

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**ÉTUDES DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
DES ROCHES DU GISEMENT LOUVICOURT DANS
UN CONTEXTE DE DÉLIMITATION DU MINÉRAI**

VALÉRIE LAFLÈCHE

**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MINÉRAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)**

JUILLET 1996

© Valérie Laflèche, 1996.



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

Acquisitions et
services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-26488-2

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDES DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES
DES ROCHES DU GISEMENT LOUVICOURT DANS
UN CONTEXTE DE DÉLIMITATION DU MINÉRAI

présenté par: LAFLECHE Valérie

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. MARCOTTE Denis, Ph.D., président

M. CHOUTEAU Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. McGAUGHEY John, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. CALVERT Andrew, Ph.D., membre

RÉSUMÉ

Cette étude examine les relations entre les propriétés physiques mesurables par techniques géophysiques et les propriétés géologiques des roches du gisement Louvicourt. Ce gisement, exploité pour le cuivre, le zinc et l'or, est situé à 25 kilomètres à l'est de Val d'Or, en Abitibi. C'est un gisement profond de type sulfure massif volcanogène archéen.

Des propriétés physiques et des mesures chimiques prises sur des échantillons de carottes de forage et lors de levés de diagraphie (mesures physiques prises en trous de forage) sont étudiées de façon statistique. La connaissance des relations entre les propriétés physiques et la géologie des roches du gisement ouvre les portes à plusieurs types d'applications. On peut en effet interpréter la géologie (type de roches et teneurs) à partir de mesures de propriétés physiques ou encore, à l'inverse, estimer des valeurs de propriétés physiques à partir de la géologie.

Ainsi, la connaissance des propriétés physiques en fonction des différents types de roches offre la possibilité d'interpréter la géologie sans avoir besoin de voir la roche par l'intermédiaire d'échantillons de carottes de forage. La géologie de trous sondés par diagraphie peut être interprétée directement. Si l'on atteint la précision technique nécessaire, de tels sondages diagraphiques, possiblement effectués dans des trous de production, pourraient devenir une alternative beaucoup plus économique, tant au point de vue temps qu'argent, aux techniques habituelles (forage à diamant et à

l'interprétation des carottes). En effet, ceci offre la possibilité remplacer des trous qui auraient auparavant dû être forés au diamant par des trous forés à percussion (technique environ quatre fois moins coûteuse). Aussi, l'interprétation de la géologie à partir des données de diagraphie est faite sur place et est plus rapide que l'interprétation des carottes. Notre étude détermine, par exemple, que grâce à l'analyse discriminante et à l'étude des relevés de forage et de diagraphie, on réussit à reproduire la description géologique des carottes à partir des mesures de conductivité électrique et de rayonnement gamma naturel. En effet, des seuils ont été établis, pour les sondes utilisées lors de nos levés, afin de séparer la roche stérile du minerai et même de différencier le minerai cuprifère du zincifère. Ce genre d'interprétation géologique n'est pas détaillé, mais comme il identifie le stérile du minerai, et même le minerai cuprifère du zincifère, il devient appréciable, surtout à cause de sa rapidité d'exécution et le fait qu'il peut être effectué dans des trous de production.

Un ensemble de valeurs propres aux types majeurs de roches du gisement a été développé à partir des propriétés physiques mesurées afin de caractériser ces roches de façon fiable pour pouvoir ultérieurement faire des simulations géophysiques réalistes. Six types rocheux ont été étudiés. Ce sont la rhyodacite, le tuf, la pyrite massive, les dykes, le minerai cuprifère et le minerai zincifère.

Aussi, la connaissance des relations entre les propriétés physiques et certains métaux, économiques (cuivre et zinc) ou non (fer), présents dans les roches du gisement, permet d'établir des formules d'estimation des teneurs directement à partir

des mesures physiques. La capacité de calculer ainsi les teneurs permet, par l'intermédiaire des levés de diagraphie, d'estimer rapidement les teneurs *tout au long* des trous, et ce, même pour les *trous de production*, permettant ainsi de modifier les interprétations géologiques et les plans des chantiers. De plus, on réalise une économie considérable de temps et d'argent grâce à la diminution du nombre d'analyses chimiques d'échantillons et aussi parce que tous les trous de délimitation des lentilles minéralisées n'auraient plus à être forés au diamant. Le sondage des trous par diagraphie est aussi plus rapide que la préparation et l'analyse en laboratoire d'échantillons de carottes. Ainsi, des formules d'estimation des teneurs de cuivre et de fer ont été développées à l'aide d'ajustements de courbes aux observations et de régressions linéaires simples et multiples. Les mesures de conductivité électrique permettent l'estimation du cuivre avec une erreur moyenne de 0,85 % Cu et ce sont les mesures de vitesse des ondes de compression et de masse volumique qui expliquent le mieux les teneurs en fer avec une erreur moyenne de 3,27 % Fe. Les teneurs de zinc n'ont pu être estimées de façon satisfaisante à partir des données disponibles.

L'étude des relations entre la géologie et les propriétés physiques nous permet aussi de modéliser trois propriétés physiques (masse volumique, conductivité électrique et vitesse des ondes sismiques de compression) de façon tridimensionnelle dans une zone minéralisée du gisement. Ceci principalement afin d'utiliser ces modèles comme modèles de départ fiables et propres au gisement pour des simulations géophysiques. Ces simulations permettraient entre autres d'évaluer le potentiel des méthodes

géophysiques entre trous de forage, que ce soit pour la délimitation du minerai ou dans d'autres buts. Aussi, l'existence de tels modèles géophysiques rend possible une vaste gamme d'études et d'évaluations géophysiques spécifiques à la région étudiée. On peut de plus comparer les résultats des simulations à des levés réels. Ces comparaisons et évaluations exhaustives ne font pas partie du présent ouvrage mais sont rendues possibles grâce ce dernier. Ainsi, les conductivités électriques sont estimées à l'aide des teneurs en cuivre et en fer et la vitesse des ondes de compression à l'aide les teneurs en fer, en cuivre et en zinc. La masse volumique est également le mieux expliquée par une combinaison entre les teneurs de fer, de cuivre et de zinc. On modélise donc ces trois propriétés physiques partout dans une zone minéralisée de la mine pour laquelle les valeurs des teneurs sont disponibles à intervalles réguliers. Les modèles de masse volumique pourront être utilisés pour des études de gravimétrie, ou bien, en combinaison avec les modèles de vitesses sismiques pour des levés de sismique-réflexion. Les modèles des vitesses des ondes de compression serviront pour la sismique-transmission entre trous de forage, et la conductivité électrique pour les levés électromagnétiques. Un exemple d'application à un levé tomographique de transmission des ondes sismiques est présenté à la toute fin de cette étude.

ABSTRACT

This study examines the relations between physical properties measurable by geophysical techniques and geological properties of the Louvicourt deposit rocks. This deposit is exploited for copper, zinc and gold and is located 25 kilometers east of Val d'Or, Québec. It is a deep, Archean, volcanogenic massive sulphide deposit.

Chemical measurements taken on rock samples and physical properties measured on samples and by borehole logging are statistically studied. Understanding the relations between the physical properties and the geology allows many types of applications. We can interpret geology (rock type and grade) from the physical property measurements, or, conversely, estimate some physical property values from the geology.

Thus, knowing the physical properties in relation to the different rock types allows the possibility of interpreting the geology without needing to actually see the rock through core samples. Geological interpretation of holes geophysically logged can be performed immediately. If technical success is achieved, borehole logging performed in production holes, could therefore be an economical alternative to usual techniques (core logging of diamond drilled holes). In fact, this solution allows using percussion drilling instead of expensive diamond drilling for some delineation holes. In addition, geological interpretation through geophysical logging is done on the spot and is faster than visual interpretation of core logs.

This study, using discriminant analysis and examination of geophysical logs, shows that we can reproduce core logs through electric conductivity and natural gamma logging. On the probes used for those logs, thresholds determined for natural gamma and electric conductivity probes allow differentiation of ore and waste, and also isolation of copper ore from zinc ore. This type of geological interpretation is not detailed, but very still valuable since it gives the key elements and can be performed in percussion holes.

A number of average physical property values have been calculated to characterize the major rock types of the deposit, in order to have reliable geophysical modelling parameters for future studies. Six rock types have been studied; rhyodacites, tuffs, massive pyrite, dykes, copper ore and zinc ore.

Also, understanding the relations between the physical properties and certain metals, economic (copper and zinc) or not (iron), present in the rock, allows development of equations to estimate grades through the physical property measurements. This enables us, through geophysical logging, to quickly estimate those grades all along the holes. This could be done even in production holes (percussion drilled holes) in order to modify geological interpretation and stope designs. Furthermore, the costs and time required to estimate grades would be considerably reduced since there is no need for chemical assays and that not all delineation holes would have to be diamond drilled. Grade estimations through geophysical logging is also a lot less time consuming than the preparation of core samples and time required for the assays. Equations have

been developed to estimate copper and iron grades using curve fitting and simple and multivariate linear regressions. Electric conductivity measurements allow estimation of copper grades with a mean error of 0,85 % Cu and velocity of seismic compressional waves and density measurements permit estimation of iron grades with a mean error of 3,27 % Fe. The available data set has not allowed us to develop a reliable zinc grade estimation equation.

Modelling of three physical properties (density, electric conductivity and velocity of seismic compressional waves) using their relations to metal contents of the rock has been performed in a mineralized area of the mine. The physical property models developed are exclusive to this area of the Louvicourt deposit and can be used as reliable starting models for geophysical survey simulations and modelling. Such simulations would allow, as an example, evaluation of crosshole geophysical methods for delineation purposes. The results of such simulations can also be compared to actual field surveys. This paper does not include these studies, but makes them feasible. Estimations of the electric conductivities use copper and zinc grades, and those of the velocity of the compressional waves use a combination of iron, copper and zinc grades. The density is also estimated with iron, copper and zinc. These physical properties are thus modeled in an area of the deposit for which we have grade estimations everywhere on a three dimensional regular grid. Density models could be used for gravity, or, in combination with velocity models, for seismic reflection. Velocity models could also be used for crosshole seismic transmission, and electric conductivity models for electromagnetic studies. An example of the use of a

velocity model for tomographic velocity survey purposes is presented at the end of this paper.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le Dr John McGaughey, du Centre de technologie Noranda (CTN), pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce projet tout en complétant mes études de maîtrise, ainsi que pour ses nombreux conseils et pour la connaissance qu'il m'a patiemment transmise. Je remercie également mon directeur de recherche, le Dr Michel Chouteau, pour sa disponibilité et son support ainsi que le Dr Denis Marcotte avec qui j'ai eu de nombreuses discussions constructives et qui m'a aimablement fourni des routines de traitement statistique.

Ce projet n'aurait pas été possible sans la collaboration de Louvicourt Mine d'où proviennent toutes les données. En particulier, j'aimerais remercier messieurs Edmund Stuart, Louis Martin, Denis Boivin et Petr Pelz.

J'aimerais exprimer ma gratitude à monsieur Richard McCreary et à madame Marie-Josée Bertrand, anciennement du CTN, pour leur support et leurs nombreux conseils. Je remercie également le Dr Marc Vallée du CTN pour son aide précieuse. Je suis reconnaissante envers le Dr Taoufik Ait Ettajer, de l'École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, pour l'aide technique qu'il m'a accordée lors de l'utilisation du logiciel Gocad®.

Enfin, un remerciement particulier est adressé à ma famille pour son soutien et tout particulièrement à mon mari, Nicholas, pour sa patience et son encouragement.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	viii
REMERCIEMENTS	xii
TABLE DES MATIÈRES	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xvi
LISTE DES FIGURES	xviii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Contexte et buts de l'étude	1
1.2 Le gisement Louvicourt	3
1.3 Région étudiée	6
2. DONNÉES ET PRINCIPES GÉOPHYSIQUES	8
2.1 Mesures prises en laboratoire (groupe "échantillons")	9
2.2 Mesures diagraphiques	14
2.2.1 La diagraphie	15
2.2.2 Groupe "655"	17
2.2.3 Groupe "565"	19
2.3 Mesures entre trous de forage	22
2.3.1 Tomographie	22
2.3.2 Mesures sismiques	23

2.4 Remarque	25
3. MÉTHODES D'ANALYSE STATISTIQUE	28
3.1 Diagrammes binaires et courbes d'ajustement	28
3.2 Régression linéaire à multiples variables	29
3.3 Analyse discriminante	32
4. DÉTERMINATION DES TYPES ROCHEUX	36
4.1 Groupe "échantillons"	39
4.2 Groupe "655"	47
4.3 Groupe "565"	55
4.4 Conclusion	64
5. ESTIMATION DES TENEURS	96
5.1 Groupe "échantillons"	98
5.2 Groupe "655"	110
5.3 Groupe "565"	117
5.4 Conclusion	128
6. MODÈLES 3D GÉOLOGIQUE ET GÉOPHYSIQUES	159
6.1 Modélisation de la géologie	162
6.2 Modélisation de la vitesse des ondes de compression	163
6.3 Modélisation de la conductivité électrique	167

6.4 Modélisation de la masse volumique	170
6.5 Conclusion	171
7. EXEMPLE D'UTILISATION DES MODÈLES	191
7.1 Modèle de la vitesse des ondes de compression	191
7.2 Temps de premières arrivées synthétiques	192
7.3 Le réel entre trous de forage	194
7.4 Conclusion	196
8. CONCLUSION	199
RÉFÉRENCES	202

LISTE DES TABLEAUX

2. DONNÉES ET PRINCIPES GÉOHYSIQUES

Tableau 2.1	Analyses chimiques effectuées sur les échantillons	10
-------------	--	----

Tableau 2.2	Analyses physiques effectuées sur les échantillons	11
-------------	--	----

3. MÉTHODES D'ANALYSE STATISTIQUE

Tableau 3.1	Types d'ajustements	29
-------------	---------------------------	----

Tableau 3.2	Exemple de résultats d'une analyse discriminante	34
-------------	--	----

4. DÉTERMINATION DES TYPES ROCHEUX

Tableau 4.1	Propriétés des échantillons: valeurs moyennes et écarts-type	44
-------------	--	----

Tableau 4.2	Résultats de l'analyse discriminante (log (conductivité électrique à 1 kHz))	45
-------------	---	----

Tableau 4.3	Propriétés des types rocheux pour le groupe "655": valeurs moyennes et écarts-type	50
-------------	---	----

Tableau 4.4	Résultats de l'analyse discriminante (susceptibilité magnétique)	52
-------------	--	----

Tableau 4.5	Propriétés des types rocheux pour le groupe "565": valeurs moyennes et écarts-type	59
-------------	---	----

Tableau 4.6	Résultats de l'analyse discriminante (conductivité électrique et rayonnement gamma-gamma)	60
-------------	--	----

Tableau 4.7	Résultats de l'analyse discriminante (rayonnement gamma naturel)	61
-------------	---	----

5. ESTIMATION DES TENEURS

Tableau 5.1	Coefficients de corrélation simple pour le groupe "échantillons"	100
Tableau 5.2	Formules d'estimation des teneurs en cuivre - groupe "échantillons"	104
Tableau 5.3	Formules d'estimation des teneurs en fer - groupe "échantillons"	108
Tableau 5.4	Coefficients de corrélation simple pour le groupe "655"	112
Tableau 5.5	Formules d'estimation des teneurs en fer - groupe "655"	116
Tableau 5.6	Coefficients de corrélation simple pour le groupe "565"	118
Tableau 5.7	Formules d'estimation des teneurs en cuivre - groupe "565"	121
Tableau 5.8	Formules d'estimation des teneurs en cuivre ^{équivalent} - groupe "565"	125
Tableau 5.9	Formules d'estimation des teneurs en fer - groupe "565"	127

6. MODÈLES 3D GÉOLOGIQUE ET GÉOPHYSIQUES

Tableau 6.1	Formules d'estimation de la vitesse des ondes de compression basées sur les levés diagraphiques du groupe "655"	165
Tableau 6.2	Formules d'estimation de la conductivité des échantillons	168
Tableau 6.3	Formule d'estimation de la conductivité - groupe "565"	169

LISTE DES FIGURES

1. INTRODUCTION

Figure 1.1 Localisation de Louvicourt	7
---	---

2. DONNÉES ET PRINCIPES GÉOPHYSIQUES

Figure 2.1 Trous de forage investigués	26
Figure 2.2 Section verticale et localisation des échantillons	27

3. MÉTHODES D'ANALYSE STATISTIQUE

Figure 3.1 Exemple d'analyse discriminante, cas de 2 groupes avec 2 variables discriminantes (figure adaptée de Davis, 1987)	35
---	----

4. DÉTERMINATION DES TYPES ROCHEUX

Figure 4.1 Histogrammes des propriétés mesurées sur les échantillons	67
Figure 4.2 Diagramme binaire de la conductivité électrique à 1 kHz en fonction de la masse volumique	74
Figure 4.3 Relevés de diagraphie des trous du groupe "655"	75
Figure 4.4 Histogrammes des propriétés mesurées - groupe "655"	78
Figure 4.5 Diagramme binaire de la susceptibilité magnétique en fonction du rayonnement gamma naturel	81
Figure 4.6 Relevés de diagraphie des trous du groupe "565"	82
Figure 4.7 Histogrammes des propriétés mesurées - groupe "565"	86

Figure 4.8	Diagramme binaire du rayonnement gamma naturel en fonction de la conductivité électrique	90
Figure 4.9	Diagramme binaire de la susceptibilité magnétique en fonction du rayonnement gamma naturel	91
Figure 4.10	Comparaison des interprétations géologiques	92

5. ESTIMATION DES TENEURS

Figure 5.1	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en cuivre - groupe "échantillons"	131
Figure 5.2	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en zinc - groupe "échantillons"	135
Figure 5.3	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en fer - groupe "échantillons".....	138
Figure 5.4	Diagrammes binaire et tertiaire utilisés pour l'estimation des quantités de pyrite, du mélange sphalérite/chalcoppyrite et de gangue des échantillons (adaptée de Salisbury et <i>al.</i> , 1996)	143
Figure 5.5	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs - groupe "655".....	144
Figure 5.6	Estimation du fer à l'aide de la vitesse des ondes de compression pour les trous du groupe "655"	148
Figure 5.7	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en cuivre - groupe "565"	149

Figure 5.8	Estimation du cuivre à partir de la conductivité électrique pour les trous du groupe "565"	151
Figure 5.9	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en zinc - groupe "565"	152
Figure 5.10	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en cuivre équivalent - groupe "565"	153
Figure 5.11	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en fer - groupe "565"	156
Figure 5.12	Estimation du fer à l'aide du rayonnement gamma-gamma pour les trous du groupe "565"	158

6. MODÈLES 3D GÉOLOGIQUE ET GÉOPHYSIQUES

Figure 6.1	Surface de contact lithologique entre le tuf et la rhyodacite	173
Figure 6.2	Modèle de blocs des types lithologiques	174
Figure 6.3	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la vitesse des ondes de compression pour le groupe "échantillons"	175
Figure 6.4	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la vitesse des ondes de compression à partir des levés du groupe "655"	176
Figure 6.5	Modèle de la vitesse des ondes de compression estimée à partir du fer	178
Figure 6.6	Modèle de la vitesse des ondes de compression estimée à partir du fer, du cuivre et du zinc	179

Figure 6.7	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la conductivité électrique à partir du cuivre	180
Figure 6.8	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la conductivité électrique à partir du zinc	183
Figure 6.9	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la conductivité électrique à partir du fer	185
Figure 6.10	Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la conductivité électrique à partir des levés diagraphiques du groupe "565"	188
Figure 6.11	Modèle de la conductivité électrique à 1 MHz estimée à partir du cuivre	189
Figure 6.12	Modèle de la masse volumique	190

7. EXEMPLE D'UTILISATION DES MODÈLES

Figure 7.1	Modèle de la vitesse des ondes de compression estimée à partir du fer, du cuivre et du zinc et tomogramme synthétique	197
Figure 7.2	Tomogrammes illustrant la vitesse des ondes de compression	198

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte et buts de l'étude

Le climat économique actuel dans le domaine de l'exploitation minière incite à maximiser la récupération du minerai tout en minimisant les coûts de développement. Ceci nécessite une description de plus en plus précise du minerai (localisation, géométrie, type et teneur). L'intégration de diverses technologies permet de générer des modèles géologiques et géophysiques en trois dimensions de plus en plus réalistes qui peuvent aider à cette description du minerai.

L'industrie minière commence à s'intéresser à cette idée, mais l'intégration des technologies en est encore à ses débuts. Des études, comme par exemple celles de Glenn et Nelson (1979) et Cinq-Mars et *al.* (1992), intègrent la diagraphie géophysique et la géochimie à l'information géologique. La Commission géologique du Canada, entre autres, a développé des outils permettant de mesurer des propriétés physiques en trous de forage de petit diamètre et a depuis effectué un grand nombre de levés pour lesquels on essaie d'interpréter la géologie à partir de mesures physiques. On pense par exemple à Pflug et *al.* (1994), Mwenifumbo et Killeen (1987) et Mwenifumbo et *al.* (1993). Aussi, de plus en plus, on utilise des méthodes statistiques multivariées pour analyser les données de diagraphie. Par exemple, Cinq-Mars (1990) utilise l'analyse discriminante et l'analyse en composantes principales afin de caractériser la lithologie et la minéralisation en plomb du dépôt de Yava situé au

Cap Breton, en Nouvelle-Écosse. Wänstedt (1992) a étudié les propriétés physiques des roches de deux mines suédoises principalement dans le but de localiser le minerai, d'estimer les teneurs et aussi pour comparer l'économie de temps et d'argent obtenue en utilisant la diagraphie en trous de percussion plutôt que des analyses chimiques de carottes de forage. Les companies Outokumpu Metals and Resources de Finlande et Mala Geoscience de Suède ont développé plusieurs sondes de diagraphie spécialement adaptées à l'environnement souterrain. Plusieurs de leurs systèmes sont utilisés de façon routinière dans des mines de minerai de sulfures massifs situées principalement en Finlande et en Suède.

