage électrique SE 24.

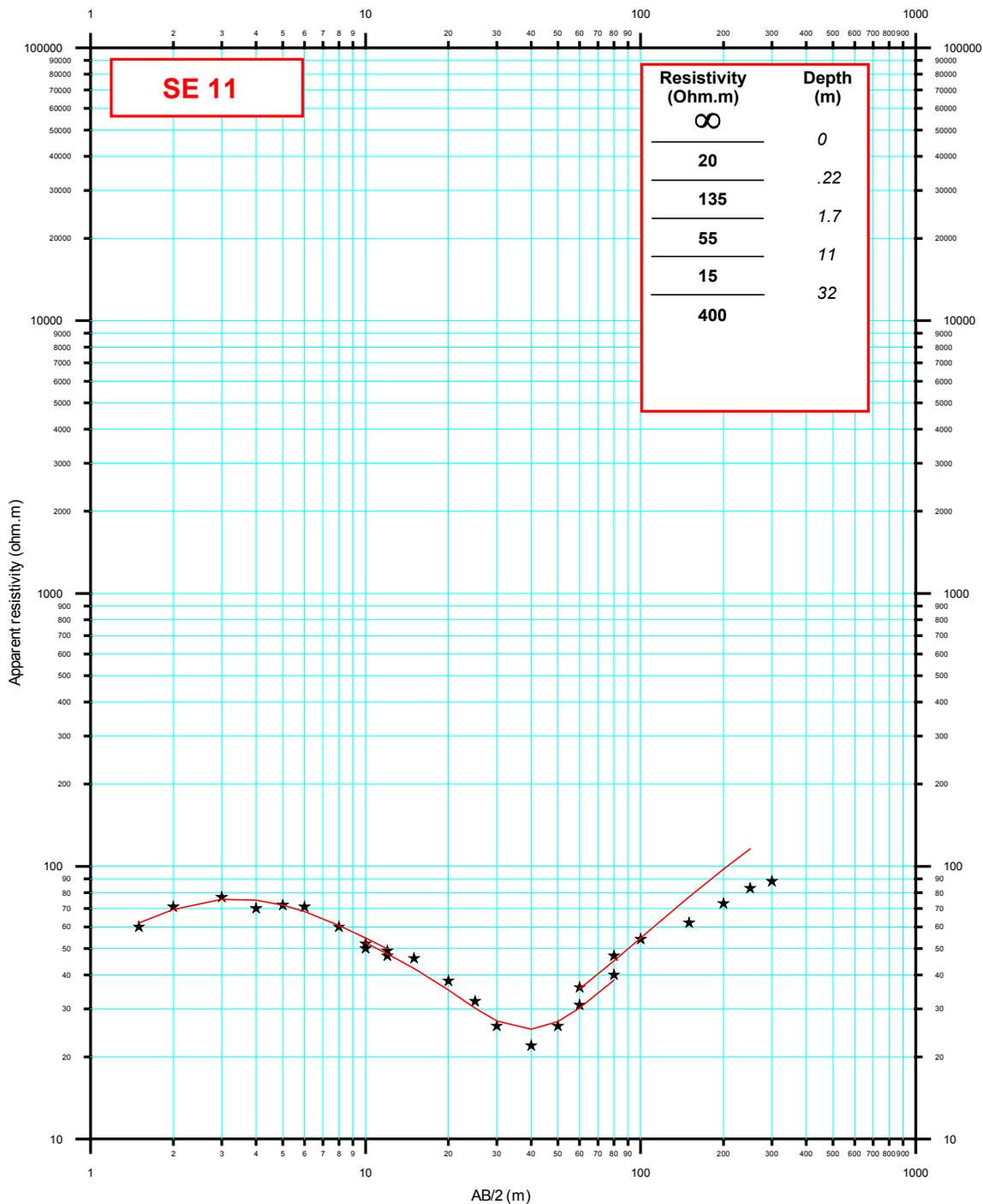


Fig. 18 - Détermination de la résistivité vraie de la base de la formation de Cala di Labra. Sondage électrique SE 11.

Numéro du sondage électrique	X Lambert IV (m)	Y Lambert IV (m)	Z (m)	Profondeur du toit du granite (m)	Profondeur de la base de la formation sédimentaire résistante (m)	Altitude du toit du granite (m)	Altitude de la base de la formation sédimentaire résistante (m)	Épaisseur de la formation sédimentaire conductrice (m)	Résistivité de la Fm Bonifacio + top de la Fm Cala di Labra (ohm.m)	Résistivité du top de la Fm Cala di Labra (ohm.m)
SE01	573000	4121950	72	99	72	-27	0	27	400	
SE02	572740	4120620	52	119	106	-67	-54	13	150	
SE03	573000	4121220	70	109	84	-39	-14	25	250	
SE04	572140	4123830	50	190	116	-140	-66	74	350	
SE05	571910	4124410	76	265	158	-189	-82	107	250	
SE06	573180	4124210	56	83	53	-27	3	30	650	
SE07	570450	4125190	67	66	40	1	27	26	400	
SE08	570080	4124680	72	101	58	-29	14	43	400	
SE09	570000	4124040	90	130	111	-40	-21	19	450	
SE10	569540	4124140	83	56	40	27	43	16	350	
SE11	569490	4125170	80	32	11	48	69	21		55
SE12	570800	4124020	67	197	151	-130	-84	46	350	
SE13	573450	4126100	73	229	81	-156	-8	148	350	
SE14	575060	4126460	52	24	16	28	36	8		250
SE15	569270	4123180	55	80	76	-25	-21	4	300	
SE16	568750	4123310	55							
SE17	573800	4124960	67	38	34	29	33	4	400	
SE18	573330	4123440	67	70	36	-3	31	34	400	
SE19	571680	4125870	87	175	66	-88	21	109	350	
SE20	572950	4124660	70	135	113	-65	-43	22	350	
SE21	572560	4123390	77	237	167	-160	-90	70	500	
SE22	572820	4123770	49	78	67	-29	-18	11	400	
SE23	571540	4123260	82	170	105	-88	-23	65	400	
SE24	569080	4124230	78	47	19	31	59	28		145
SE25	572940	4122480	64	129	97	-65	-33	32	250	
SE26	573720	4122180	75	27	19	48	56	8		180
SE27	574080	4123420	64	127	64	-63	0	63		80
SE28	573560	4124450	65	60	48	5	17	12		110
SE29	571380	4123910	59	263	182	-204	-123	81	220	
SE30	570190	4123460	78	182	171	-104	-93	11	300	
SE31	572110	4121970	77	67	65	10	12	2	225	
SE32	571360	4124520	75	246	160	-171	-85	86	350	

Tabl. 6 - Synthèse des résultats des sondages électriques.

Les résultats de ces modélisations (tabl. 6 et ann. 5) permettent d'appréhender :

- la profondeur du toit du substratum granitique ; afin de mieux imager la morphologie de ce substratum, il est préférable de raisonner en altitudes du toit du substratum ;
- l'épaisseur de la formation conductrice (base de la formation Cala di Labra) ;
- la profondeur de la base de la formation sédimentaire résistante (partie supérieure de la formation Cala di Labra + ensemble de la formation de Bonifacio) qui correspond en fait approximativement à l'épaisseur de cet ensemble, car le recouvrement alluvionnaire et/ou colluvionnaire est généralement de faible puissance. Ce paramètre permet également, par transformation en altitudes, d'imager la morphologie de la base de cette unité résistante.

c) Cartographie et coupes géoélectriques

• Substratum granitique (fig. 19 et 20)

La carte des altitudes du toit du substratum granitique met en évidence deux axes de surcreusement ou paléovallées.

Ces deux paléovallées ont une orientation NE-SW (environ N45°E) sur la partie nord du causse, alors que dans la partie sud cette direction semble s'infléchir pour devenir NNE-SSW.

La morphologie de ce substratum granitique ne présente apparemment pas de structuration E-W qui pourrait être à l'origine de toute une série de vallées sèches qui traversent le causse suivant cette direction.

La maille de mesure n'est cependant peut-être pas assez dense pour mettre en évidence des ondulations de faible longueur d'onde dans le substratum granitique.

La principale paléovallée PV1 est centrée sur les sondages électriques SE 13, SE 05 et SE 29. Dans l'axe de cette paléovallée, la profondeur du substratum varie entre 229 m (SE 13) et 265 m (SE 05). Deux discontinuités, orientées approximativement NW-SE, semblent affecter cette structure, l'une au niveau du SE 19 et l'autre au niveau de SE 04 - SE 21.

La deuxième paléovallée PV2, qui s'étend parallèlement à la première sur la bordure sud-est de la zone d'étude, est moins entaillée. Dans l'axe de cette vallée la profondeur du substratum est de l'ordre de 125 m (SE 2 = 119 m, SE 25 = 129 m et SE 27 = 127 m).

La présence de deux sources sous-marines situées dans le prolongement des deux paléovallées (sources du port de Bonifacio sur l'axe PV1 et source de Cala di Labra sur l'axe PV2) semble confirmer le rôle de drain joué par ces anciennes vallées.

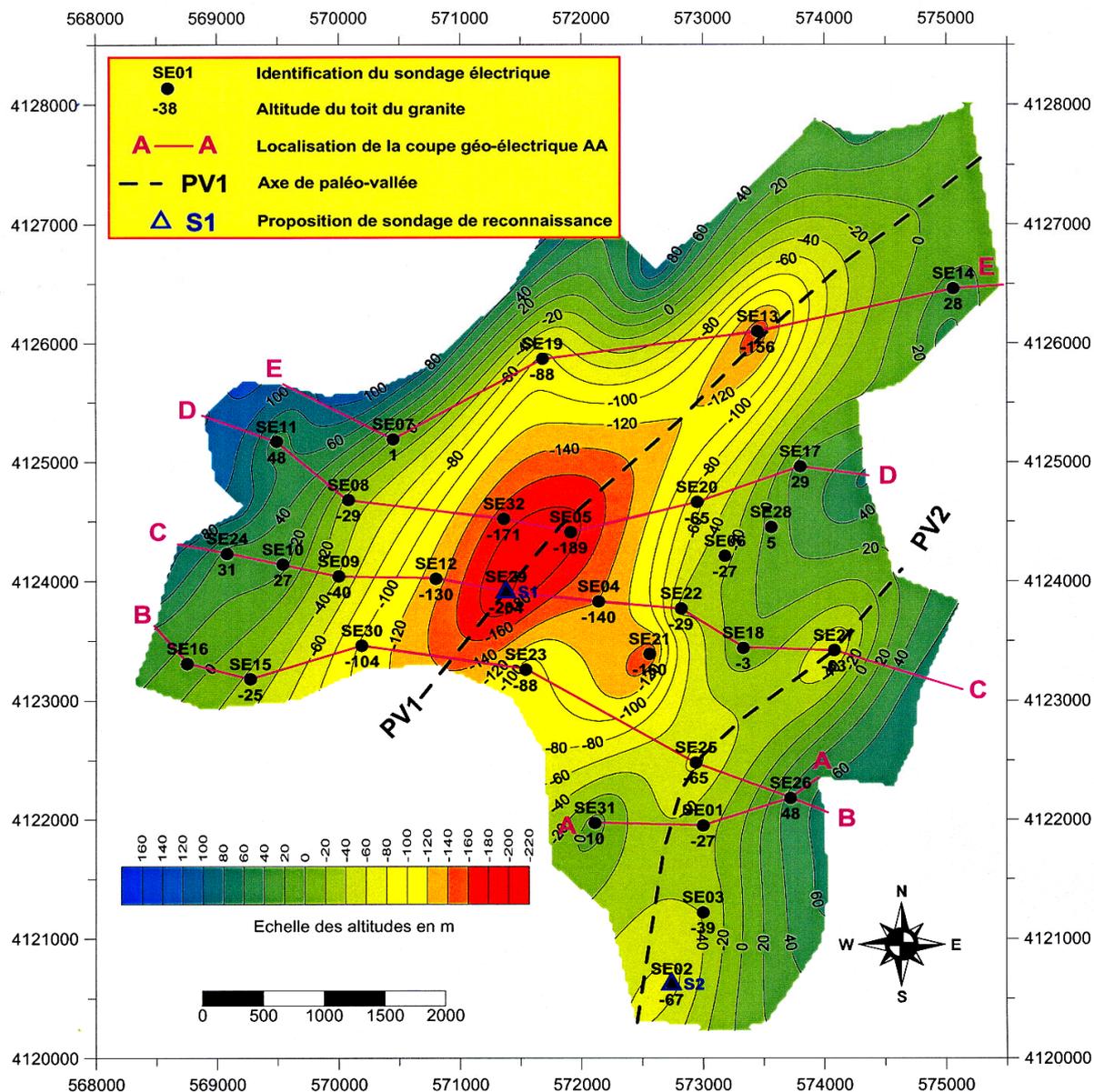


Fig. 19 - Altitudes du toit du substratum granitique.

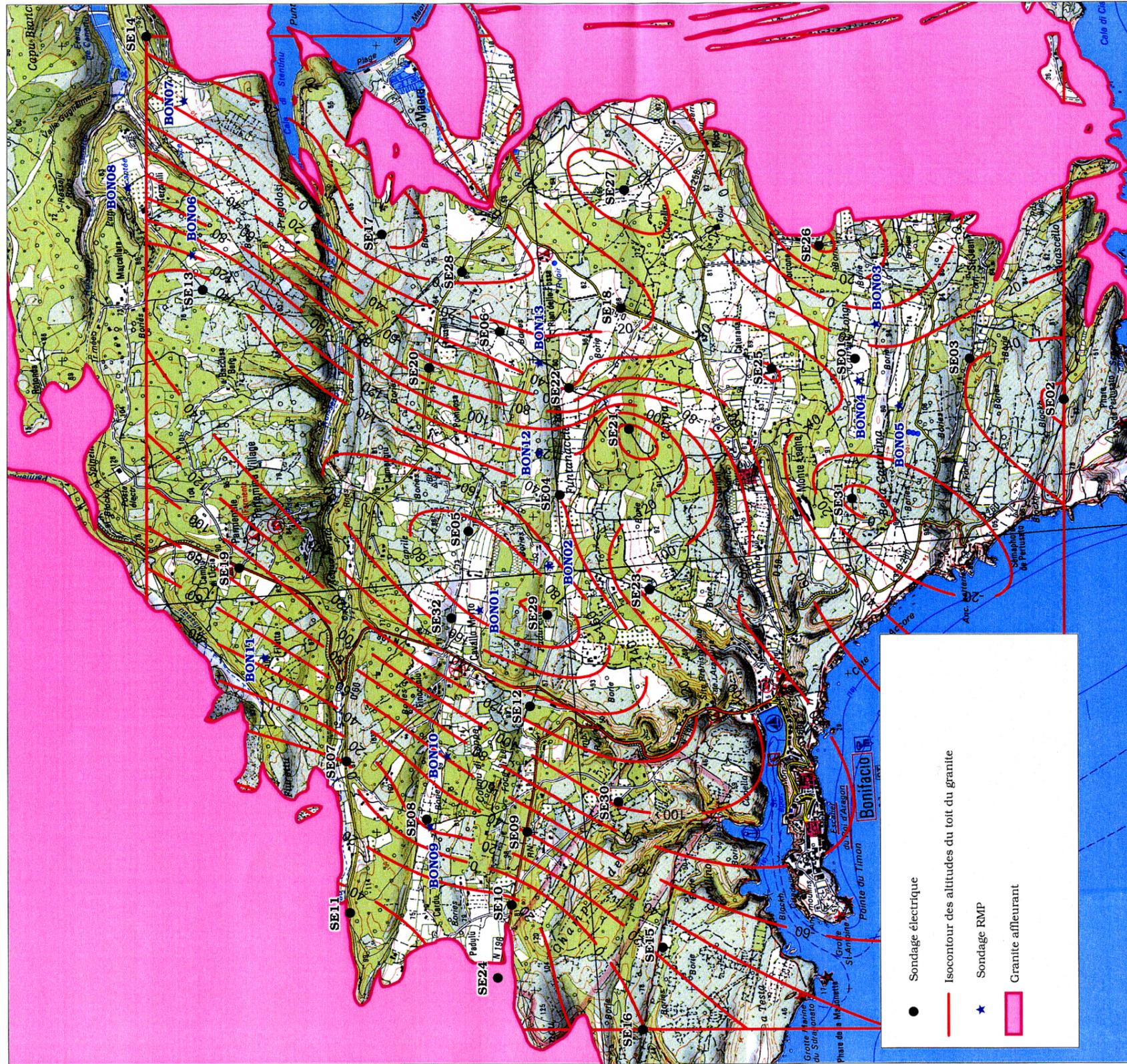


Fig. 20 - Carte des isocontours du substratum granitique.

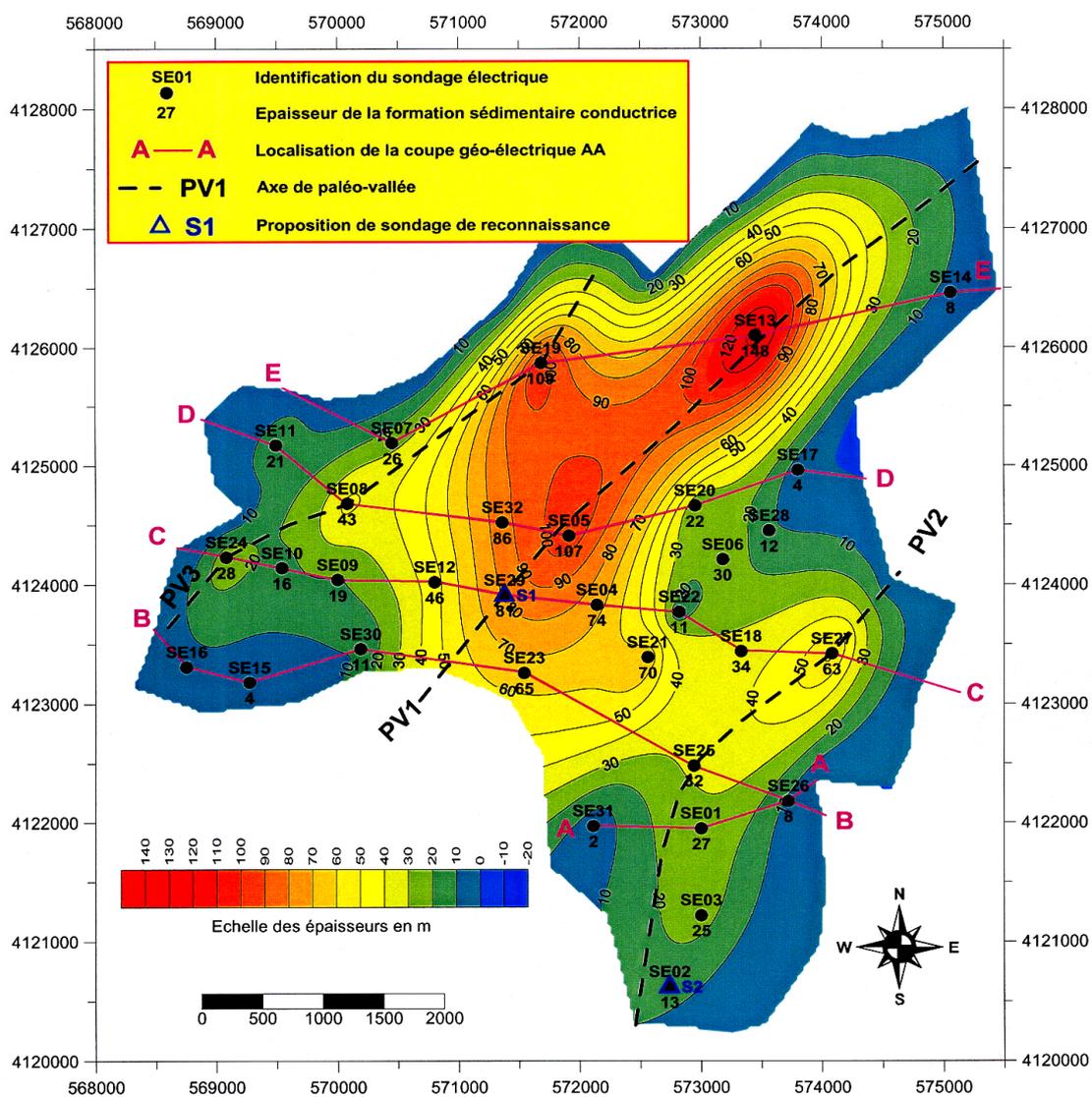


Fig. 21 - Épaisseur de la formation sédimentaire conductrice. Base de la Fm de Cala di Labra.

• **Formation sédimentaire conductrice** (fig. 21 et 22)

L'unité géophysique intitulée « Formation sédimentaire conductrice », correspond à la base de la formation de Cala di Labra qui regroupe les unités U1, U2, U3 et U4. Les unités U1, U2 et U3, formées d'une succession d'arènes, de sables et de grès carbonatés pourraient constituer un aquifère potentiel alors que l'unité U4 (silts gréseux) correspond à un niveau imperméable.

La carte des épaisseurs de cette unité géophysique confirme la présence de deux paléovallées (PV1 et PV2) dans lesquelles le remplissage par des sédiments provenant de l'érosion des granites atteint des épaisseurs importantes. Au niveau de PV1, l'épaisseur maximale de ce remplissage serait de l'ordre de 100 à 150 m (SE 13 = 148 m et SE 05 = 107 m) et au niveau de PV2 d'une soixantaine de mètres.

Elle confirme également la présence d'une structure NW-SE (située au niveau SE 21) qui mettrait en relation PV1 et PV2.

Sur la bordure nord-ouest du causse, cette carte met en évidence la possible existence d'une troisième paléovallée (PV3) passant par les sondages électriques SE 19, SE 08 et SE 24. Cette structure PV3 n'apparaît pas clairement sur la cartographie du toit du substratum granitique probablement du fait de ses faibles dimensions (largeur et profondeur) par rapport à la maille de mesure.

Les zones présentant un maximum d'épaisseur pour cette formation conductrice ne sont pas situées dans les parties aval des paléovallées, mais plutôt dans les parties amont (SE 13 pour PV1, SE 27 pour PV2 et SE 19 pour PV3). L'étude géophysique n'apporte pas d'explication logique à cette situation, si ce n'est une augmentation ponctuelle de la résistivité de la formation conductrice entraînant par phénomène d'équivalence une augmentation de l'épaisseur. Cette hypothèse est confortée par le graphe de la figure 22 qui présente la relation entre la profondeur du toit du granite et l'épaisseur de la formation conductrice. Il montre que certains sondages électriques, comme SE 19 et SE 13 sont situés largement en dehors de la droite de corrélation.

• **Formation sédimentaire résistante** (fig. 23 et 24)

L'unité géophysique intitulée « Formation sédimentaire résistante » correspond à la formation de Bonifacio et à la partie supérieure de la formation de Cala di Labra (unité U5). Cette unité constitue le deuxième aquifère potentiel du causse de Bonifacio.

La carte des altitudes de la base de la formation sédimentaire résistante ainsi que celle des épaisseurs de cette formation confirme la structure du bassin sédimentaire de Bonifacio. Les zones d'épaisseur maximale de la formation résistante se situent dans l'axe des paléovallées PV1 et PV2 avec, cette fois-ci, une décroissance de l'épaisseur de l'amont vers l'aval.

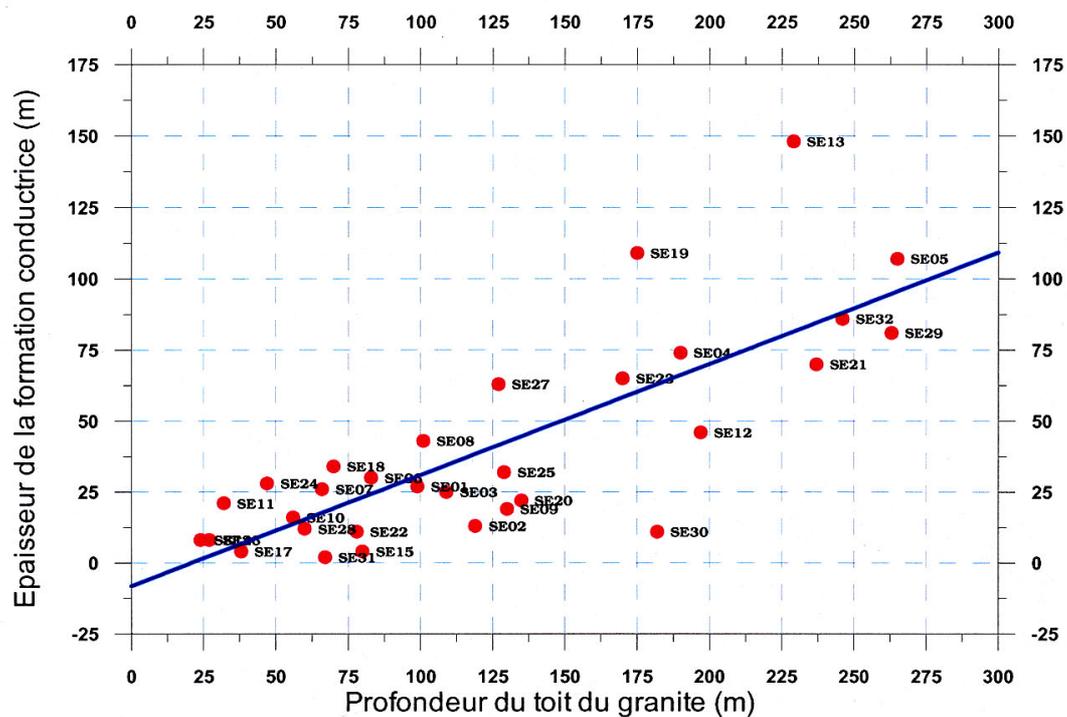


Fig. 22 - Relation entre la profondeur du toit du granite et l'épaisseur de la formation conductrice.

La présence d'un paléochenal reliant PV1 et PV2, et passant par le sondage électrique SE 21, est également confirmée.

La puissance de cette formation, qui constitue l'aquifère supérieur du causse, est relativement importante : plus de 180 m dans la partie aval de PV1 et plus de 105 m dans la partie aval de PV2.

• **Coupes géoélectriques** (fig. 25)

Cinq coupes géoélectriques, orientées approximativement E-W, ont été réalisées en travers du bassin sédimentaire de Bonifacio. Seules les trois principales unités géoélectriques ont été prises en considération. Il s'agit :

- du substratum granitique ;
- de la formation sédimentaire conductrice ;
- de la formation sédimentaire résistante.

Ces coupes permettent de mieux visualiser la géométrie du bassin sédimentaire et notamment :

- l'importance de la paléovallée PV1 visible sur les coupes BB à EE (SE 30, SE 29, SE 05 et SE 13) ;
- la présence de la paléovallée PV2 visible sur les coupes AA (SE 01) et CC (SE 27) ;
- la possible existence d'une troisième paléovallée, de moindre ampleur, mise en évidence sur la coupe CC (SE 24) ;
- l'augmentation de l'épaisseur de la formation conductrice avec la profondeur du toit du substratum granitique.

4.3.2. Sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP)

Sur les 13 sondages RMP effectués sur la zone d'étude, seulement 10 sont exploitables (cf. tabl. 5) et parmi ces 10 sondages, 4 ont atteint une profondeur d'investigation de l'ordre de 100 m et 6 une profondeur d'investigation d'environ 50 m.

En l'absence de toute contrainte (impossibilité d'étalonner les sondages RMP sur des forages renseignés) l'interprétation des sondages RMP a été effectuée par inversion selon une procédure automatique et avec un modèle à nombre de couches égal au nombre de pulses. Les résultats de ces interprétations sont fournis en annexe 6.

La faible densité des points de mesure et leur répartition non régulière ne permet pas de cartographier les paramètres hydrodynamiques des différents aquifères rencontrés. Les résultats seront donc analysés secteur par secteur (cf. tabl. 7).