Dans ce contexte, la présente étude des propriétés physiques des roches du gisement Louvicourt se veut une analyse des relations entre les propriétés physiques qui peuvent être mesurées grâce à des techniques géophysiques et les propriétés géologiques des roches. Ces propriétés géologiques sont la classification lithologique et l'estimation quantitative des teneurs en métaux. On veut donc identifier par sondages diagraphiques et à l'aide de méthodes statistiques les types de roches intersectées par les trous de forage ainsi que leurs teneurs en cuivre et en zinc. On désire aussi caractériser les roches du gisement au point de vue de leurs propriétés physiques propres afin de pouvoir faire des simulations géophysiques réalistes. Grâce à ces résultats, on peut avoir accès rapidement et économiquement à de l'information qui ne peut autrement être obtenue que par analyses chimiques et physiques faites à coûts élevés sur des échantillons provenant de trous forés au diamant. Aussi, la modélisation en trois dimensions de trois propriétés physiques

(conductivité électrique, masse volumique et vitesse des ondes sismiques de compression) dans une zone minéralisée de la mine permet de facilement la visualiser en trois dimensions et de simuler des levés géophysiques permettant éventuellement d'estimer le potentiel des méthodes électromagnétique et sismique entre trous de forage au point de vue délimitation du minéral.

Ainsi, on retrouve dans le second chapitre de ce mémoire une description des données disponibles et des principes géophysiques étudiés. Le troisième chapitre décrit brièvement les méthodes statistiques utilisées tout au long de l'étude. Au chapitre 4, on étudie les propriétés physiques en fonction des types rocheux. On y détermine comment interpréter la géologie à partir des logs de diagraphie et on établit des valeurs moyennes des propriétés physiques en fonction des différents types rocheux. Le cinquième chapitre développe des formules d'estimation des teneurs à partir des mesures physiques et au sixième chapitre on modélise le comportement des propriétés physiques en fonction des teneurs en cuivre, de zinc et de fer contenus dans les roches. Une zone du gisement est aussi modélisée grâce à ces fonctions. Le chapitre 7 donne un exemple d'utilisation des modèles développés au chapitre 6.

1.2 Le gisement Louvicourt

Le gisement Louvicourt est exploité principalement pour le cuivre, le zinc et l'or. Il appartient à 30% à Aur Ressources inc., qui est aussi opérateur de la mine, à 45% à Novicourt inc. et à 25% à Teck Corporation. Il est situé à 25 kilomètres à l'est de

Val d'Or, Québec (voir figure 1.1). C'est un gisement de type sulfure massif volcanogène (VMS) archéen. Il est relativement profond; ses réserves principales se trouvent entre 400 et 900 mètres sous la surface.

Régionalement, le gisement se présente avec une orientation est-ouest dans une séquence fortement pentée de roches volcaniques felsiques à la base du groupe de Malartic Supérieur de la sous-province de l'Abitibi.

À l'échelle de la mine, le gisement est situé dans une unité felsique volcanoclastique déformée et altérée. Cette unité a une épaisseur maximale de deux cents mètres et a une composition variable allant du tuf fin et tuf à bandes de chert au tuf à lapilli et à bombe (Stuart, 1995).

Vers le nord, les unités volcano-sédimentaires sont limitées par des coulées et des unités fragmentaires rhyodacitiques, alors qu'au sud, elles sont recouvertes d'une unité de dacite massive. La séquence est recoupée par de nombreux dykes de composition intermédiaire à mafique.

La zone minéralisée est formée de lentilles isolées de sulfures massifs à semi-massifs et de zones de veinules minéralisées ("stringer zone" en anglais). Ces zones de veinules représentent environ 20 % de la minéralisation économique du gisement. Les veines et veinules varient de quelques centimètres à quelques mètres et sont composées de 20 à 35 % de chalcopryrite. Elles sont déformées et semblent orientées

de façon aléatoire. Les zones de sulfures massifs sont formées de lentilles de 1 à 60 mètres d'épaisseur composées de chalcopryrite, de pyrite et de sphalérite. On y retrouve aussi de l'or et de l'argent. Les lentilles sont aussi orientées de façon aléatoire, parfois associées aux zones de veinules (Tourigny et *al.*, 1995).

L'enveloppe du minerai est orientée est-nord-est, pentée à 70 degrés vers le nord et montre une plongée forte à modérée vers l'est. Structuralement, deux groupes de failles orientées ouest-nord-ouest déplacent les lentilles de sulfures ainsi que la roche hôte (Stuart, 1995). La séquence volcano-sédimentaire et le gisement sont fortement déformés et complexes à cause de deux principales phases de plissement (Tourigny et *al.*, 1995). La complexité de la géométrie du gisement rend difficile la délimitation du minerai et en fait ainsi un site d'étude intéressant.

En décembre 1994, les réserves minables étaient estimées à 13,9 millions de tonnes à 3,8% Cu, 1,8% Zn, 32 g/t Ag et 0,9 g/t Au en utilisant une teneur de coupure de 2% cuivre équivalent. Cette quantité équivalente de cuivre est donnée par l'équation suivante.

$$\text{Cu}_{\text{équivalent}} (\%) = \text{Cu} (\%) + 0,197 \text{ Zn} (\%) + 0,006 \text{ Ag (g/t)} + 0,540 \text{ Au (g/t)} \quad (1.1)$$

On estime la durée de vie de la mine à 12 ans.

1.3 Région étudiée

La région qui nous intéresse particulièrement pour la modélisation des propriétés physiques (chapitre 6) a des dimensions de 219 par 270 par 324 mètres. Elle est située dans la zone minéralisée principale du gisement.

La région de cette zone d'où proviennent la majorité des données analysées dans cette étude est une section verticale située dans la partie nord du gisement entre les niveaux ayant des profondeurs de 655 et 920 mètres respectivement. Elle comprend des lentilles de sulfures massifs en contact avec des zones de sulfures disséminés situées dans les tufs. Verticalement, on retrouve au-dessus et en dessous de ces tufs des coulées felsiques (rhyodacites).



Figure 1.1 Localisation de Louvicourt

2. DONNÉES ET PRINCIPES GÉOPHYSIQUES

Dans le cadre de l'étude géophysique effectuée à Louvicourt Mine, ce chapitre décrit les données disponibles et les principes géophysiques pertinents.

Les données proviennent de mesures physiques et chimiques prises sur des échantillons de carottes de forage, de levés de diagraphie (mesures physiques prises par des appareils introduits dans des trous de forage), d'un levé sismique entre trous de forage, ainsi que d'un ensemble de données chimiques et géologiques fournies par la mine.

Les mesures chimiques et physiques sont regroupées en trois groupes distincts. Le groupe "échantillons" représente les mesures physiques et chimiques prises en laboratoire sur des échantillons de carottes de forage provenant des trous 655-284, -302 et -304. Le groupe "655" représente des levés de diagraphie faits dans ces mêmes trous, et le groupe "565" provient de levés diagraphiques faits dans les trous 565-023, -025, -026 et -027. Nous avons aussi procédé à un levé sismique entre les trous de forage 655-284 et -302. On retrouve sur la figure 2.1 la trace des trous investigués ainsi que le contour, en noir, de la région que nous désirons modéliser (voir chapitre 1). Sur cette image, les trous du groupe "655" sont en rouge et ceux du groupe "565" en vert. La ligne bleue en traits pointillés représente le contour approximatif de la zone minéralisée. Tous les trous sondés sont de type BQ

(d'environ six centimètres de diamètre) et ont été forés au diamant. Les trous 655- sont sub-verticaux alors que ceux de la série 565- font partie d'un tir en éventail.

2.1 Mesures prises en laboratoire (groupe "échantillons")

Des analyses chimiques et physiques ont été effectuées en laboratoire sur quarante échantillons prélevés des carottes de forages des trous 655-284, -302 et -304. Ces trous sont situés dans la partie nord du gisement entre les niveaux 655 et 920. La région comprend des lentilles de sulfures massifs en contact avec des zones de sulfures disséminés et situées dans les tufs. Sur une coupe en section verticale, au-dessus et en dessous de ces tufs, on retrouve des coulées felsiques (rhyodacites). Les trois trous de forage sont sub-verticaux et traversent les lentilles (voir figure 2.2). Au total, 14 mesures physiques et 20 chimiques ont été prises sur ces échantillons. Toutefois, certains problèmes techniques dus particulièrement à la forme et la taille des échantillons font que toutes les mesures physiques ne sont pas disponibles ou valides pour chacun de ceux-ci. On retrouve au tableau 2.1 la liste des mesures chimiques effectuées. Ces mesures ont été prises en deux parties; une analyse d'éléments particuliers (Cu, Zn, Fe et Pb) et une analyse multi-éléments (en anglais "whole-rock") des oxydes majeurs et éléments mineurs. Ce sont le cuivre, le zinc et le fer qui nous intéressent le plus puisque ce sont les éléments que nous suspectons influencer le plus les propriétés physiques des roches de cette région. De plus, le cuivre et le zinc sont les éléments économiques du gisement.

Tableau 2.1 Analyses chimiques effectuées sur les échantillons

analyse	unités
quantité de cuivre	ppm
quantité de zinc	ppm
quantité de fer	%
quantité de plomb	ppm
quantité de quartz	%
quantité d'oxyde d'aluminium	%
quantité d'oxyde de fer	%
quantité d'oxyde de manganèse	%
quantité d'oxyde de magnésium	%
quantité d'oxyde de calcium	%
quantité d'oxyde de sodium	%
quantité d'oxyde de potassium	%
quantité d'oxyde de titane	%
quantité d'oxyde de phosphore	%
quantité de barium	ppm
quantité d'yttrium	ppm
quantité de scandium	ppm
quantité de zirconium	ppm
quantité de vanadium	ppm
quantité de chrome	ppm

Le tableau 2.2 liste les analyses physiques effectuées sur nos échantillons ainsi que les unités dans lesquelles elles ont été originalement mesurées.

Tableau 2.2 Analyses physiques effectuées sur les échantillons

analyse	unités
masse volumique	g/cm ³
vitesse des ondes de compression	m/s
vitesse des ondes de cisaillement	m/s
conductivité électrique à 1 kHz	S/m
constante diélectrique à 1 kHz	-
conductivité électrique à 10 kHz	S/m
constante diélectrique à 10 kHz	-
conductivité électrique à 100 kHz	S/m
constante diélectrique à 100 kHz	-
conductivité électrique à 1 MHz	S/m
constante diélectrique à 1 MHz	-
conductivité électrique à 10 MHz	S/m
constante diélectrique à 10 MHz	-
susceptibilité magnétique	10 ⁻⁶ c.g.s.

Les mesures de masse volumique, de conductivité électrique, de constante diélectrique et de vitesses sismiques ont été prises au département de géophysique et d'astronomie de l'Université de Colombie Britannique tandis que les mesures de susceptibilité magnétique ont été prises au laboratoire de mécanique des roches du département des sciences géologiques de l'Université de Saskatchewan. Toutes les analyses géochimiques ont été effectuées par le laboratoire Abilab à Val d'Or.

Knight et Nur (1987) expliquent comment les mesures électriques (conductivité et constante diélectrique) ont été obtenues. La conductivité électrique indique la facilité avec laquelle la roche peut conduire un courant électrique. La conduction dans nos roches est dite électronique. Elle est due à la grande mobilité des nombreux électrons libres présents dans les métaux. Les valeurs augmentent avec la fréquence du champ appliqué sur les échantillons en laboratoire. La quantité d'éléments conducteurs ainsi que leur conductivité et leur connectivité sont reflétées dans la valeur globale de la conductivité de l'échantillon. Comme la pyrite et la chalcopryrite sont des minéraux particulièrement conducteurs, les échantillons qui en contiennent beaucoup devraient avoir des valeurs élevées de conductivité. Ainsi, on pourrait distinguer ces échantillons (possiblement économiques s'ils contiennent de la chalcopryrite) des autres. Théoriquement, on s'attend à ce que la réponse du conductivimètre soit proportionnelle à la conductivité pour les très faibles valeurs de conductivité, proportionnelle à la racine carrée de la conductivité pour les conductivités faibles et intermédiaires puisque le paramètre d'induction devient alors $(\omega\mu\sigma)^{1/2}$, et indépendante de la conductivité pour les conductivités élevées puisque l'on atteint la saturation.

La constante diélectrique indique la capacité d'un matériel à emmagasiner une charge lorsqu'un courant électrique y est appliqué. Une mesure négative indique que la mesure de capacitance (produit de la susceptance et de la fréquence angulaire) de l'échantillon est négative. Ce phénomène se présente lorsque l'échantillon est

tellement conducteur qu'il agit comme une inductance. Plusieurs de nos échantillons de minerai ont ainsi donné des valeurs négatives.

La susceptibilité magnétique indique à quel point l'échantillon rocheux peut être magnétisé. Cette propriété de la roche dépend de la quantité de minéraux ferrimagnétiques qu'elle contient (en particulier la pyrrhotite et la magnétite). Le plus courant dans nos échantillons est la magnétite. On en retrouve des cristaux visibles à l'oeil nu surtout dans les échantillons de tuf. Lorsqu'une substance magnétisable est placée dans un champ magnétique d'intensité H , elle se magnétise avec une intensité J . Le rapport de ces quantités est appelé susceptibilité magnétique (k). C'est cette valeur que l'on désire quantifier. Les mesures ont été prises avec un susceptibilimètre Bison, modèle 3101. Cet appareil permet de prendre les mesures dans un champ magnétique équivalent au champ magnétique terrestre. Il peut mesurer des susceptibilités variant de 0,00001 à 0,1 cgs (manuel d'instruction du susceptibilimètre Bison 3101). À cause de la géométrie des échantillons minéralisés (carottes fendues), les mesures de susceptibilité magnétique ne sont pas fiables pour ces derniers. Ainsi, seulement les résultats des mesures prises sur les échantillons de roche non-minéralisée ont été conservés.

La vitesse des ondes sismiques varie selon les propriétés élastiques, la masse volumique et la structure des roches dans lesquelles les ondes voyagent. Connaissant ces vitesses dans les roches encaissantes et les sulfures économiques, l'interprétation des levés de sismique en trous de forage deviendrait facile et fiable si

l'on pouvait associer des vitesses directement aux types de roches. Les mesures des vitesses des ondes de compression et de cisaillement de nos échantillons ont été prises avec un appareil à transmission directe (en anglais "through transmission"), selon une technique nommée transmission à impulsions (en anglais "pulse transmission"). Deux sondes, l'une émettrice, l'autre réceptrice sont placées aux extrémités de la carotte, le tout étant fixé dans un support d'aluminium. Les ondes de compression, centrées à 500 kHz sont produites en excitant un gros cristal orienté selon l'axe de la carotte. Les ondes de cisaillement sont générées en excitant un ensemble de 8 cristaux placés de façon azimuthale. Leur fréquence centrale est de 400 kHz. Les cristaux de la sonde réceptrice produisent un signal électrique lu par un oscilloscope, permettant ainsi de calculer le temps nécessaire à l'onde sismique pour traverser l'échantillon d'un bout à l'autre (Knight, communication personnelle, 1995).

Les mesures de masse volumique sont obtenues simplement en divisant la masse de chaque échantillon par son volume.

2.2 Mesures diagraphiques

Deux levés de mesures diagraphiques ont été effectués. Le premier a été fait par la Commission Géologique du Canada et le second par des géophysiciens de la compagnie finlandaise Outokumpu Mining Services.

2.2.1 La diagraphie

La géophysique en trous de forage (diagraphie) enregistre des mesures physiques effectuées dans le forage en fonction de la profondeur (Killeen, 1991). Cette technique permet donc d'accroître considérablement la quantité d'information disponible. Elle permet de sonder in situ un volume de roc plus grand et plus représentatif que le permet la prise de mesures sur des échantillons de carottes. De tels sondages permettent d'investiguer la roche "autour" des trous, même si les carottes de forage ne sont pas disponibles. Ainsi, il est possible d'effectuer de telles mesures dans des trous de production, forés à percussion (cette technique de forage rend impossible la récupération de carottes). Le rayon de "profondeur d'investigation" des différentes méthodes est variable, mais habituellement faible; généralement de l'ordre de quelques dizaines de centimètres ou moins. Malgré cette faible profondeur, les mesures prises en trous de forage représentent un plus grand échantillon rocheux que les mesures prises sur des bouts de carottes, et sont ainsi plus représentatives du milieu. De plus, elles sont prises dans des conditions pas ou très peu perturbées de la roche; ce sont des mesures in situ. Cette technique est aussi économique puisqu'une fois les appareils calibrés pour déterminer les types rocheux d'une mine, des mesures peuvent être prises dans les trous de production (forage à percussion). Cette technique de forage ne permet pas de récupérer des carottes, elle est plus rapide et beaucoup moins dispendieuse que la technique de forage au diamant (environ le quart du prix du forage au diamant).

Bien que largement utilisée dans l'industrie pétrolière, la diagraphie est encore peu connue du monde de l'exploration et l'exploitation minière à cause du manque d'histoires de cas et d'instruments convenablement adaptés à cette industrie; équipement pouvant aller sous-terre, dans des trous étroits, parfois plein d'eau, parfois vides, et forés dans toutes les directions. La Commission Géologique du Canada ainsi que plusieurs companies ont essayé de faire connaître les techniques de diagraphie et leurs possibilités. Elles ont également développé des appareils conçus spécialement pour l'industrie minière.

Dans plusieurs mines de Scandinavie, la diagraphie est utilisée pour la détection rapide des zones minéralisées pour ainsi réduire la dilution et les pertes de minerai (minerai qui aurait été laissé en place). Les appareils sont conçus et calibrés de façon spécifique pour chaque site (Lappalainen et Lehto, 1994).

On compte parmi les nombreuses applications de la diagraphie la délimitation de zones minéralisées, l'interprétation géologique, la corrélation stratigraphique entre les forages et la cartographie de zones d'altération associées à la minéralisation. Les deux premières de ces applications, la délimitation de zones minéralisées et l'interprétation géologique, sont celles que nous étudions dans le présent document.

Un éventail d'instruments devient disponible sur le marché. Certaines sondes permettent de mesurer à la fois plusieurs paramètres (par exemple la conductivité électrique et la susceptibilité magnétique) alors que d'autres ne mesurent qu'une

propriété physique à la fois. De la même façon, certaines sondes permettent de prendre des mesures même lorsqu'un tubage de plastique est inséré dans le trou (par exemple, une sonde qui mesure la susceptibilité magnétique par induction) alors que d'autres sondes requièrent qu'aucun tubage ne soit présent dans le trou. Aussi, seulement certains appareils nécessitent que les trous soient pleins d'eau (par exemple pour les sondages de résistivité galvanique et soniques). Les sondes utilisées ici dans les trous du groupe "655" appartiennent à la Commission Géologique du Canada et celles du groupe "565" à Outokumpu Mining Services.

2.2.2 Groupe "655"

Les trous 655-284 -302 et -304 ont été sondés pour le rayonnement gamma naturel, la susceptibilité magnétique et la vitesse des ondes de compression par un groupe de géophysiciens de la Commission Géologique du Canada. Les mesures de conductivité électrique ne sont malheureusement pas disponibles à cause de problèmes techniques survenus lors des sondages. Selon les relevés de forage, les types rocheux majeurs rencontrés dans ces trous sont la rhyodacite, le tuf, le minerai cuprifère et le minerai zincifère, la pyrite massive et les dykes. Les données chimiques correspondant aux roches rencontrées par ces trous proviennent des relevés de forage de la mine.

Les mesures de rayonnement gamma naturel détectent les rayons gamma produits lors de la désintégration radioactive du potassium-40, du thorium-232, de

l'uranium-238 et de leurs familles. La quantité de rayons gamma émis lors de désintégration d'éléments radioactifs varie avec la quantité de ces radio-éléments présents dans le milieu. Comme les concentrations en radio-éléments et l'atténuation des rayons gamma varient selon les types de roches, ces mesures pourraient offrir un moyen de différencier les diverses lithologies. L'appareil utilisé pour le levé mesure toute l'énergie des rayons gamma variant de 0,1 à 3,0 MeV à l'aide d'un scintillomètre d'iodure de césium (CsI) à toutes les 1,9 secondes (Pflug, communication personnelle, 1995). Ainsi, les données sont mesurées en comptes par échantillons de temps de 1,9 seconde (cpé). On prend une mesure à chaque 20 centimètres environ. Lorsqu'un rayon gamma atteint le cristal, un photon de lumière est émis. Cette scintillation est détectée par un photomultiplicateur, amplifiée et enregistrée comme une différence de voltage. Pour les roches du gisement Louvicourt, on considère que le seul radio-élément d'importance est le potassium (McCreary, communication personnelle, 1995).

Les mesures de susceptibilité magnétique ont été prises à chaque 5 centimètres à l'aide d'une bobine intégrée à un circuit électrique énergisé à une fréquence de 1400 Hz. Lorsque la sonde passe dans du matériel magnétisable, l'inductance de la bobine varie. Pour rétablir le circuit, la fréquence est modifiée et c'est ce changement de fréquence qui est relié à la susceptibilité magnétique de la roche environnante. Cette sonde permet de mesurer des susceptibilités variant de 100 microSI à 1,0 SI (Pflug, communication personnelle, 1994). Les minéraux magnétiques affectant grandement les lectures de susceptibilité magnétique sont la magnétite et la pyrrhotite.

La vitesse des ondes de compression dans la roche dépend des propriétés intrinsèques (propriétés élastiques et masse volumique) et structurales de la roche.

Son équation est la suivante.

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

où λ est la constante de Lamé, μ le module de cisaillement et ρ la masse volumique. Ainsi, en mesurant les vitesses tout au long d'un trou de forage (à un intervalle de 5 à 10 centimètres), on devrait pouvoir noter les changements lithologiques et structuraux. Par exemple, des mesures prises dans la région du gisement nickelifère de McConnell à Sudbury, Ontario, montrent que la vitesse des ondes de compression est faible dans les sulfures massifs à masse volumique élevée comparativement à la vitesse dans les roches encaissantes (Pflug et al., 1994). La source sismique, un émetteur piézoélectrique ayant une fréquence centrale d'environ 28 kHz, se trouve espacée de 0,9 et 1,2 mètre des récepteurs, aussi piézoélectriques. C'est la différence entre les temps d'arrivée des ondes à chaque récepteur qui permet de calculer la vitesse des ondes de compression dans la roche.

2.2.3 Groupe "565"

Les trous 565-023, -025, -026 et -027 ont été sondés par des géophysiciens de la compagnie Outokumpu Metals and Services pour la conductivité électrique, la susceptibilité magnétique et les rayonnements gamma-gamma et gamma naturel.

Comme pour le groupe "655", les types rocheux rencontrés dans ces trous sont le tuf, le minerai cuprifère et le minerai zincifère, la pyrite massive et les dykes. Les données géochimiques proviennent des relevés de forage de la mine.

La sonde utilisée pour mesurer les conductivités électriques fonctionne à une fréquence de 1200 Hz et peut mesurer inductivement, à l'aide d'une bobine, des conductivités allant de 10 à 10^6 S/m. Ce champ possible de mesure ne permet donc pas de quantifier la conductivité des roches résistantes. On obtient une mesure de 0 millivolt pour ces types de roches (rhyodacites, tufs, etc). En effet, les mesures sont données en millivolts et aucune table de conversion n'a été développée pour cette sonde. On peut toutefois utiliser ces mesures en les comparant entre-elles, et, si l'on a une quantité satisfaisante de données, établir une table de conversion ou calibrer la sonde de façon spécifique pour chaque site. Aucune tentative n'a été faite ici pour établir une telle table de conversion. La sonde mesurant la susceptibilité magnétique permet de mesurer des susceptibilités variant de 20×10^{-5} à 30 SI (Lappalainen et Lehto, 1994). La conductivité et la susceptibilité sont mesurées aux 5 centimètres.

Les sondages gamma-gamma mesurent indirectement la masse volumique de la roche. Une source de césium (Cs^{137}) émet des rayons électromagnétiques de très haute fréquence (rayons gamma) qui sont dispersés et retournés par la roche et mesurés par un scintillomètre d'iodure de sodium (NaI). Aux niveaux d'énergie mesurés, cette radiation secondaire est expliquée principalement par la dispersion Compton; elle dépend de la quantité d'électrons par unité de volume. En effet, la

dispersion de Compton s'explique ainsi: le photon (rayon gamma) perd une fraction de son énergie au profit d'un électron lorsqu'il percute ce dernier. Ainsi, plus grande est la quantité d'électrons, plus le photon a de chances d'entrer en collision avec ceux-ci et ainsi de perdre son énergie. On relie cette quantité à la masse volumique de la roche par l'équation suivante:

$$\rho_e = N (Z/A) \rho_b \quad (2.2)$$

où ρ_e est la masse volumique électronique, N est la constante d'Avogadro, Z le numéro atomique, A le poids atomique et ρ_b la masse volumique de la roche (Cinq-Mars et *al.*, 1992). La plupart des éléments retrouvés dans les roches communes ont un facteur Z/A d'environ 0,5. Ainsi, la masse volumique électronique dépend directement de la masse volumique de la roche. Finalement, plus la masse volumique de la roche est élevée, plus la dispersion Compton est importante et moins de rayons gamma sont captés par le récepteur. Les mesures de rayonnements gamma-gamma ont été prises aux 5 centimètres.

Les diagraphies à rayonnement gamma naturel n'utilisent pas de source artificielle, c'est l'énergie des rayons gamma émis naturellement par la désintégration radioactive des isotopes de potassium, d'uranium et de thorium contenus dans la roche qui est mesurée. La sonde (le même scintillomètre que pour les levés gamma-gamma) mesure aux 10 centimètres les rayons gamma en compte par échantillon de temps (cpé) dans une fenêtre d'énergie ayant un seuil de 30 KeV. Selon les analyses chimiques effectuées sur nos échantillons, on retrouve principalement le potassium

dans les tufs et les rhyodacites. Les dykes semblent aussi en contenir des quantités considérables.

2.3 Mesures entre trous de forage

Un levé sismique en mode tomographique entre trous de forage a été effectué entre les trous 655-284 et -302. Le but de ce levé était d'améliorer la délimitation des veines de minéral dans le plan vertical formé par ces trous. Elle est habituellement interprétée en observant les relevés de forage. La tomographie permet de "voir entre les trous" et de vérifier la connectivité des veines minéralisées.

2.3.1 Tomographie

Les forages de délimitation des lentilles minéralisées, souvent disposés en éventail, sont nombreux et coûteux. Ils permettent aux géologues et aux ingénieurs d'interpréter la géologie pour ainsi planifier l'exploitation des zones minéralisées. La tomographie permet l'investigation de la masse rocheuse située *entre* deux trous de forage. Si les propriétés physiques des roches le permettent, l'utilisation d'une telle technique d'investigation offrirait la possibilité de diminuer le nombre de forages nécessaires et ainsi de diminuer considérablement les coûts.

La tomographie est une technique d'imagerie permettant de créer une image en section (tomogramme) d'un objet en utilisant la réponse de cet objet excité par une

source d'énergie non-destructrice externe à ce corps (Lo et Inderwiesen, 1994). Dans notre cas, cette énergie est de type sismique et l'objet à imager représente les lentilles de sulfures massifs situées dans la roche stérile entre deux trous de forage. La technique de création de l'image utilise les mesures de temps des premières arrivées des ondes de compression entre chaque paire émetteur-récepteur. Ces appareils sont situés à différentes profondeurs dans les trous de forage. Pour modéliser le trajet des ondes, on utilise une technique dite "de rayons". Cette méthode suppose que la source produit des ondes sismiques dont la longueur d'onde est inférieure à la taille des hétérogénéités présentes dans le médium. On utilise des techniques d'inversion afin de résoudre les nombreuses équations générées par toutes ces mesures reliant la réponse aux trajets et aux propriétés physiques. Une brève analyse des résultats de ce levé est présentée au dernier chapitre de ce mémoire afin de démontrer un exemple d'utilisation de tels levés en conjonction avec notre étude des propriétés physiques des roches du gisement.

2.3.2 Mesures sismiques

La procédure de prise de données est très simple. Les sources sont des détonateurs (théoriquement sans délais), et les récepteurs sont des hydrophones reliés à deux sismographes (de marque Bison, modèle 9024). En tout, 48 hydrophones sont placés dans l'un des deux trous de forage, à raison d'un hydrophone à chaque 2 mètres. Afin de sonder toute la longueur du trou, le câble des hydrophones a été installé de façon à couvrir premièrement le haut du trou (les premiers 100 mètres), et ensuite le

bas du trou (de la profondeur 100 à 200 mètres). La source est descendue dans le second trou à l'aide d'un câble électrique qui permet de la situer dans le trou, de la faire exploser et d'envoyer un signal aux sismographes, permettant ainsi le synchroniser les sismographes avec le moment où l'explosion a lieu (temps t_0). Ainsi, pour chaque explosion, 48 trains d'ondes sismiques sont mesurés à raison d'un par hydrophone. Chaque hydrophone mesure le train d'ondes sismiques qui l'atteint en prenant 1000 mesures d'amplitude avec une fréquence d'échantillonnage de 0,05 milliseconde. On mesure donc pendant les 50 millisecondes qui suivent l'explosion du détonateur. Les fréquences de 5000 Hz et plus sont automatiquement filtrées et exclues de nos données avant tout traitement. Comme on utilise des sources explosives, on doit changer la source après chaque explosion.

De telles mesures ont été prises entre les trous 655-284 et -302. Ces trous sont espacés d'environ 65 mètres. La cueillette des données se fait en deux parties. Pour la première, les détonateurs sont dans un trou (une explosion à la fois, avec 8 mètres d'intervalle entre chacun) et les hydrophones sont situés dans le second trou. Et inversement pour la seconde série de mesures, permettant ainsi une bonne couverture du plan par les "rayons" (trajectoires reliant la source à chaque hydrophone).

Ce qui nous intéresse ici, est le temps que met le début de l'onde sismique de compression à se rendre à chaque hydrophone. Ce temps de transmission dépend de la longueur du trajet à parcourir et des propriétés des roches que l'onde traverse. Ces

propriétés devraient être différentes pour les sulfures et la roche encaissante permettant ainsi d'imager les lentilles de sulfures sur les tomogrammes.

2.4 Remarque

L'ensemble de toutes ces données forme donc une base remarquable pour le genre d'étude que l'on fait ici. En effet, vu les coûts très élevés d'analyse d'échantillons, de la prise des données diagaphiques et des levés entre trous de forage, il est rare qu'un tel éventail de mesures physiques soit disponible pour un même gisement.

Ainsi, malgré qu'elles semblent parfois statistiquement insuffisantes, les données analysées ici forment un ensemble appréciable et rarement égalé dans l'industrie minière des métaux de base.

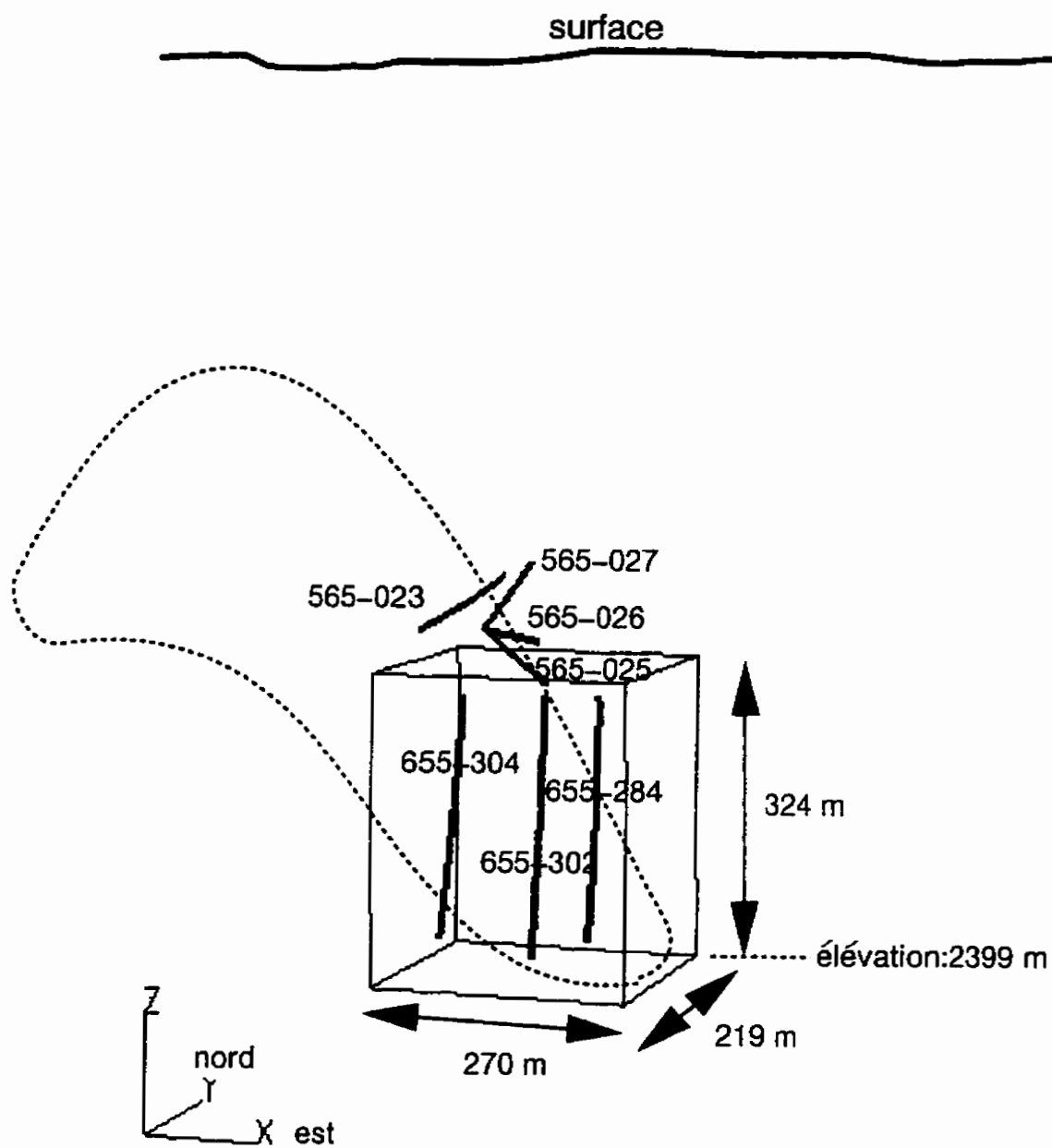


Figure 2.1 Trous de forage investigués

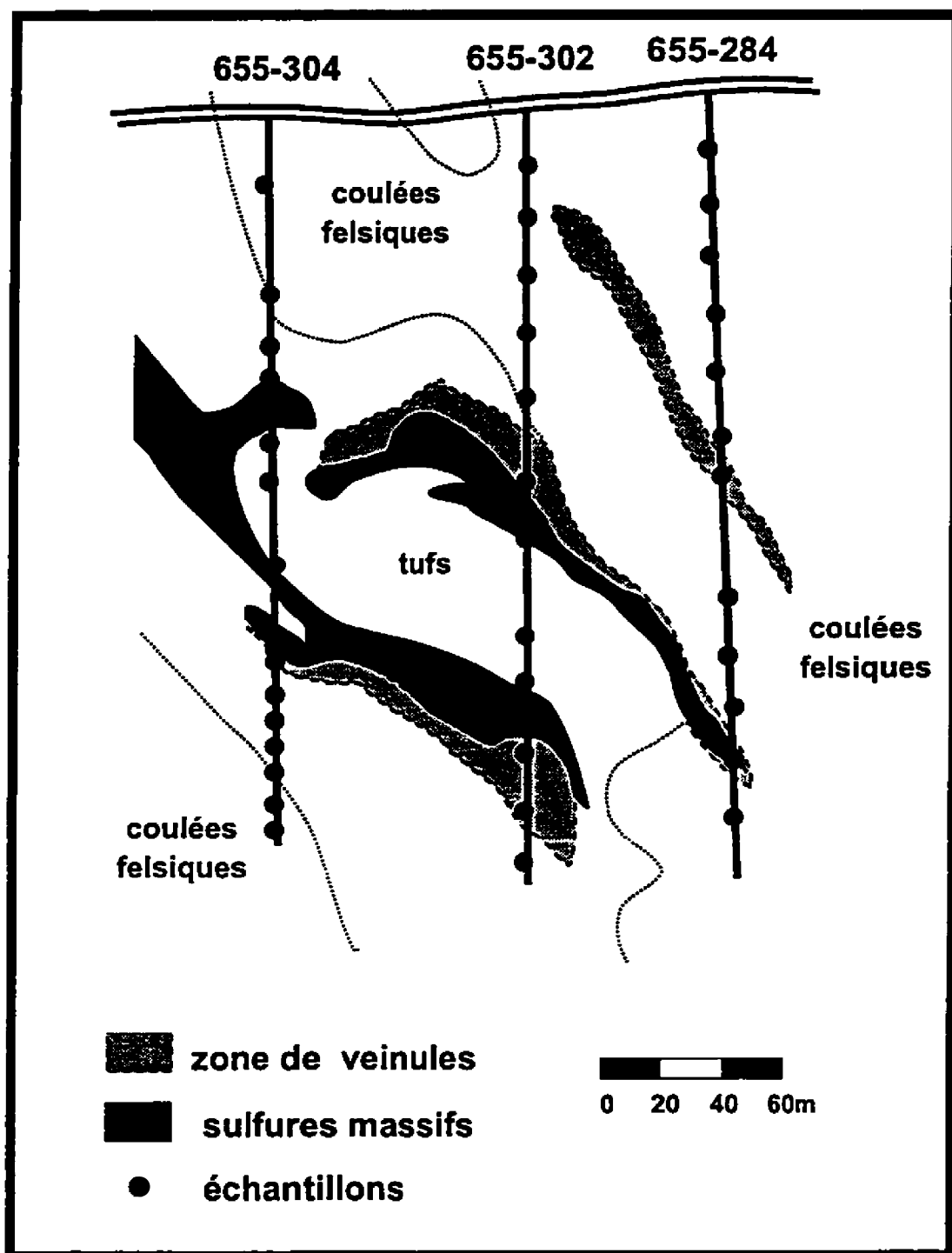


Figure 2.2 Section verticale et localisation des échantillons

3. MÉTHODES D'ANALYSE STATISTIQUE

Ce chapitre décrit brièvement les méthodes statistiques utilisées dans les chapitres suivants pour analyser les propriétés physiques et chimiques des roches du gisement Louvicourt. Au chapitre 4, on utilise les courbes d'ajustement, les diagrammes binaires et l'analyse discriminante pour caractériser six grands types rocheux rencontrés dans le gisement, alors qu'au chapitre 5, on utilise les courbes d'ajustement, les diagrammes binaires et la régression linéaire à multiples variables pour établir des formules permettant d'estimer les teneurs en cuivre, en zinc et en fer des roches à partir des mesures physiques. Au chapitre 6, on estime la conductivité électrique et la vitesse des ondes de compression pour une région de la mine à l'aide de mesures chimiques. Pour ce faire, on utilise les mêmes techniques qu'au chapitre 5.

3.1 Diagrammes binaires et courbes d'ajustement

L'observation des diagrammes binaires permet de voir s'il existe des relations simples entre les variables. Ces relations peuvent être linéaires ou non. Le calcul des coefficients de corrélation simple permet de quantifier la qualité des relations *linéaires* pour chaque combinaison de variables. Ensuite, par un processus d'ajustement de courbes faisant partie du logiciel GRAPHER, on cherche à expliquer une variable par une autre. Cinq types de courbes d'ajustement sont considérées pour chaque combinaison de variables. Le tableau 3.1 liste ces ajustements.

Tableau 3.1 Types d'ajustements

type de courbe	formule
droite	$y = bx + a$
exponentielle	$y = ae^{bx}$
logarithmique	$y = b \ln(x) + a$
logarithmique avec puissance	$y = ax^b$ ou $\ln(y) = b \ln(x) + a$
polynomiale	$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots$

Ces ajustements sont faits au sens des moindres carrés. Le choix du type de courbe pour chaque combinaison est basé sur la courbe qui permet le meilleur ajustement aux observations et à leurs tendances générales. L'erreur moyenne est calculée pour chaque ajustement ou régression. Elle représente la somme des valeurs absolues des différences entre les valeurs observées (mesurées) et les valeurs prédites divisée par le nombre total d'observations considérées. Lorsque la meilleure courbe d'ajustement est une droite (régression linéaire simple), le coefficient de corrélation (r) est une façon simple et bien connue de quantifier la force du lien entre les variables.

3.2 Régression linéaire à multiples variables

Cette technique permet d'utiliser plus d'une variable explicative pour estimer une variable à expliquer. Ainsi, avec la régression linéaire multiple, on cherche à expliquer une variable d'un type particulier (Y) par un ensemble de variables d'un second type (X). Au chapitre 5, les variables à expliquer sont les teneurs et les variables

explicatives sont les propriétés physiques mesurées. Au chapitre 6, les variables à expliquer sont la conductivité électrique et la vitesse des ondes de compression et les variables explicatives sont les résultats des analyses chimiques.

On veut donc relier Y à p variables X par le modèle linéaire suivant:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon. \quad (3.1)$$

On cherche à estimer les $p+1$ coefficients $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ de façon à minimiser le carré de l'erreur ε commise (Marcotte, 1995).

Les coefficients de corrélation multiples R^2 représentent la proportion de la variance totale de la variable à expliquer (Y) qui peut être prise en compte par les variables explicatives (X). Si seulement une variable explicative est utilisée, le coefficient R^2 est équivalent au carré du coefficient de corrélation simple. On définit ce coefficient de corrélation multiple ainsi:

$$R^2 = \frac{SCR_m}{SCT_m} \quad (3.2)$$

Dans cette équation, SCR_m représente la somme des carrés de la régression sans la moyenne et SCT_m la somme des carrés totale corrigée pour la moyenne.

Toutes les variables explicatives (X) ne sont pas nécessairement retenues lors d'une régression. Elles sont sélectionnées grâce à une procédure pas à pas ("stepwise" en

anglais). En effet, lorsqu'un grand nombre de variables explicatives est disponible, on est intéressé à sélectionner parmi ces variables un sous-ensemble optimal qui explique presque autant la variable Y que l'ensemble complet des variables X. Cette procédure pas à pas nous permet de ne sélectionner que cet ensemble optimal de variables grâce à un test Fisher de type $F_{s,(n-p-1)}$ (une explication détaillée peut être trouvée dans Marcotte, 1995) et où s représente le nombre de variable ajouté au modèle, p le nombre de variables dans le modèle final et n le nombre d'observations. L'utilisation des variables non sélectionnées n'apporterait pas une amélioration significative des modèles. Ceci n'implique pas qu'aucun autre modèle ne pourrait expliquer nos données de façon satisfaisante. Les modèles d'estimation déterminés par ces procédures représentent les meilleurs modèles possibles lorsque l'on considère toutes les variables explicatives (X) disponibles.