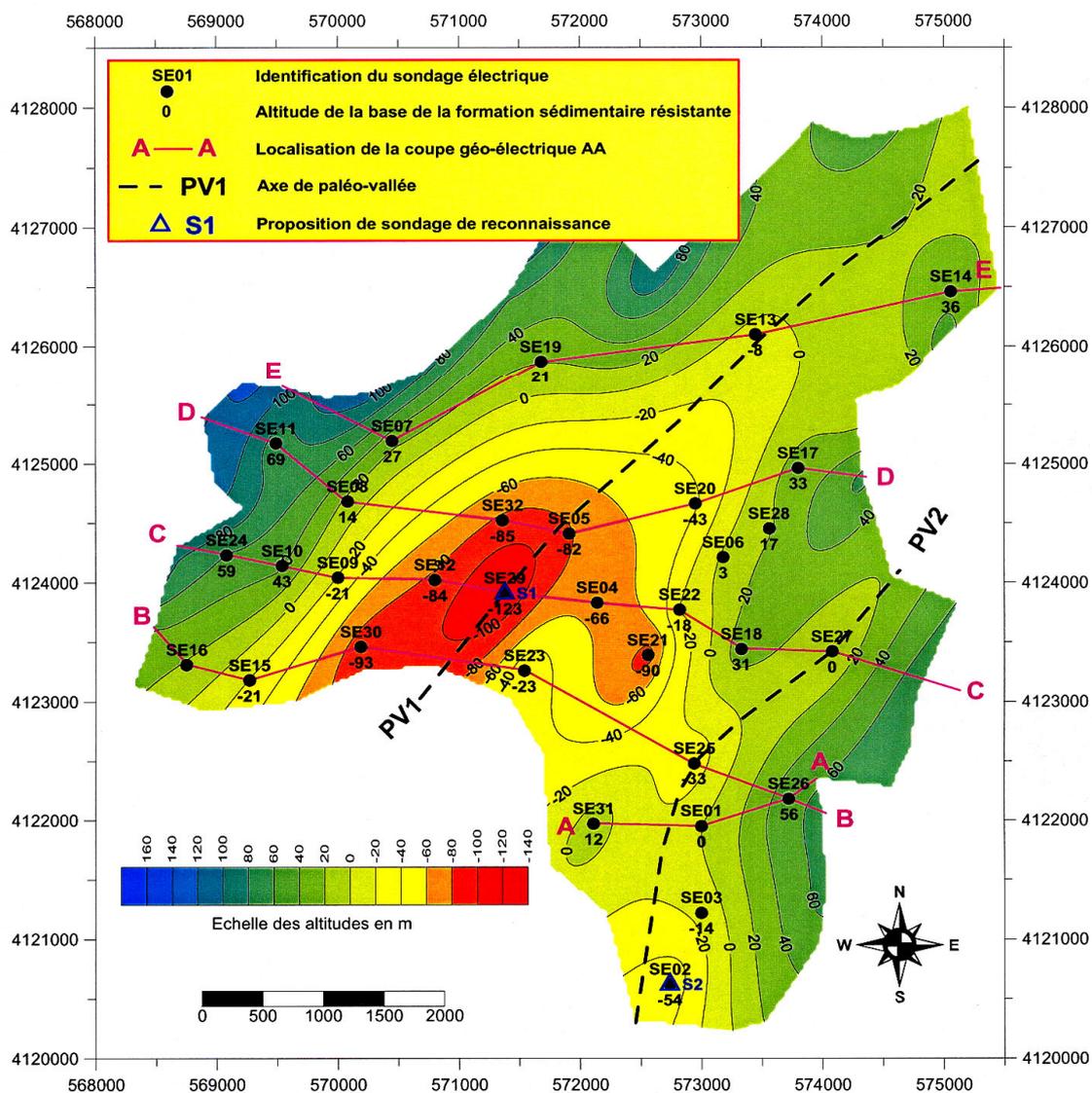


Fig. 23 - Altitudes de la base de la formation sédimentaire résistante. Fm de Bonifacio + partie supérieure de la Fm de Cala di Labra.

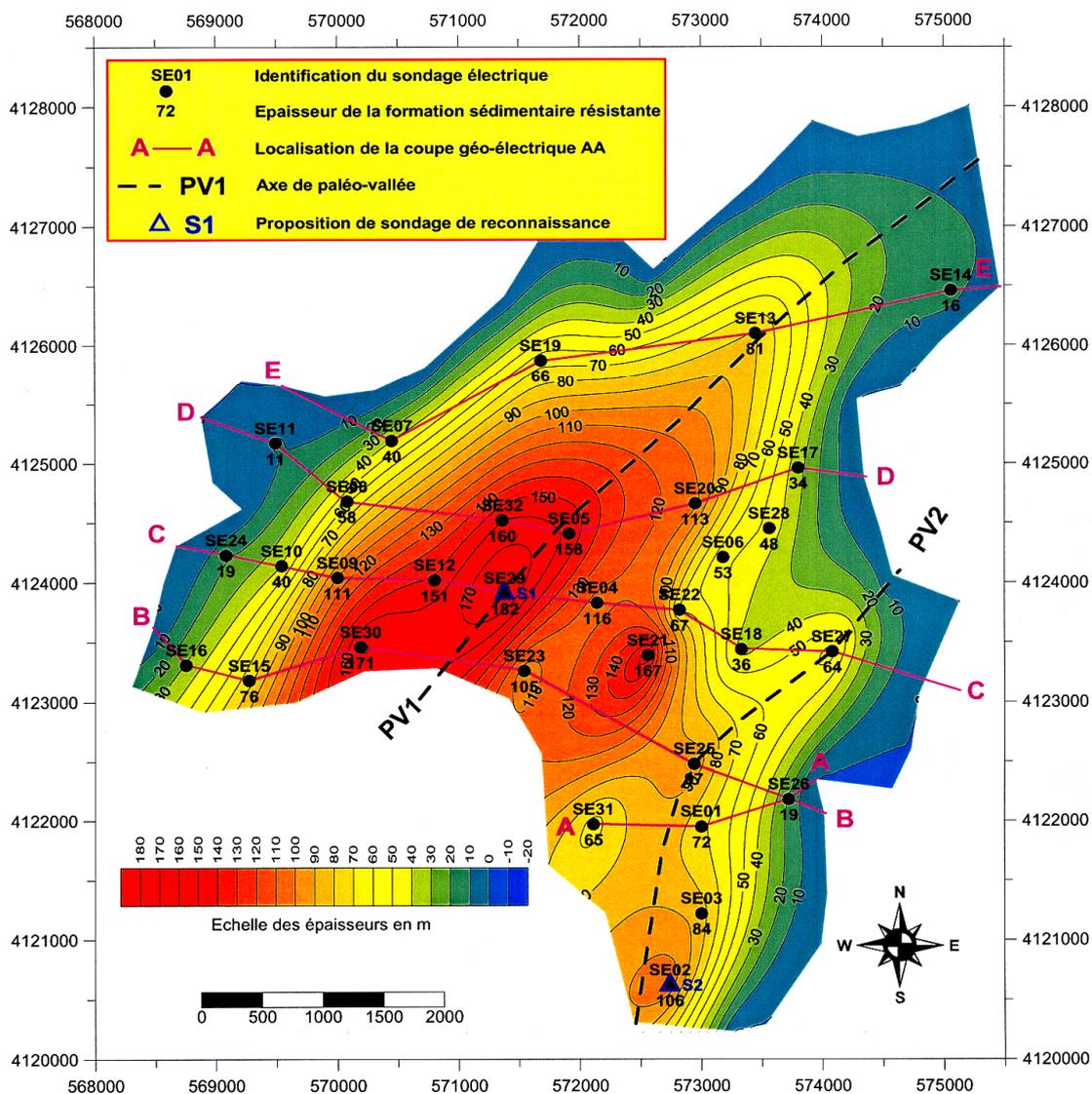


Fig. 24 - Épaisseurs de la formation sédimentaire résistante. Fm de Bonifacio + partie supérieure de la Fm de Cala di Labra.

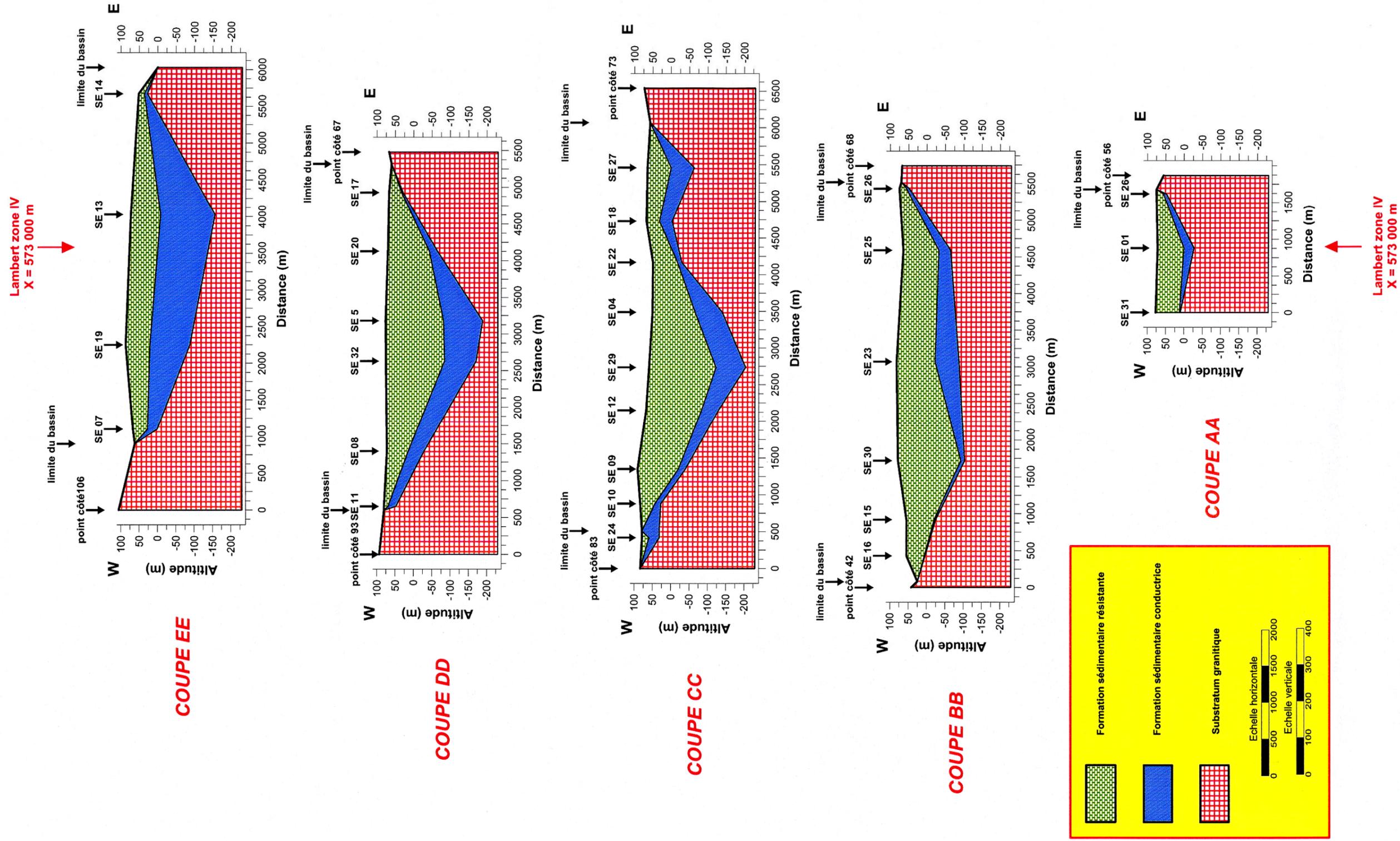


Fig. 25- Coupes géoélectriques.

Sondage RMP	Profondeur d'investigation max. (m)	Aquifère supérieur				Aquifère inférieur			
		Niveau statique (m)	Base de l'aquifère (m)	Teneur en eau max. X (%)	Perméabilité max K (10^{-5} m/s)	Sommet de l'aquifère (m)	Base de l'aquifère (m)	Teneur en eau max. W (%)	Perméabilité max. K (10^{-5} m/s)
BON03	50	7	32	13	13	32	> 50	3	0,05
BON04	50	6	25	20	25	25	> 50	6	0,11
BON06	100	6	36	7	3	36	> 100	2	0,03
BON07	100	10	34	7	3,5	34	75	2	0,03
BON08	100	11	37	8	1,5	37	> 100	1,5	0,03
BON09	100	8	30	7	2,5	30	> 100	0,5	0,01
BON10	50	9	27	12	6	27	> 50	8	0,3
BON11	50	7	27	7	2,5	27	> 50	8	0,5
BON12	50	8	27	7	3,5	27	> 50	2	0,04
BON13	50	5	34	2	1	34	> 50	1,5	0,03

Tabl. 7 - Synthèse des résultats des sondages RMP.

a) Secteur BON 03 et BON 04

Ces deux sondages RMP, distants de 400 m, sont situés à proximité du SE 01. Le BON 04 se trouve dans l'axe de la paléovallée PV2 et le BON 03 sur le flanc est de cette structure. Ils ont mis en évidence la présence de deux horizons aquifères qui, d'après les résultats du sondage électrique SE 01, se situeraient au sein de la formation de Bonifacio.

L'aquifère supérieur (7 à 30 m) possède des caractéristiques hydrodynamiques intéressantes (W : 13 à 20 % et K = 13 à 25×10^{-5} m/s) alors que pour l'aquifère inférieur, la teneur en eau et surtout la perméabilité sont beaucoup plus faibles (W = 3 à 6 % et K = 5 à 11×10^{-7} m/s).

On peut noter qu'au niveau du BON 04, qui est situé dans l'axe de la paléovallée PV2, les paramètres hydrodynamiques des deux aquifères sont meilleurs qu'au niveau du BON 3.

b) Secteur BON 06, BON 07 et BON 08

Ces sondages RMP sont situés à l'extrémité NE de la zone d'étude, dans l'axe et sur le flanc est de la paléovallée PV1. D'après les informations fournies par la coupe géoélectrique EE, ces trois sondages RMP, dont la profondeur d'investigation est de l'ordre de 100 m, auraient atteint la base de la formation de la Cala di Labra et même le substratum granitique (BON 07).

Deux aquifères ont été mis en évidence. Leurs principales caractéristiques hydrodynamiques moyennes sont les suivantes :

- aquifère supérieur : 10 à 35 m, $W = 7 \%$, $K = 1,5 \text{ à } 3,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.
- aquifère inférieur : 35 à ? , $W = 2 \%$, $K = 3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$.

L'aquifère supérieur intéresse exclusivement la formation de Bonifacio, alors que l'horizon inférieur se situe dans la zone de contact entre la formation résistante et la formation conductrice.

Le sondage BON 07 montre qu'au-delà de 75 m de profondeur, cote qui correspond au toit du substratum granitique défini par SE, la teneur en eau est inférieure à 0,5 %.

c) Secteur BON 09, BON 10 et BON 11

Ces sondages RMP sont situés sur le flanc W de la paléovallée PV1, à proximité des sondages électriques SE 08 et SE 07.

Dans ce secteur, le niveau statique de l'aquifère supérieur (formation de Bonifacio) s'établit aux environs de 8 m, et sa base fluctue entre 27 m et 30 m. Les caractéristiques hydrodynamiques moyennes de cet aquifère sont :

$$W = 7 \text{ à } 12 \% \text{ et } K = 2,5 \text{ à } 6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

L'aquifère inférieur mis en évidence au niveau de BON 10 et de BON 11 intéresse également la formation de Bonifacio mais, contrairement aux autres secteurs, les paramètres hydrodynamiques sont plus élevés ($W = 8 \%$ et $K = 3 \text{ à } 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$).

Dans la zone de BON 09 l'aquifère inférieur correspond (d'après les sondages électriques) essentiellement à la base de la formation de Cala di Labra et ses caractéristiques hydrodynamiques sont relativement défavorables ($W = 0,5 \%$ et $K = 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$).

d) Secteur BON 12 et BON 13

BON 12 et BON 13 sont localisés sur le flanc est de la paléovallée PV1, dans la zone des sondages électriques SE 24 et SE 22.

Deux aquifères, situés tous les deux dans la formation de Bonifacio, ont été mis en évidence. Leurs principales caractéristiques hydrodynamiques moyennes sont les suivantes :

- aquifère supérieur : 6 à 30 m, $W = 2 \text{ à } 7 \%$, $K = 1 \text{ à } 3,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
- aquifère inférieur : 30 à ? , $W = 2 \%$, $K = 3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$.

e) Synthèse des résultats de la RMP

La faible densité des points de mesure RMP n'a pas permis d'investiguer la totalité du causse de Bonifacio et, par conséquent, la caractérisation des différents aquifères en présence n'est que partielle. Les principales informations apportées par la RMP sont les suivantes :

- Il existerait apparemment deux aquifères distincts au sein de la formation de Bonifacio :

- un aquifère supérieur avec les caractéristiques hydrodynamiques moyennes suivantes :
 - . niveau statique : 5 à 10 m,
 - . épaisseur : 25 m,
 - . teneur en eau : 7 %,
 - . perméabilité 3×10^{-5} m/s.

Dans le secteur BON 03 - BON 04, les paramètres hydrodynamiques de cet aquifère sont plus élevés ($W = 13$ à 21 % et $K = 13$ à 30×10^{-5} m/s).

- un aquifère inférieur (formation de Bonifacio + sommet de la formation de Cala di Labra) possédant des caractéristiques hydrodynamiques moins favorables et beaucoup plus variables d'un site à l'autre :

- . teneur en eau : 0,5 à 8 %,
- . perméabilité : 1 à 50×10^{-7} m/s.

- Les quelques sondages RMP ayant atteint l'aquifère de la formation de Cala di Labra (formation conductrice) montrent que les paramètres hydrodynamiques sont relativement défavorables :

- . teneur en eau : < 2 %,
- . perméabilité : $< 3 \times 10^{-7}$ m/s ;

- Le seul sondage RMP ayant atteint le substratum granitique (BON 07) montre que dans ce secteur, le système fissural des granites ne serait pas aquifère.

5. Conclusions et perspectives

La caractérisation géométrique et hydrodynamique de l'hydrosystème du causse de Bonifacio, a été effectuée à partir d'une synthèse des connaissances géologiques concernant le bassin sédimentaire (formations litho-stratigraphiques, géométrie supposée), des connaissances hydrogéologiques (formations aquifères, propriétés hydrodynamiques, exutoires, bilan hydrologique et inventaire des forages existants) ainsi qu'une reconnaissance géophysique (sondages électriques et sondages RMP).

Les investigations géophysiques (sondages électriques) ont permis de répondre aux questions concernant la morphologie du substratum et l'existence de paléochenaux entaillant le toit du granite. La morphologie du substratum granitique est bien ébauchée ; la présence de trois paléovallées, dont une majeure, entaillant le toit du granite, ont été mises en évidence. Ces paléovallées sont orientées NNE-SSW.

Le remplissage sédimentaire du bassin est constitué de deux unités principales à savoir la formation de Cala di Labra et la formation de Bonifacio. Deux unités géoélectriques présentant un contraste de résistivité important (> 10) ont été mises en évidence à l'aide des sondages électriques. L'unité résistante correspond à la formation de Bonifacio à laquelle est intégré le sommet de la formation de la Cala di Labra. L'unité conductrice est représentée par la partie inférieure de la formation de la Cala di Labra. Le niveau marneux séparant ces deux unités et conditionnant la présence de deux réservoirs n'a pu être caractérisé par sondages électriques (épaisseur trop faible compte tenu de sa profondeur). La puissance et l'extension latérale de ce niveau marneux n'ont pu être confirmées à l'aide des sondages électriques.

De plus, le remplissage sédimentaire atteint une épaisseur de 265 m (158 m pour l'unité résistante et 107 m pour l'unité conductrice) dans l'axe de la principale paléovallée. Cette épaisseur correspond à l'ordre de grandeur pré supposé à partir des observations géologiques de terrain et de la morphologie préalablement supposée du substratum. L'ordre de grandeur de la puissance des deux formations aquifères est ainsi connu.

Deux horizons aquifères sont censés exister à partir des données géologiques (lithologiques) et du peu de données hydrogéologiques. Trois horizons aquifères ont été mis en évidence à partir des sondages RMP. L'aquifère principal, situé dans la tranche 0-40 m (formation de Bonifacio) possède des caractéristiques hydrodynamiques moyennes suivantes : teneur en eau = 7 % et perméabilité = 3×10^{-5} m/s. Les deux autres aquifères (base de la formation de Bonifacio et formation de la Cala di Labra) ont des caractéristiques hydrodynamiques plus défavorables : teneur en eau = 2 % et perméabilité = 3×10^{-7} m/s. Ces informations donnent des ordres de grandeur ; elles devraient être validées à partir d'un ou deux forages de calage.

Cependant un certain nombre de questions reste sans réponse au terme de cette étude :

- Quelle est l'importance des apports latéraux en provenance du socle situé au NNW du causse ?
- Quels sont les paramètres hydrodynamiques et leur variabilité (porosité, transmissivité...) ?
- Quelle est l'importance de la zone d'exutoire en mer au niveau des Bouches de Bonifacio ?

• Perspectives

Au terme de cette étude, il apparaît qu'un certain nombre de travaux complémentaires s'avèrent nécessaires pour caractériser plus précisément ce bassin sédimentaire tant du point de vue de sa géométrie que du point de vue de ses caractéristiques hydrodynamiques afin d'évaluer les potentialités en terme de ressource d'eau souterraine :

- Reconnaissance par forage profond atteignant le substratum (250 à 300 m)]. Cet ouvrage permettrait d'une part d'étalonner les sondages électriques et d'autre part de procéder à une étude géologique détaillée des carottes ou cuttings (comparaison des observations des formations à l'affleurement et au niveau du forage ; analyse sédimentologique, minéralogique, pétrographique, datation) ainsi qu'à des essais de pompage pour caractériser les propriétés hydrodynamiques des aquifères. Deux propositions de sondage de reconnaissance sont données au vu des résultats des sondages électriques. La première se situe dans l'axe de la paléovallée PV1 au niveau du SE 29 et la deuxième dans l'axe de PV2 sur le sondage électrique SE 02.
- Caractérisation hydrochimique et isotopique des eaux (prélèvements au niveau de points de surface, de forages AEP et particuliers) permettrait d'identifier une alimentation du causse par les eaux du socle (alimentation latérale).
- Campagne piézométrique à partir des forages individuels pour déterminer si possible des axes de drainage souterrains et des zones de différents gradients hydrauliques.
- Implantation de piézomètres à proximité du ou des forages implantés afin de suivre les évolutions piézométriques des deux aquifères (mise en évidence de la drainance) en continu (sonde pression et enregistreur).
- Détermination de la zone d'exutoires sous-marins à partir d'interprétation de photos aériennes infrarouges et des profils de salinité au niveau des Bouches de Bonifacio.
- Finalement, une densification des sondages électriques apporterait un complément d'information dans certaines zones importantes comme :
 - . la partie amont de la paléo-vallée PV1 entre SE 05 et SE 13 et au-delà de SE 13,
 - . la zone de connexion entre PV1 et PV2, c'est-à-dire entre SE 25, SE 21 et SE 23,
 - . sur la bordure NW du causse pour confirmer la présence de la paléovallée PV3.

Références bibliographiques

- Archie (1942) - The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Petroleum Technology*.
- Bellon H. (1976) - Séries magmatiques néogènes et quaternaires du pourtour de la Méditerranée occidentale, comparées dans leur cadre géochronométrique. Implications géodynamiques. Thèse d'État, univ. Paris XI, Orsay, 367 p.
- C.G.G. (1972) - Commune de Bonifacio, étude hydrogéologique par sondages électriques dans la vallée du Canelli, Compagnie Générale de Géophysique, 9 p. planches.
- Chang *et al.* (1997) - Effective porosity, producible fluid and permeability from NMR logging. *The Log Analyst*, March-April, p. 60-72.
- Daum *et al.* (1997) - Rapport BRGM
- Ferrandini M., Galloni F., Babinot J.-F. et Margerel J.-P. (2002). - La plate-forme burdigalienne de Bonifacio (Corse du Sud) : microfaune (foraminifères, ostracodes) et paléoenvironnements. *Revue de Micropaléontologie*, 45, 1, p. 57-68.
- Ferrandini J., Gattacceca J., Ferrandini M., Dieno A., Janin M.C. (2002) - Chronostratigraphie des dépôts oligo-miocènes de Corse et implications géodynamiques (Soumis B.S.G.F.)
- Galloni F., Cornee J.-J., Rebelle M. et Ferrandini M. (2001) - Sedimentary anatomies of early Miocene coral reefs in South Corsica (France) and South Sardinia (Italy). *Géologie méditerranéenne*, XXVIII, 1-2, p. 73-77.
- Gattacceca J. (2001) - Cinématique du bassin liguro-provençal entre 30 et 12 Ma. Implications géodynamiques. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, Mémoires des Sciences de la Terre, 41, 299 p.
- Gilly E. (2001) - Etude préalable sur le drainage des karsts littoraux (A. Bouches-du-Rhône et Var, entre l'étang de Berre et Toulon, B. Corse : régions de Bonifacio et Saint-Florent). Document provisoire. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.
- Jakni B., Poupeau G., Sosson M., Rossi P., Ferrandini J. et Guennoc P. (2000) - Dénudation cénozoïque en Corse, une analyse thermochronologique par traces de fission sur apatites. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 331, p. 775-782.
- Kenyon (1997) - Petrophysical Principles of Applications of NMR Logging. *The Log Analyst*, March-April, p. 21-43.

- Legchenko et Shushakov (1998) - Inversion of surface NMR data. *Geophysics*, vol. 63, n° 1, p. 75-84.
- Legchenko *et al.* (1997) - Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 2, n° 2, p. 173-190.
- Monleau C., Arnaud M., Negretti B. et Rossi F. (1996) - Précisions stratigraphiques sur le Miocène inférieur et moyen du Sud de la Corse et de la Sardaigne. - *Géologie méditerranéenne*, 23, 3-4, p. 235-241.
- Ottaviani-Spella M.-M., Girard M., Rochette P., Cheilletz A. et Tinon M. (2001) - Le volcanisme acide burdigalien du Sud de la Corse : pétrologie, datation K-Ar, paléomagnétisme. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 333, p. 113-120.
- Orszag-Sperber F. et Pilot M.-D. (1976). - Grands traits du Néogène de Corse. *Bull. Soc. géol. France*, XVIII, 5, p. 1183-1187.
- Trushkin *et al.* (1994) - The potential of a noise-reducing antenna for surface NMR groundwater surveys in the earth's magnetic field. *Geophys. Prosp.*, vol. 42, p. 855-862.
- Shirov *et al.* (1991) - New direct non-invasive groundwater detection technology for Australia. *Expl. Geophys.*, vol. 22, p. 333-338.

ANNEXE 1

Inventaire des forages implantés par M.Clementz de Porto Vecchio

Numéro	Dénomination	Profondeur	Débit (m ³ /h)	Remarques
1	TARALO-2	85	1,5	Socle
1	TARALO-3	103	0,7	Socle
1	TARALO-1	80	1,5	Socle
2	GERLAIN	45	6	Socle
3	BECAUD	35	0,5	Socle
4	WIBOUX	0	1	Socle
5	BERLIN-2	45	3	Socle
5	BERLIN-1	45	4	Socle
6	LEUPERDRIX	40	12	
7	ROLLIN-2	100	0,4	Socle
7	ROLLIN-1	40	2	Socle
8	ACHCAR-2	53	0,3	Socle
8	ACHCAR-3	35	0,4	Socle
8	ACHCAR-1	50	0,25	Socle
9	TRAVI	117	0,2	Socle
10	MICHEL	103	0	Socle
11	PERRIN	140	0	Socle
12	CASTELDOU	60	6	Miocène
13	MASUREL	40	7	Socle
14	LUCIONI	103	0,4	Miocène
15	CUCCI	90	3	Miocène
16	LORENZ	127	3	Miocène
18	CHIOCCA	20	10	Miocène
19	D'ORTOLI	80	4,2	Miocène
20	GIREDI	58	6	Miocène
21	MEROU	60	3	Miocène
22	DELGUIDICE	90	1,5	Miocène
23	FILIPEDU	70	1,5	Miocène
24	TOPIN	70	4	Miocène
25	ANDREANI	68	2,7	Miocène

ANNEXE 2

Inventaire des forages de la BSS

Caractérisation géométrique et hydrodynamique du causse de Bonifacio (Corse)

N° ordre	N° BSS	X	Y	Z	Prof	Diamètre ouvrage	Prof Eau sol	Type	Litho	Remarque
1	11276X0002	565,94	126,3	20	81			Eau	Granite altéré et granite	Pas venue d'eau
2	11276X0003	565,93	126,4	18	58			Eau	Granite altéré et granite	Pas venue d'eau
3	11276X0004	565,81	126,3	15	54			Eau	Quaternaire (argile et sable) (12 m), granite rose fracturé (42 m)	Pas venue d'eau
4	11276X0005	565,83	126,4	12	50			Eau	Granite rose (5 m), granite altéré (45 m)	Pas venue d'eau
5	11276X0006	569,46	133,1	110	60			6 Eau	Cailloutis, sable argile, granite altéré (11 m), granite altéré gris foncé (25 m), granite gris (24 m)	AEP
6	11276X0007	569,28	124,70	80,00	31,00		25,00	Eau	Terrasse (1,4 m), bloc calcaire (0,6 m), argile, bloc, argile, bloc assez dur calcaire (6,10 m), argile et arène (1,5 m), argile et bloc(1,5 m), arène argileuse (1,5 m), arène argileuse, venue d'eau (2 m), arène assez dur (7 m)	
7	11276X0008	570,16	125,21	65,00	15,00	163,00		Eau	Terre noire avec sable d'arène (5 m), arène granitique (1,5 m), arène argileuse (1,5 m), sable fin, roux (2 m), granite fracturé (5 m)	F2
8	11276X0009	570,32	125,27	60,00	19,90	163,00	1,61	Eau	Calcaire (5,6 m), arène granitique (7 m), granite fissuré et altéré (7,4 m)	F1
9	11276X00010	570,43	125,26	60,00	19,00	163,00	0,88	Eau	Calcaire gréseux (5 m), calcaire gris, argileux (4 m), calcaire blanc (9,5 m)	F3
10	11276X00011	571,13	124,59						Sondage électrique	
11	11273X0001	577,20	143,22	2,00	9,00	168,00	3,24	Eau	limon sablo-argileux (1,5 m), sable graveleux argileux (0,6 m), sable graveleux (1,6 m), sable graveleux roux propre (2,5 m), sable moyen et grossier, gris (2 m), granite altéré (0,5 m)	
12	11273X0002	575,93	144,10	15,50	17,00	140,00	2,10	Eau	Terre végétale (1,8 m), gros galets et blocs de granite avec sable (4,7 m), gros galets et blocs avec sables roux fins (2,2 m), galets moyens à gros avec sable gris (5,3 m), roche granitique décomposée (3 m) à 14 m, de profondeur;	
13	11273X0003	576,32	142,87	9,00	13,70		3,50	Eau	Terre végétale (0,9 m), sable argileux compact (2,7 m), sable argileux (1,4 m), sable, graviers et qq galets (1,8 m), sable et graviers argileux (4,2 m), arène (1,6 m), granite (1,1 m)	
14	11273X0004	575,74	143,78	13,00	14,65		2,30	Eau	Terre végétale argileuse (1 m), sable grossier (1,2 m), sable argileux avec qq galets (0,85 m), sable, graviers et galets (3,9 m), granite très altéré (4,05 m), granite altéré (3,65 m)	
15	11273X0005	575,74	143,93	16,00	3,50			Carrière	Alluvions quaternaires (graviers et sables)	
16	11273X0006	576,34	142,77	7,00	7,80			Eau		Débit prélevé 60 m³/h

Caractérisation géométrique et hydrodynamique du causse de Bonifacio (Corse)

17	11273X0008	575,88	144,10	15,00	7,50		2,50	Eau	Blocs, sables et graviers (3 m), blocs dans sables et graviers argileux (3,1 m) et granite altéré (1,4 m)	Essai pompage de 24 m ³ /h à 45 m ³ /h débit critique proche de 35 m ³ /h K = 1,5 E-3 m/s
18	11273X0009	577,38	143,25	2,00	8,60		3,10	Eau	Alluvions quaternaires (graviers et sables)	Puits
19	11273X0011	574,78	126,60	0,50	10,00			Eau		
20	11273X0013	574,71	126,66	2,00	9,40			Eau		
21	11273X0014	574,71	126,61	2,00	25,00		0,40	Eau	Quaternaire (vase noire coquillier à végétaux) (5,3 m), sable blanc quaternaire (3,3 m), Miocène : grès grossier (9,4 m), marne jaune à galets (6,3 m), marne brune (0,7m)	
22	11282x0001	569,92	122,33	3,00				Cavité		Puits Saint Barthélémy
23	11282x0002	571,45	122,48	20,00	15,50	114,00	0,51	Eau	Vase noire (6,2 m), sable vaseux (2,1 m), bloc calcaire (0,8 m), calcaire friable avec passage sableux (6,4 m)	Puits Arenaggio
24	11282x0003	571,40	122,53	25,00	15,75	450,00		Eau	Vase noire (0,6m), blocs calcaire et sable vaseux (1,6 m), sable vaseux (1,1 m), sable argileux (0,3 m), sable vaseux avec coquillages (1,65 m), sable blanc (0,65 m), sable calcaire et blocs (9,95 m) (Quaternaire et Pliocène)	Puits complexe bord de la D58
25	11282x0004	571,13	122,58	10,00	15,50		2,30	Eau	Éboulis calcaire terreux (9,20 m), Calcaire gréseux alternant avec couches de calcaire friable (6,3 m)	
26	11282x0005	570,69	122,84	20,00	16,00	450,00	3,02	Eau	Terre noire compacte avec débris calcaire (1,9 m), vase noire compact sableuse (0,6 m), bloc calcaire et sable jaune fin (0,5 m), sable vaseux et bloc calcaire (4,5 m), bloc calcaire et sable (4,5 m), calcaire dur (1 m), sable blanc légèrement argileux (0,4 m), calcaire dur (0,8 m), sable grossier (0,8 m), calcaire dur (1 m)	
27	11282x0006	571,02	122,44	5,00	7,50	116-96	3,00	Eau	Sable et terre végétale (0,5 m), calcaire sableux très fin peu consolidé (7m)	
28	11282X0007	570,96	122,43	2,00				Eau		Débit prélevé 70 m ³ /h
29		568,71	123,28	45,00	148,00			Eau	Formation de Bonifacio et arènes granitiques	
30	11283X0001	572,38	122,64	70,00				Cavité	Grotte de Saint-François	

ANNEXE 3

Organisation pratique de la campagne géophysique

- **Volume des travaux**

Pendant les vingt jours d'intervention sur le terrain, 32 sondages électriques et 13 sondages RMP ont été réalisés sur l'ensemble de la zone d'étude. Les tableaux 1 et 2 présentent un récapitulatif des principales caractéristiques de ces sondages électriques et de ces sondages RMP.

- **Personnel et calendrier**

Pour les sondages RMP, les acquisitions sur le terrain ont été effectuées par F. Mathieu et F. Le Jeune, géophysiciens de l'unité ARN/MRS. J.M. Baltassat, expert en RMP, a passé deux jours sur le terrain pour orienter et optimiser les acquisitions.

Les sondages électriques ont été réalisés par F. Mathieu et F. Le Jeune, assistés de deux techniciens du BRGM, G. Richalet et K.M. Nay. L'appui de ces deux techniciens est dû à l'impossibilité de recruter de la main d'œuvre locale.

La campagne de mesure s'est déroulée du 26/03 au 22/04/2002, amené et repli compris, soit un total de 20 jours d'acquisition (10 jours pour la RMP et 10 jours pour les sondages électriques).

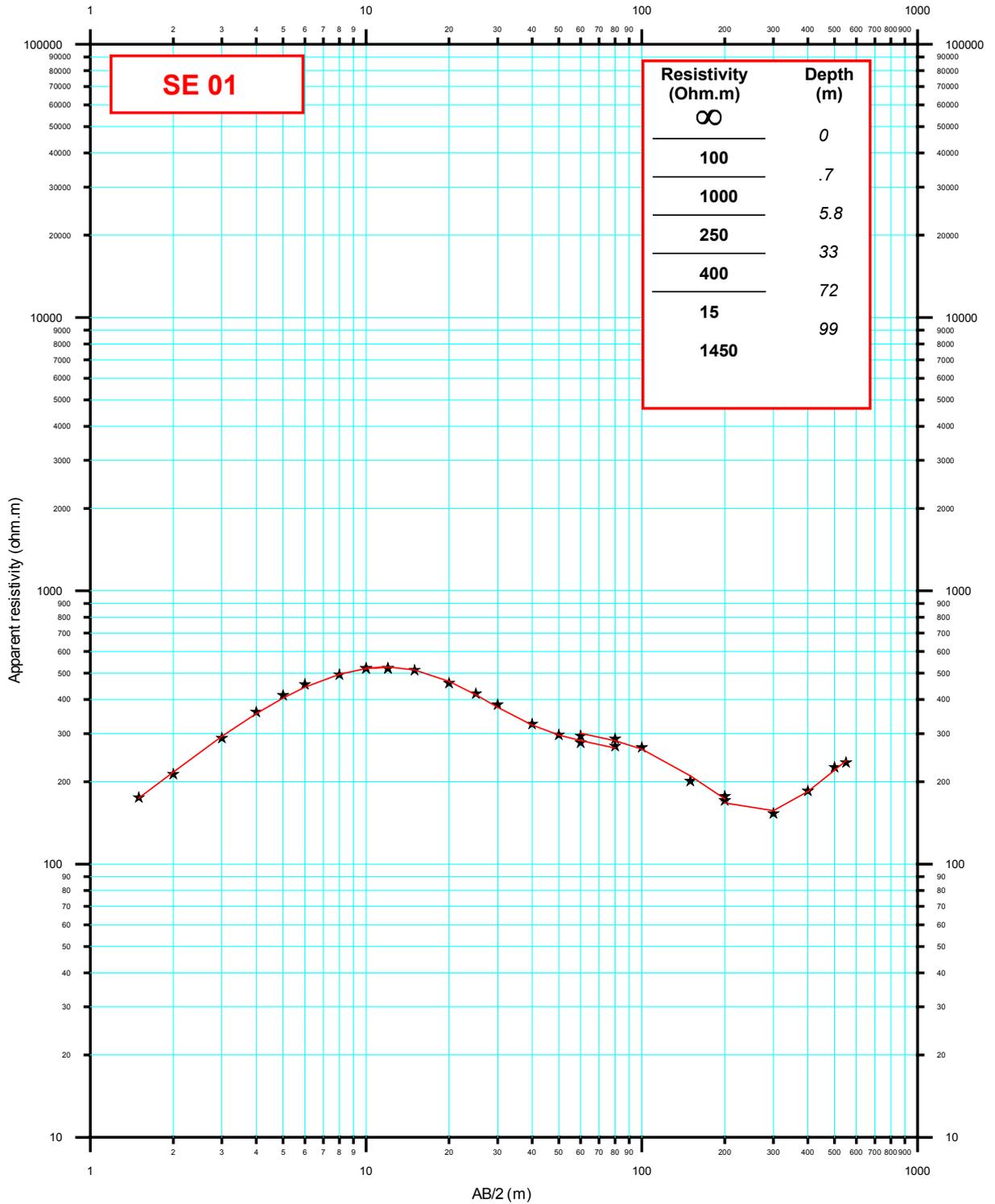
- **Équipements**

- Sondages électriques :
 - 1 Syscal R2 IRIS Instrument,
 - 1 convertisseur 250 W, IRIS instrument,
 - 3 talkies walkies,
 - 3 000 m de câble,
 - matériel annexe pour les opérations électriques ;
- RMP :
 - 1 système RMP IRIS-BRGM NUMIS+,
 - 1 magnétomètre à proton,
 - 600 m de câble d'injection et de mesure ;
- 2 micro-ordinateurs portables ;
- 2 véhicules.

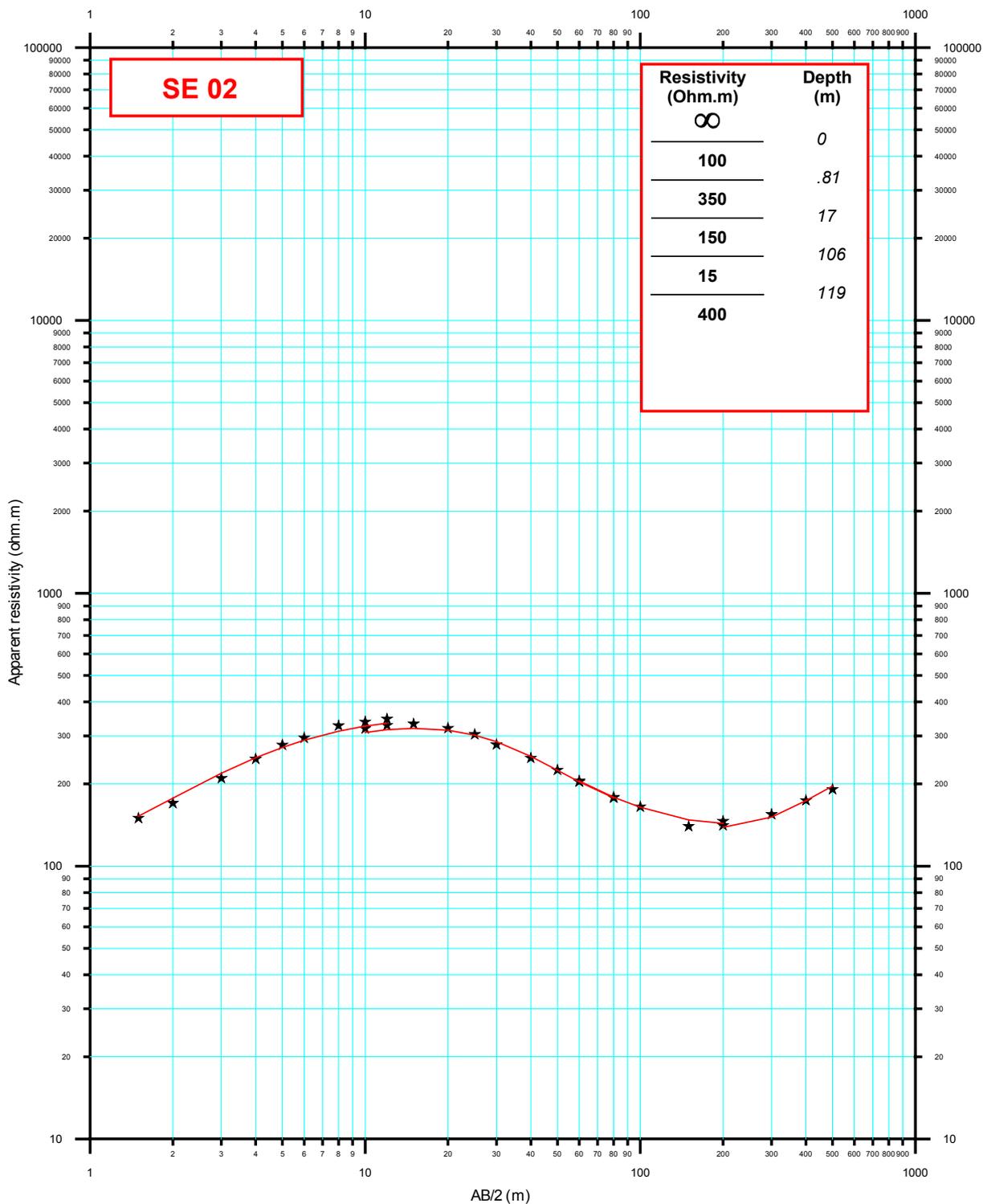
ANNEXE 4

Sondages électriques. Modélisation 1D

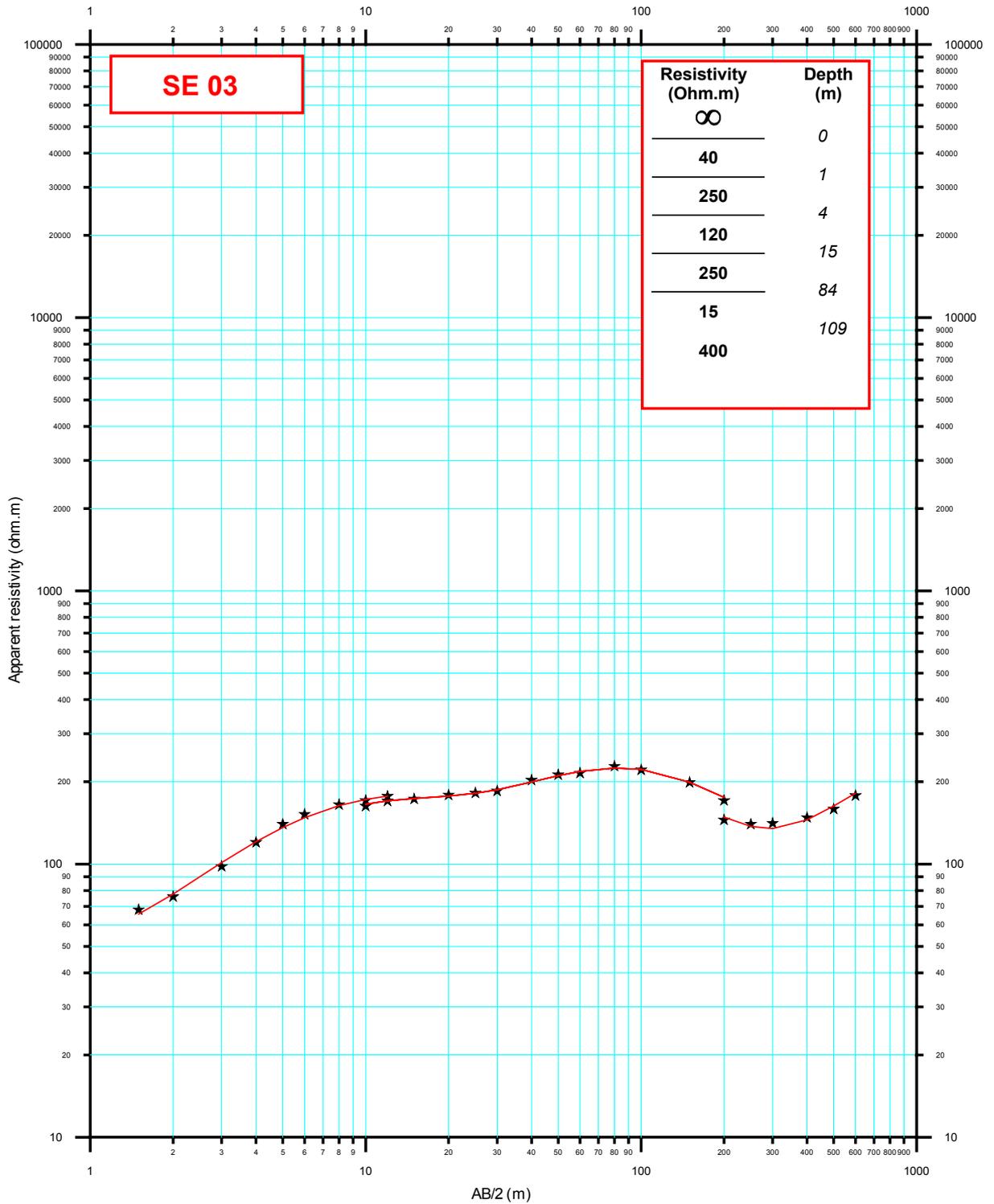
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



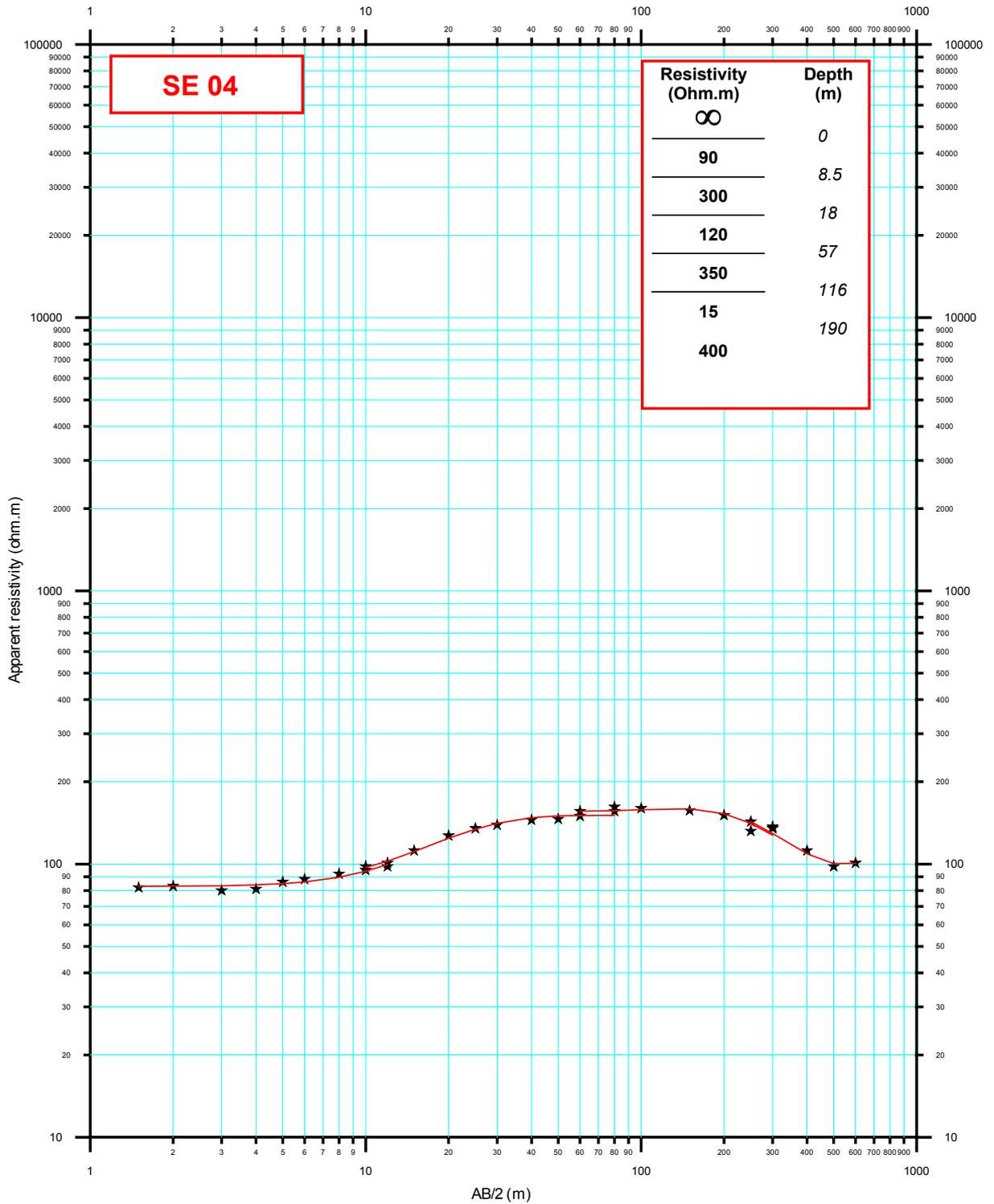
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



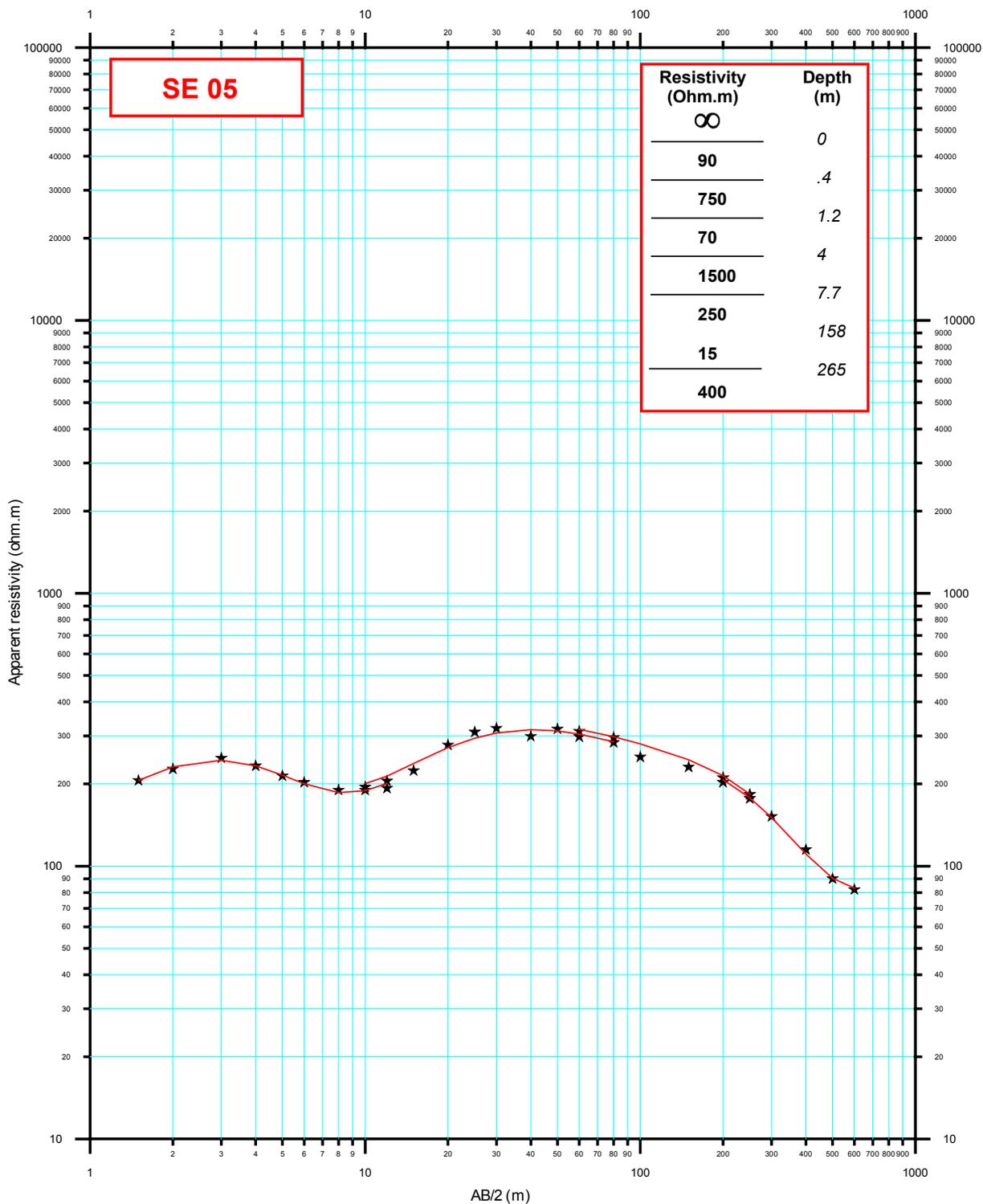
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



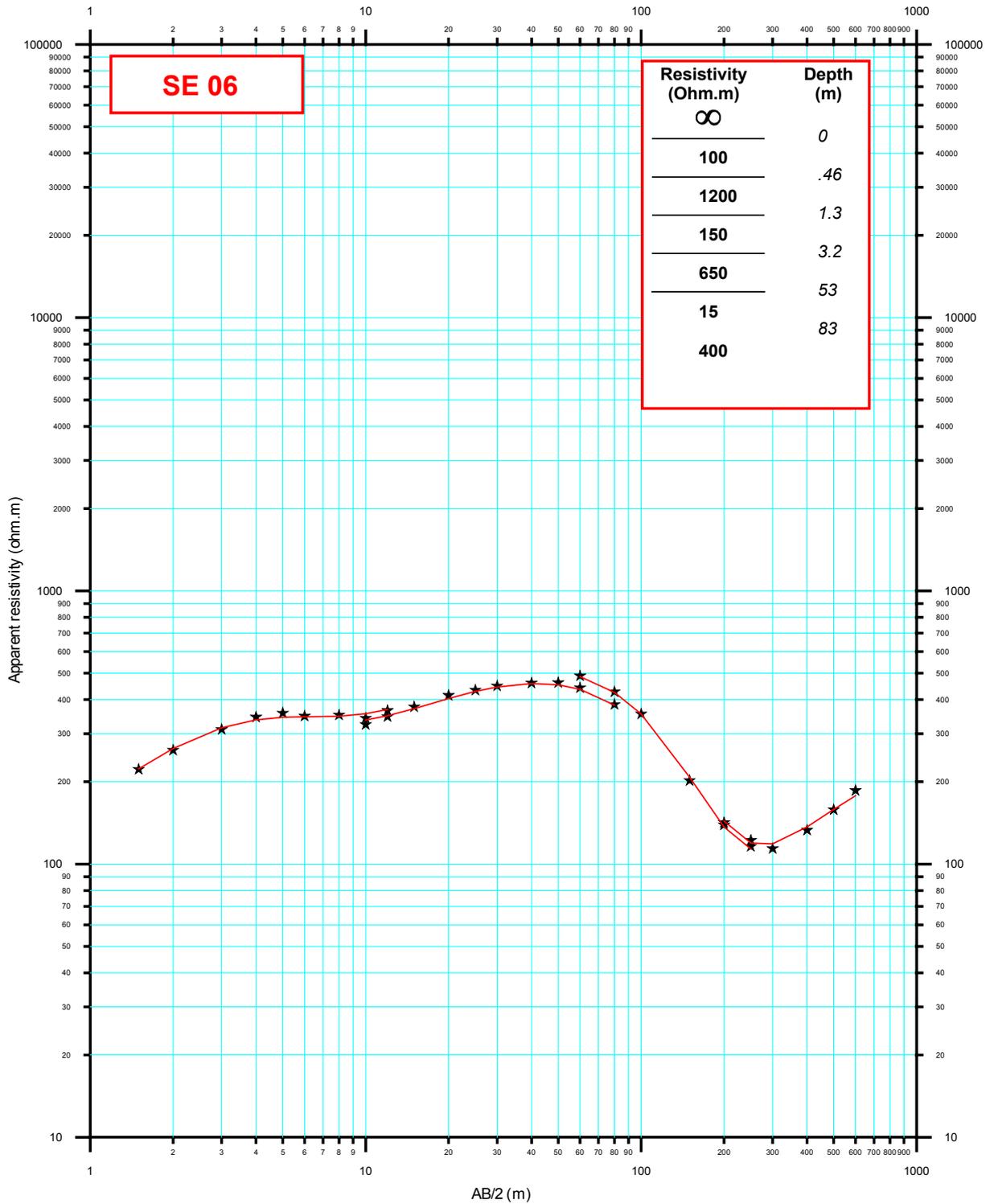
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