L'observation des résidus des modèles de régression ou des modèles obtenus par ajustement de courbes sur diagrammes binaires des erreurs en fonction des valeurs prédites permet d'évaluer visuellement si la fonction d'estimation explique bien la variable à expliquer. En effet, si les résidus ne sont pas distribués de façon aléatoire, il est possible qu'une autre fonction d'estimation soit plus adéquate pour estimer la variable à expliquer. Les graphes des erreurs illustrés dans les chapitres suivants montrent toutefois les erreurs en fonction des valeurs mesurées. On y observe donc, de façon prévisible, une tendance qui montre que les faibles valeurs mesurées sont surestimées alors que les fortes valeurs sont sous-estimées. Les routines de

régressions linéaires à multiples variables ont été écrites et utilisées avec le logiciel MATLAB.

3.3 Analyse discriminante

L'analyse discriminante (AD), utilisée au chapitre 4, étudie des données provenant de groupes connus à priori (nos types rocheux). Elle vise deux buts principaux:

- la description des principales différences entre les groupes que l'on peut déterminer à l'aide des variables mesurées (mesures géophysiques),
- la classification d'observations, possiblement nouvelles (nouveaux levés de diagraphie), dans leur groupe (type rocheux) à partir des variables mesurées (Marcotte, 1995).

L'analyse discriminante cherche à créer une fonction des variables discriminantes géophysiques pour laquelle les distributions des groupes rocheux ne se chevauchent pas, ou se chevauchent le moins possible. La figure 3.1, tirée de Davis (1987), montre un exemple pour un cas à 2 groupes et 2 variables discriminantes.

On cherche donc une fonction pour laquelle les projections des moyennes des groupes soient le plus espacées possible et que, simultanément, les projections des observations d'un même groupe soient le plus rapprochées possible de la projection de la moyenne du groupe (Marcotte, 1995).

Pour classer une observation dans les groupes, on utilise des fonctions de classification (ou fonctions linéaires discriminantes). Ce classement utilise une approche géométrique. On calcule la distance entre l'observation et le centre de chacun des groupes et on classe l'observation dans le groupe pour lequel cette distance est minimum (distance D). Pour ce faire, les fonctions de classification nous permettent de calculer un "score" pour l'observation. Ce score est relié à la distance D . On affecte l'observation au groupe pour lequel sa fonction de classification (score) est maximale.

Toutes les mesures géophysiques ne servent pas nécessairement de façon significative à la classification. Encore une fois, on utilise une procédure pas à pas pour déterminer quelles variables sont significatives pour chaque classement. La première variable sélectionnée est celle qui donne le plus grand pourcentage d'observations bien classées par rapport aux groupes connus. Par la suite, on ne choisit que les variables qui font augmenter ce pourcentage de façon significative.

Pour évaluer la qualité de notre analyse discriminante, on classe toutes nos observations et on vérifie le pourcentage d'observations bien classées pour chaque groupe. On utilise des tableaux qui indiquent le nombre d'observations classées dans chaque groupe par l'analyse discriminante et le nombre réel d'observations dans ces groupes. Le tableau suivant en est un exemple.

Tableau 3.2 Exemple de résultats d'une analyse discriminante

		groupes établis par l'analyse discriminante		
groupes connus		groupe 1	groupe 2	groupe 3
	groupe 1	125	15	10
	groupe 2	20	115	25
	groupe 3	5	0	120

On tire les informations suivantes de ce tableau. Au total, on sait que l'on a 435 observations. On sait aussi que 150 de celles-ci appartiennent réellement au groupe 1, 160 au groupe 2 et 125 au groupe 3 (sommes des observations à chaque ligne du tableau). L'analyse discriminante classe 150 observations dans le groupe 1, 130 dans le groupe 2 et 155 dans le groupe 3 (sommes des observations à chaque colonne). De ces observations, 360 sont bien classées. On retrouve ces observations bien classées sur la diagonale du tableau ($125 + 115 + 120$). On obtient donc un pourcentage de bien classées de 83 % ($360/435$). Pour les observations qui n'ont pas bien été classées par l'AD, on sait que 20 observations appartenant réellement au groupe 2 ont été classées dans le groupe 1 par l'AD, que 15 observations appartenant au groupe 1 ont été classées dans le groupe 2, et ainsi de suite.

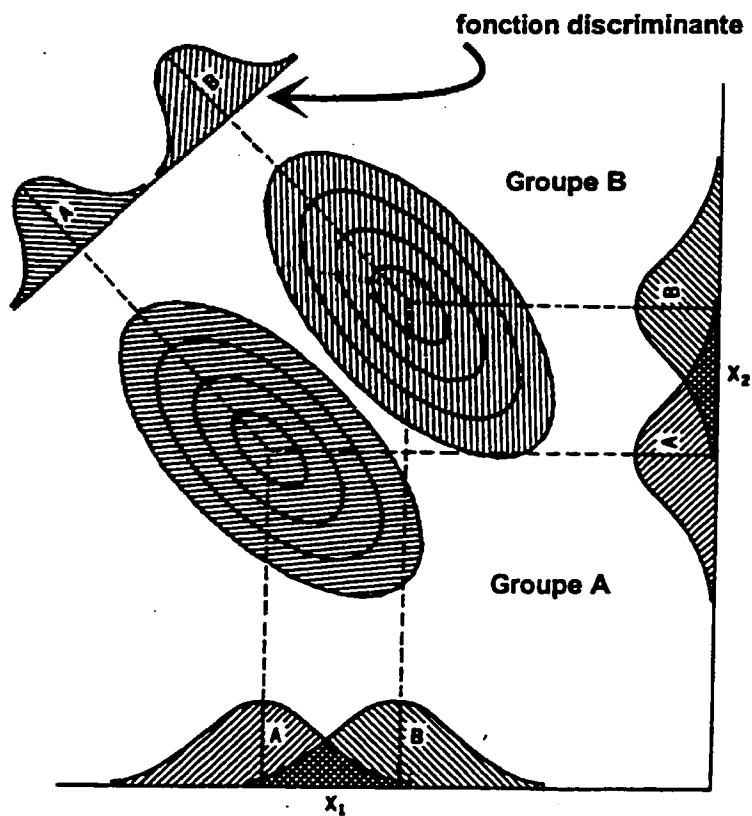


Figure 3.1 Exemple d'analyse discriminante, cas de 2 groupes avec 2 variables discriminantes (figure adaptée de Davis, 1987).

4. DÉTERMINATION DES TYPES ROCHEUX

La connaissance des propriétés physiques des différentes roches du gisement Louvicourt permet d'interpréter la géologie et de créer des modèles géologiques et géophysiques sans avoir besoin d'observer les roches par l'intermédiaire d'échantillons. Ainsi, la géologie de trous sondés par diaggraphie peut être interprétée de façon fiable si l'on connaît bien les propriétés des roches. Les sondages par diaggraphie des trous de production sont donc une alternative beaucoup plus économique, tant au point de vue temps qu'argent, au forage à diamant et à l'interprétation des carottes.

Nous désirons donc prédire les types rocheux à partir des réponses géophysiques obtenues par diaggraphie. Cette partie de l'étude commence donc par l'observation générale des données physiques selon les types rocheux (relevés de diaggraphie et histogrammes). La description de la géologie (types rocheux) provient des relevés de forage de la mine. Ensuite, on procède à un examen des diagrammes binaires pour voir s'il existe des combinaisons de propriétés physiques qui permettent de correctement identifier chaque type rocheux. Finalement, on essaie de trouver une formule (par les fonctions discriminantes) permettant de différencier les types rocheux grâce à l'analyse discriminante. Cette étude permet aussi de déterminer des valeurs typiques des propriétés physiques des roches du gisement Louvicourt pour ainsi

améliorer le choix des paramètres lors de la modélisation des phénomènes physiques et l'interprétation géologique des levés.

Notre analyse doit être faite de façon individuelle pour nos trois groupes de données puisque différentes mesures physiques ont été prises pour chacun, et qu'en plus, les teneurs des observations n'ont pas été mesurées de la même façon pour chaque groupe. Des mesures de vitesse des ondes de compression et de conductivité électrique ont été prises à la fois sur les échantillons et en diagraphie. Les résultats peuvent être comparés jusqu'à un certain point, puisqu'ils représentent des mesures de la même propriété physique, mais on doit le faire sous réserve. En effet, les mesures prises en laboratoire sur les échantillons sont très précises, en ce sens qu'elles ont été mesurées sur de petits échantillons bien définis, mais elles n'ont pas été prises in situ. De plus, toutes les mesures n'ont pas été prises aux mêmes fréquences, par les mêmes instruments et dans les mêmes unités de mesure.

Les descriptions des relevés de forage indiquent que, dans la région investiguée, on rencontre six grands types de roches. Deux d'entre-eux sont économiques (minerai cuprifère et minerai zincifère) tandis que les autres composent la roche encaissante (rhyodacite, tuf, pyrite massive et des dykes). Le type "dykes" englobe tous les dykes rencontrés par les trous de forage étudiés dans cette étude. Malgré le caractère structural de ces derniers, ils ont tous des compositions intermédiaires semblables mais différentes de celles des autres roches stériles du gisement. C'est ce qui nous

permet de les regrouper. La classification de chaque échantillon dans un de ces six types rocheux a été basée sur la description visuelle géologique des échantillons, sur les descriptions géologiques des relevés de forage ainsi que sur les quantités de cuivre et de zinc. Pour être classifié comme minerai cuprifère, un échantillon doit contenir plus de 2 % de cuivre équivalent et une plus grande quantité de cuivre que de zinc. De la même façon, pour être classifié comme minerai zincifère, un échantillon doit contenir plus de 2 % de cuivre équivalent et une plus grande quantité de zinc que de cuivre. Les rhyodacites et les tufs se distinguent particulièrement par leur texture et la grosseur des grains qui les composent. Tel qu'il a déjà été mentionné, c'est dans le tuf que l'on retrouve les sulfures. Ainsi, cette catégorie est plus "large" que les autres types rocheux au point de vue de la variété de sa composition. En effet, on appelle tuf toute roche dont la matrice est de tuf et dont la quantité de cuivre équivalent varie entre 0 et 1,9 %. Ces tufs peuvent également contenir de la pyrite non-massive (disséminée ou en veinules). Ainsi, le type rocheux "tuf" n'est pas défini aussi strictement que les autres; fait qui devra être considéré tout au long de nos analyses. On ne rencontre pas ce problème avec le type "rhyodacite" car cette unité ne contient généralement que peu de sulfures; ce type est donc plus "pur" que le tuf. Le type "pyrite massive" peut parfois être très proche du tuf puisque la limite entre un tuf avec pourcentage élevé de pyrite et la pyrite massive n'est pas clairement établie et peut varier selon la personne qui interprète les carottes de forage et les échantillons rocheux.

4.1 Groupe “échantillons”

La figure 4.1 montre les histogrammes des résultats des analyses physiques effectuées sur chacun de nos échantillons selon les types rocheux. Comme il a déjà été mentionné, il est important de noter que le faible nombre d'échantillons analysés (34) ainsi que la proximité spatiale de leur lieu d'origine ne permettent pas d'affirmer sans réserves que cette partie de l'étude est représentative de toutes les roches du gisement. En effet, seulement trois des six grands groupes rocheux sont ici représentés. Nous avons 17 échantillons rhyodacitiques, 11 échantillons de tuf et 6 de minerai cuprifère. Un seul échantillon contient assez de zinc pour être considéré comme minerai zincifère, aussi, il n'a pas été inclus dans cette analyse. Nous espérons que les trois groupes de roches ont des propriétés physiques assez différentes pour que l'on puisse établir un lien entre les réponses géophysiques et les types de roche afin de les différencier.

On remarque sur ces histogrammes que la masse volumique est une propriété qui permet de différencier de façon assez sûre la roche stérile (rhyodacites et tufs) du minerai cuprifère (voir figure 4.1a). Le seuil se trouve à environ $3,2 \text{ g/cm}^3$. Les deux seuls échantillons de tufs dépassant ce seuil contiennent de fortes quantités de fer (24 et 34 %). Ceci est une des premières évidences de la problématique du grand éventail de composition du type rocheux “tuf” mentionnée au début du présent

chapitre. La masse volumique est une propriété qui peut être estimée par des sondages diagaphiques de rayonnements gamma-gamma.

Les mesures des vitesses des ondes de compression (V_p) ne permettent pas de différencier les types rocheux ni de différencier la roche stérile du minéral (figure 4.1b), ceci en accord avec les conclusions tirées par Salisbury et *al.* (1996) qui obtiennent aussi de trop larges éventails de V_p pour pouvoir différencier les sulfures des roches non-sulfurées. Les distributions sont larges et se chevauchent beaucoup. Les vitesses des ondes de cisaillement (V_s) sont assez localisées pour le minéral de cuivre, mais l'étendue des valeurs de V_s pour la roche stérile est tellement vaste qu'il est impossible de déterminer les types rocheux ou encore de différencier le stérile du minéral (figure 4.1c).

L'impédance est calculée en multipliant la masse volumique d'un échantillon par sa vitesse sismique. Les histogrammes des impédances pour les ondes de compression (ondes P) et de cisaillement (ondes S) illustrés à la figure 4.1d et e n'apportent pas de possibilités additionnelles. Les distributions sont plus compactes que celles de V_p et V_s , mais le sont moins que celles de la masse volumique.

Les histogrammes des logarithmes de la conductivité électrique (figure 4.1 f à j) montrent des intervalles de valeurs différents pour les trois types rocheux. Les rhyodacites ont de faibles valeurs, celles des tufs sont intermédiaires et celles du

mineral cuprifère sont élevées. Il y a un peu de chevauchement entre les distributions du mineral cuprifère et du tuf. On explique ceci par la présence de sulfures conducteurs en différentes quantités dans les tufs. Les valeurs moyennes des distributions pour ces trois types de roche sont plus espacées lorsque la fréquence est basse (à 1 kHz). Cette propriété semble donc un élément-clé pour identifier ces trois types rocheux ainsi que pour différencier ces deux types de roche stérile du mineral cuprifère.

Les mesures des constantes diélectriques et des susceptibilités magnétiques n'ont pu être analysées pour les échantillons de mineral pour les raisons mentionnées au chapitre 2. Les distributions des constantes diélectriques pour les rhyodacites et les tufs se chevauchent considérablement (figure 4.1 k à o). On remarque qu'un des échantillons de tuf obtient une valeur de constante diélectrique particulièrement élevée (240) à une fréquence de 1 kHz. Aucun indice lors de l'examen des propriétés géologiques de l'échantillon ne permet d'expliquer cette valeur hors de l'ordinaire. Elle serait possiblement due à une erreur lors de la prise de mesures. On conserve tout de même cette valeur dans notre banque de données à analyser. De toute façon, on conclut qu'il est impossible de différencier les rhyodacites des tufs uniquement avec cette propriété.

Une partie des échantillons de tuf ont des valeurs de susceptibilité magnétique plus élevées que les rhyodacites, mais les distributions se chevauchent (figure 4.1 p). Il

semble que la lithologie seule n'aie pas une influence assez grande pour différencier les échantillons à l'aide de cette propriété. La présence de magnétite a été observée dans certains échantillons de tuf; c'est ce qui explique les quelques valeurs plus élevées. Encore une fois, il est impossible de différencier les deux types rocheux uniquement avec cette propriété.

L'étude des diagrammes binaires entre chaque combinaison de deux propriétés n'apporte que peu d'information supplémentaire. Elle confirme les observations faites sur les histogrammes. La figure 4.2 montre la conductivité électrique à 1 kHz des échantillons en fonction de leur masse volumique. Les trois types de roche se regroupent; les rhyodacites ont des conductivités et des masses volumiques faibles, les tufs ont des conductivités et des masses volumiques intermédiaires, et le minerai cuprifère a des conductivités ainsi que des masses volumiques élevées. Les deux échantillons de tuf identifiés par "Py" (pour pyrite) contiennent respectivement 24 et 34 % de fer, majoritairement sous forme de pyrite.

Le tableau 4.1 liste les valeurs moyennes (moy) et les écarts-type (é-t) des variables physiques mesurées sur nos échantillons pour chacune des trois sortes de roches. Ces valeurs sont précieuses pour Louvicourt Mine puisqu'elles sont propres aux roches du gisement Louvicourt. Elles pourront être utilisées comme paramètres fiables lors d'études de simulation et de modélisation géophysiques plutôt que d'utiliser des valeurs tirées de publications et mesurées sur des roches différentes.

On doit toutefois noter l'importance des écarts-type par rapport aux valeurs moyennes.

En effet, les propriétés varient selon les types rocheux mais semblent souvent plus influencées par la présence de certains éléments-clé que par la nature même de la roche. Ainsi, la masse volumique des tufs semble influencée par la quantité de sulfures qu'ils contiennent et la susceptibilité magnétique par la présence de magnétite. L'analyse du chapitre 5 pourra confirmer ces observations.

Tableau 4.1 Propriétés des échantillons: valeurs moyennes et écarts-type

propriété physique	unités	rhyodacite		tuf		minéral Cu	
		moy	é-t	moy	é-t	moy	é-t
masse volumique	g/cm ³	2,78	0,05	3,15	0,36	3,69	0,38
vitesse des ondes P	m/s	6217	209	6415	258	6220	298
vitesse des ondes S	m/s	3708	345	3723	298	3453	105
log (conductivité électrique à 1 kHz)	S/m	-5,22	1,48	-0,88	1,30	1,09	0,85
constante diélectrique à 1 kHz		48	42	97	93	---	---
log (conductivité électrique à 10 kHz)	S/m	-4,82	1,28	-0,88	1,30	1,09	0,84
constante diélectrique à 10 kHz		25	19	36	36	---	---
log (conductivité électrique à 100 kHz)	S/m	-4,30	1,07	-0,88	1,29	1,08	0,83
constante diélectrique à 100 kHz		16	11	38	33	---	---
log (conductivité électrique à 1 MHz)	S/m	-3,71	0,86	-0,86	1,25	1,03	0,78
constante diélectrique à 1 MHz		11	7	42	34	---	---
log (conductivité électrique à 10 MHz)	S/m	-3,21	0,75	-0,81	1,10	0,86	0,62
constante diélectrique à 10 MHz		8	4	31	23	4*	---
susceptibilité magnétique	10 ⁻⁶ c.g.s.	40	17	464	1056	---	---

* une seule mesure a pu être prise

Salisbury et *al.* (1996) obtiennent une masse volumique de 4.2 g/cm^3 et une vitesse des ondes de compression de 5.6 km/s pour la chalcopryrite presque pure. Ils observent aussi qu'à pression constante, la vitesse des ondes de compression diminue dans les échantillons de minerai cuprifère avec l'augmentation de la quantité de chalcopryrite dans la roche. Ces observations sont donc en accord logique avec nos mesures. Ils observent aussi que la vaste étendue des vitesses sismiques rencontrées dans les sulfures se confond avec celle des roches non sulfurées.

Une analyse discriminante (AD) pas à pas détermine que la meilleure classification des échantillons selon les trois types rocheux à partir des données disponibles n'utilise de façon significative que le logarithme de la conductivité électrique à 1 kHz . Cette analyse réussit à bien classer 85% des échantillons dans leurs groupes connus. Le tableau suivant montre les résultats obtenus par l'AD par rapport à ces groupes.

Tableau 4.2 Résultats de l'analyse discriminante (log (conductivité électrique à 1 kHz))

	groupes établis par l'analyse discriminante			
		rhyodacite	tuf	minerai Cu
	groupes connus			
	rhyodacite	16	1	0
	tuf	1	8	2
	minerai Cu	0	1	5

Puisque seulement une propriété physique a été sélectionnée, il n'est pas nécessaire d'utiliser l'AD. Les seuils de différenciation des groupes peuvent être évalués directement à partir des histogrammes. À partir de la figure 4.1f, on pose ceux-ci à -2,7 et 0,2 ($2,0 \times 10^{-3}$ et 1,6 S/m). Ainsi, les échantillons ayant des conductivités plus faibles que $2,0 \times 10^{-3}$ S/m seraient classifiés dans le groupe rhyodacite, ceux dont la conductivité est plus élevée que 1,6 S/m le seraient dans le groupe minéral cuprifère et les échantillons ayant des conductivités se situant entre ces deux seuils seraient classifiés dans le groupe des tufs. La même chose peut être faite pour les autres fréquences. On obtient les seuils suivants: -2,7 et 0,2 ($2,0 \times 10^{-3}$ et 1,6 S/m) pour les fréquences de 10 et 100 kHz, -2,6 et 0,2 ($2,5 \times 10^{-3}$ et 1,6 S/m) pour 1 MHz et -2,2 et 0,2 ($6,3 \times 10^{-3}$ et 1,6 S/m) pour 10 MHz.

Ainsi, à partir des données disponibles pour nos 34 échantillons de carottes, les diagrammes binaires et les histogrammes indiquent que la conductivité électrique et la masse volumique sont les propriétés permettant le mieux de différencier les trois types rocheux rencontrés; les rhyodacites ont des conductivités et des masses volumiques faibles, les tufs ont des conductivités et des masses volumiques intermédiaires, et le minéral cuprifère a des conductivités ainsi que des masses volumiques élevées. Les valeurs intermédiaires obtenues pour les tufs sont dues à la présence de sulfures dans ces roches. L'analyse discriminante confirme que le logarithme de la conductivité électrique à 1 kHz est le meilleur choix pour classer nos échantillons et les histogrammes permettent d'évaluer les seuils à $2,0 \times 10^{-3}$ et 1,6 S/m.