CAUSSE DE BONIFACIO SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D

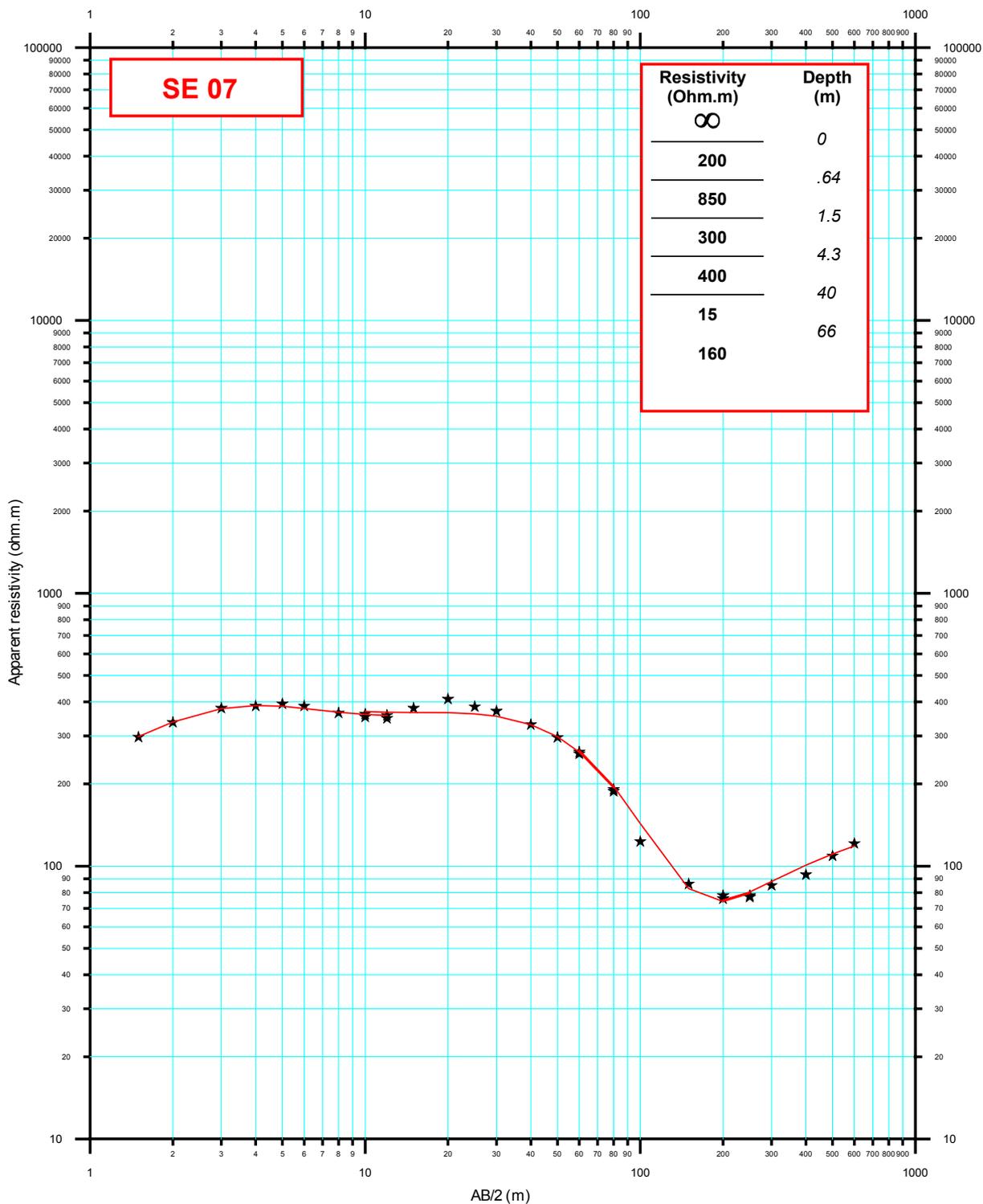


CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D

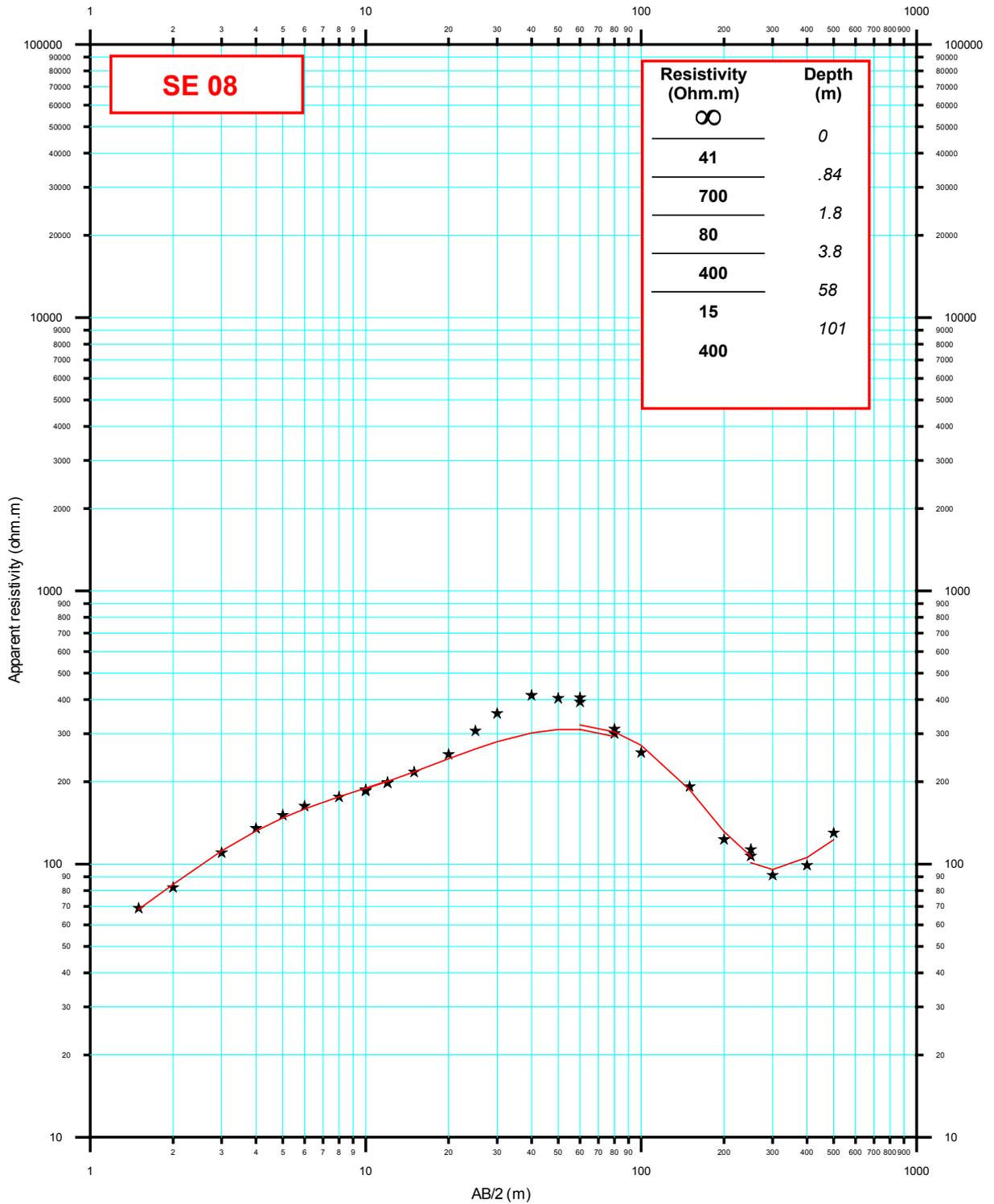


CAUSSE DE BONIFACIO

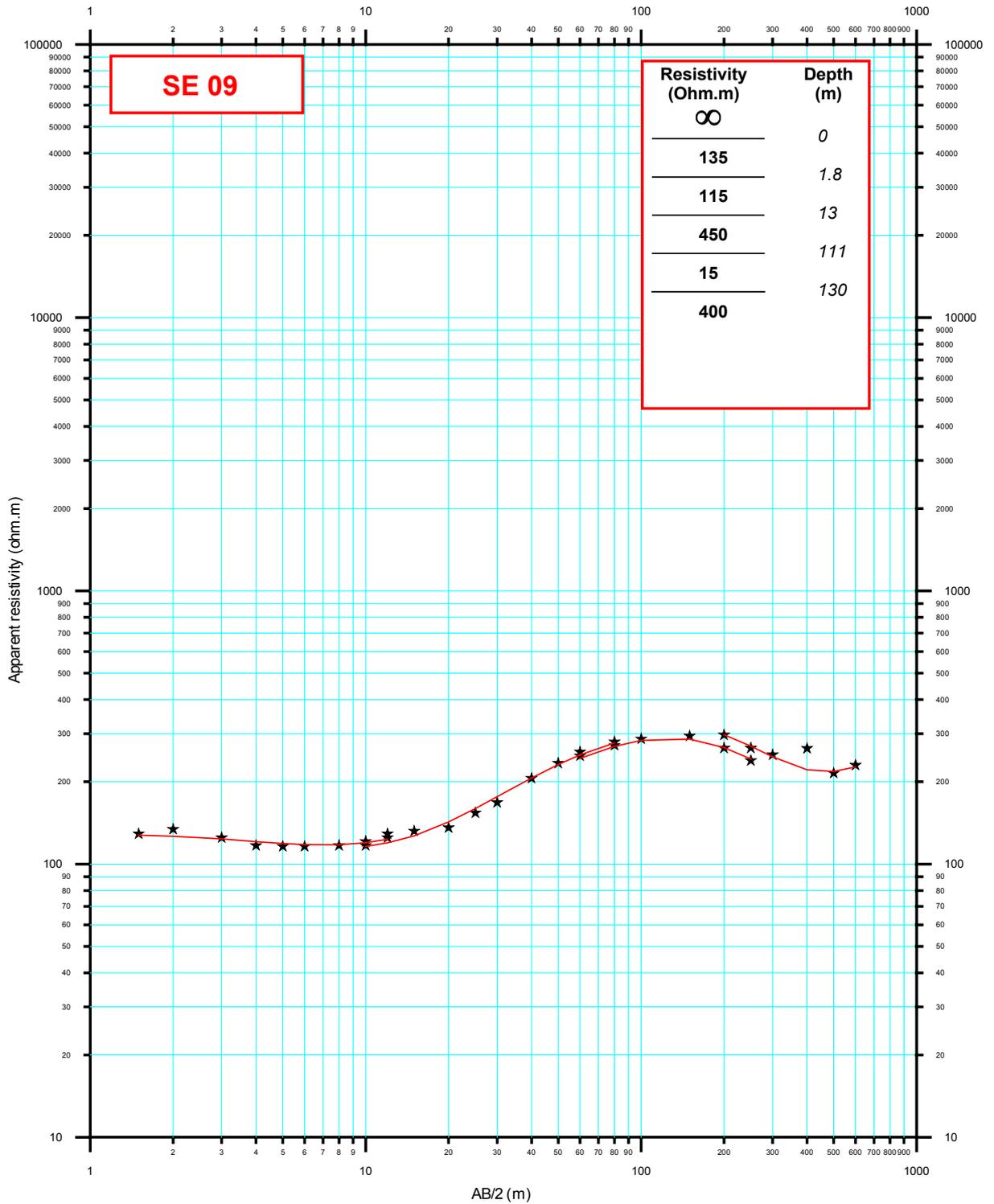
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



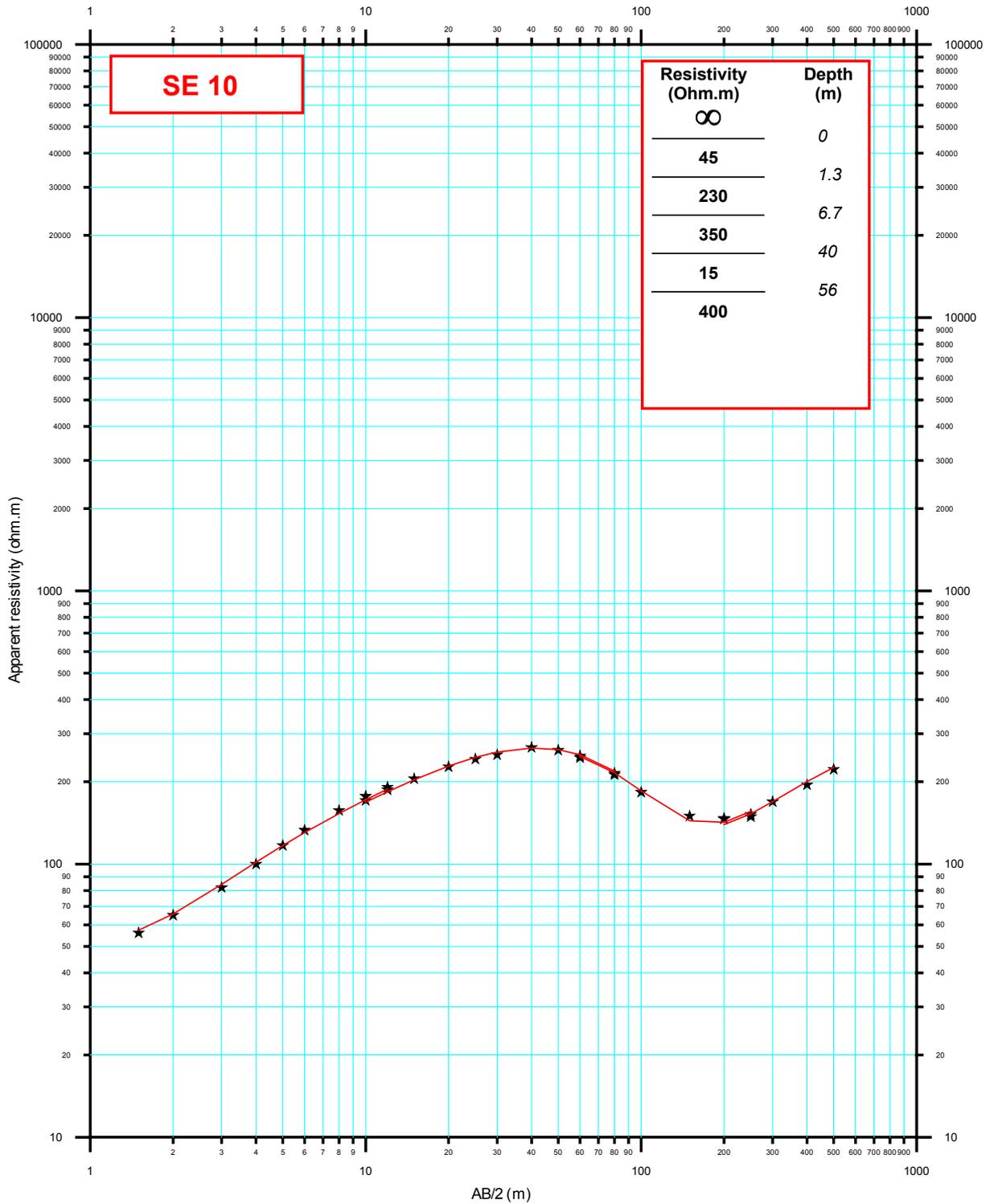
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



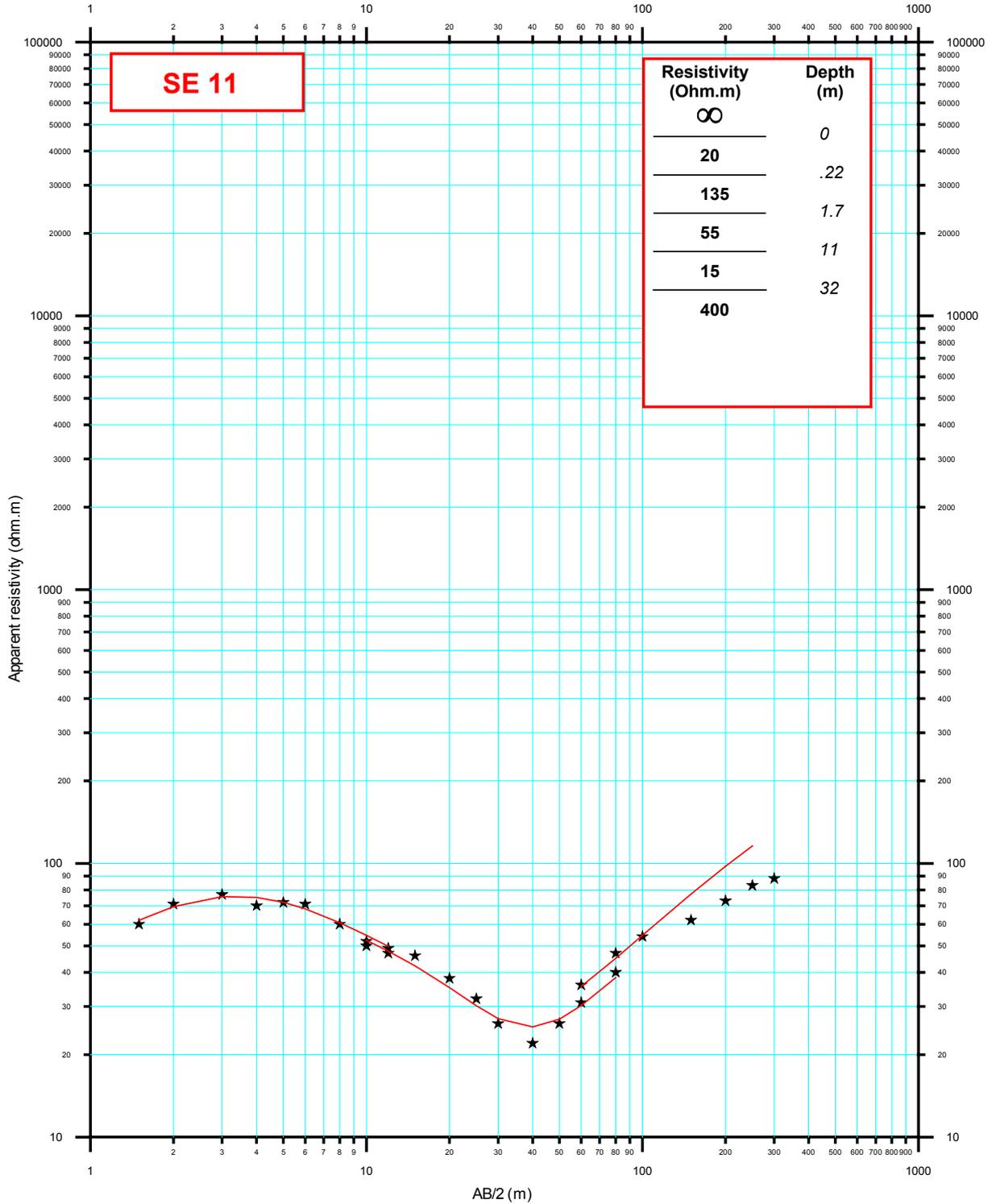
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



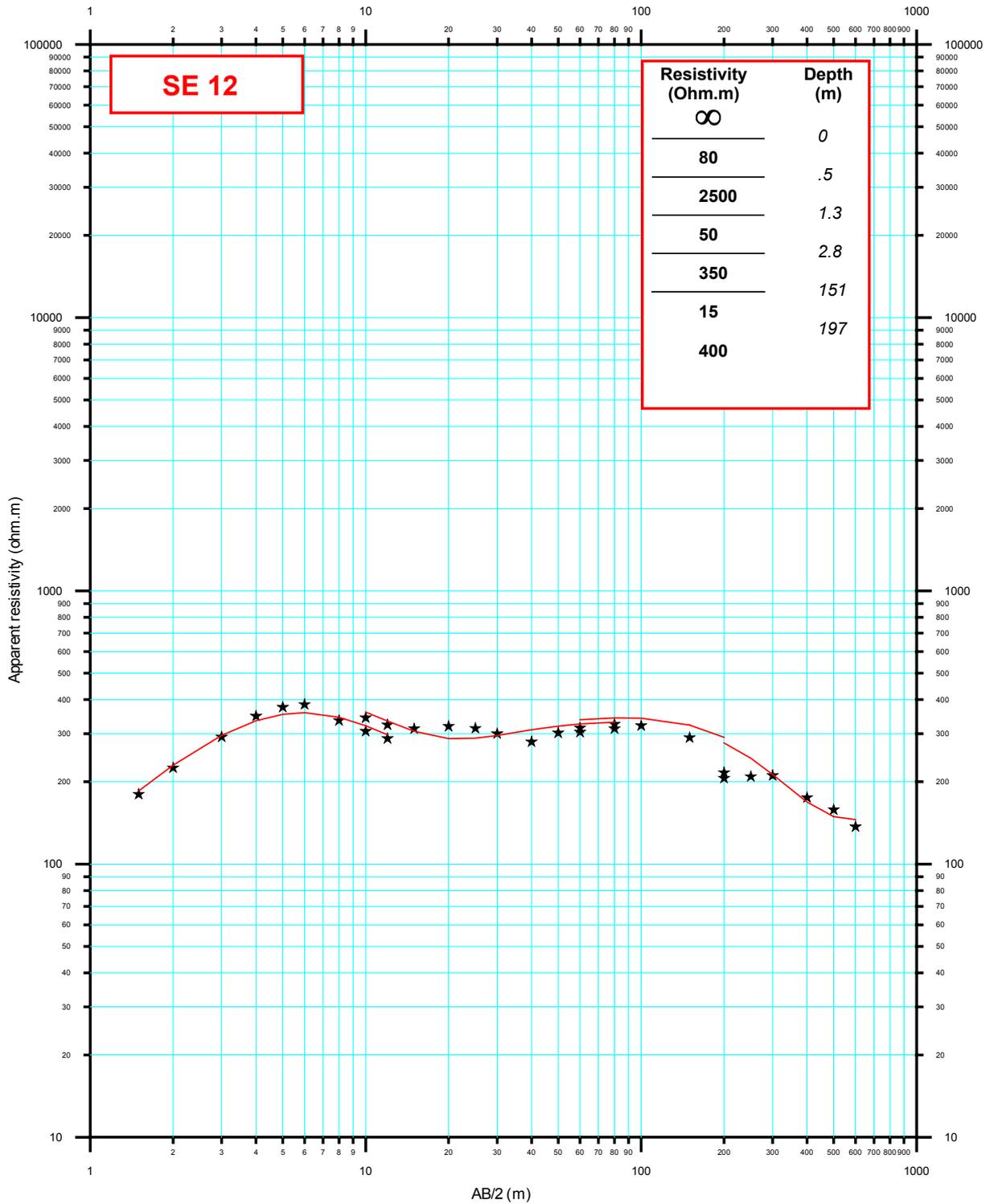
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



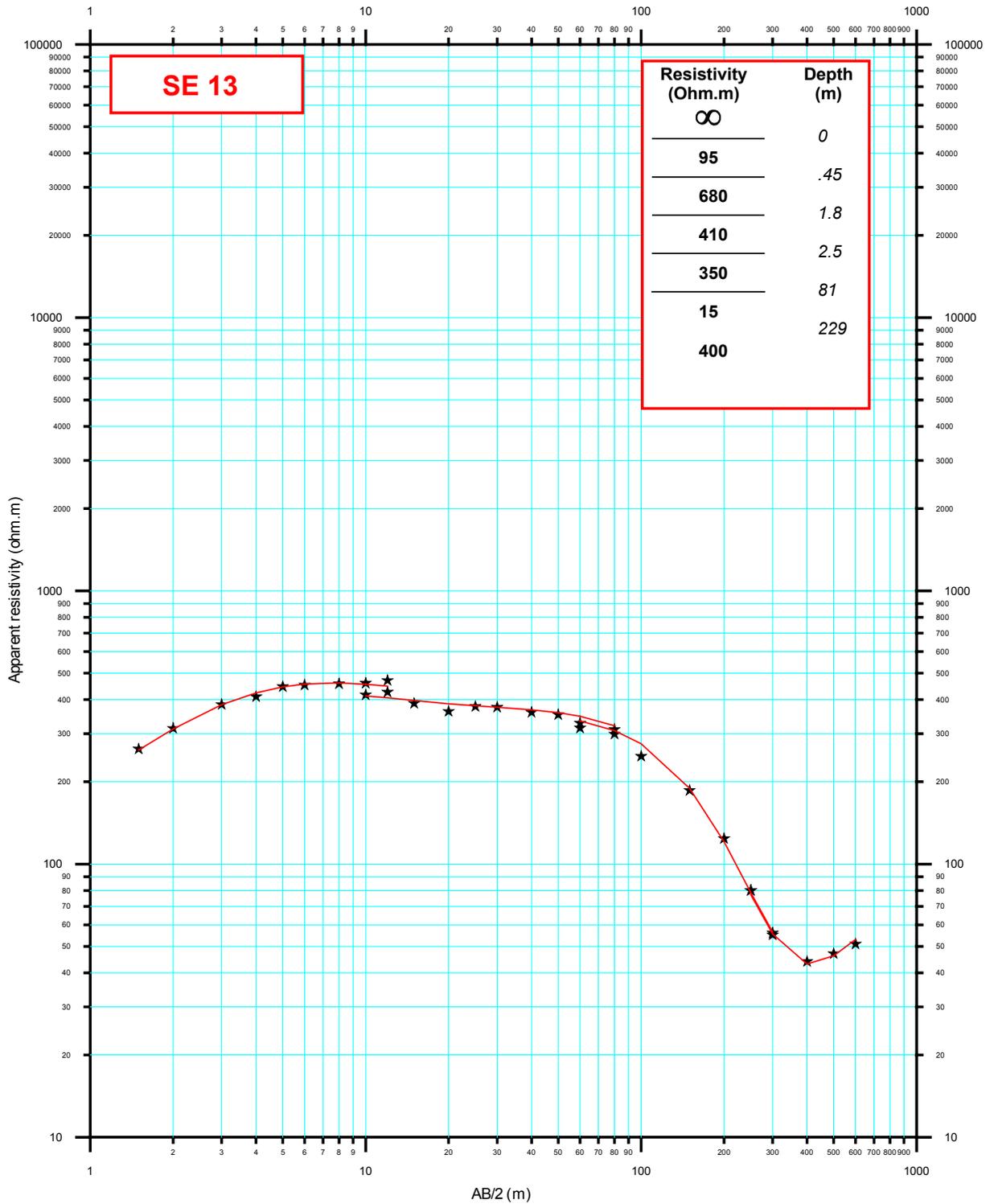
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



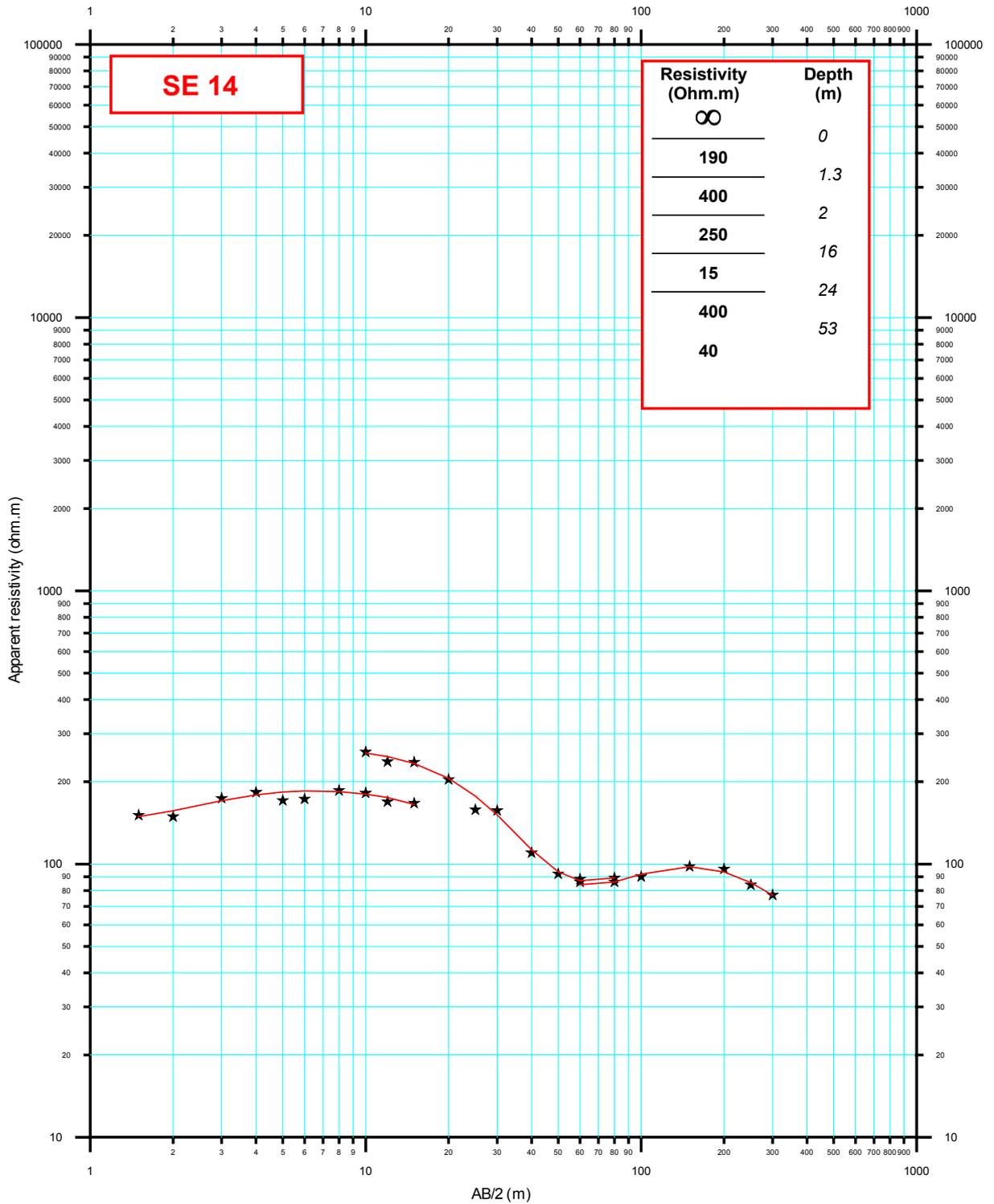
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



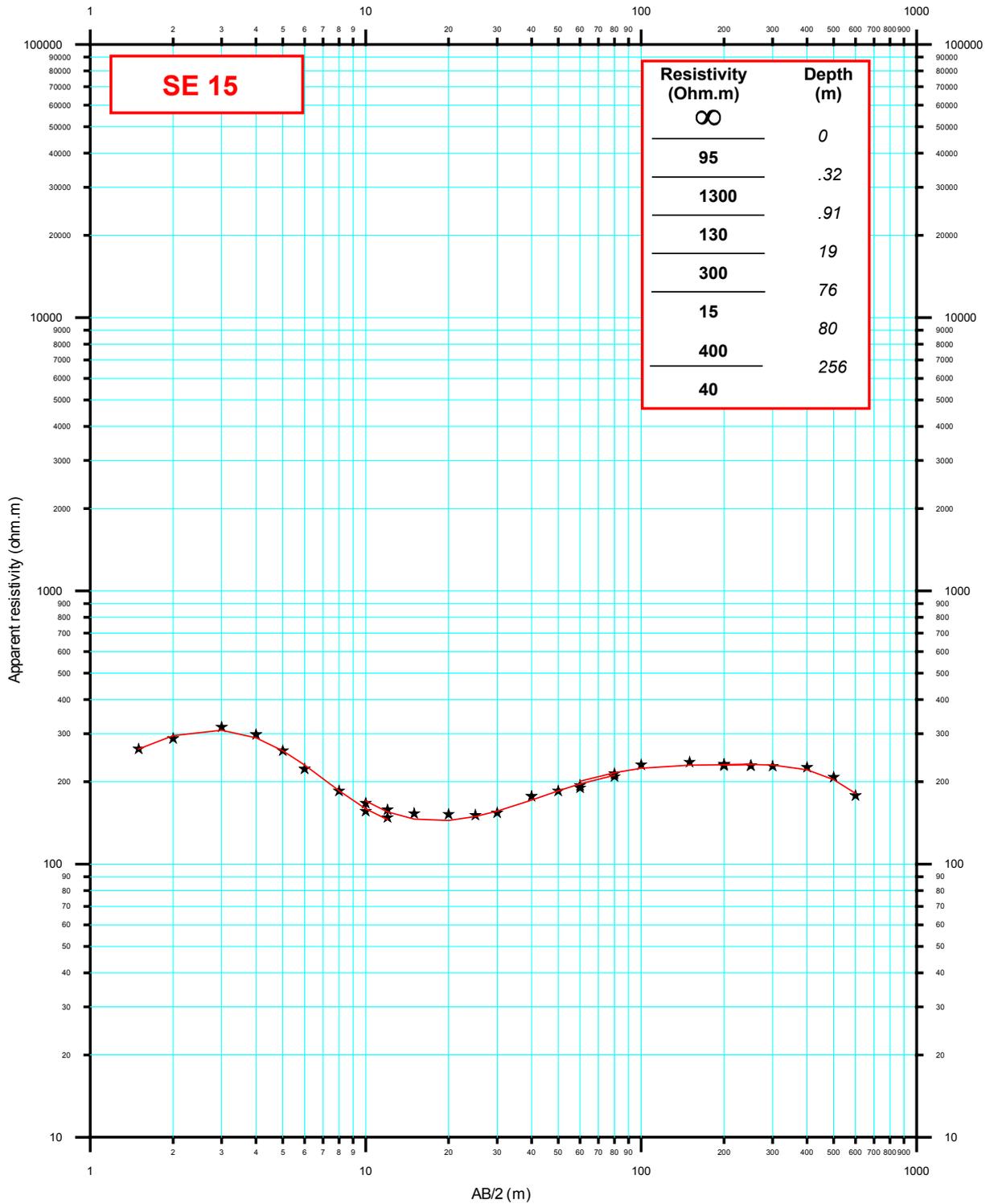
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



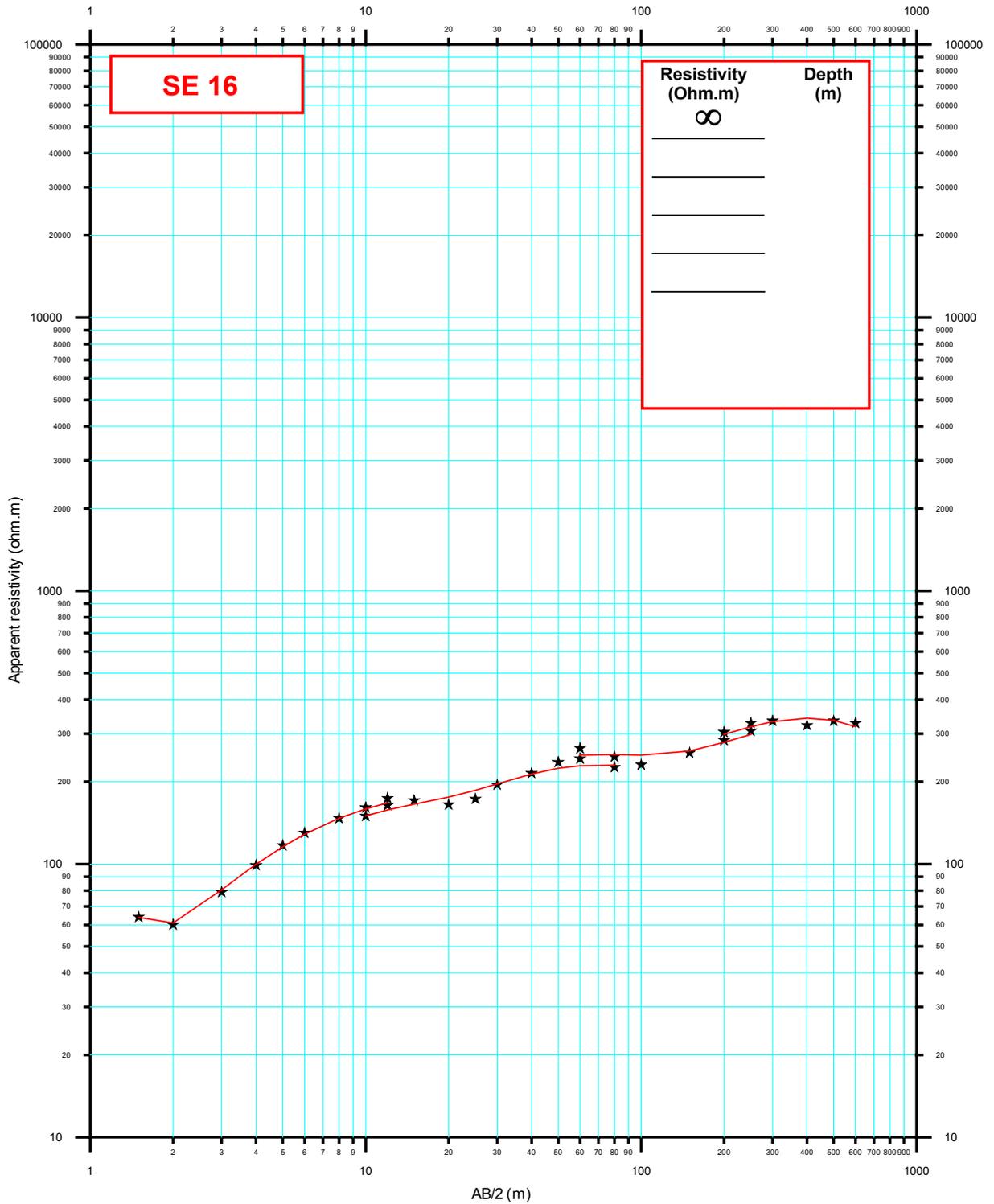
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



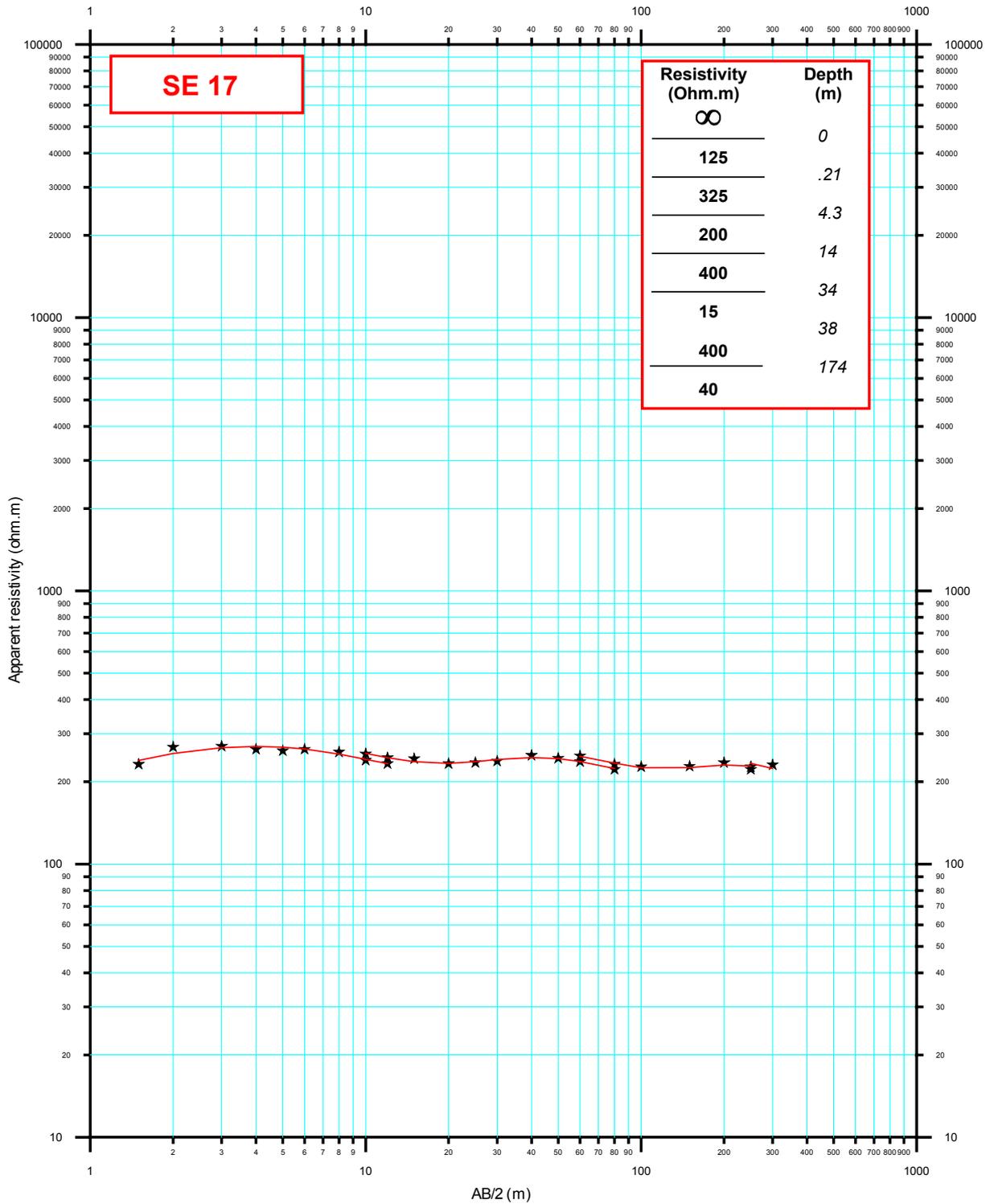
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



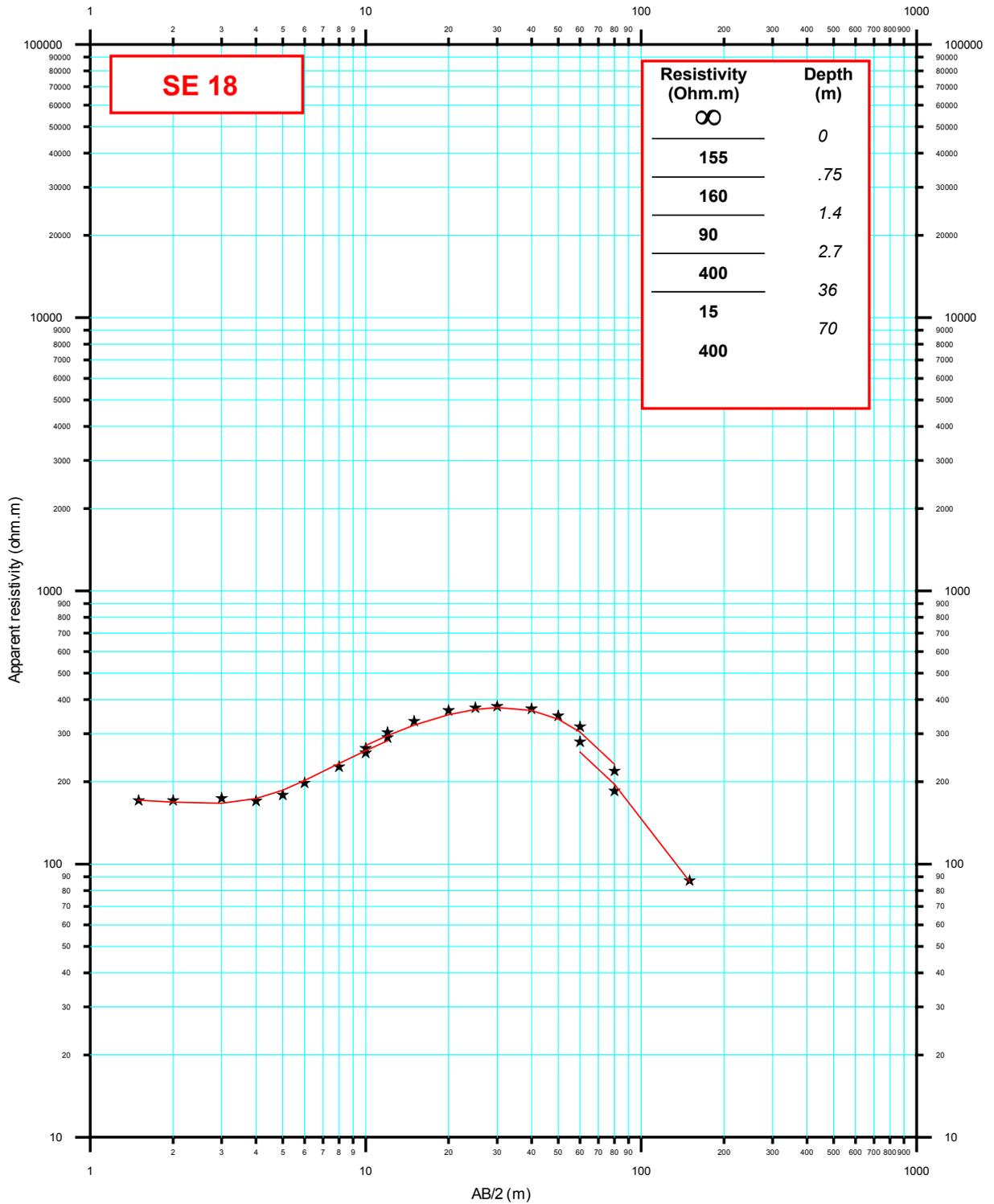
CAUSSE DE BONIFACIO SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



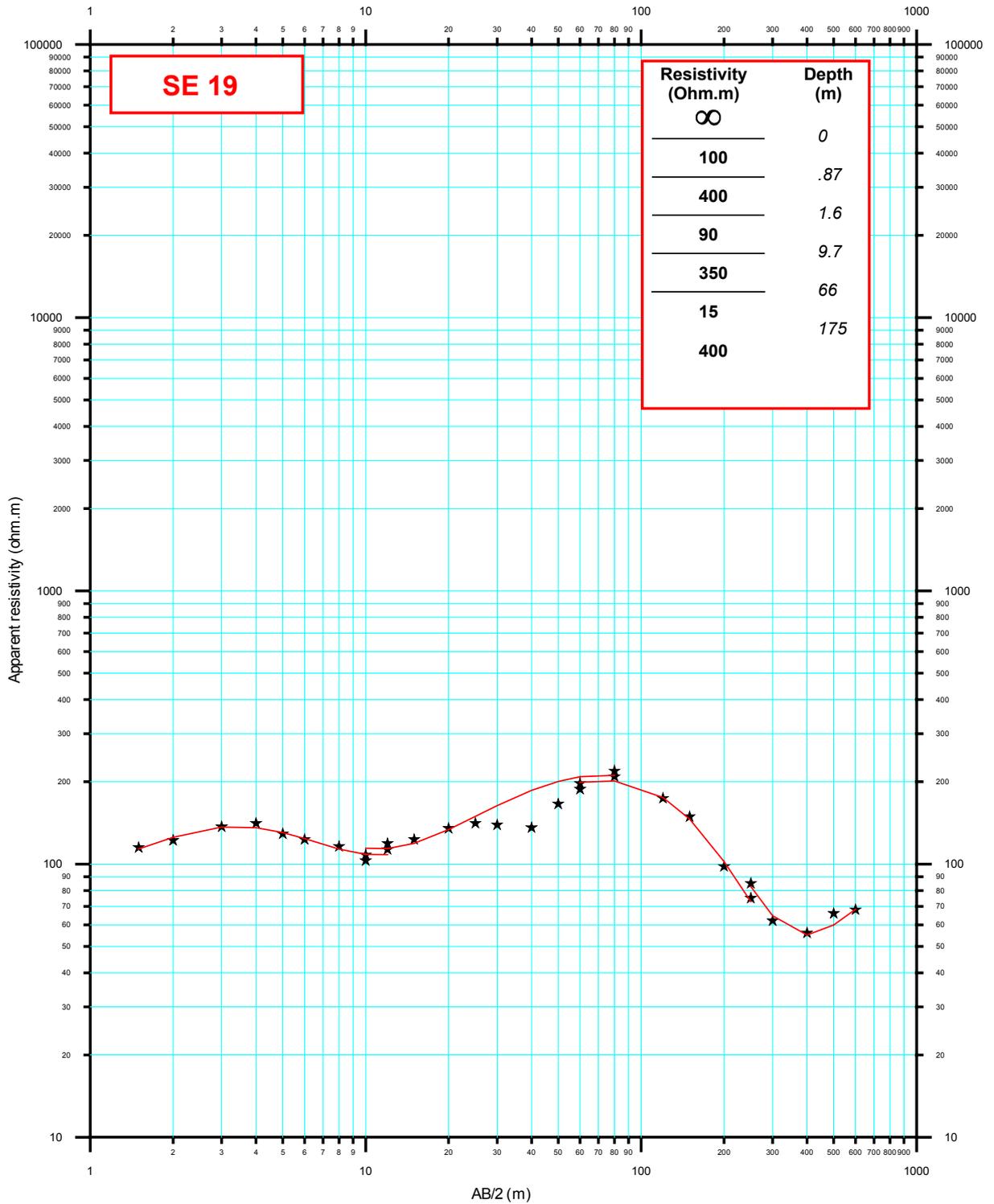
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



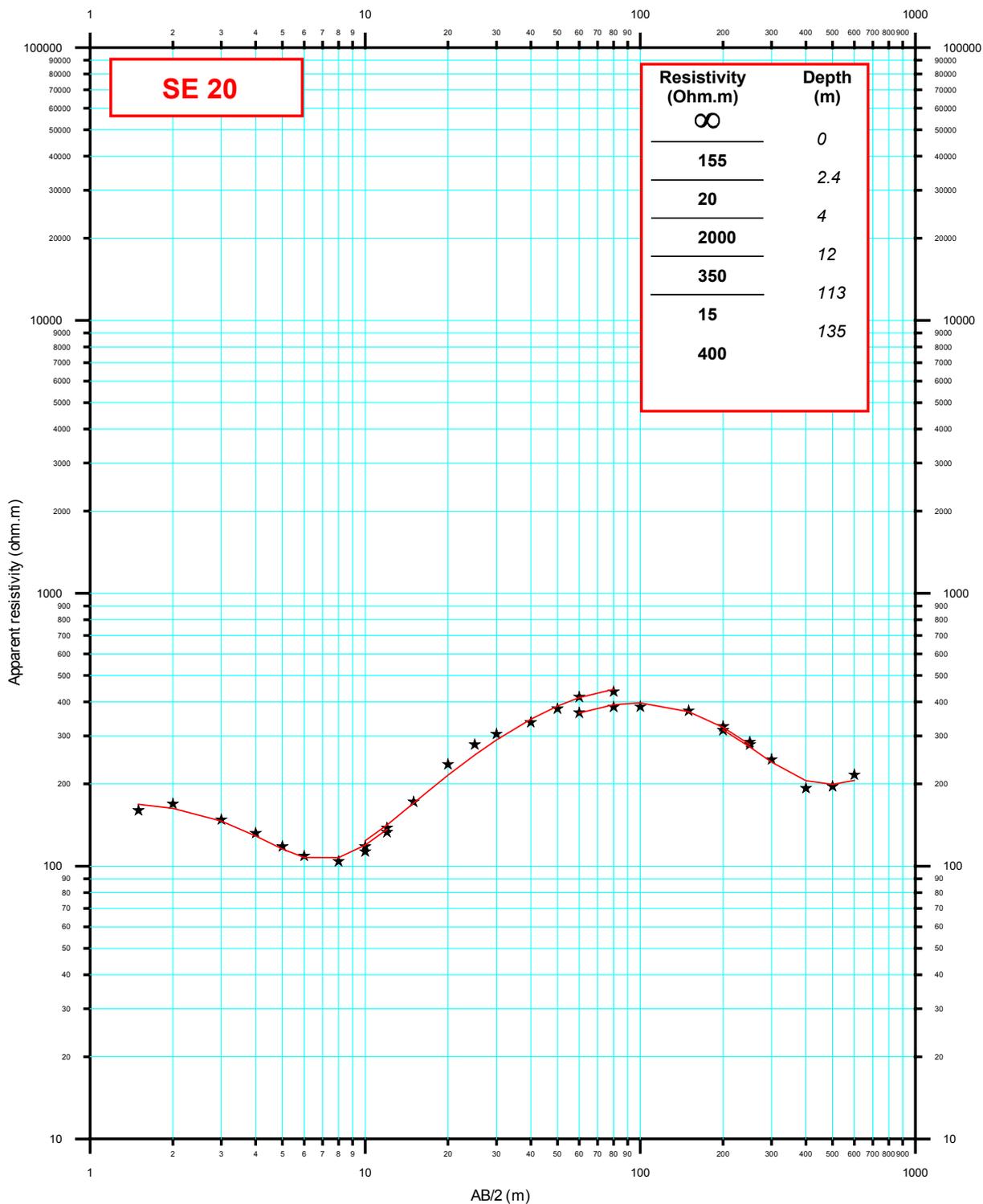
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



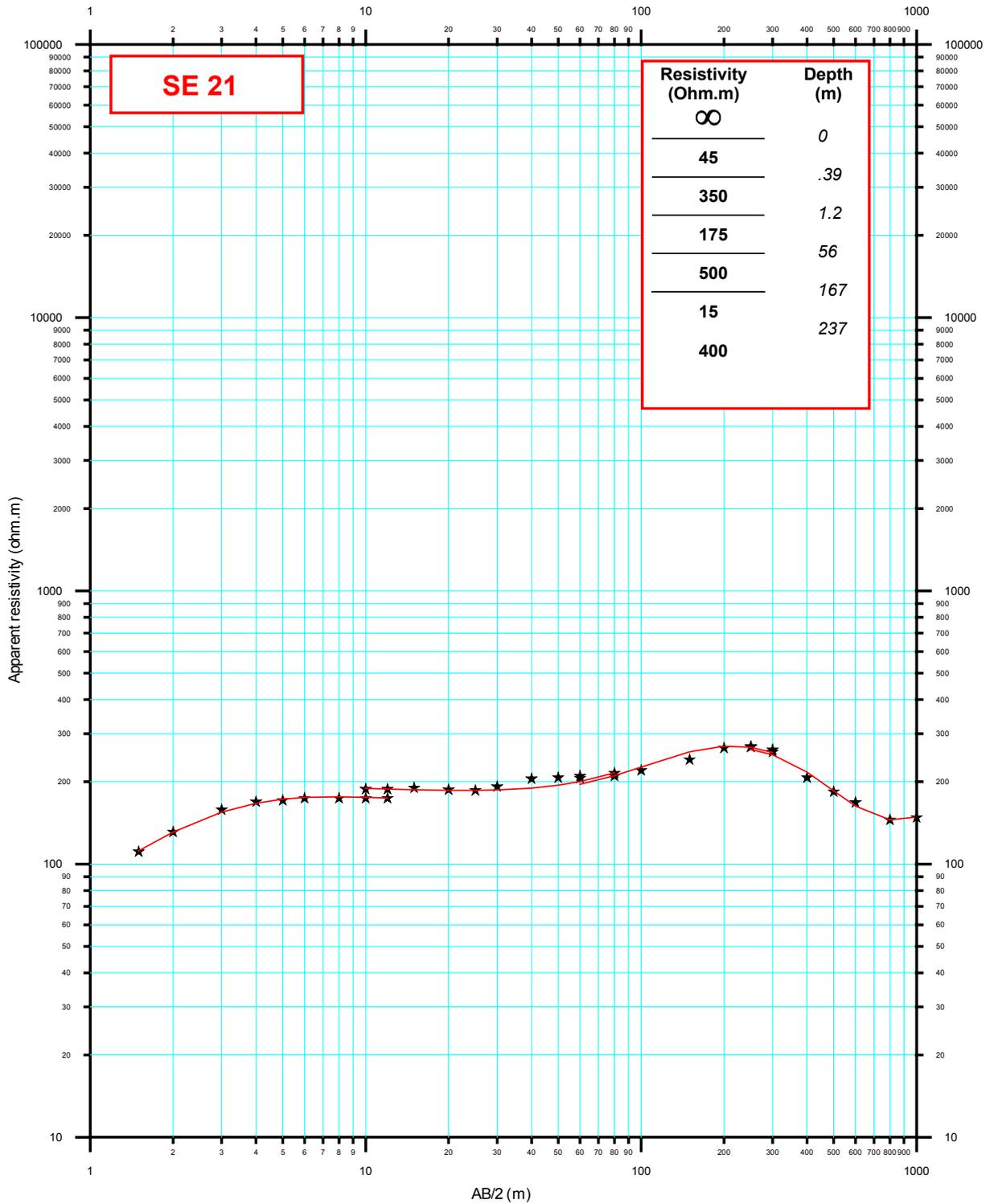
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