Les résultats obtenus sont encourageants puisqu'ils démontrent qu'il est possible de différencier les roches des trois groupes avec un pourcentage d'observations bien classées de 85% par une propriété physique mesurable en diagraphie (la conductivité électrique).

4.2 Groupe "655"

Trois propriétés physiques (vitesse des ondes de compression, rayonnement gamma naturel et susceptibilité magnétique) ont été mesurées dans ces trous qui intersectent nos six groupes rocheux majeurs (tuf, rhyodacite, pyrite massive, minéral cuprifère, minéral zincifère et dykes).

Les relevés de diagraphie (figure 4.3) illustrent les mesures physiques et la géologie. La première colonne des relevés montre la géologie principale, alors que la seconde montre les éléments géologiques structuraux et secondaires (failles, veines, etc.). Les X noirs au bas des colonnes montrant les mesures des propriétés physiques indiquent jusqu'à quelle profondeur dans le trou des mesures ont pu être prises.

On observe que les mesures de susceptibilité sont très perturbées par la présence de magnétite. On remarque aussi que les valeurs mesurées sont particulièrement élevées et suspectons un problème de calibration de la sonde. Les occurrences de pyrrhotite dans les roches du gisement sont habituellement associées à la chalcopryrite

(P. Pelz, communication personnelle, 1996). C'est ce qui expliquerait les valeurs élevées mesurées dans le minerai cuprifère. Les mesures de rayonnement gamma naturel se comportent généralement tel que prévu; elles sont en moyenne plus élevées dans les rhyodacites et les tufs que dans les sulfures massifs. On explique ceci par la plus grande abondance de potassium dans la roche stérile que dans les sulfures. Les vitesses sismiques font des "sauts" de façon très locale en présence d'éléments structuraux tels que des failles, des veines de quartz et des bandes de pyrite massive. Toutefois, ces vitesses ne semblent pas permettre la différenciation entre les types de roches. Ceci, contrairement à ce qui avait été remarqué dans les sulfures nickélifères de McConnell (Pflug et al., 1994). Ainsi, on réalise que de telles mesures de vitesse sismique ne réussissent pas à différencier le minerai de la roche stérile dans tous les genres de gisements de sulfures massifs. Une combinaison entre la masse volumique et les propriétés élastiques des sulfures massifs et de la roche encaissante doit être suffisamment différente afin d'obtenir d'importants contrastes de vitesse des ondes sismiques de compression. Aussi, Salisbury et al. (1996) montrent que les vitesses des ondes de compression dans les sulfures sont très variables rendant difficile la différenciation entre ces sulfures et la roche non sulfurée.

Puisque les mesures physiques sont prises à des intervalles de longueur différents selon les sondes utilisées, nous avons établi une "observation" comme étant la valeur moyenne de chaque type de mesure physique sur un intervalle fixe de 50 centimètres. Le type rocheux correspondant à chacune de ces observations a été tiré des relevés

de forage de la mine. Nous obtenons ainsi 496 observations de tuf, 583 de rhyodacite, 89 de pyrite massive, 94 de minerai cuprifère, 9 de minerai zincifère, et 11 de dykes pour l'ensemble de ces trous.

L'observation des histogrammes (figure 4.4) ne permet pas de trouver une propriété physique pour laquelle les différents types rocheux ont des distributions permettant de bien les distinguer. Pour toutes les propriétés mesurées ici, les distributions se chevauchent empêchant même de différencier le minerai du stérile. Les deux seules propriétés qui, combinées, auraient pu devenir un indicateur de type rocheux sont la susceptibilité magnétique et le rayonnement gamma naturel. Malgré ces indications, un diagramme binaire de ces propriétés (figure 4.5) ne permet pas de différencier les types rocheux, ni de différencier le stérile du minerai. En effet, les observations pour la rhyodacite et le minerai sont assez bien regroupées, mais de nombreuses observations de tuf s'y mêlent à cause de la grande variété de leur composition due à la présence de sulfures. Le nuage des observations de minerai a de faibles valeurs de rayonnement gamma naturel et des susceptibilités magnétiques élevées. Il deviendra intéressant de voir si ces propriétés donnent le même genre de résultat pour les données de la section suivante (groupe "565").

Le tableau 4.3 liste les valeurs moyennes (moy) et les écarts-type (é-t) des variables physiques obtenues pour chaque type de roche. Encore une fois, on obtient des écarts-type élevés par rapport aux valeurs moyennes calculées.

Tableau 4.3 Propriétés des types rocheux pour le groupe "655": valeurs moyennes et écarts-type

	gamma naturel (cpé)		vitesse des ondes P (km/s)		susceptibilité magnétique (micro SI)*	
	moy	é-t	moy	é-t	moy	é-t
tuf	84	37	6,268	0,231	6970	3903
rhyodacite	89	21	6,143	0,169	5104	4068
pyrite massive	42	21	6,546	0,405	10675	6683
mineral Cu	50	24	6,215	0,259	15595	34412
mineral Zn	75	25	6,157	0,172	9299	2488
dykes	46	12	6,150	0,091	7185	1644

* on suspecte une mauvaise calibration de l'appareil de mesure et suggère de se fier aux valeurs relatives plutôt qu'absolues.

Salisbury et *al.* (1996) obtiennent une vitesse sismique de 8 km/s pour la pyrite presque pure et observent que la vitesse croît avec la quantité de pyrite des échantillons. Ils annoncent aussi que les vitesses des ondes de compression de leurs échantillons de mineral cuprifère (chalcoppyrite) et zincifère (sphalérite) sont tellement semblables qu'elles rendent ces deux types rocheux acoustiquement indifférenciables. De plus, comme il a été mentionné à la section précédente, la vaste étendue des vitesses sismiques rencontrées dans les sulfures se confond avec celle des roches non sulfurées. Toutes ces observations concordent avec nos résultats.

Une procédure pas à pas a été utilisée afin de sélectionner les variables géophysiques qui sont significatives pour l'analyse discriminante. Si l'on essaie de classer les observations selon les six types rocheux, on obtient que même en utilisant les trois variables géophysiques mesurées (rayonnement gamma naturel, susceptibilité et vitesse des ondes P), seulement 42 % des observations sont bien classées par l'analyse discriminante (comparativement à la description géologique des relevés de forage). L'analyse discriminante ne sert à rien pour classer les observations dans nos six groupes puisqu'elle n'arrive pas à déterminer des fonctions permettant adéquatement de classer nos observations.

Malgré cet échec, la différenciation entre le minerai et la roche stérile ou encore entre les sulfures massifs et les autres roches fournirait de l'information quand même très utile au point de vue économique puisqu'elle permettrait malgré tout d'aider à la conception des chantiers, des patrons de sautage et à l'interprétation géologique. Le fait que toute l'information géologique ne soit pas disponible ne veut pas dire qu'on ne sait quelles zones miner. L'intersection stérile/minerai est souvent l'information la plus importante à considérer lors des études de planification de nouveaux forages, de sautages, pour calculer les réserves ou pour concevoir le design d'un chantier.

Ainsi, une deuxième étude par analyse discriminante a été faite afin de voir si on peut classer les observations selon leur caractère économique. Ainsi, seulement deux groupes sont formés; "stérile" et "mineral". Le groupe "stérile" contient toutes les

observations des types rocheux tuf, rhyodacite, pyrite massive et dykes, alors que le groupe "mineral" contient les observations des types mineral cuprifère et mineral zincifère. Une procédure pas à pas a permis de déterminer que 85 % des observations peuvent être bien classées en n'utilisant que la variable géophysique "susceptibilité magnétique". Les autres variables n'apportant pas d'amélioration significative à la classification. Le choix de cette variable peut surprendre lorsqu'on observe les relevés de diagraphie et les histogrammes (figures 4.3 et 4.4c). De plus, puisque seulement une propriété physique est utilisée, on devrait pouvoir n'utiliser que les histogrammes pour déterminer la valeur limite entre le mineral et le stérile. Pourtant, les histogrammes de la figure 4.4c ne montrent pas ces limites de façon claire et précise. L'observation du tableau suivant permet de comprendre les résultats obtenus. En effet, il indique le nombre d'observations classées dans chaque groupe par l'analyse discriminante et le nombre d'observations réel appartenant à chaque groupe.

Tableau 4.4 Résultats de l'analyse discriminante (susceptibilité magnétique)

	groupes établis par l'analyse discriminante		
		stérile	mineral
	groupes connus		
	stérile	1048	131
	mineral	55	48

Ce tableau montre que plus de la moitié des observations "mineral" ont été classées comme "stérile" par l'analyse discriminante. De plus, un grand nombre d'observations "stérile" ont été classées comme "mineral". Les observations de type pyrite massive sont classées, à tort, dans le groupe "mineral", mais elles ne sont pas les seules. Il y a beaucoup trop de chevauchement entre les distributions pour permettre un classement fiable. Ainsi, un tel classement, malgré un fort pourcentage d'observations bien classées, n'est pas recommandé. Le nombre élevé de "bien classées" est dû au grand nombre d'observations du groupe "stérile". Ces observations sont beaucoup plus nombreuses que celles du groupe "mineral" et sont plus souvent bien classées. Aussi, si l'on se fiait à cette analyse discriminante pour modifier des plans ou pour interpréter des trous de forage, on minerait inutilement du stérile et on laisserait la moitié du mineral en place ou encore, on commettrait d'importantes erreurs dans l'interprétation de la géométrie des lentilles minéralisées.

Une autre AD pour laquelle les observations de pyrite massive sont incorporées au groupe "mineral" pour former un nouveau groupe "sulfures" et où le second groupe contient les tufs, les rhyodacites et les dykes ne permet malheureusement pas une amélioration significative de la classification. Ceci principalement à cause des trop grandes étendues des distributions des tufs.

Une dernière tentative d'AD ne sélectionnant que le rayonnement gamma naturel obtient 70 % de bien classées mais où 25 % du mineral est classé en "stérile" et 30 %

du stérile en "minéral". Encore une fois, cette classification ne serait pas recommandée.

L'analyse discriminante n'a donc pas permis de classer nos observations selon les six types rocheux, ni selon les deux grands groupes économiques. Malgré un fort pourcentage d'observations bien classées pour ces deux grands groupes ("stérile" et "minéral"), un design de chantier basé sur cette classification risquerait de laisser 50 % du minéral en place et de miner une quantité importante de roche stérile. Ceci aurait un impact économique important, à cause des coûts inutiles dus au minage, transport et traitement du stérile et des pertes dues à la roche économique laissée en place. Cependant, si l'on considère investiguer des trous de forage de production (forage à percussion), un sondage diagaphique rapide de susceptibilité magnétique ou de rayonnement gamma naturel donnerait tout de même un *estimé* de la localisation des sulfures. Cette information pourrait être utilisée comme supplément aux hypothèses géologiques préalablement émises par les géologues. On ne devrait toutefois pas se fier aveuglément à ces informations.

Ainsi, aucune des méthodes utilisées n'a pu aider à déterminer les types rocheux pour ces trous de forage. L'observation des relevés de diagaphie ne permet pas de facilement interpréter la géologie des trous. L'AD ne permet pas non plus de classer les groupes rocheux de façon sûre. L'interprétation faite par les géologues en utilisant

les relevés géologiques des carottes ne peut être reproduite avec autant de précision à partir de nos données de diagraphie.

4.3 Groupe “565”

Les sondages diagraphiques des trous du groupe “565” mesurent quatre propriétés physiques; la conductivité électrique, la susceptibilité magnétique et les rayonnements gamma-gamma et gamma naturel. Les trous sondés rencontrent les six grands types rocheux mais la majorité de la minéralisation est de type zincifère. Pour les histogrammes et les analyses discriminantes, chaque “observation” est calculée de la même façon qu’à la section précédente. On obtient 258 observations pour le groupe des tufs, 118 pour les rhyodacites, 32 pour la pyrite massive, 58 pour le minerai cuprifère, 241 pour le minerai zincifère et 5 pour les dykes.

L’observation des relevés de diagraphie de ces trous montre clairement qu’il est possible d’identifier le minerai de la roche stérile (voir figure 4.6). Les mesures de conductivité sont élevées pour le minerai cuprifère, très variables pour le zincifère et généralement faibles dans la roche stérile. La susceptibilité magnétique a de fortes valeurs surtout lorsque la conductivité électrique est élevée. Le rayonnement gamma-gamma est élevé dans la rhyodacite, le tuf et dans les dykes, faible dans les zones minéralisées et moyen dans les zones de pyrite massive. Ces réponses reflètent la masse volumique de la roche. Le rayonnement gamma naturel est variable mais

généralement élevé dans les tufs et les rhyodacites, toujours élevé dans les dykes et bas dans le minerai. La quantité de potassium des roches, reflétée par ces mesures, est plus faible dans les sulfures massifs que dans les autres roches. Ainsi, une combinaison des mesures de rayonnements gamma-gamma ou gamma naturel et des conductivités électriques permet de différencier la roche économique de la roche stérile et en plus le minerai cuprifère du zincifère. En effet, malgré que les deux types de rayonnements mesurent des propriétés différentes, ils permettent tous les deux de séparer la roche économique du stérile. Ces affirmations sont confirmées par l'observation des histogrammes (figure 4.7). On remarque qu'il n'y a pratiquement pas de chevauchement entre les distributions de minerai et de roche stérile pour les levés de rayonnement gamma-gamma et gamma naturel et qu'il n'en existe que peu pour la conductivité électrique. De nombreuses mesures de conductivité électrique ont des valeurs de zéro millivolt. Ceci est dû à la fenêtre de mesure de la sonde utilisée. En effet, toutes les roches résistantes obtiennent une valeur de conductivité de 0 mV (voir chapitre 2). Le diagramme binaire de ces propriétés (gamma naturel et conductivité) est montré à la figure 4.8. Afin de clarifier le diagramme, des échelles logarithmiques ont été utilisées. Les valeurs nulles de conductivité électrique et de susceptibilité magnétique ont toutes été remplacées par 0,01. Les nuages de points pour le minerai cuprifère, pour le zincifère et pour la roche stérile sont assez clairement définis malgré la présence de quelques observations éparses, permettant ainsi la classification des mesures dans ces trois catégories.

Le diagramme binaire de la susceptibilité magnétique en fonction du rayonnement gamma naturel (figure 4.9) montre une séparation entre le minerai et le stérile plus nette qu'à la figure 4.5. Ceci surtout grâce à l'influence des mesures du rayonnement gamma naturel.

L'étude des histogrammes de ces deux propriétés pour les groupes "655" et "565" montre que les sondes utilisées ne donnent pas les mêmes types de résultats selon les groupes rocheux. En effet, la figure 4.4a (groupe "655") montre des distributions du rayonnement gamma naturel qui se chevauchent beaucoup plus que celles de la figure 4.7d (groupe "565"). Les mesures prises dans les trous du groupe "565" permettent de différencier le minerai des autres types roches, y compris la pyrite massive alors que cette différenciation est impossible à faire à partir du levé des trous "655". Aussi, les réponses obtenues pour les dykes sont très différentes selon le levé. Le levé des trous "655" situe les dykes dans la même gamme de mesure que le minerai cuprifère et la pyrite massive (valeurs faibles) alors que le levé "565" obtient des mesures beaucoup plus élevées pour les dykes que pour le minerai. Cette inconsistance est difficile à expliquer si l'on considère que les types rocheux des deux régions où ont été faits les levés sont équivalents. Les fenêtres d'énergie et les temps de mesures des deux sondes utilisées ne sont pas identiques, mais ceci ne devrait pas affecter ainsi les mesures en fonction des types rocheux.

On retrouve le même genre de phénomène pour les levés de susceptibilité magnétique (voir figures 4.4c et 4.7b). Les distributions des mesures ne se comportent pas exactement de la même façon selon la sonde utilisée. En particulier, les mesures prises dans les zones de pyrite massive lors du levé "655" sont du même ordre de grandeur que celles prises dans le minerai, alors que ce n'est pas le cas pour le levé "565". On note aussi le problème de calibration de la sonde du levé "655" qui donne des valeurs de susceptibilité magnétique très élevées. Comme on compare ici les valeurs entre-elles, pour une même sonde, aucune recherche approfondie n'a été effectuée dans le but d'expliquer ces problèmes de calibration.

Le tableau 4.5 liste les valeurs moyennes (moy) et les écarts-type (é-t) des propriétés physiques mesurées selon les types de roches. Encore une fois, on explique les fortes valeurs de susceptibilité magnétique du minerai cuprifère par la présence de pyrrhotite associée à la chalcopyrite.

Tableau 4.5 Propriétés des types rocheux pour le groupe "565": valeurs moyennes et écarts-type

	conductivité électrique (mV)*		susceptibilité magnétique (1e-5 SI)		rayonnement gamma-gamma (cpé)		rayonnement gamma naturel (cpé)	
	moy	é-t	moy	é-t	moy	é-t	moy	é-t
tuf	0	0	25	149	16386	2379	33	9
rhyodacite	0	0	4	3	14984	1980	31	7
pyrite massive	0	0	8	4	11367	2410	23	6
mineral Cu	46	45	2159	4510	5443	1187	2	2
mineral Zn	2	3	380	807	5440	1979	5	7
dykes	0	0	62	63	13090	2206	37	5

* cette unité de mesure est telle que fournie par la sonde. Aucune table de conversion n'a été établie pour transformer ces différences de potentiel en siemens par mètres.

La procédure pas à pas de l'analyse discriminante indique que le meilleur choix de variables géophysiques pour classer les observations dans les six groupes rocheux est la combinaison conductivité électrique et rayonnement gamma-gamma. Cette combinaison de variables permet d'obtenir un pourcentage de bien classées de 69 %. Le tableau 4.6 liste le nombre d'observations de chaque groupe selon le classement de l'analyse discriminante et selon les groupes véritables, connus grâce aux relevés de forage.

Tableau 4.6 Résultats de l'analyse discriminante (conductivité électrique et rayonnement gamma-gamma)

	groupes établis par l'analyse discriminante						
		tuf	rhyodacite	pyrite massive	mineral Cu	mineral Zn	dykes
groupes connus	tuf	182	46	16	0	3	11
	rhyodacite	63	30	11	0	2	12
	pyrite massive	2	4	17	0	2	7
	mineral Cu	0	0	1	35	22	0
	mineral Zn	1	2	10	0	226	2
	dykes	0	3	1	0	0	1

Cette classification n'est pas idéale pour nos six groupes rocheux, mais sépare les groupes de mineral des groupes de stérile de façon assez claire. Aussi, en faisant une analyse discriminante où les groupes tuf, rhyodacite, pyrite massive et dykes sont regroupés en un grand ensemble nommé "stérile" et où les deux groupes de mineral sont regroupés en un seul ensemble "mineral", on trouve que la variable "rayonnement gamma naturel" à elle seule permet de classer les observations avec un pourcentage de biens classées de 95 %. Le tableau suivant montre les résultats obtenus avec cette classification.

Tableau 4.7 Résultats de l'analyse discriminante (rayonnement gamma naturel)

	groupes établis par l'analyse discriminante		
groupes connus		stérile	mineral
	stérile	394	19
	mineral	19	280

Grâce à cette classification, on ne classe que 6 % de mineral comme stérile et 5 % de stérile en mineral. Certaines des observations "stérile" classées en "mineral" proviennent du type pyrite massive, mais aucun autre "indice géologique" n'indique, en vérifiant quelles sont les observations mal classées, ce qui pourrait expliquer les autres erreurs. Que la procédure pas à pas ne sélectionne que la variable rayonnement gamma naturel pour sa classification se comprend facilement en observant les histogrammes de la figure 4.7d. Tel que déjà mentionné, les mesures de rayonnement gamma naturel sont basses pour les deux types de mineral et élevées pour la roche stérile. Ainsi, la classification des observations par analyse discriminante sert plus ou moins dans le cas présent puisqu'elle n'utilise qu'une seule variable géophysique. On peut aussi déterminer une valeur limite à partir des histogrammes de la figure 4.7d pour différencier le mineral de la roche stérile. Cette valeur est fixée à 12 cpé. De la même façon, une limite de 8000 cpé de rayonnement gamma-gamma permet aussi de classer les observations en nos deux groupes avec un fort pourcentage de bien classées.

Les propriétés permettant le mieux de différencier le stérile du minéral sont donc la conductivité électrique et les rayonnements gamma-gamma et gamma naturel. On réussit à obtenir une classification fiable et performante. La figure 4.10 compare la géologie des relevés de forage à l'interprétation ainsi faite à partir de la diagraphie. Les mesures de rayonnement gamma naturel et de conductivité électrique ont été utilisées pour cette interprétation. Un seuil de 12 cpé de rayonnement gamma naturel a permis de différencier le stérile du minéral et un seuil de 5 millivolt de conductivité électrique a identifié les zones à fortes concentrations en cuivre. La première colonne lithologique sur ces figures représente l'interprétation géologique telle que retrouvée dans les relevés de forage de la mine. Également tirée de ces relevés, la seconde colonne montre la géologie "secondaire" et structurale telle que la présence de failles ou de fractures. La troisième colonne, identifiée "diagraphie", montre l'interprétation lithologique faite à partir des levés de rayonnement gamma naturel et de conductivité électrique. La forte correspondance entre ces interprétations et les données des relevés de forage prouve à quel point la diagraphie réussit à identifier les roches. Toutes les zones minéralisées de plus d'un mètre "d'épaisseur d'intersection" ont été détectées par la diagraphie. À seulement une occasion, de la roche stérile a été interprétée à tort comme étant minéralisée; à une "profondeur" d'environ 20 mètres dans le trou 565-023. En effet, les réponses géophysiques obtenues dans cette zone où l'on rencontre une brèche et du tuf cherteux sont semblables à celles généralement obtenues dans le minéral zincifère. Malgré cette erreur d'interprétation, on peut affirmer que les mesures en diagraphie prises dans ces trous donnent des résultats

très prometteurs pour Louvicourt Mine. L'interprétation faite à partir de la diagraphie indique la présence de minces "couches" cuprifère qui ne sont pas indiquées dans les relevés de forage; par exemple entre les "profondeurs" de 74 et 80 mètres du trou 565-025. Il est possible que ces couches n'aient pas été décrites dans les relevés de forage à cause de leur faibles longueurs d'intersections avec le trou. En effet, à ces profondeurs, le relevé de forage décrit le minerai comme étant "mixte"; c'est à dire un mélange de chalcopryrite et de sphalérite. Les failles situées à environ 45 et 64 mètres dans le trou 565-025 ont été détectées par le levé de rayonnement gamma naturel. En effet, on retrouve des sauts dans les relevés à ces profondeurs. Un autre saut de même type apparaît vers 59 mètres. Ce dernier indiquerait possiblement la présence d'une autre petite faille ou encore d'un autre élément structural non décrit dans le relevé de forage. Aussi, la présence de "creux" dans le relevé de rayonnement gamma naturel, comme par exemple à 12 mètres dans le trou 565-023, pourrait indiquer la localisation d'une veine minéralisée. Malheureusement, les relevés de forage de la mine ne sont pas assez détaillés pour confirmer ces indications. On ne peut donc affirmer pour l'instant si ces informations sont des artefacts dus au sondage diagraphique ou bien si elles représentent des éléments réellement présents dans la roche. Il sera toutefois intéressant lors de l'interprétation des prochains levés de diagraphie de voir si de tels éléments peuvent être corrélés et suivis dans des trous voisins et peut-être même confirmés par des relevés de forage plus détaillés.

Ainsi, les sondages effectués avec les sondes de conductivité électrique et de rayonnements gamma naturel et gamma-gamma d'Outokumpu Mining Services réussissent à classer de façon très satisfaisante les observations comme stérile ou minéral en plus de différencier le minéral cuprifère du zincifère. Ces sondes pourraient donc être utilisées de façon routinière pour sonder les trous de production à Louvicourt Mine. Une économie substantielle serait ainsi possible puisqu'on n'aurait pas à payer pour des analyses chimiques d'échantillons de carottes et que le forage à percussion est moins coûteux que le forage à diamant. De plus, le temps nécessaire avant d'obtenir l'information géologique serait coupé de beaucoup puisqu'on n'aurait pas à attendre après la préparation des échantillons et l'analyse de ces derniers.

4.4 Conclusion

Malgré le fait que les mesures semblent plus influencées par des minéraux ou éléments-clé plutôt que par la nature même de la roche, des valeurs moyennes des propriétés physiques mesurées ainsi que les écarts-type associés ont été calculés pour chaque type rocheux. Ces valeurs sont propres aux roches du gisement Louvicourt et pourront être utilisées ultérieurement lors de modélisation et de simulations géophysiques.

L'analyse discriminante n'a pas fournie de "recette" pour classer les observations selon les types rocheux puisque les procédures pas à pas ont toujours sélectionné

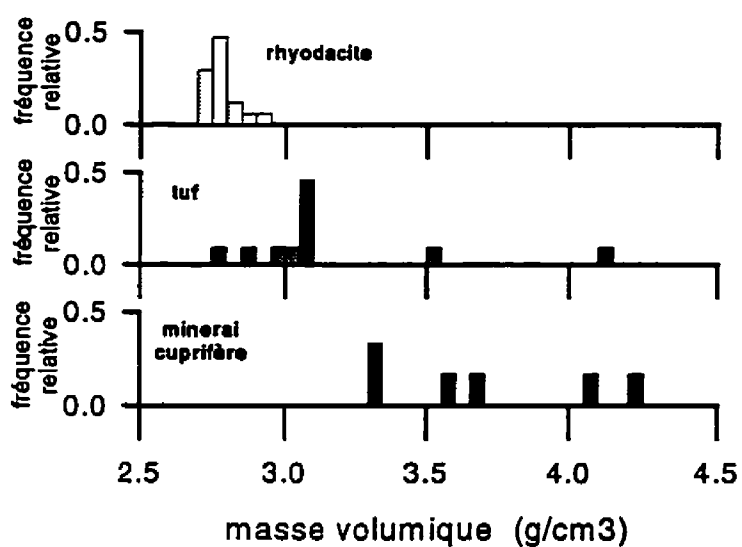
une seule propriété physique à la fois. L'AD a tout de même permis de confirmer qu'aucun ensemble de propriétés physiques n'est plus utile à la classification que les propriétés-clés utilisées individuellement.

L'étude des échantillons annonce que la conductivité électrique et la masse volumique sont des propriétés qui pourraient être utilisées pour classer les observations de trois de nos six grands types rocheux (tuf, rhyodacite et minerai cuprifère). Ces deux propriétés sont mesurables en diagraphie.

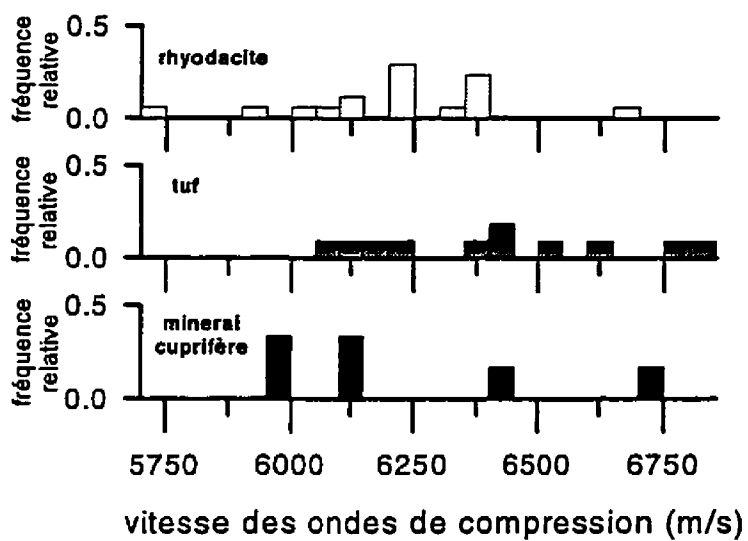
Les sondages du groupe "655", qui ne mesurent pas les mêmes propriétés que celles du groupe précédent, donnent des résultats décevants. On ne peut classer les observations selon les six groupes rocheux rencontrés ni même distinguer de façon fiable le stérile du minerai. Les relevés de diagraphie effectués dans ces trous ne permettent pas de reproduire l'interprétation géologique des relevés de forage.

Pour les sondages du groupe "565", les propriétés permettant le mieux de différencier le stérile du minerai sont la conductivité électrique et les rayonnements gamma-gamma et gamma naturel. On réussit, grâce à la conductivité électrique et au rayonnement gamma naturel, à obtenir une classification fiable et performante. L'étude des relevés de diagraphie permet de reproduire assez fidèlement la description géologique des relevés de forage. Le stérile est clairement distinguable du minerai, et les fortes concentrations en cuivre sont aussi démarquées. Grâce à ces

résultats, il serait possible de forer certains trous de délimitation du minéral avec des foreuses à percussion plutôt que des foreuses au diamant, permettant ainsi une importante économie de temps et d'argent. Ces trous seraient ensuite investigués par sondages diagraphiques.

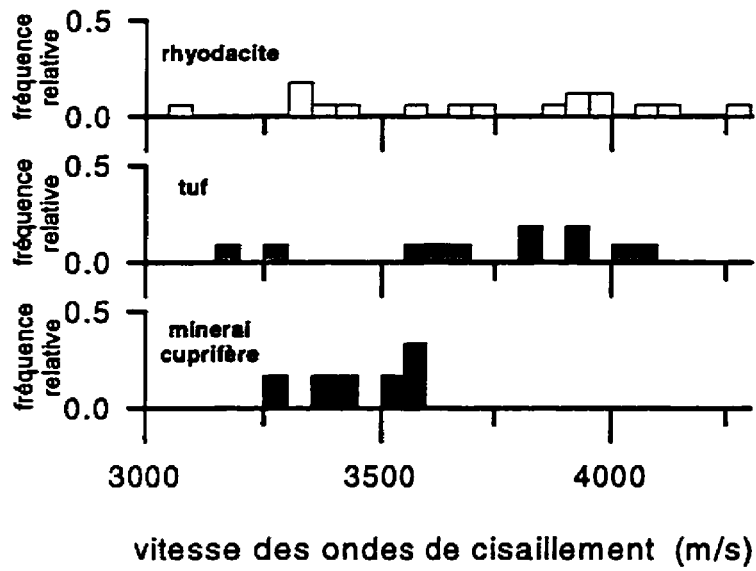


a)

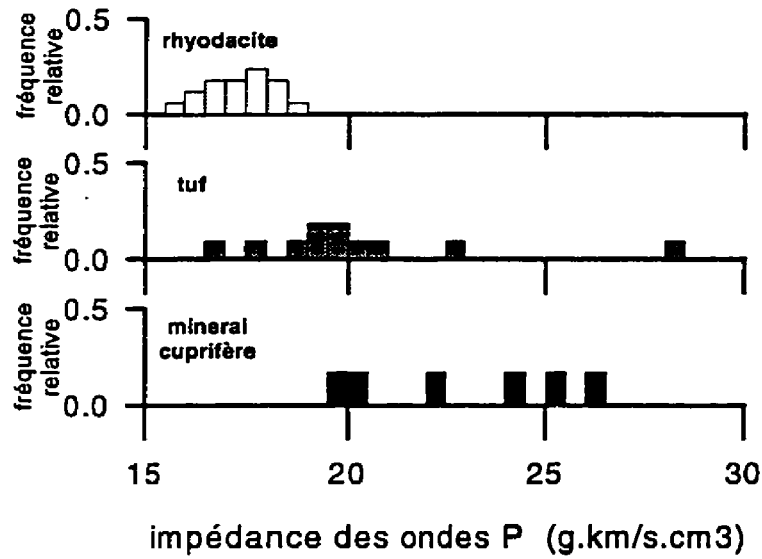


b)

Figure 4.1 Histogrammes des propriétés mesurées sur les échantillons

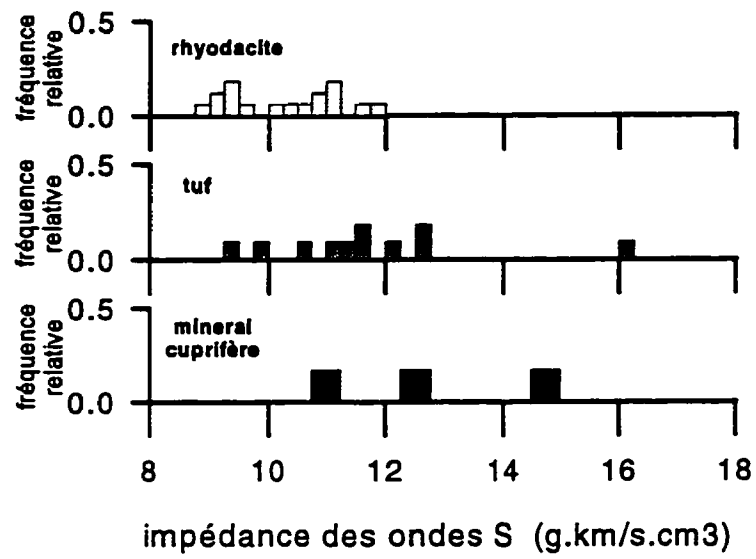


c)

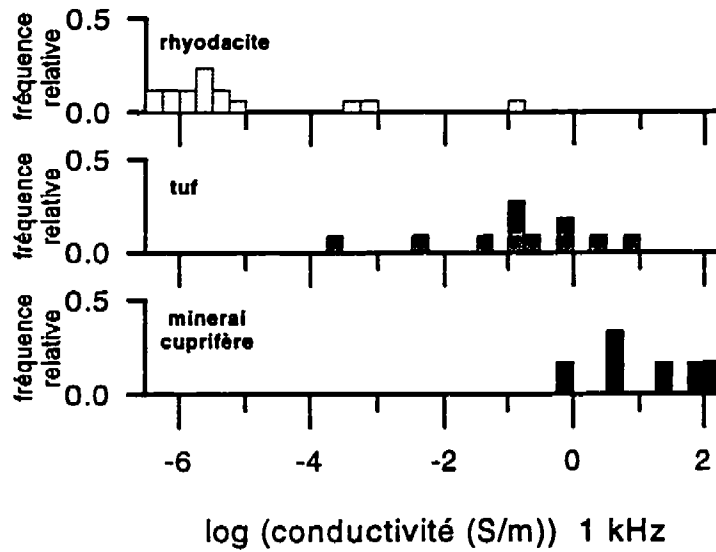


d)

Figure 4.1 (suite)

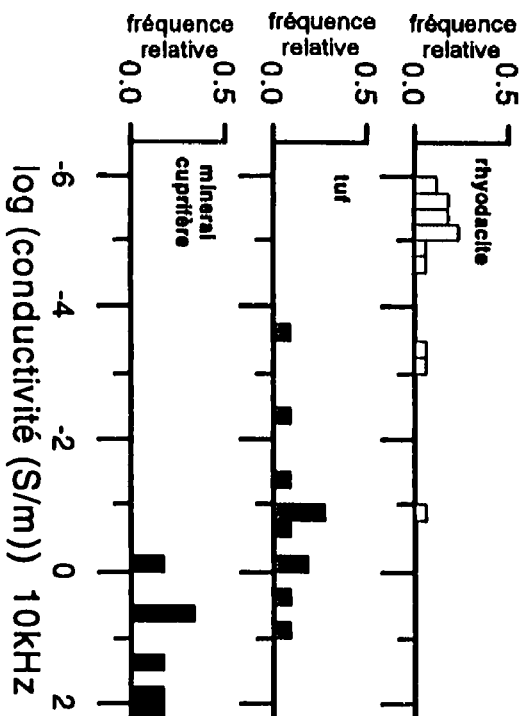


e)

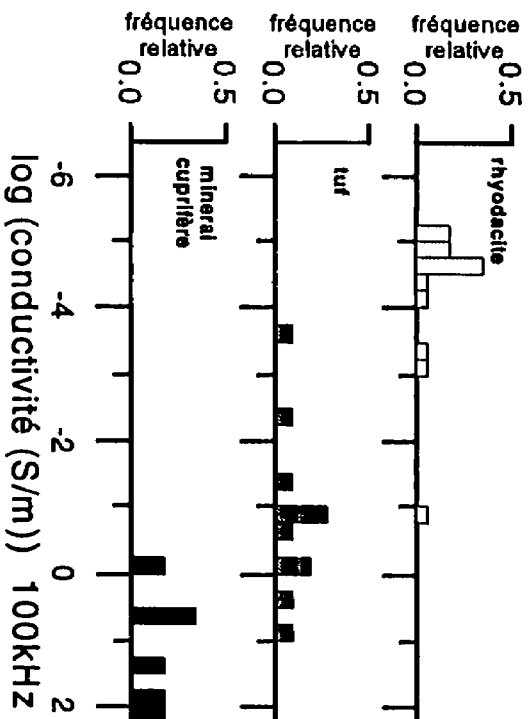


f)

Figure 4.1 (suite)

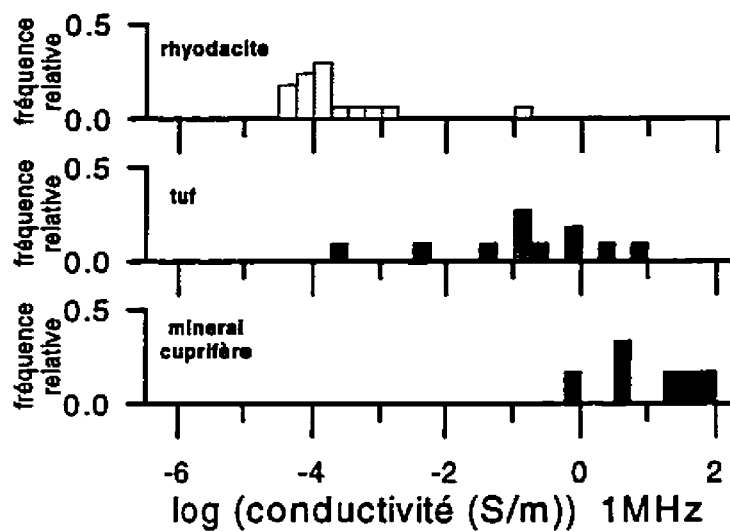


g)

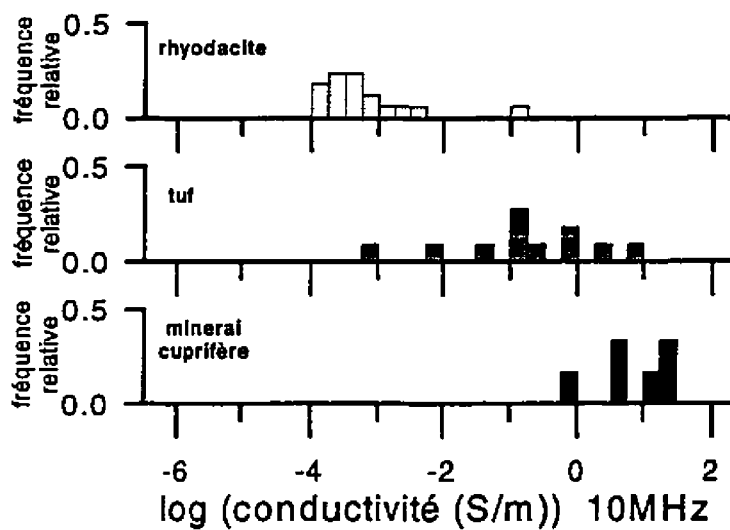


h)

Figure 4.1 (suite)



i)



j)

Figure 4.1 (suite)

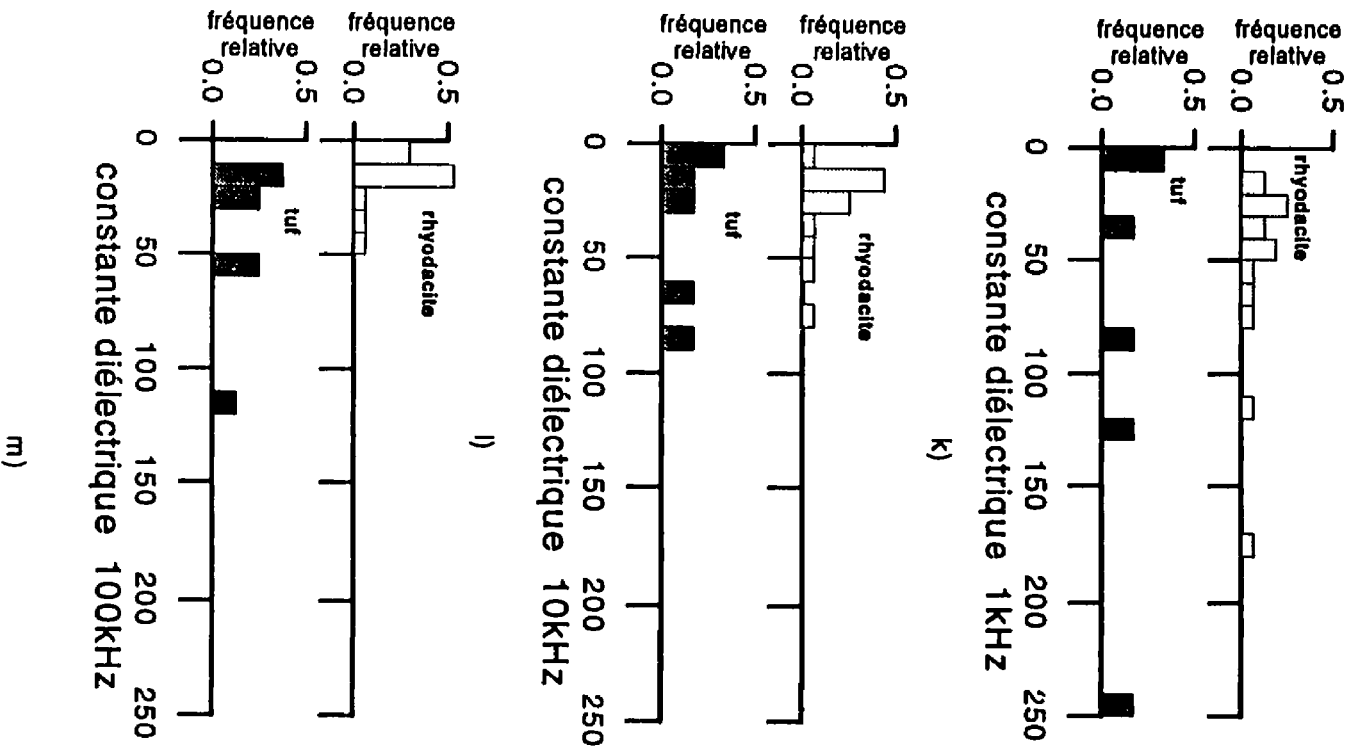
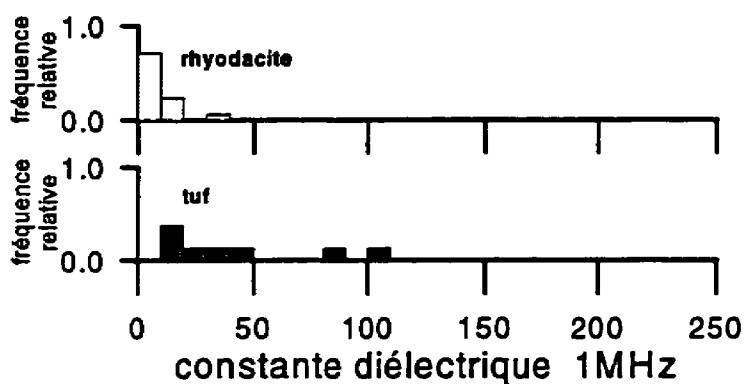
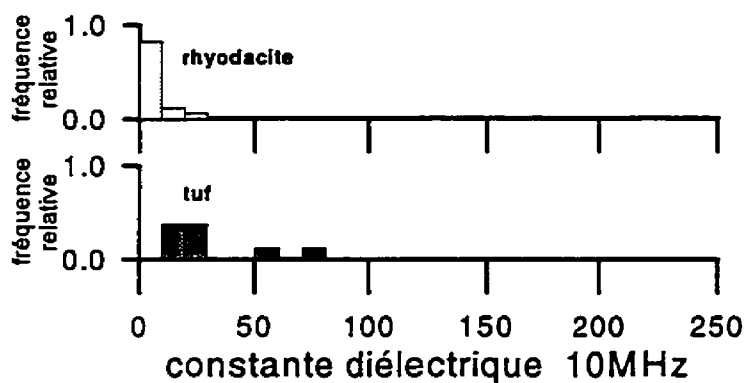