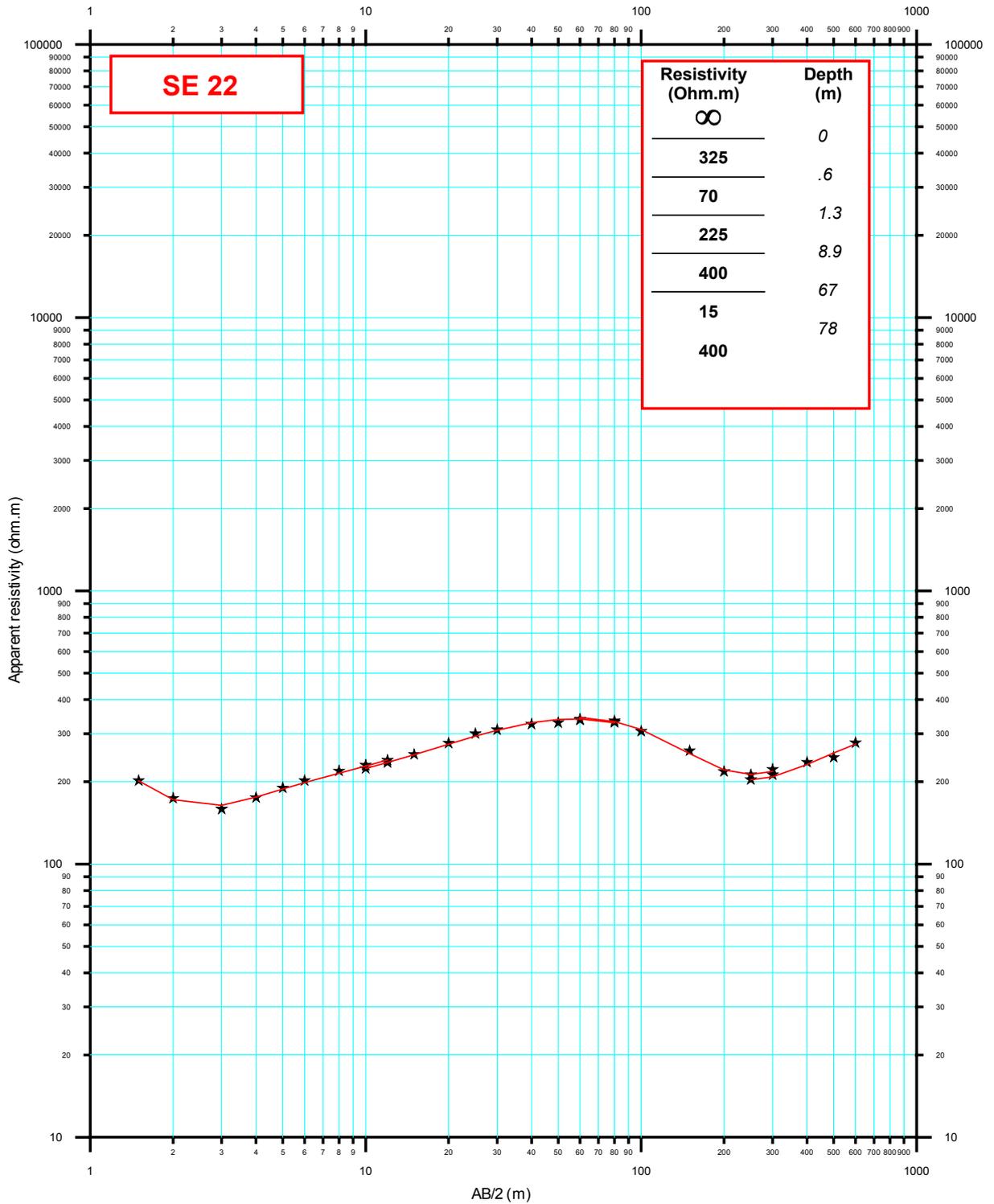
CAUSSE DE BONIFACIO SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



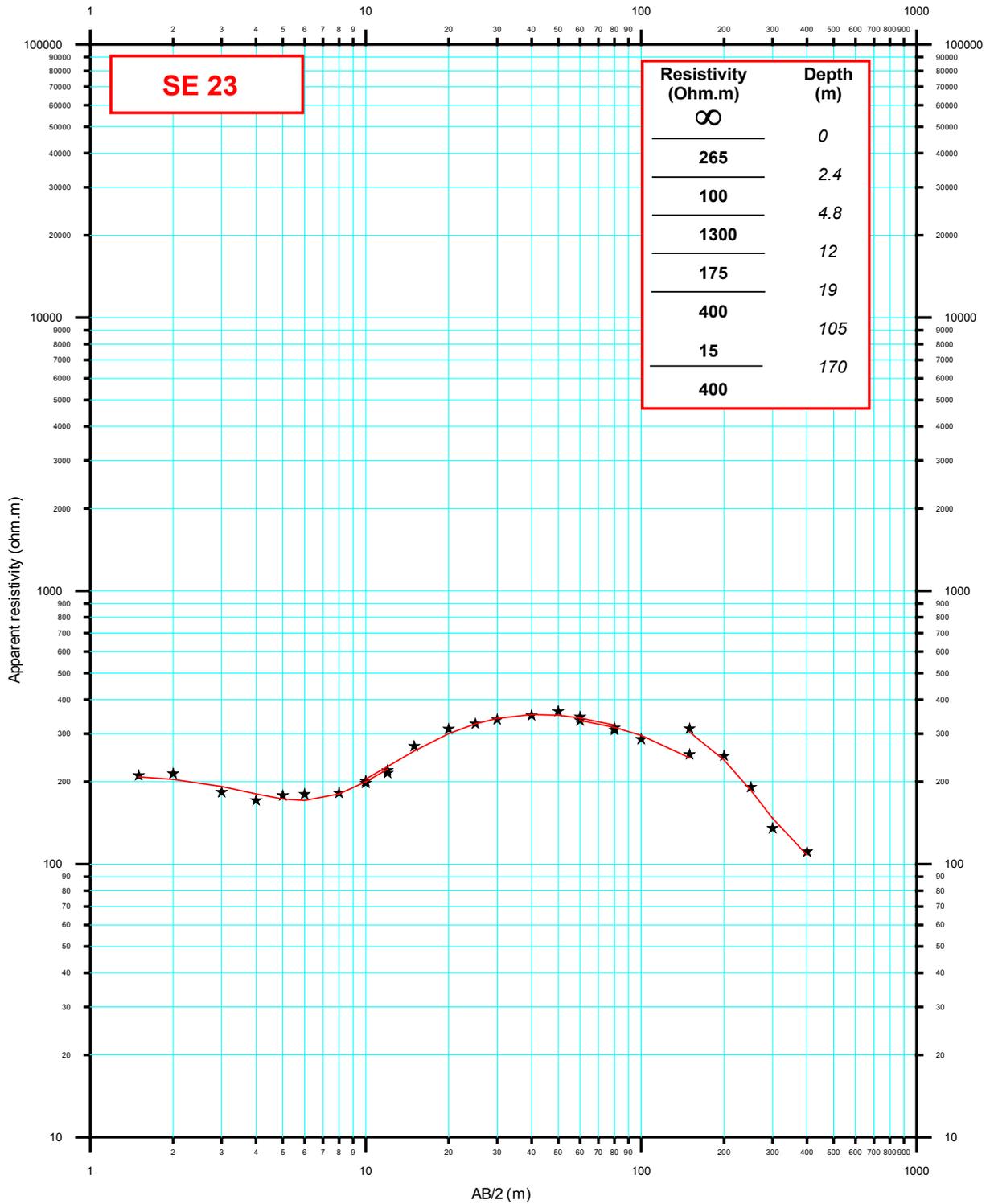
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



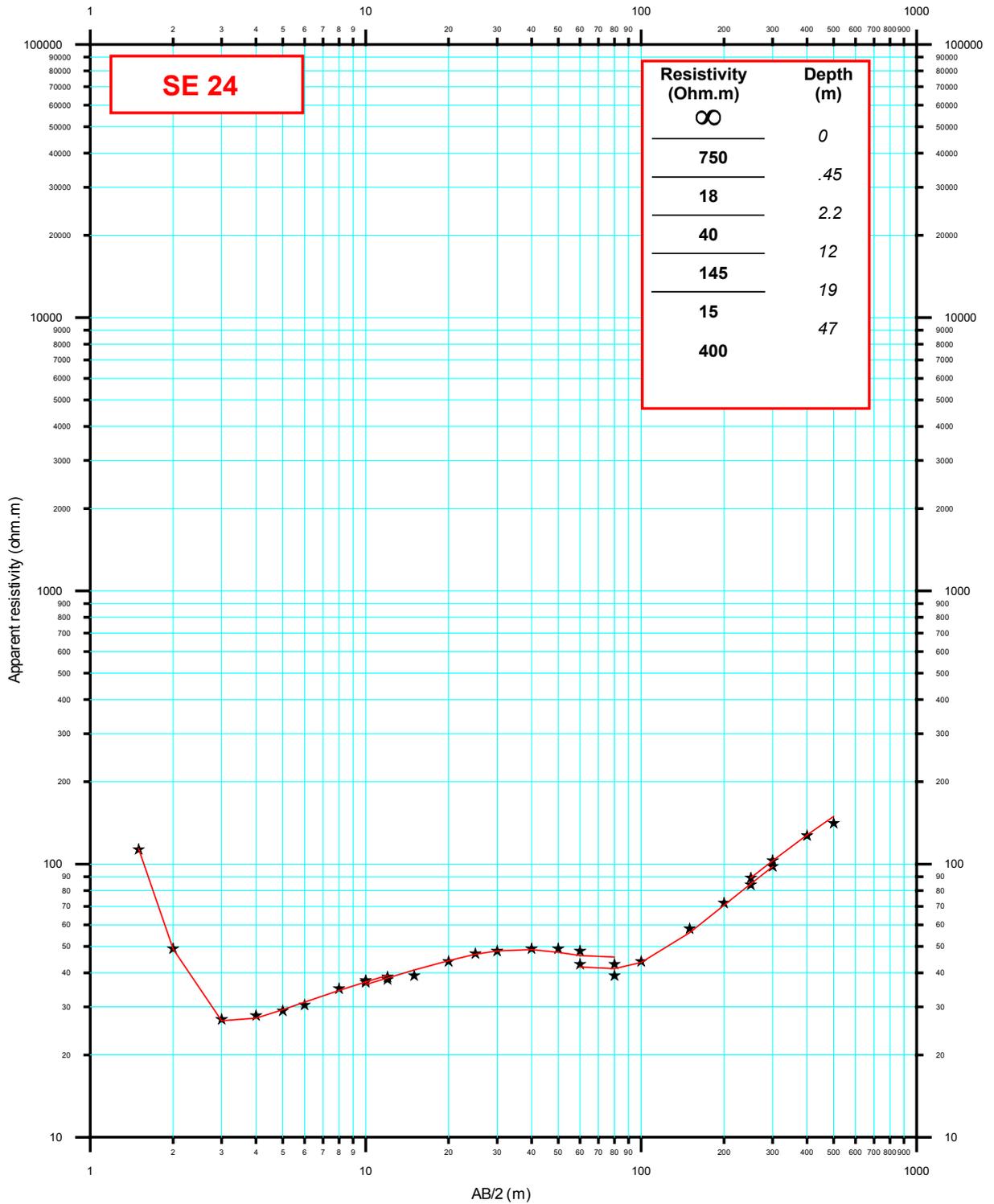
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D

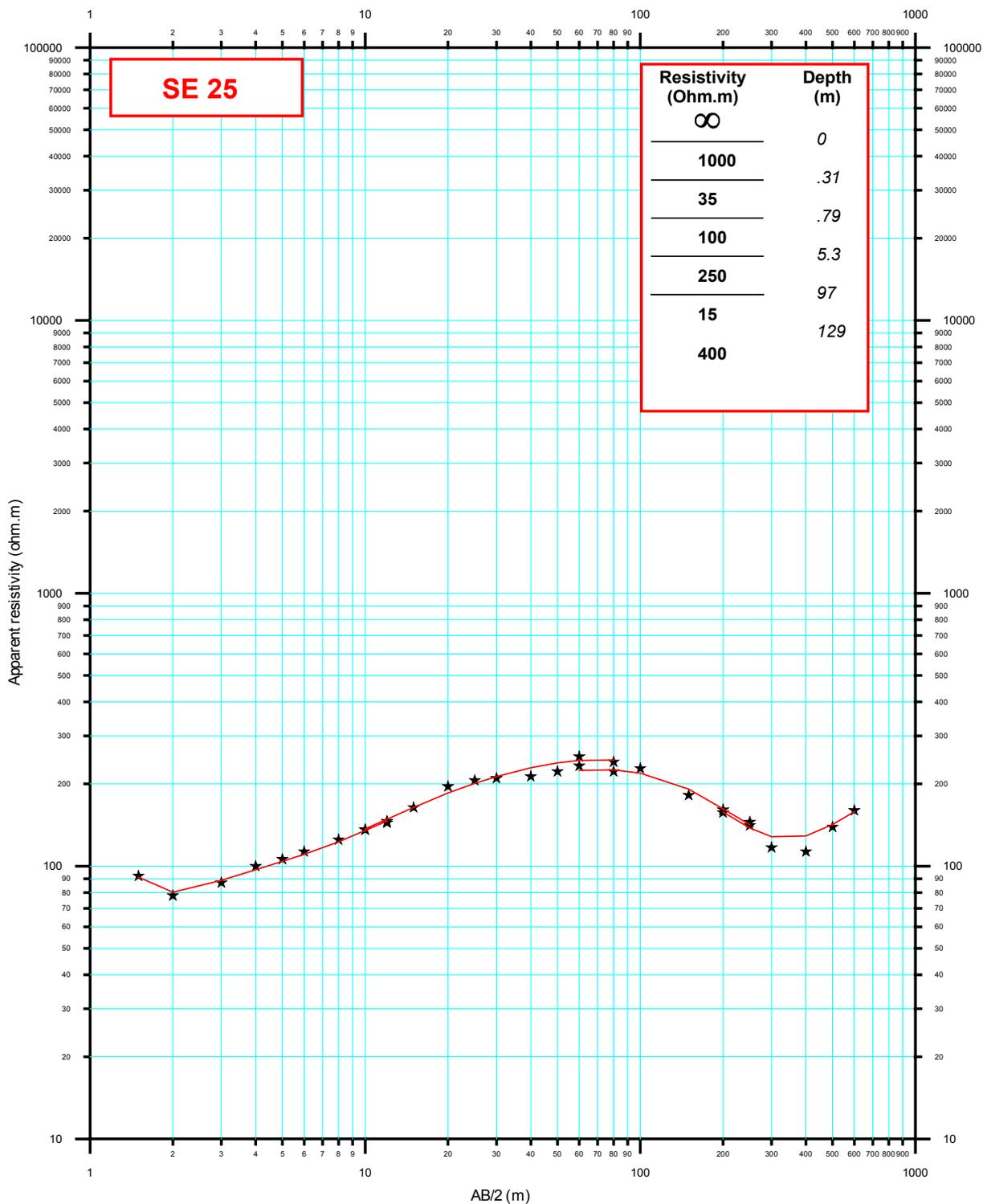


CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D

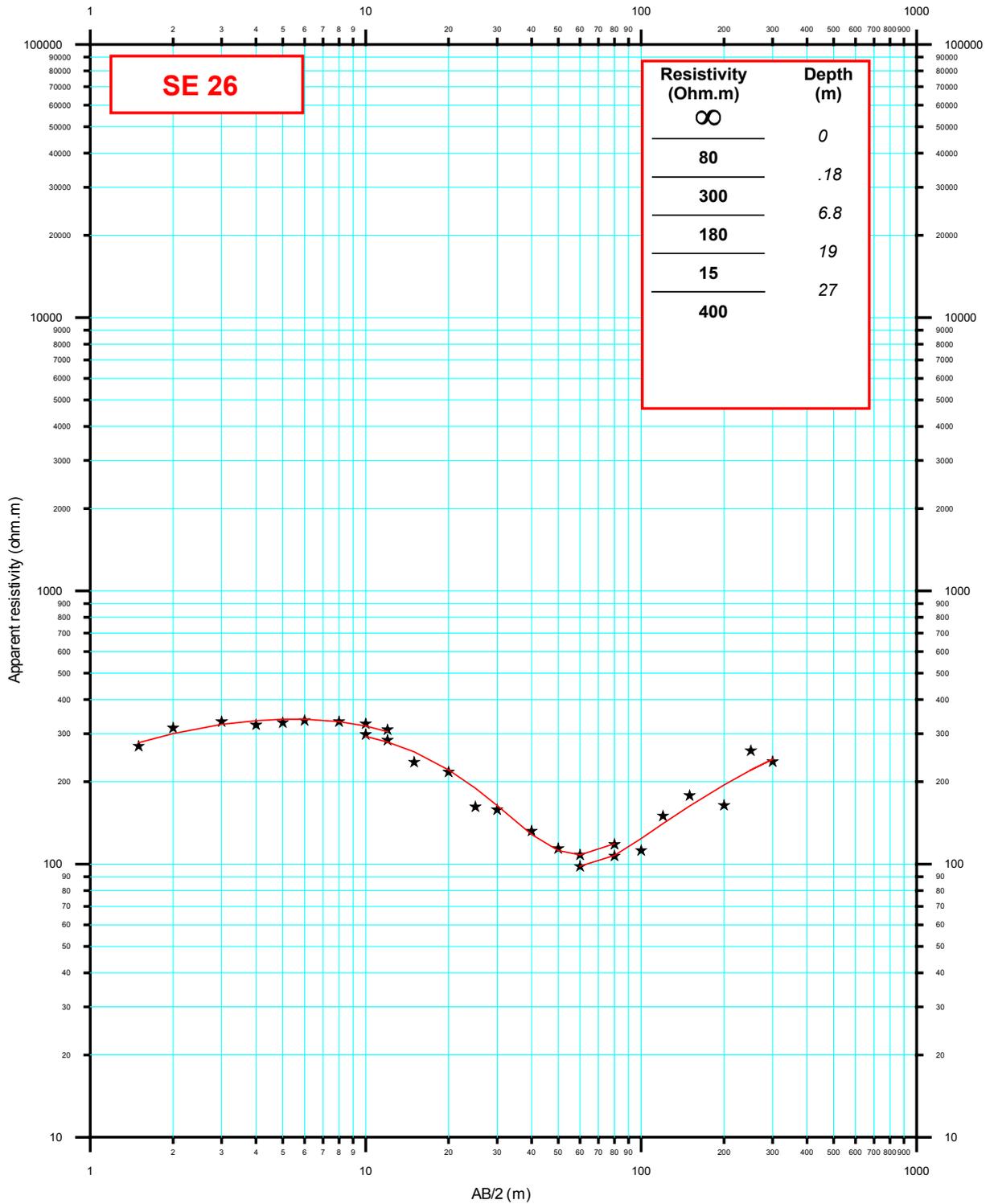


CAUSSE DE BONIFACIO

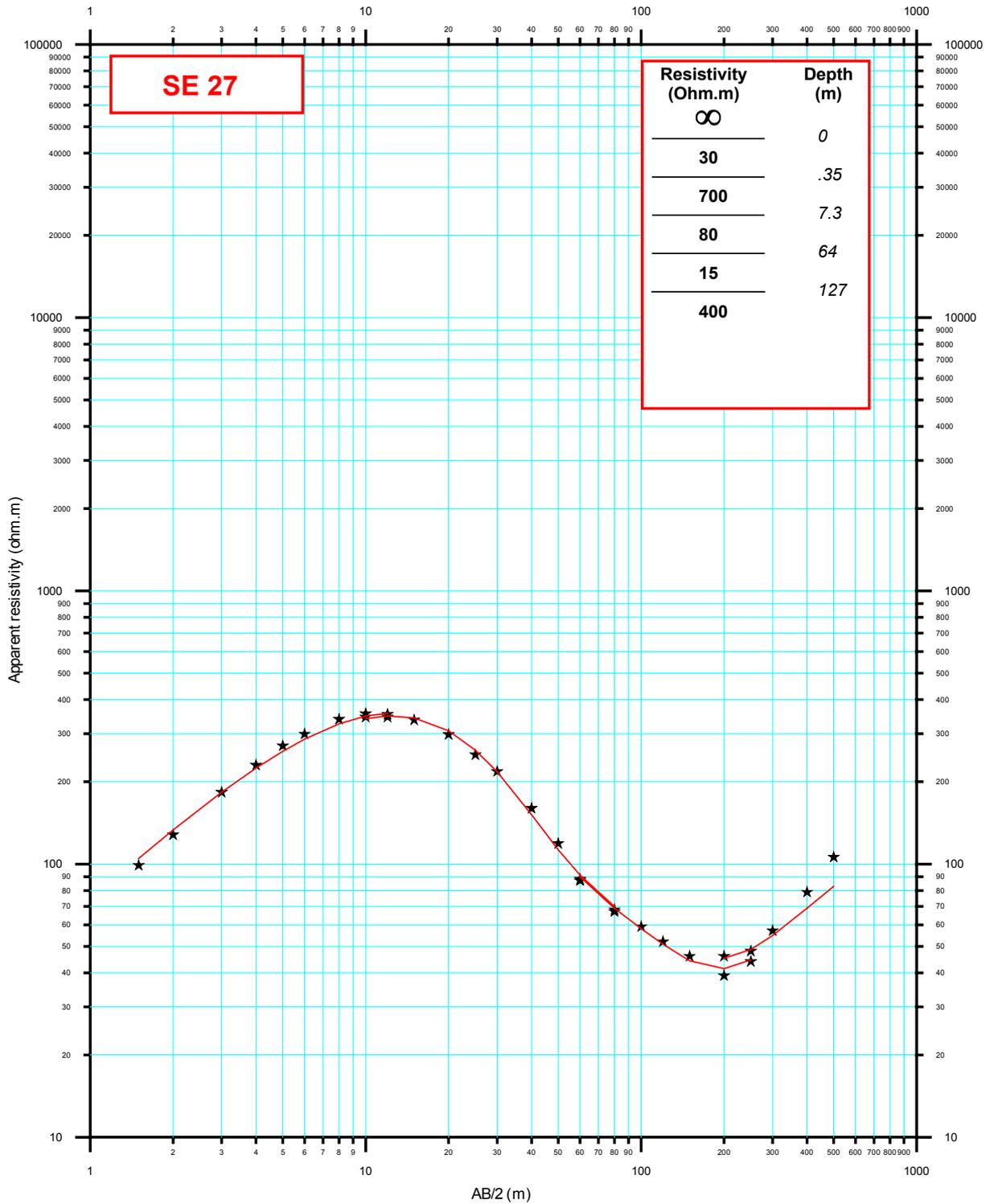
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



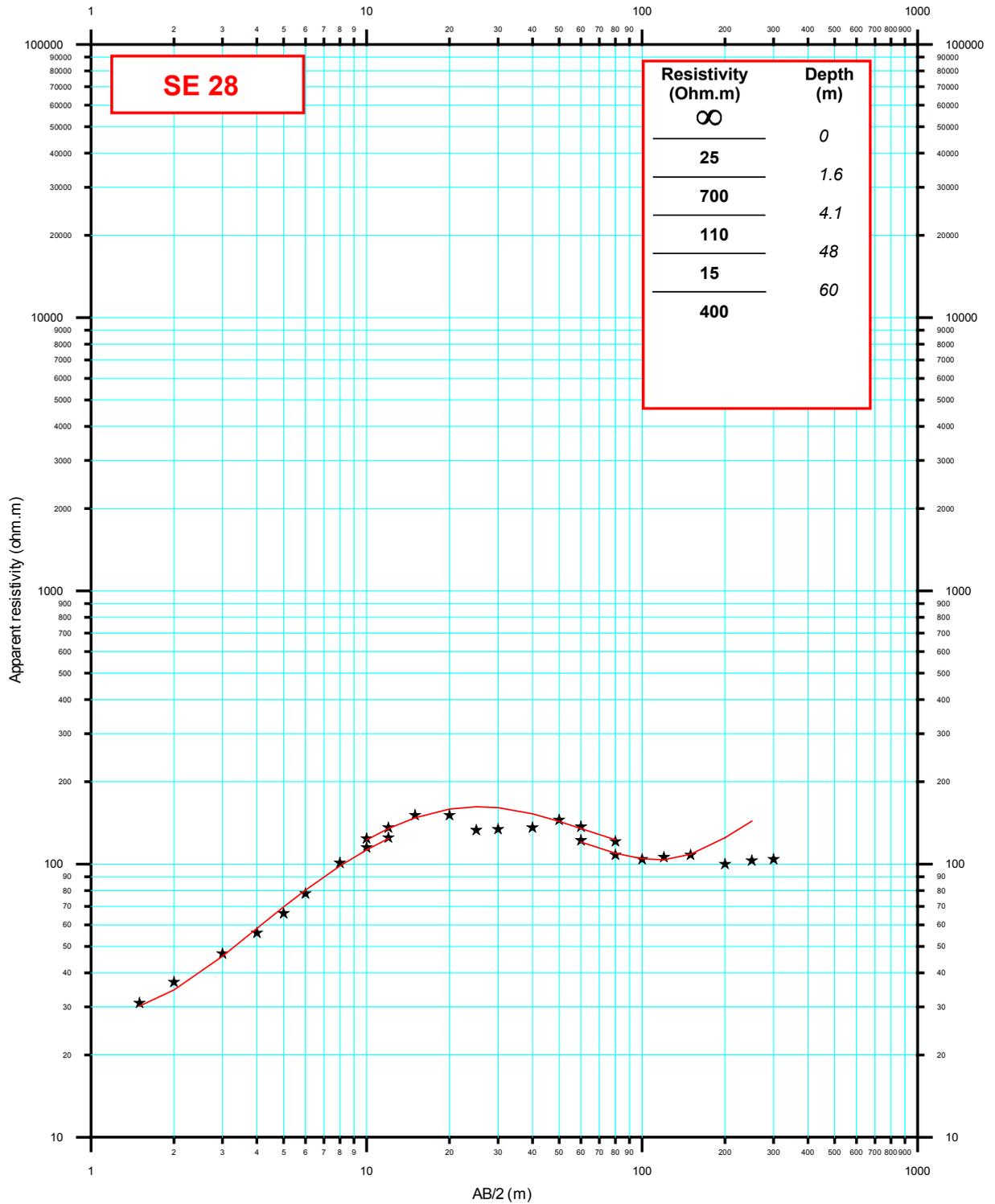
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



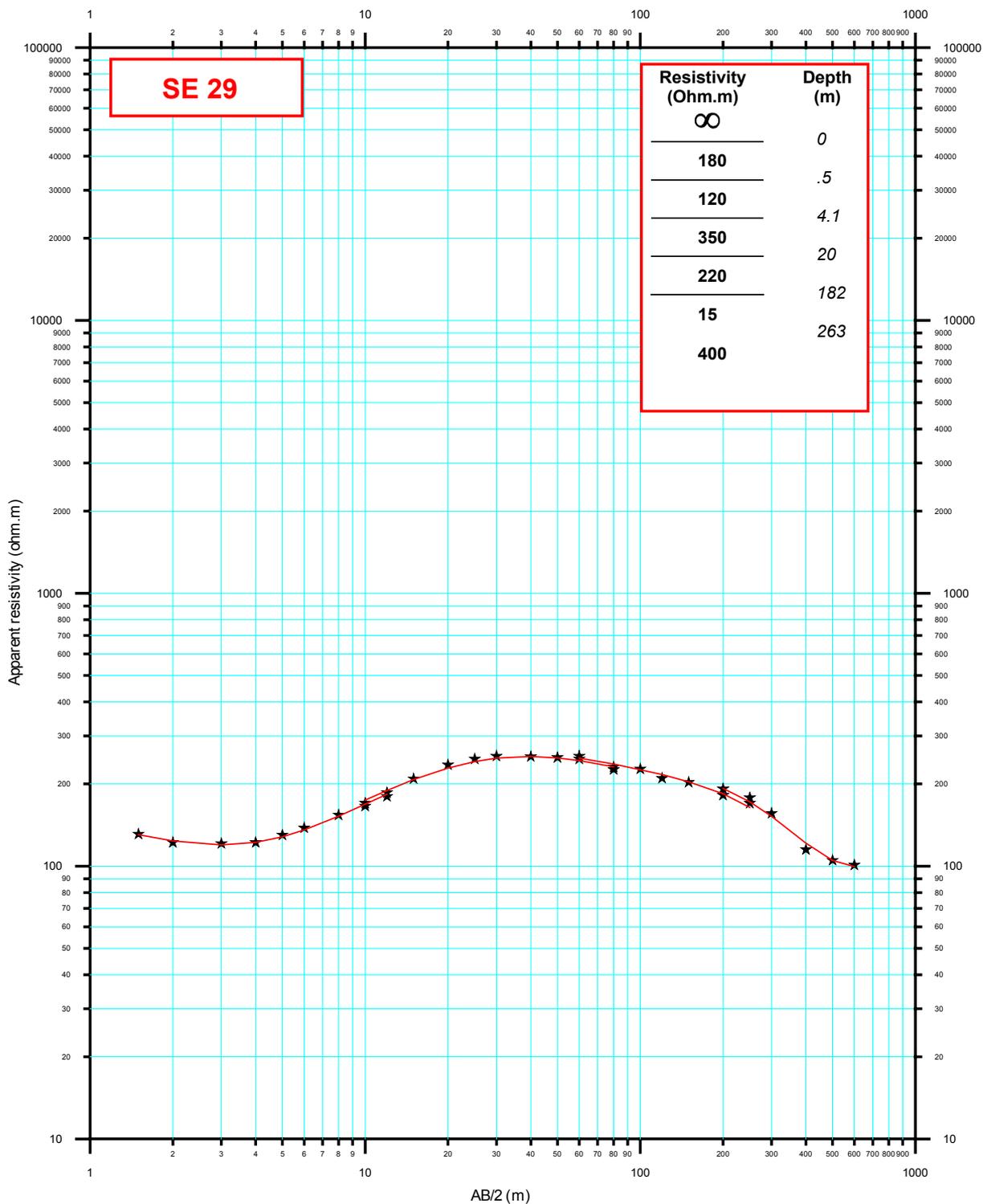
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