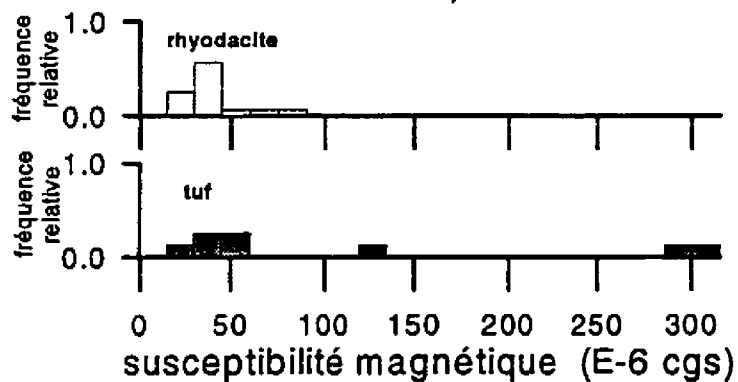
Figure 4.1 (suite)



n)



o)



p)

Figure 4.1 (suite)

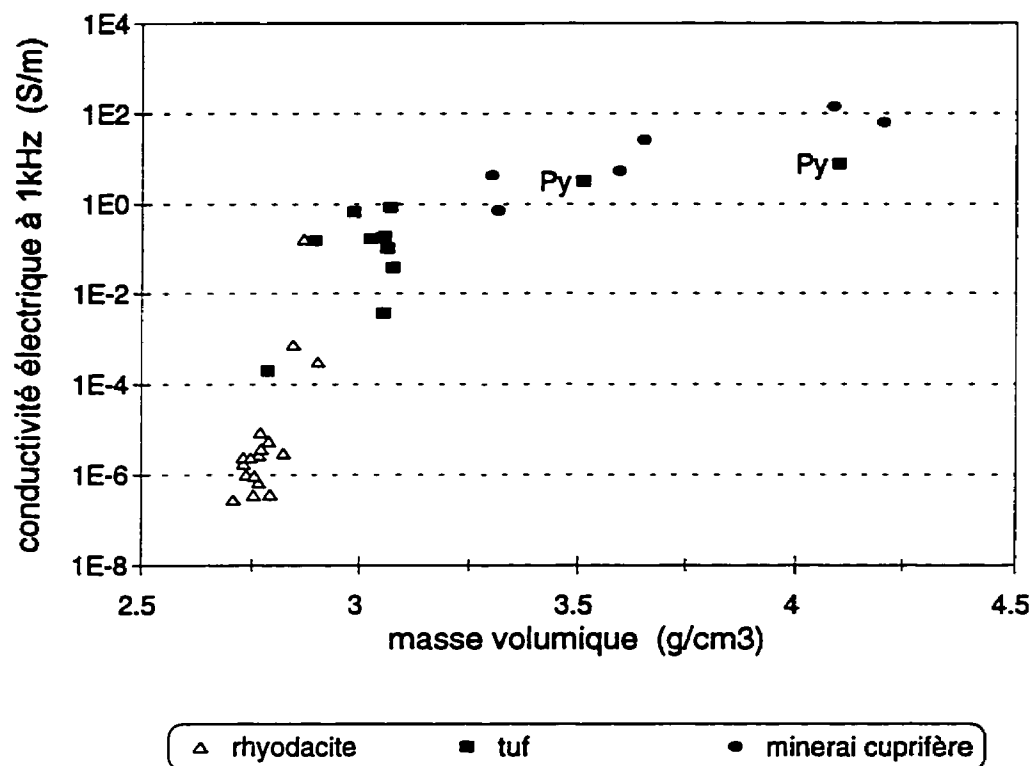


Figure 4.2 Diagramme binaire de la conductivité électrique à 1 kHz en fonction de la masse volumique

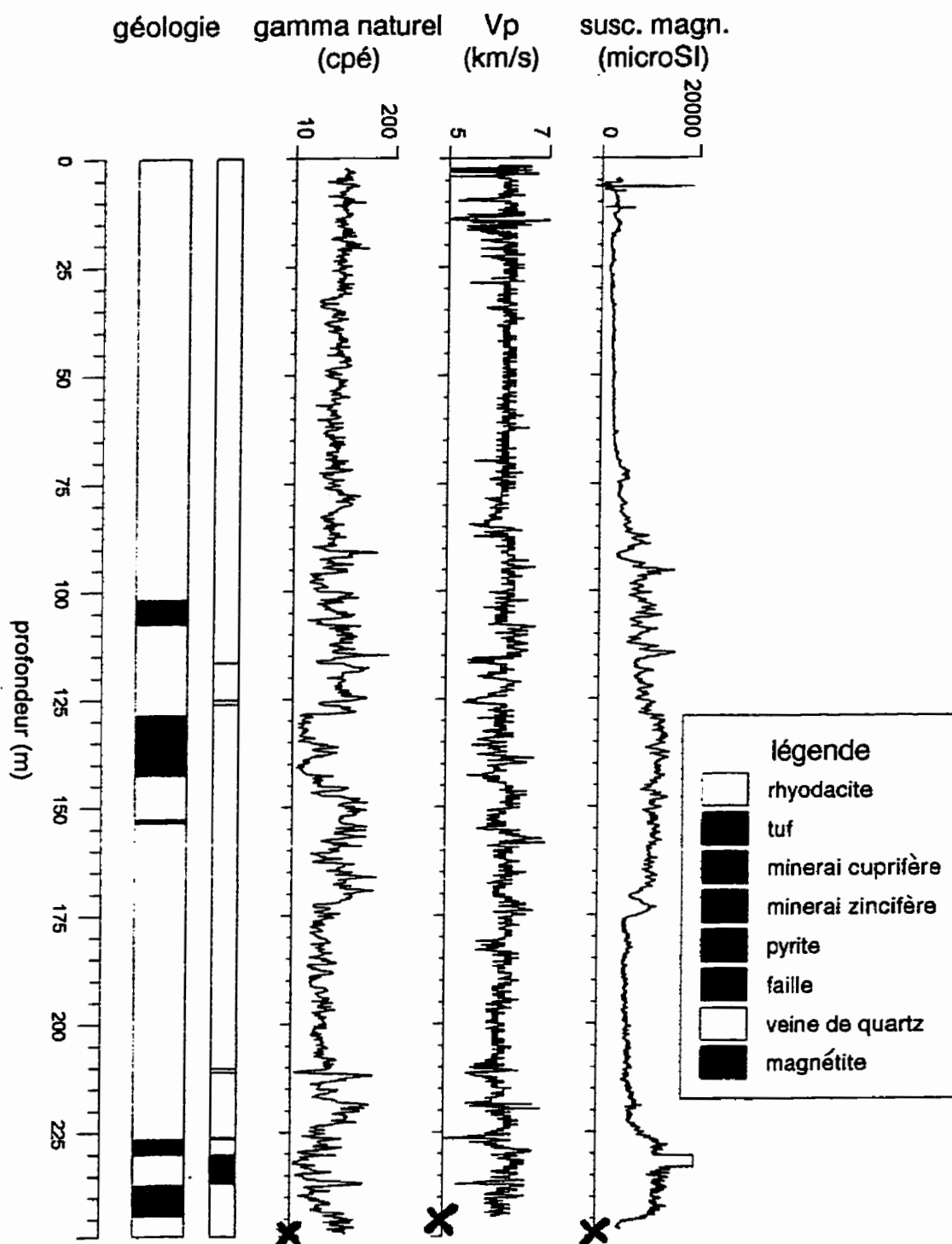


Figure 4.3 Relevés de diagraphie des trous du groupe "655"
a) trou 655-284

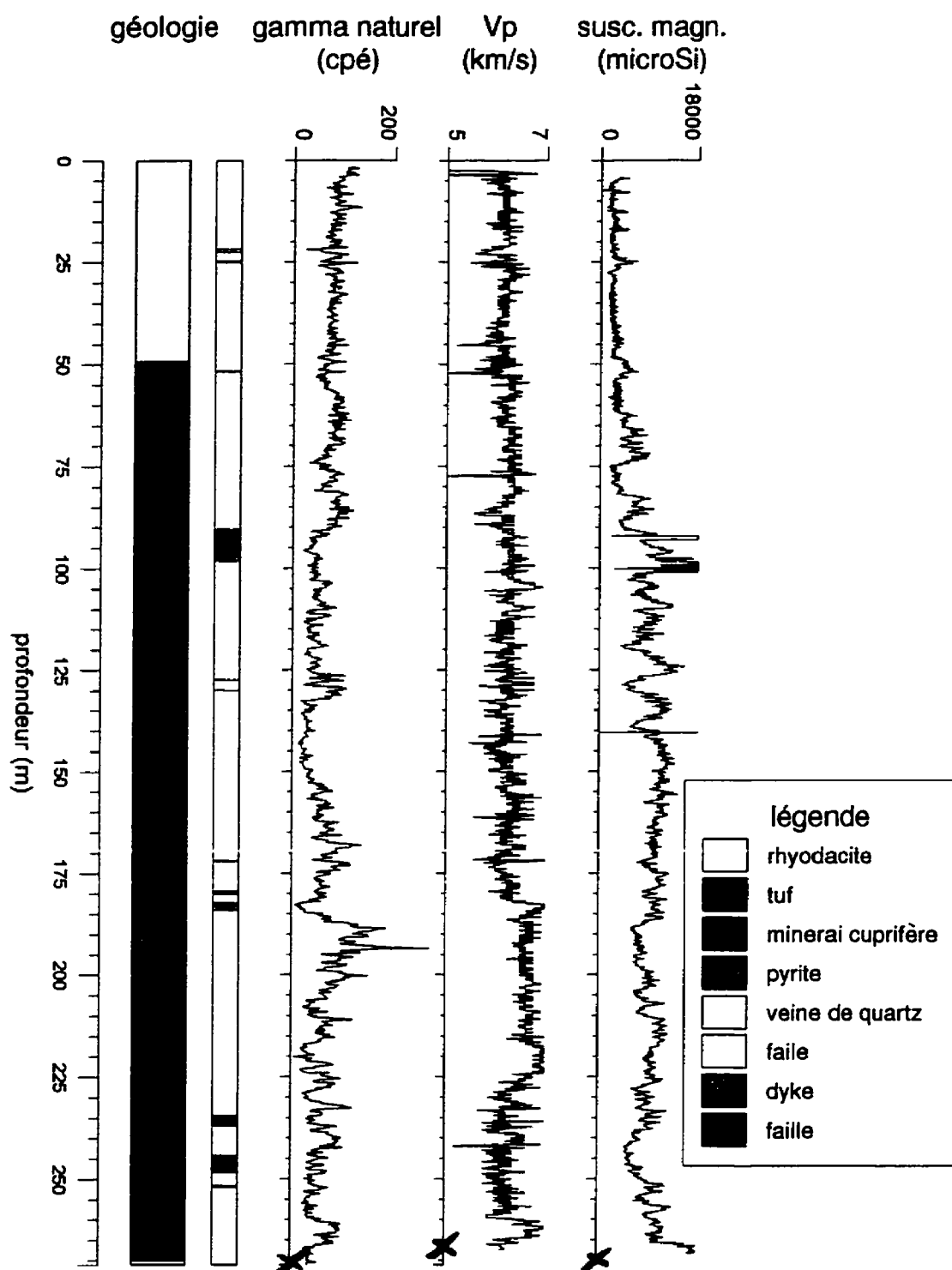


Figure 4.3 b) trou 655-302

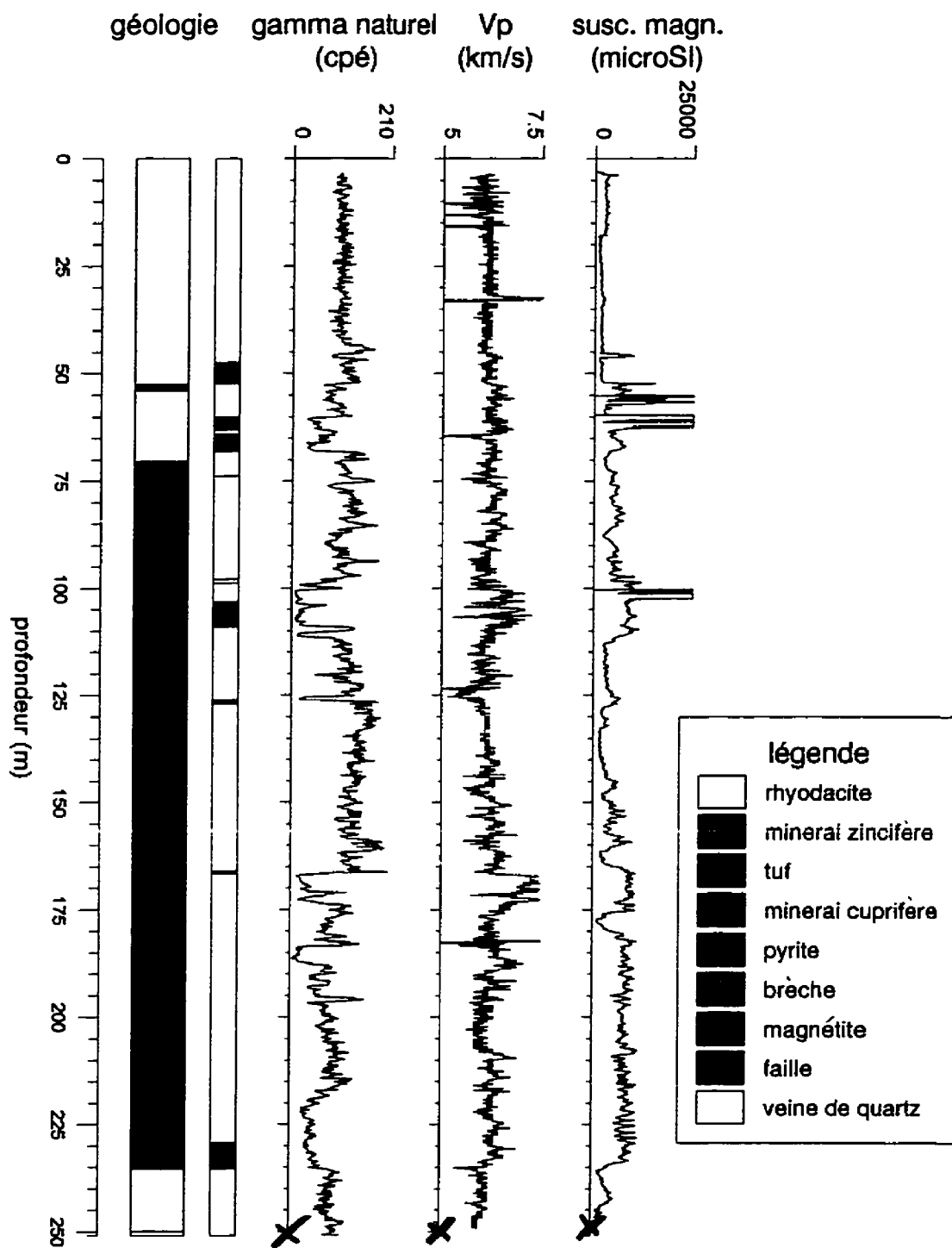
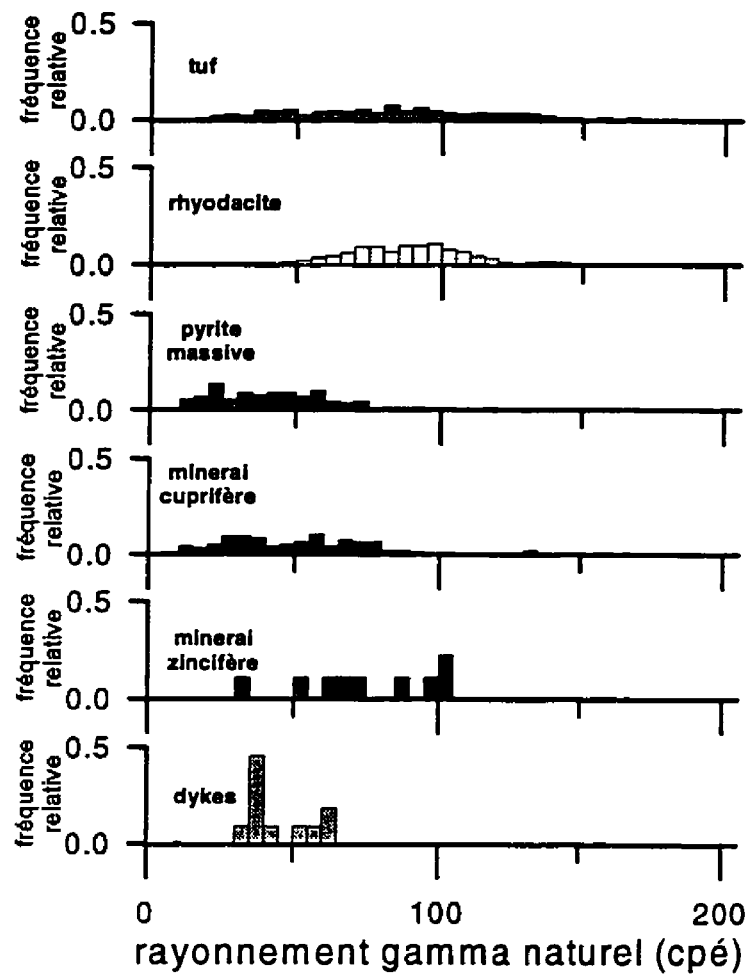
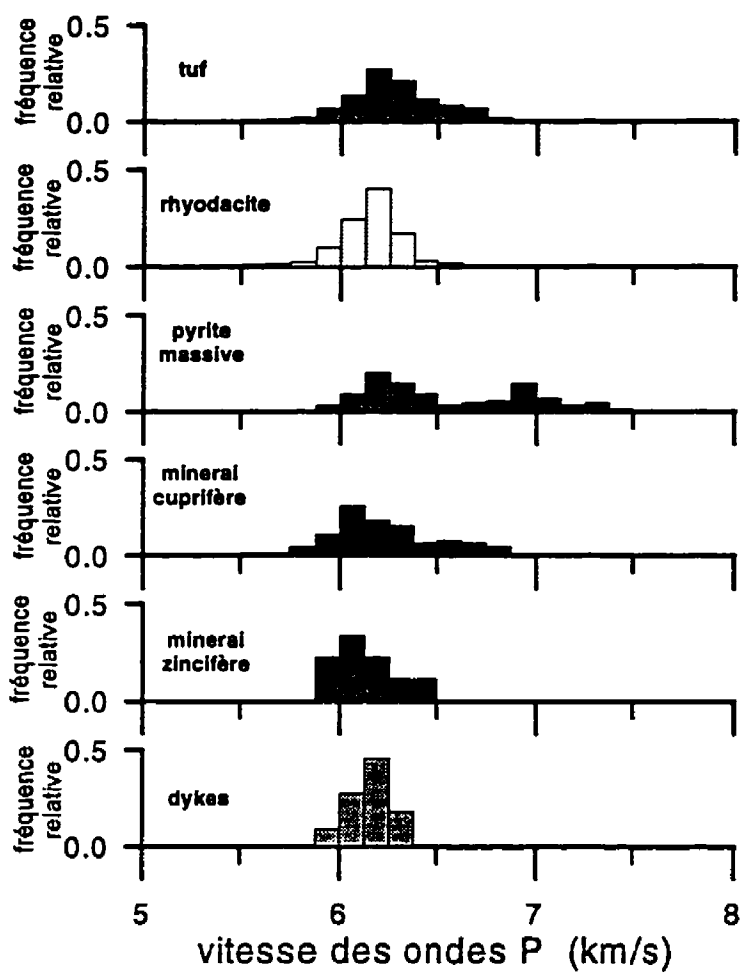