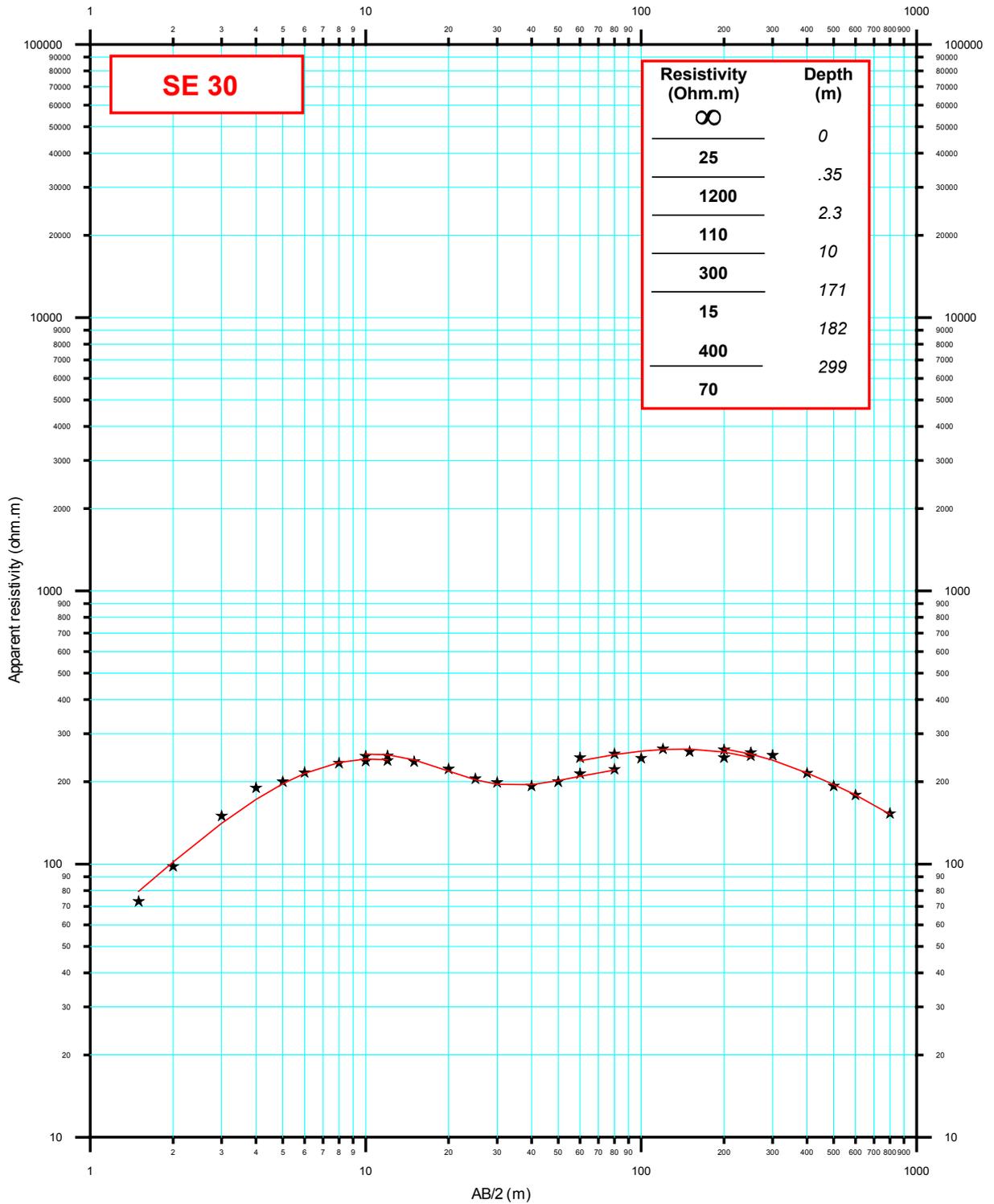
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



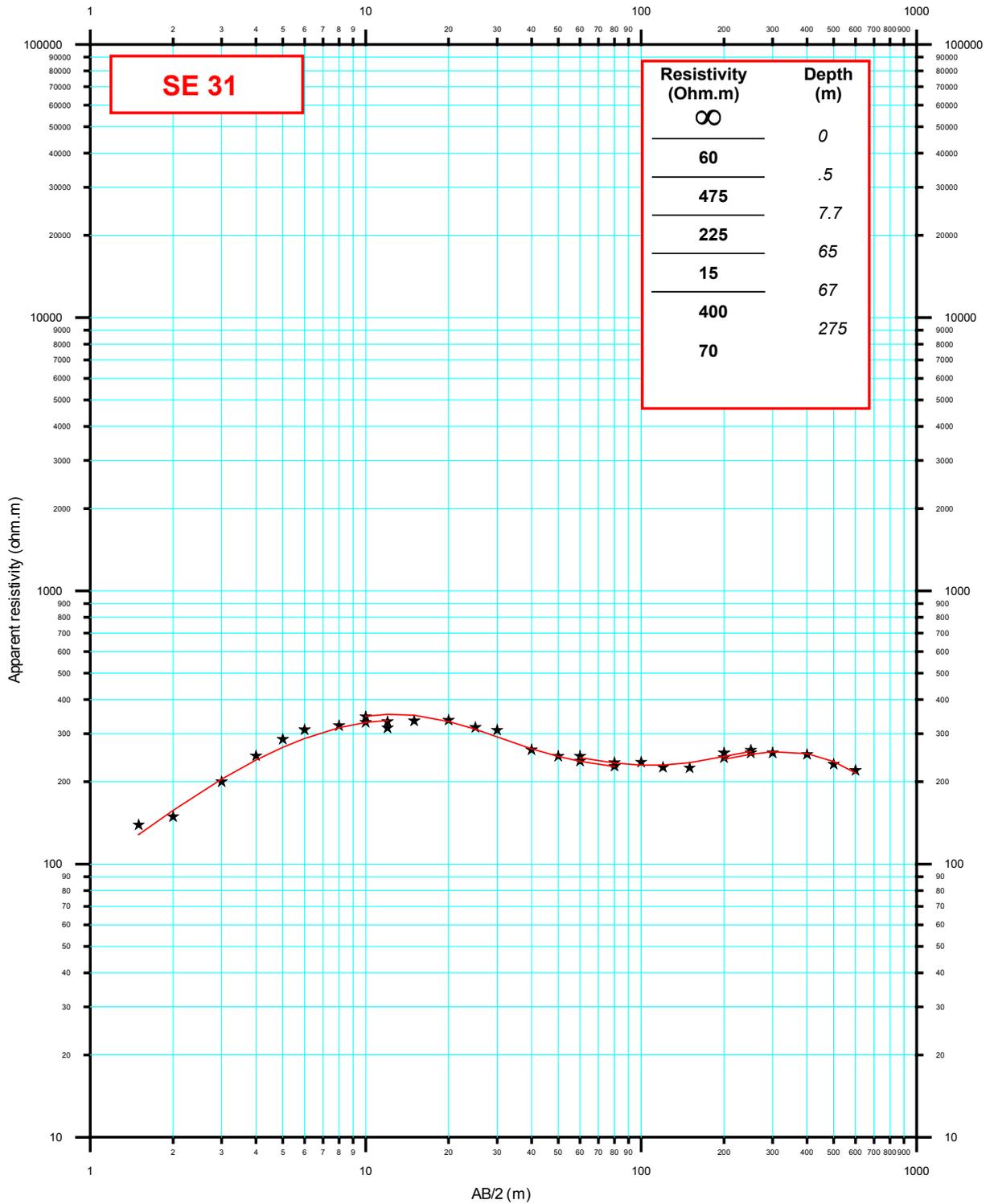
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



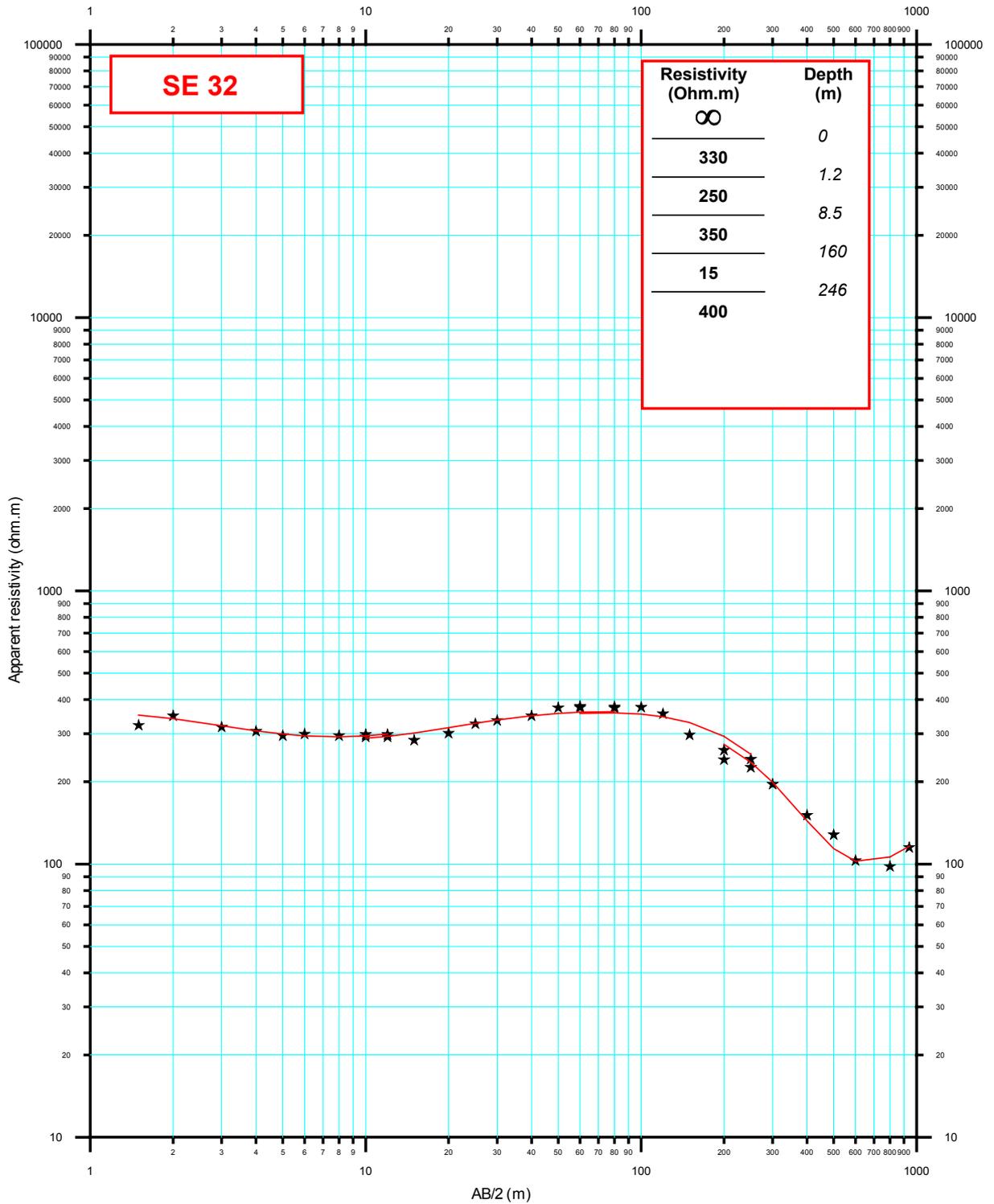
CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D



ANNEXE 5

Tableaux récapitulatifs de l'interprétation des sondages électriques

CAUSSE DE BONIFACIO

SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D

SE01			SE02			SE03			SE04		
RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie									
100	0,72	Recouvrement	100	0,81	Recouvrement	40	1	Recouvrement	90	8,5	Recouvrement
1000	5,8		350	17		250	4		300	18	
250	33	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	150	106	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	120	15	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	120	57	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra
400	72		15	119		250	84		350	116	
15	99	Base Fm Cala di Labra	400		Granite	15	109	Base Fm Cala di Labra	15	190	Base Fm Cala di Labra
1450			400			400			400		

SE05			SE06			SE07			SE08		
RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie									
90	0,4	Recouvrement	100	0,46	Recouvrement	200	0,64	Recouvrement	41	0,84	Recouvrement
750	1,2		1200	1,3		850	1,5		700	1,8	
70	4	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	150	3,2	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	300	4,3	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	80	3,8	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra
1500	7,7		650	53		400	40		400	58	
250	158	Base Fm Cala di Labra	15	83	Base Fm Cala di Labra	15	66	Base Fm Cala di Labra	15	101	Base Fm Cala di Labra
15	265		400			160			400		
400		Granite			Granite			Granite			Granite

CAUSSE DE BONIFACIO

SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D

SE09			SE10			SE11			SE12		
RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie
135	1,8	Recouvrement	45	1,3	Recouvrement	20	0,22	Recouvrement	80	0,5	Recouvrement
115	1,3	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	230	6,7	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	135	1,7	Recouvrement	2500	1,3	Recouvrement
450	1,1		350	40		55	11	Top Fm Cala di Labra	50	2,8	
15	1,30	Base Fm Cala di Labra	15	56	Base Fm Cala di Labra	15	32	Base Fm Cala di Labra	350	151	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra
400		Granite	400		Granite	400		Granite	15	197	Base Fm Cala di Labra
									400		Granite

SE13			SE14			SE15			SE16		
RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie
95	0,45	Recouvrement	190	1,3	Recouvrement	95	0,32	Recouvrement			
680	1,8		400	2	Fm Bonifacio	1300	0,91	Recouvrement			
410	2,5	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	250	16	Top Fm Cala di Labra	130	19	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra			
350	81		15	24	Base Fm Cala di Labra	300	76	Base Fm Cala di Labra			
15	229	Base Fm Cala di Labra	400	53	Granite	15	80	Base Fm Cala di Labra			
400		Granite	40		Granite + invasion salée	400	256	Granite			
						40		Granite + invasion salée			

CAUSSE DE BONIFACIO
SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D

SE17			SE18			SE19			SE20		
RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie									
125	0,21	Recouvrement	155	0,75	Recouvrement	100	0,87	Recouvrement	155	2,4	Recouvrement
325	4,3		160	1,4		400	1,6		20	4	
200	1,4	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	90	2,7	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	90	9,7	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	2000	12	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra
400	3,4		400	36		350	66		350	113	
15	38	Base Fm Cala di Labra	15	70	Base Fm Cala di Labra	15	175	Base Fm Cala di Labra	15	135	Base Fm Cala di Labra
400	17,4	Granite	400		Granite	400		Granite	400		Granite
40		Granite + invasion salée									

SE21			SE22			SE23			SE24		
RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie
45	0,39	Recouvrement	325	0,6	Recouvrement	265	2,4	Recouvrement	750	0,45	Recouvrement
350	1,2		70	1,3		100	4,8		18	2,2	
175	56	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	225	8,9	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	1300	12	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	40	12	Top Fm Cala di Labra
500	167		400	67		175	19		145	19	
15	237	Base Fm Cala di Labra	15	78	Base Fm Cala di Labra	400	105	Base Fm Cala di Labra	15	47	Base Fm Cala di Labra
400		Granite	400		Granite	15	170	Base Fm Cala di Labra	400		Granite
						400		Granite			

CAUSSE DE BONIFACIO

SONDAGES ELECTRIQUES - MODELES 1D

SE25			SE26			SE27			SE28		
RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie
1000	0,31	Recouvrement	80	0,18	Recouvrement	30	0,35	Recouvrement	25	1,6	Recouvrement
35	0,79		300	6,8		700	7,3		700	4,1	
100	5,3	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	180	19	Top Fm Cala di Labra	80	64	Top Fm Cala di Labra	110	48	Top Fm Cala di Labra
250	97		15	27	Base Fm Cala di Labra	15	127	Base Fm Cala di Labra	15	60	Base Fm Cala di Labra
15	129	Base Fm Cala di Labra	400		Granite	400		Granite	400		Granite
400		Granite									

SE29			SE30			SE31			SE32		
RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie	RHO(ohm.m)	Prof. (m)	Lithologie
180	0,5	Recouvrement	25	0,35	Recouvrement	60	0,5	Recouvrement	330	1,2	Recouvrement
120	4,1		1200	2,3		475	7,7		Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	250	
350	20	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	110	10	Fm Bonifacio + top Fm Cala di Labra	225	65	Base Fm Cala di Labra	350	160	Base Fm Cala di Labra
220	182		300	171	15	67	15	246	400		Granite
15	263	Base Fm Cala di Labra	15	182	Base Fm Cala di Labra	400	275	Granite + invasion salée	400		Granite
400		Granite	400	299	Granite + invasion salée	70					
			70								

ANNEXE 6

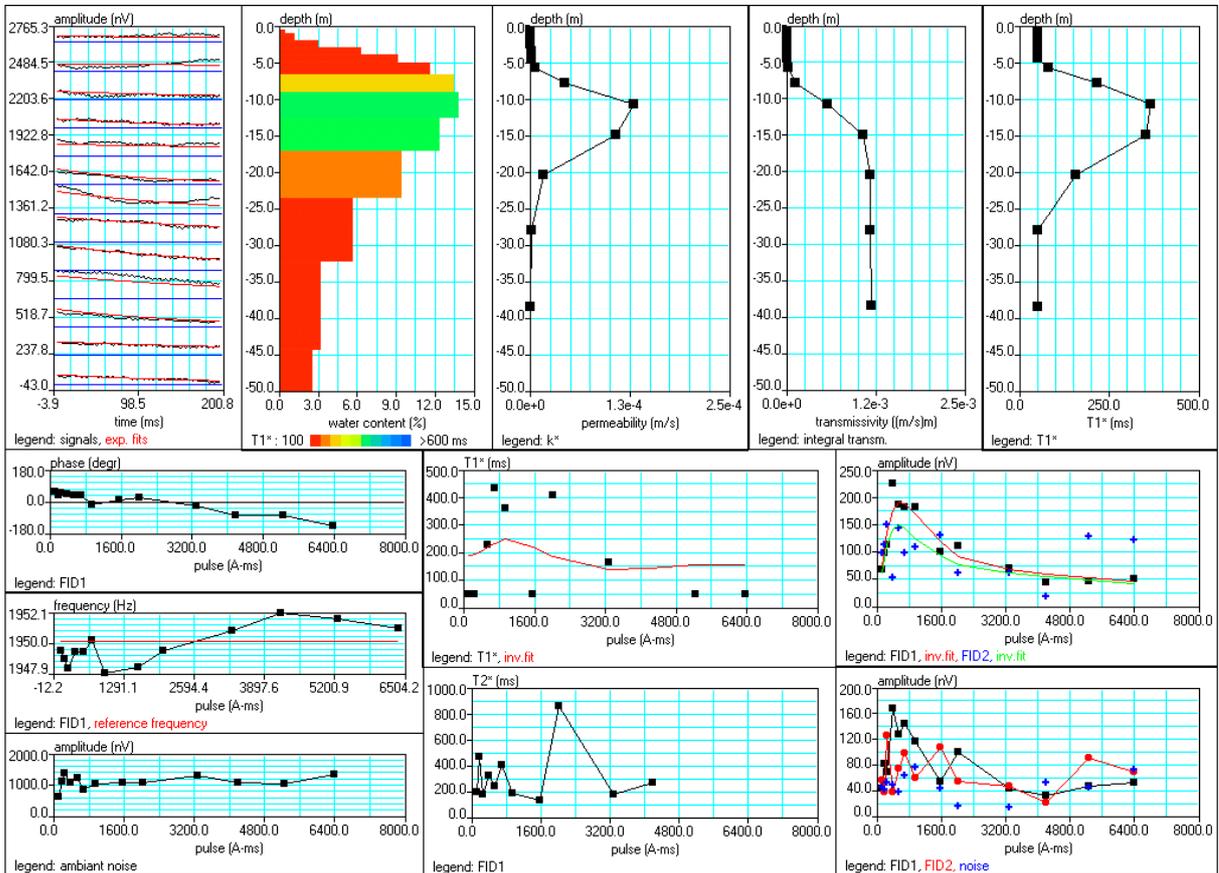
Données et résultats d'interprétation des sondages RMP avec un modèle à nombre de couches égal au nombre de pulses

Caractérisation géométrique et hydrodynamique du cause de Bonifacio (Corse)

Site: CAUSSE DE BONIFACIO BON03
 Loop: 2 - 75.0 Date: 29.03.2002 Time: 16:40

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon03.inp
 matrix: C:\MONTREUIL\DEBUT2001\MATRIX\Ms75_55.mrm
 loop: square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 55 degr, magnitude= 45920.19 nT

filtering window = 198.3 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.27
 fitting error: FID1 = 22.01%; FID2 = 57.65 %
 param. of regular.: E, T2* = 1000.0; T1* = 10.000
 permeability constant Cp = 7.00e-09

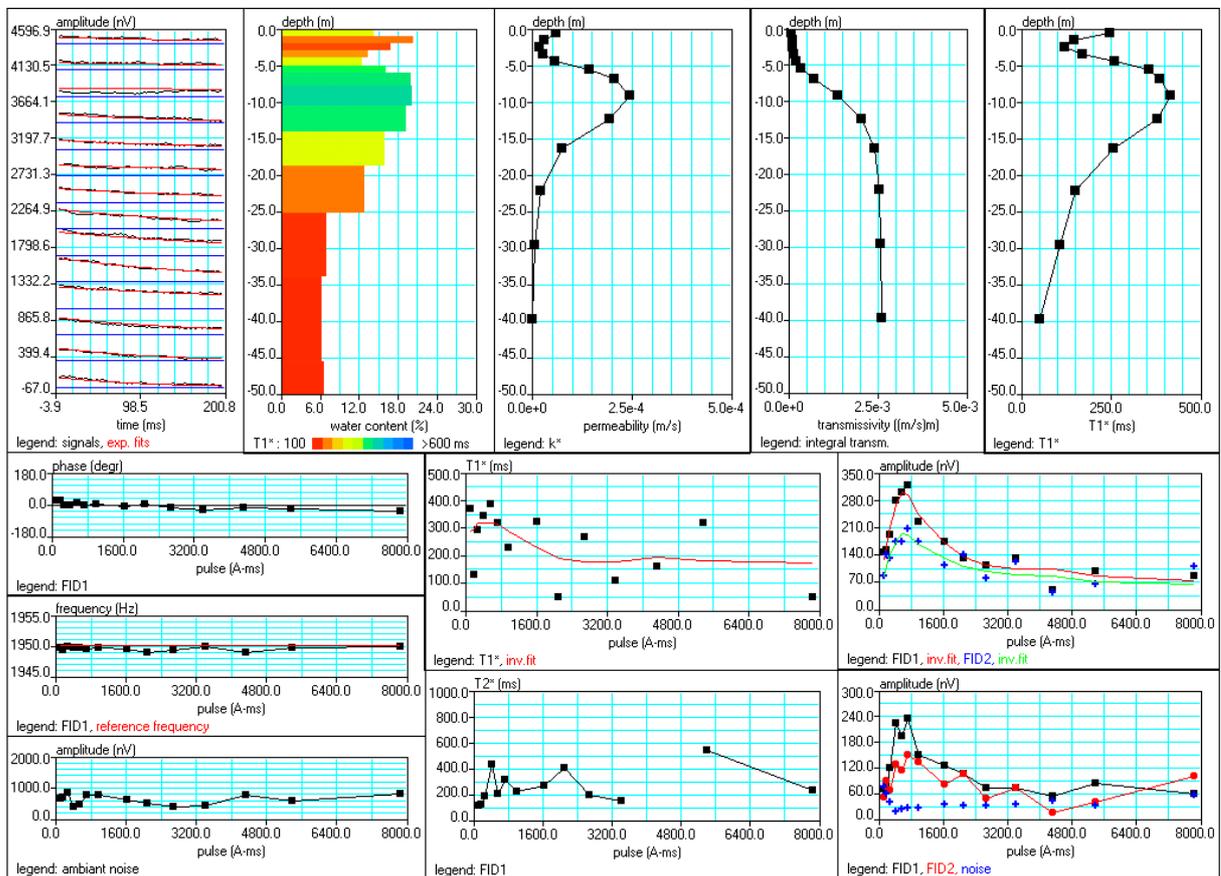


Caractérisation géométrique et hydrodynamique du cause de Bonifacio (Corse)

Site: CAUSSE DE BONIFACIO BON04
 Loop: 4 - 37.5 Date: 30.03.2002 Time: 10:25

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon04.inp
 matrix: C:\CORSE\MATRICE\Corse37.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 58 degr, magnitude= 45777.00 nT

filtering window = 199.0 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 2.79
 fitting error: FID1 = 10.84%; FID2 = 18.36 %
 param. of regular.: E, T2* = 500.0; T1* = 10.000
 permeability constant Cp = 7.00e-09

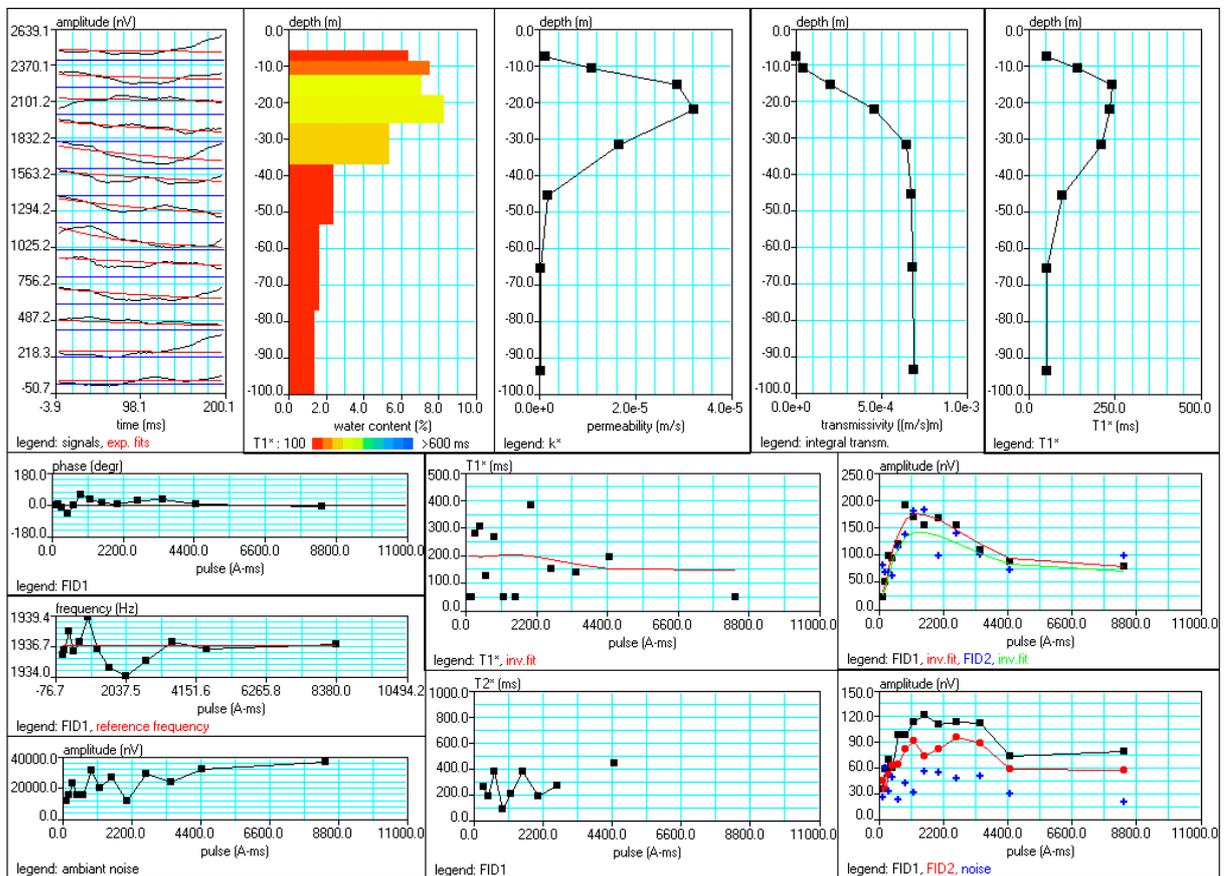


Caractérisation géométrique et hydrodynamique du cause de Bonifacio (Corse)

Site: CAUSSE DE BONIFACIO BON06
 Loop: 2 - 75.0 Date: 02.04.2002 Time: 09:31

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon06.inp
 matrix: C:\CORSE\MATRICE\Corse75.mrm
 loop: square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 58 degr, magnitude= 45464.79 nT

filtering window = 198.3 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.82
 fitting error: FID1 = 10.77%; FID2 = 22.66 %
 param. of regular.: E, T2* = 500.0; T1* = 10.000
 permeability constant Cp = 7.00e-09

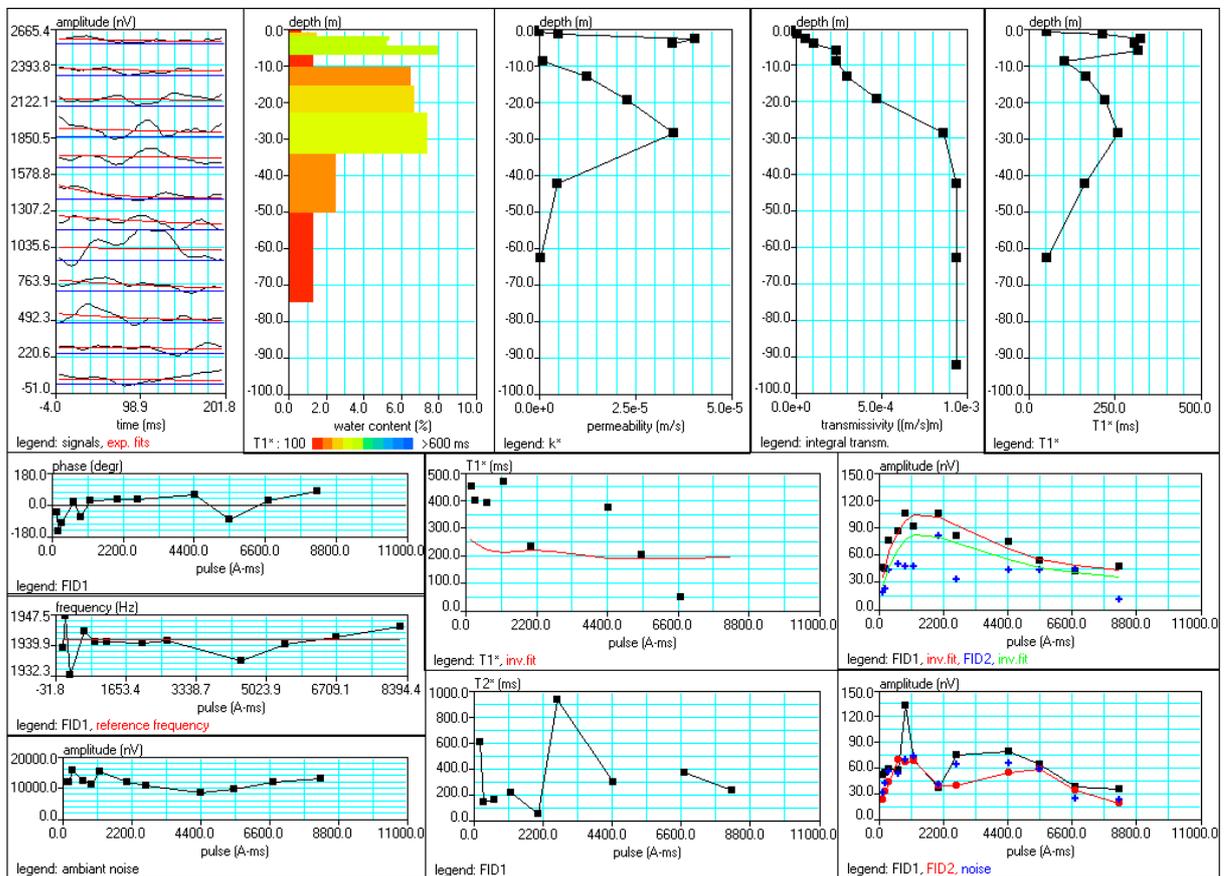


Caractérisation géométrique et hydrodynamique du cause de Bonifacio (Corse)

Site: CAUSSE DE BONIFACIO BON07
 Loop: 2 - 75.0 Date: 02.04.2002 Time: 18:44

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon07.inp
 matrix: C:\CORSE\MATRICE\Corse75.mrm
 loop: square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 58 degr, magnitude= 45570.42 nT

filtering window = 199.9 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 0.97
 fitting error: FID1 = 10.56%; FID2 = 47.13 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant $C_p = 7.00e-09$

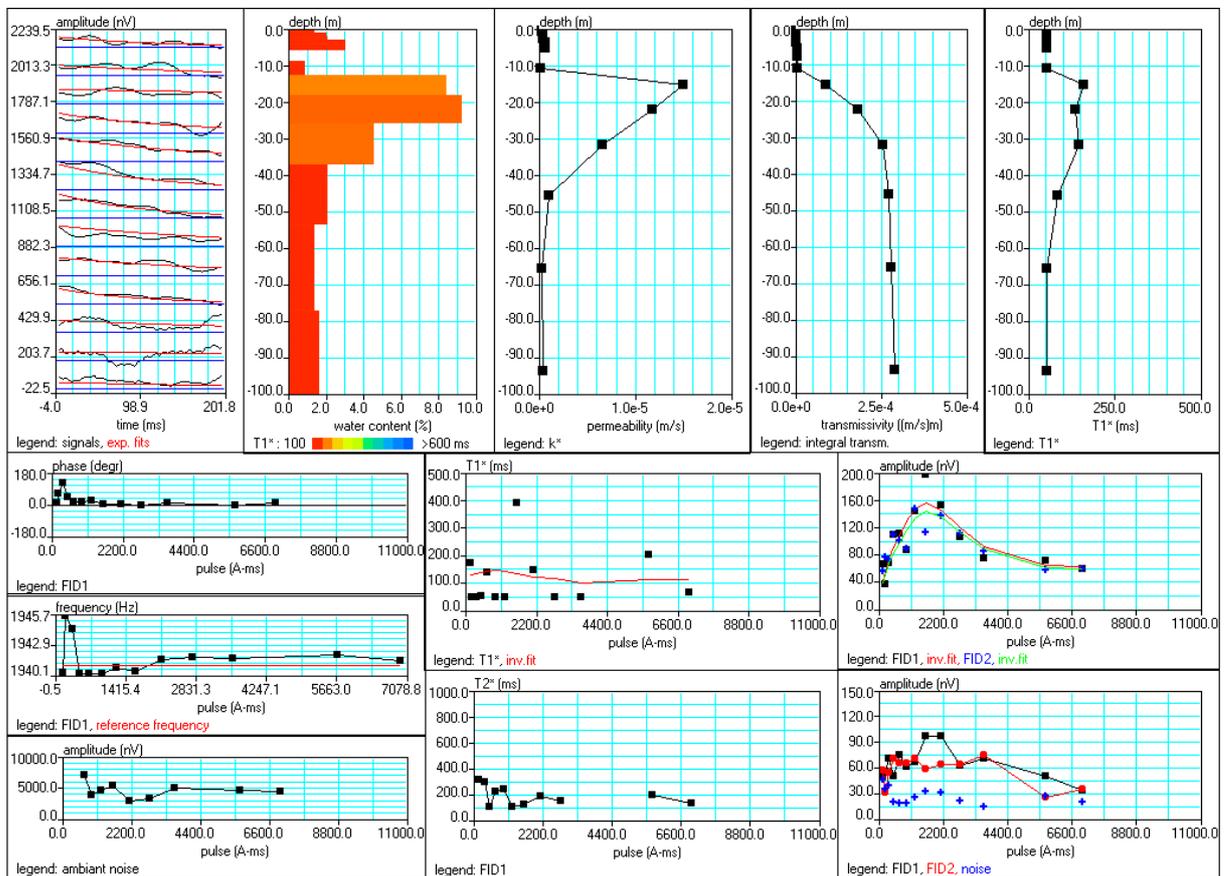


Caractérisation géométrique et hydrodynamique du cause de Bonifacio (Corse)

Site: CAUSSE DE BONIFACIO BON08
 Loop: 2 - 75.0 Date: 03.04.2002 Time: 11:00

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon08.inp
 matrix: C:\CORSE\MATRICE\Corse75.mrm
 loop: square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 58 degr, magnitude= 45563.38 nT

filtering window = 199.9 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 2.10
 fitting error: FID1 = 18.66%; FID2 = 17.11 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant $C_p = 7.00e-09$

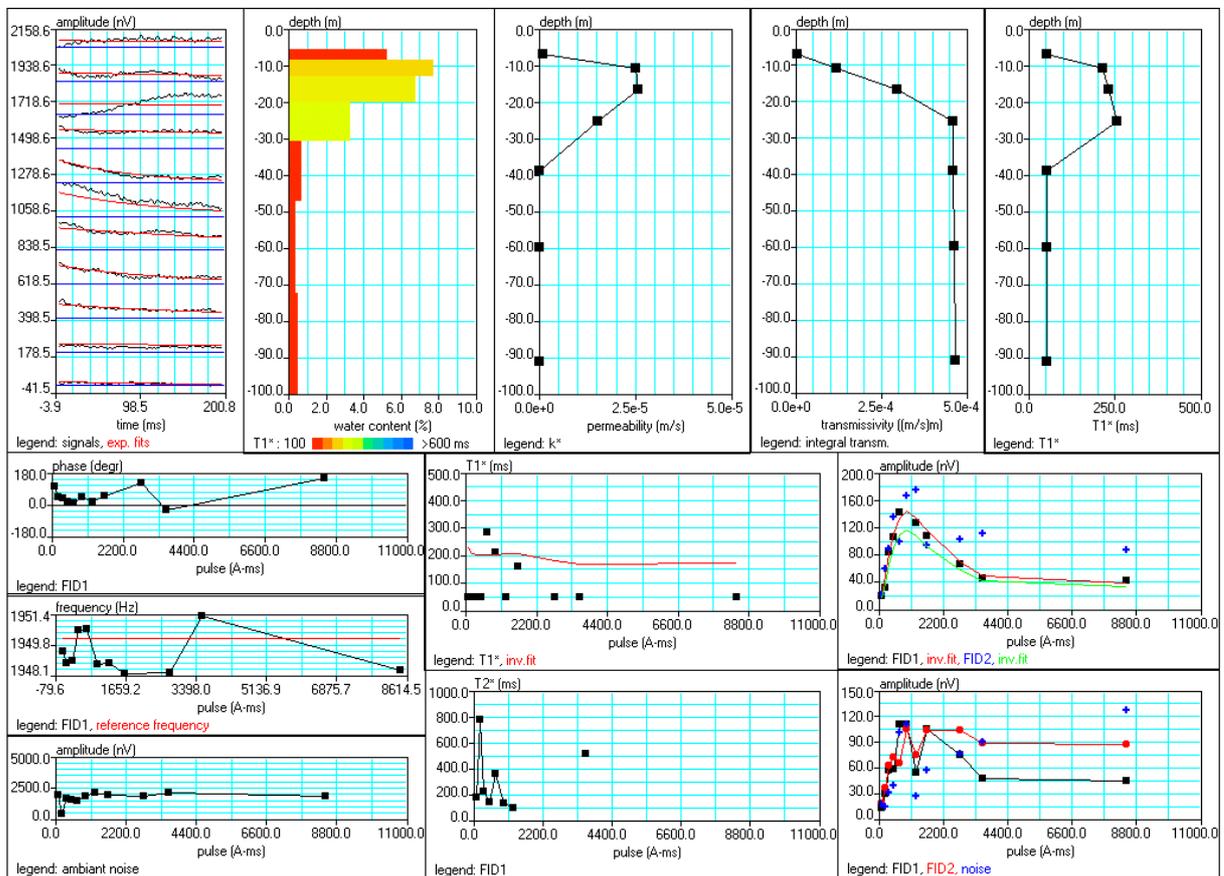


Caractérisation géométrique et hydrodynamique du cause de Bonifacio (Corse)

Site: CAUSSE DE BONIFACIO BON09
 Loop: 2 - 75.0 Date: 04.04.2002 Time: 10:03

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon09.inp
 matrix: C:\CORSE\MATRICE\Corse75.mrm
 loop: square, side = 75.0 m
 geomagnetic field:
 inclination= 58 degr, magnitude= 45777.00 nT

filtering window = 199.0 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 0.61
 fitting error: FID1 = 19.83%; FID2 = 37.84 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant $C_p = 7.00e-09$

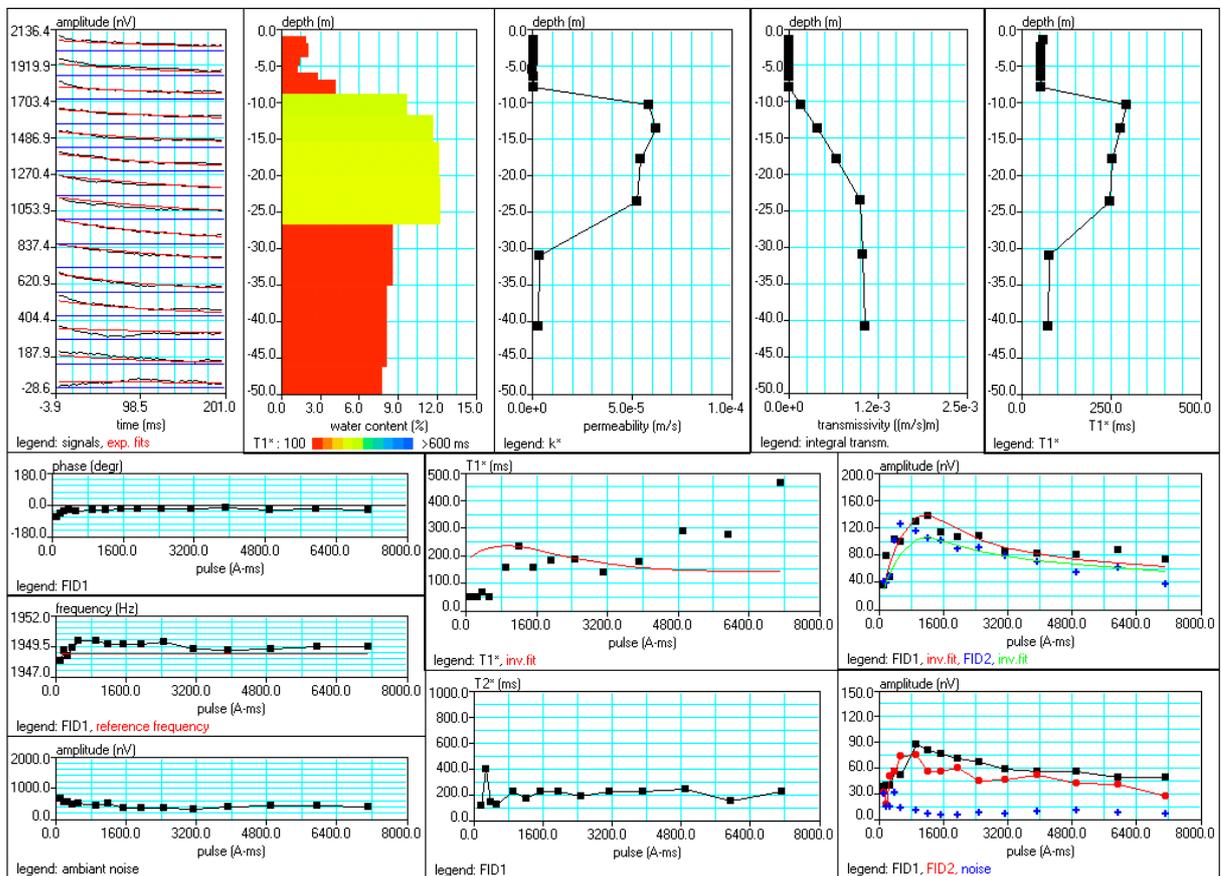


Caractérisation géométrique et hydrodynamique du cause de Bonifacio (Corse)

Site: CAUSSE DE BONIFACIO BON10
 Loop: 4 - 37.5 Date: 04.04.2002 Time: 19:57

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon10.inp
 matrix: C:\CORSE\MATRICE\Corse37.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 58 degr, magnitude= 45748.83 nT

filtering window = 199.1 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 4.23
 fitting error: FID1 = 13.39%; FID2 = 19.41 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

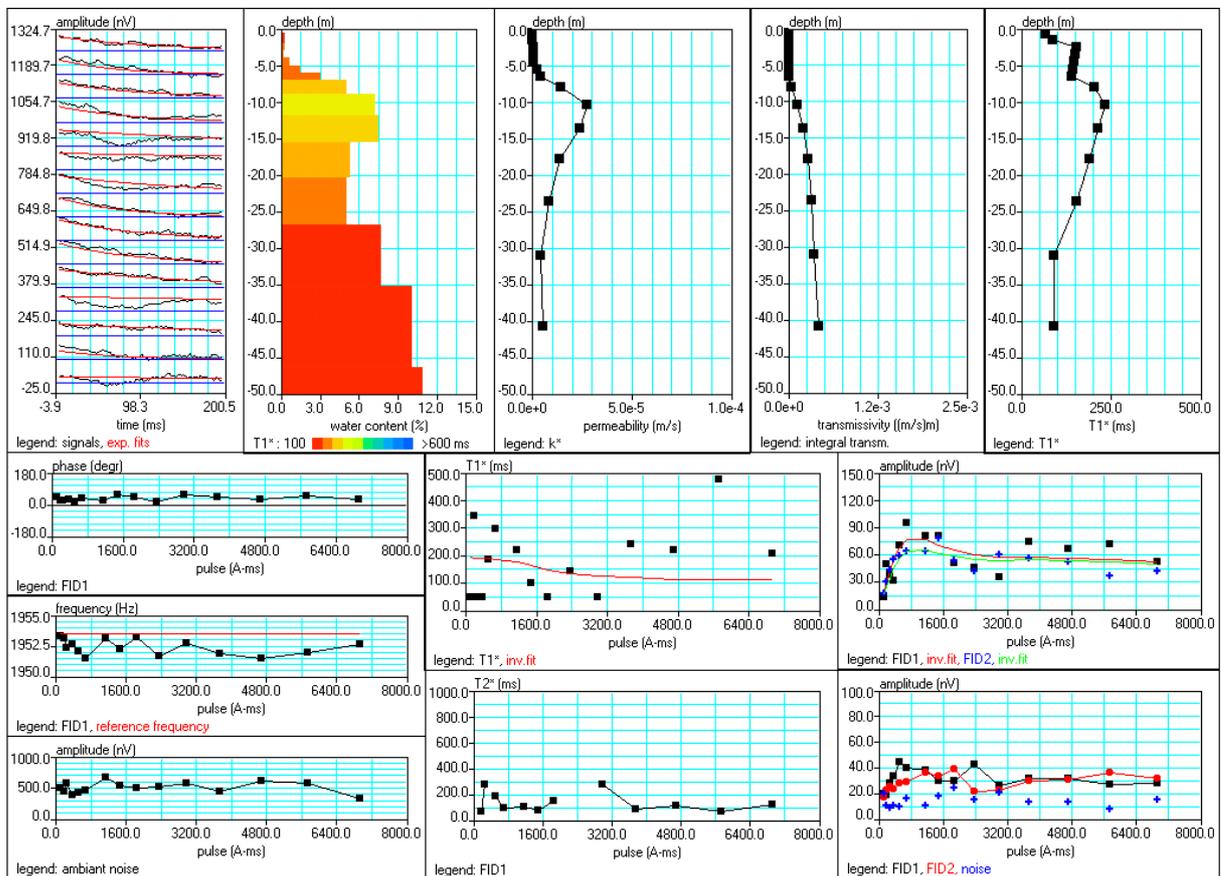


Caractérisation géométrique et hydrodynamique du cause de Bonifacio (Corse)

Site: CAUSSE DE BONIFACIO BON11
 Loop: 4 - 37.5 Date: 05.04.2002 Time: 10:57

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon11.inp
 matrix: C:\CORSE\MATRICE\Corse37.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 58 degr, magnitude= 45856.81 nT

filtering window = 198.6 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 2.12
 fitting error: FID1 = 23.54%; FID2 = 15.80 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

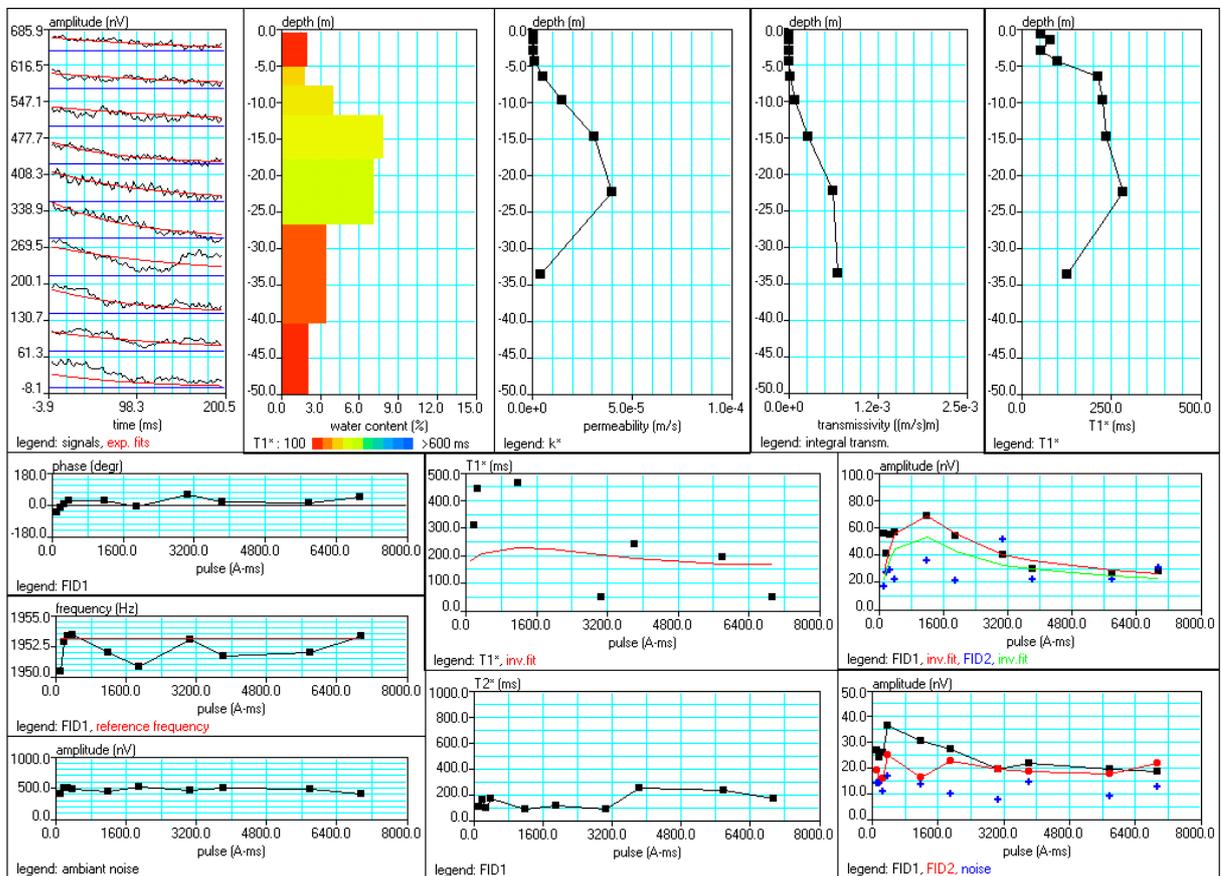


Caractérisation géométrique et hydrodynamique du cause de Bonifacio (Corse)

Site: CAUSSE DE BONIFACIO BON12
 Loop: 4 - 37.5 Date: 06.04.2002 Time: 10:11

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon12.inp
 matrix: C:\CORSE\MATRICE\Corse37.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 58 degr, magnitude= 45847.42 nT

filtering window = 198.7 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.24
 fitting error: FID1 = 21.25%; FID2 = 45.68 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

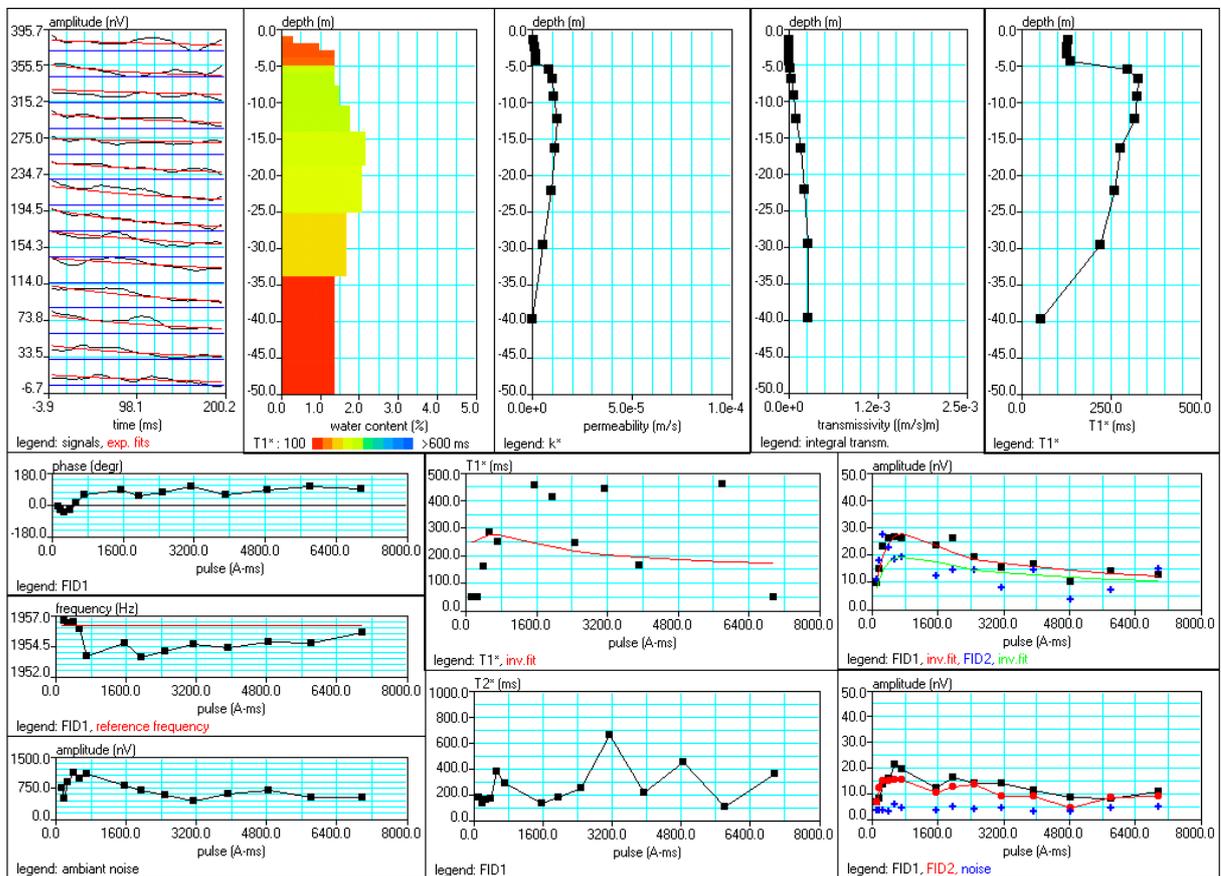


Caractérisation géométrique et hydrodynamique du cause de Bonifacio (Corse)

Site: CAUSSE DE BONIFACIO BON13
 Loop: 4 - 37.5 Date: 08.04.2002 Time: 09:44

NUMIS data set: C:\CORSE\MOD40C\Bon13.inp
 matrix: C:\CORSE\MATRICE\Corse37.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 58 degr, magnitude= 45920.19 nT

filtering window = 198.3 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 2.71
 fitting error: FID1 = 10.97%; FID2 = 34.34 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant $C_p = 7.00e-09$



BRGM
SERVICE EAU

Unité Évaluation de la ressource, milieux discontinus
1039 rue de Pinville - 34000 Montpellier - France - Tél. : 33 (0)4 67 15 79 80