Figure 4.3 c) trou 655-304



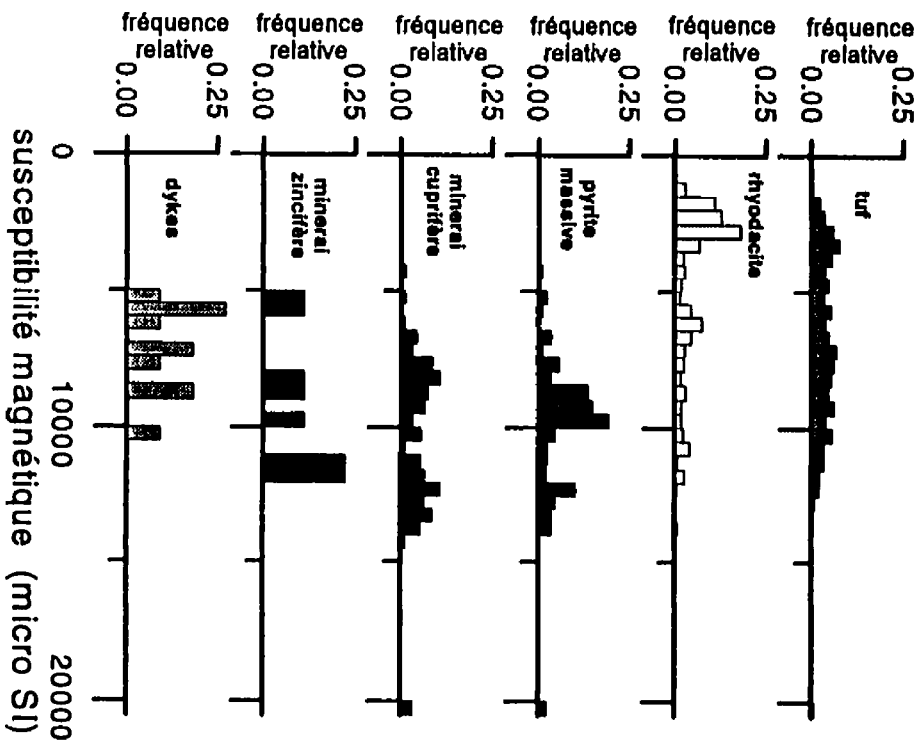
a)

Figure 4.4 Histogrammes des propriétés mesurées - groupe "655"



b)

Figure 4.4 (suite)



c)

Figure 4.4 (suite)

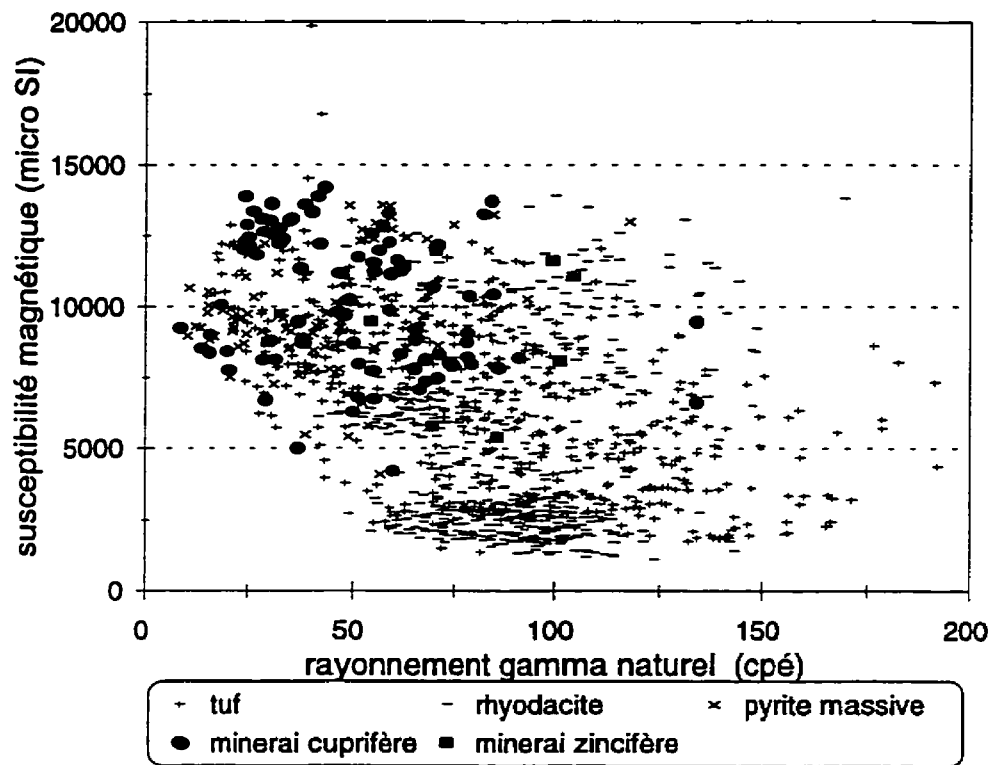


Figure 4.5 Diagramme binaire de la susceptibilité magnétique en fonction du rayonnement gamma naturel

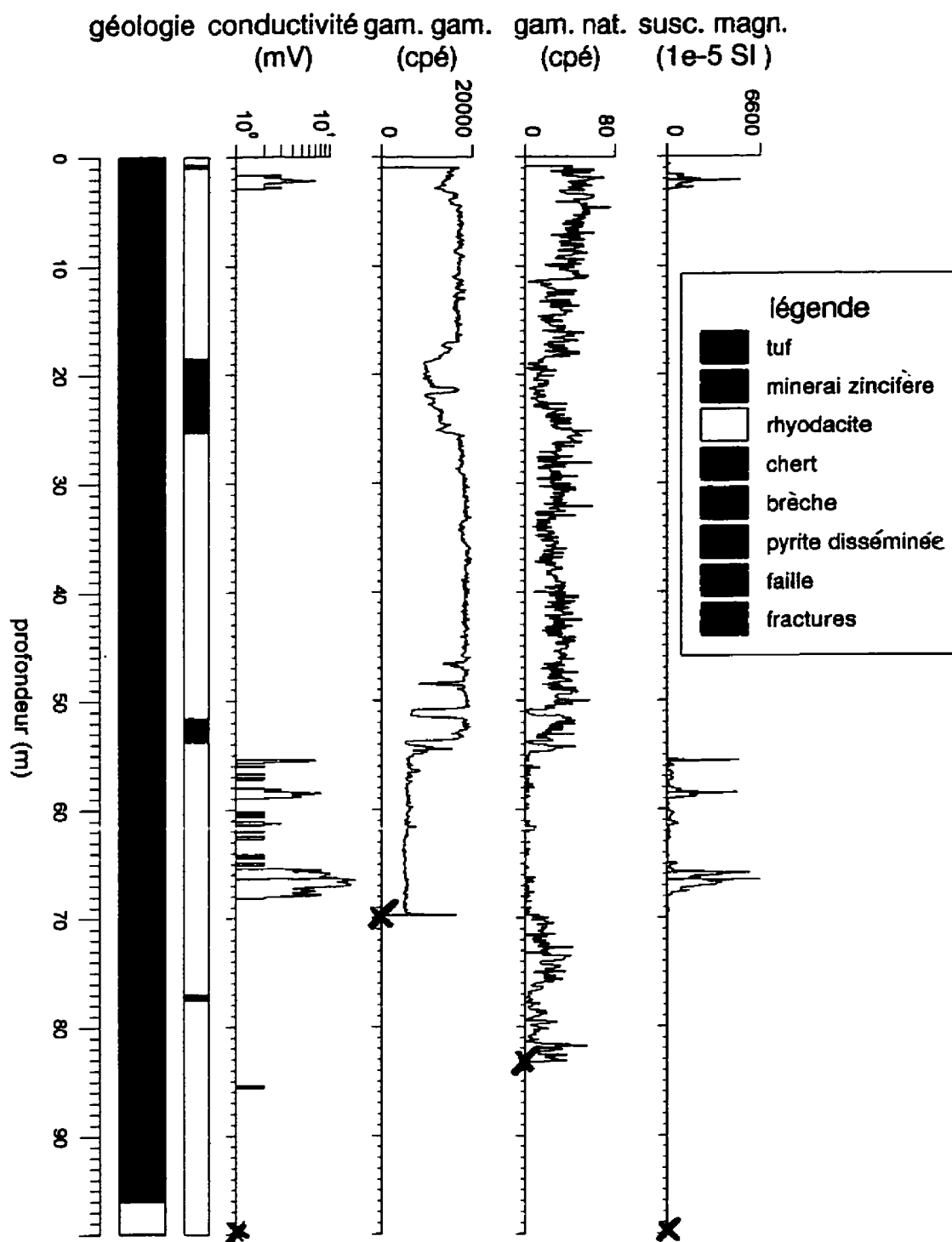


Figure 4.6 Relevés de diagraphie des trous du groupe "565"
a) trou 565-023

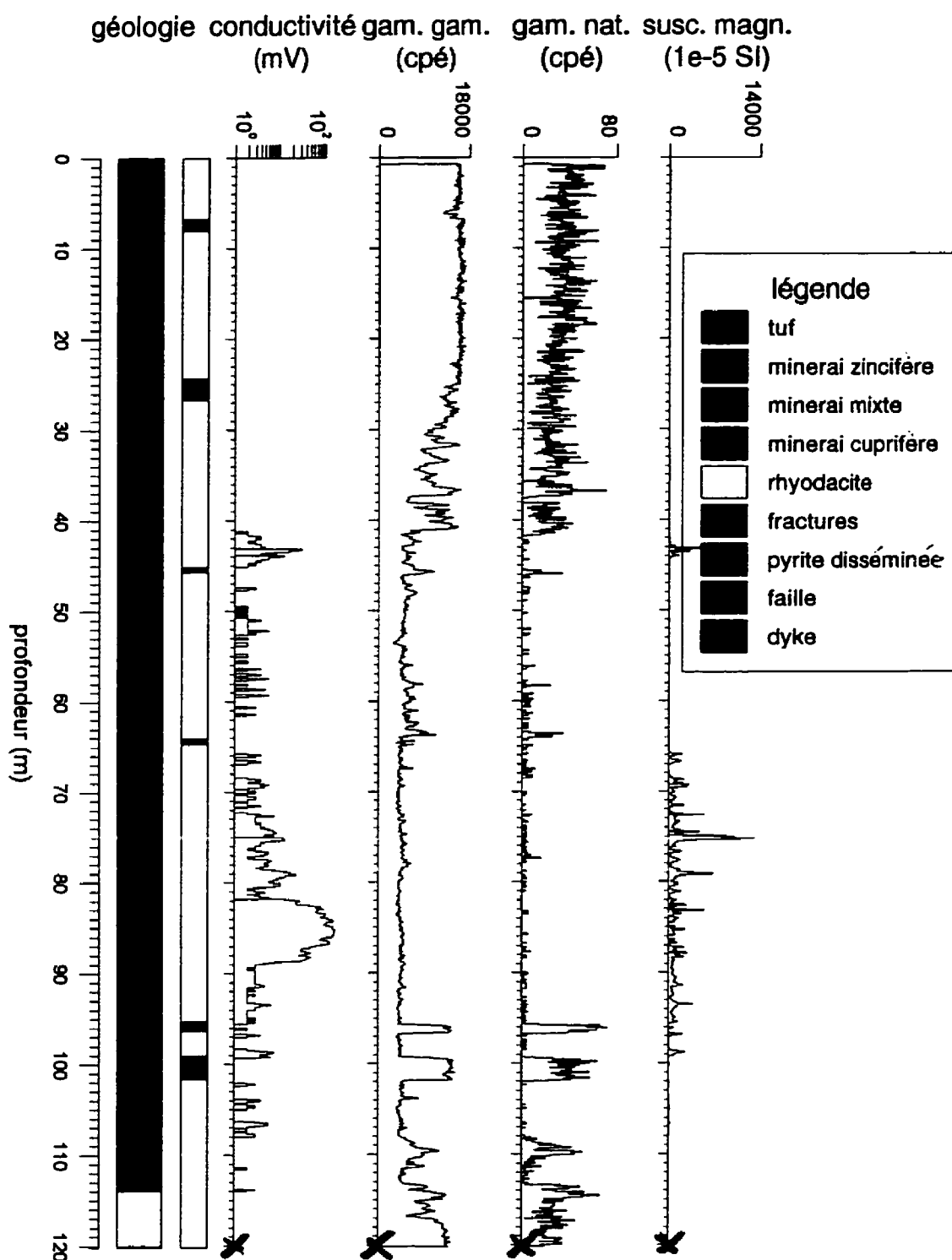


Figure 4.6 b) trou 565-025

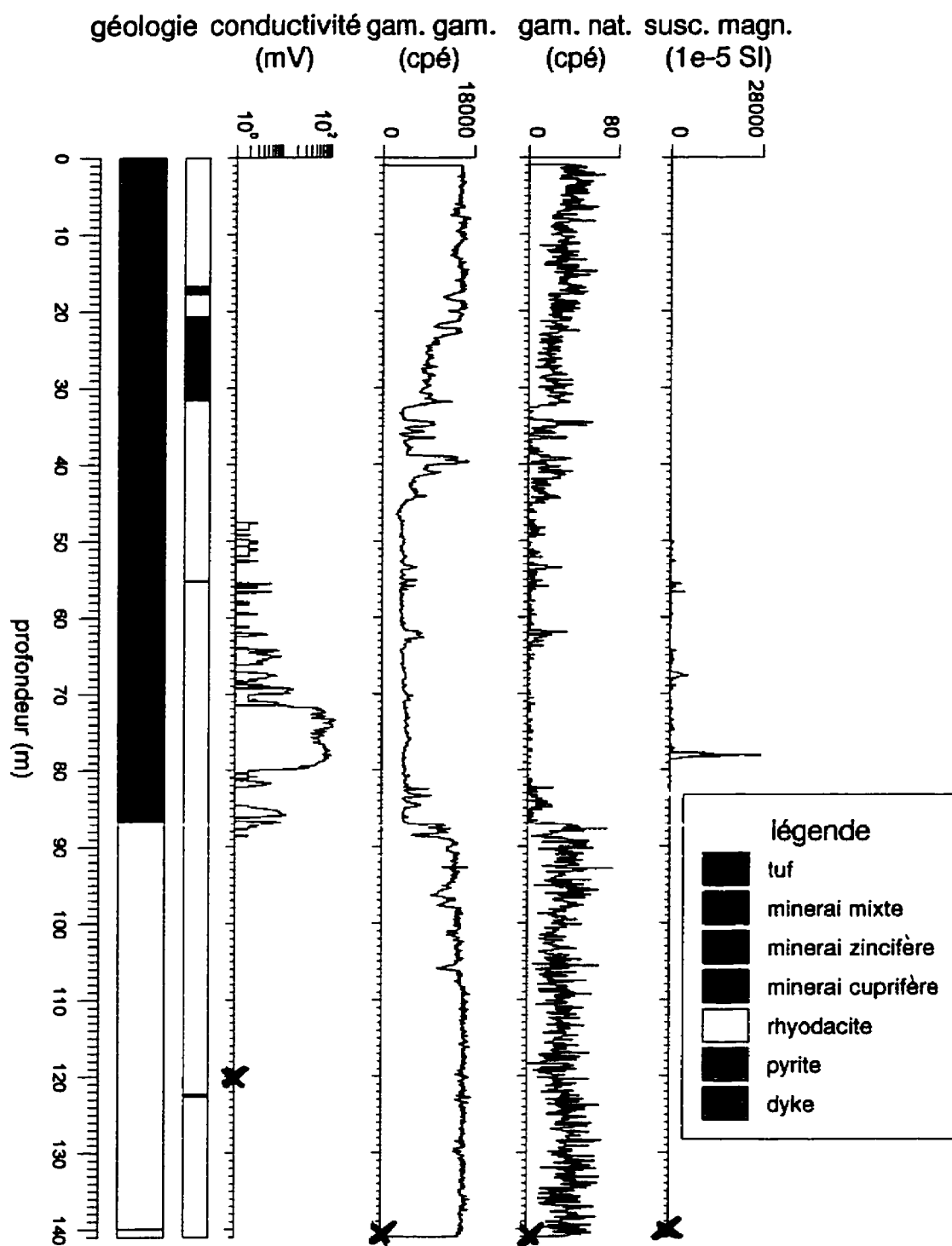


Figure 4.6 c) trou 565-026

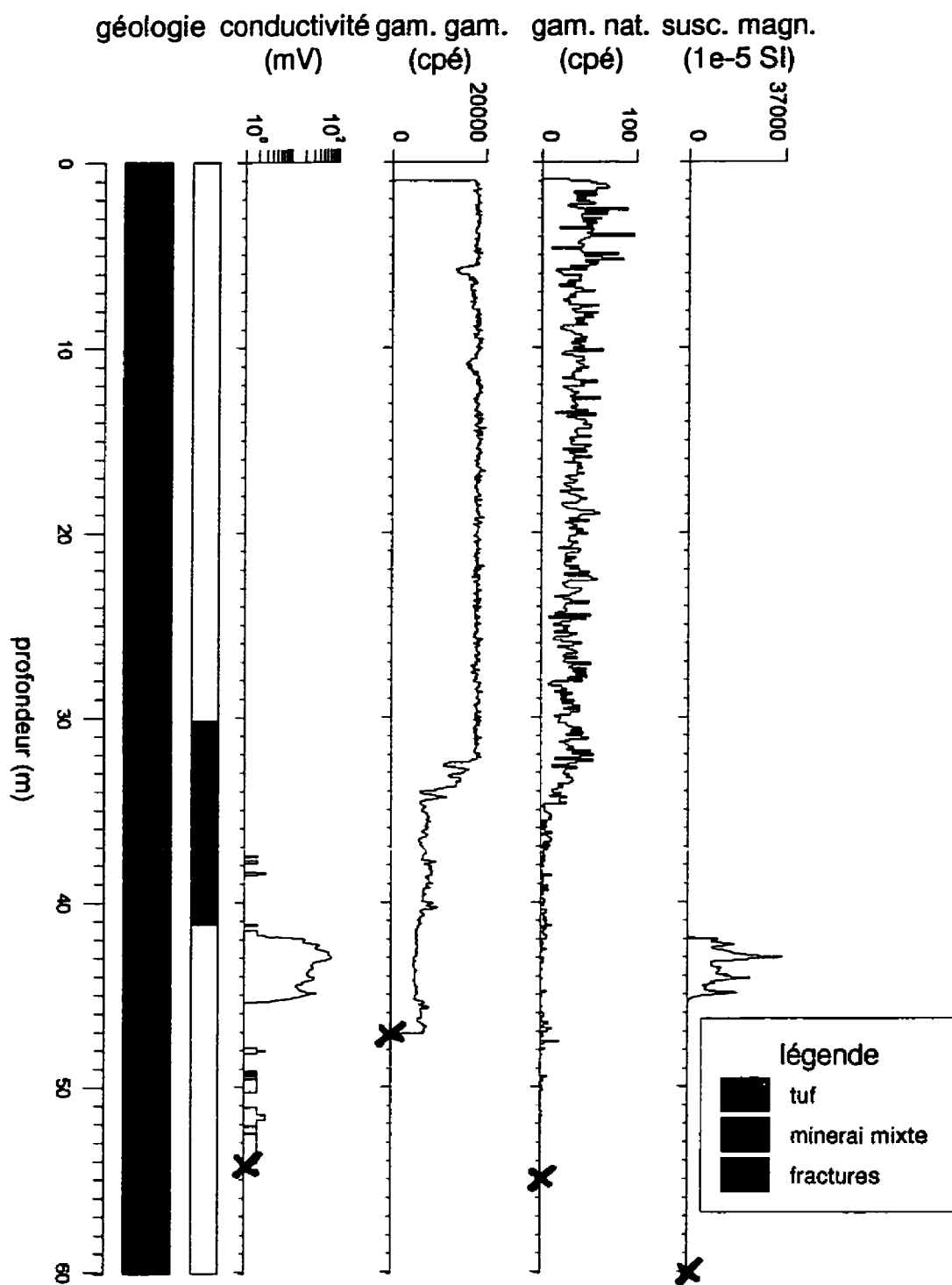
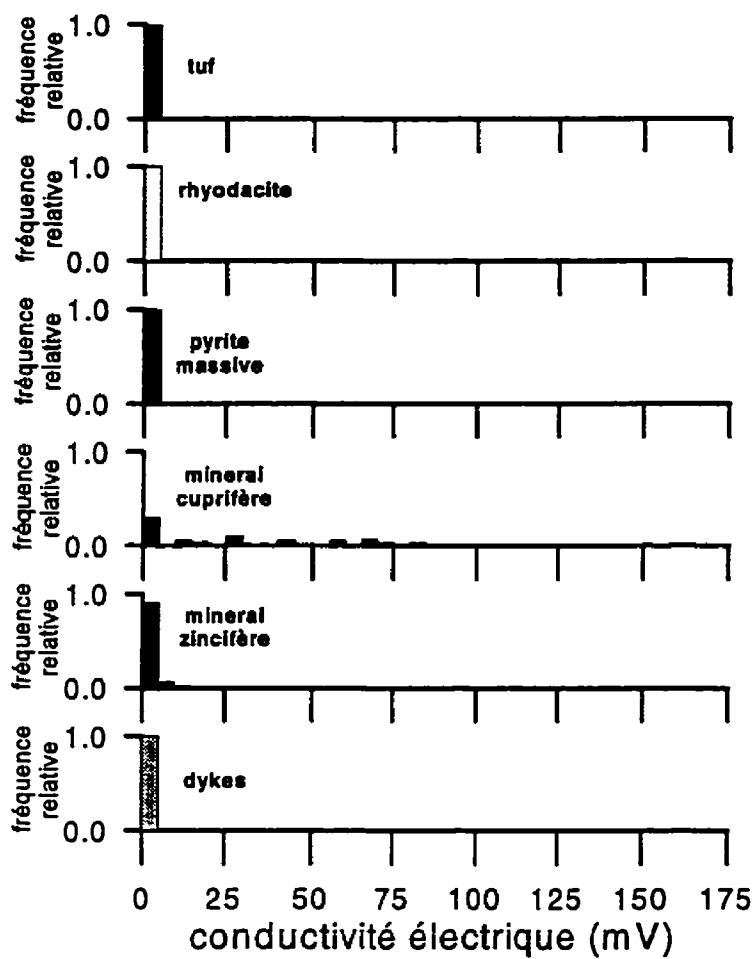
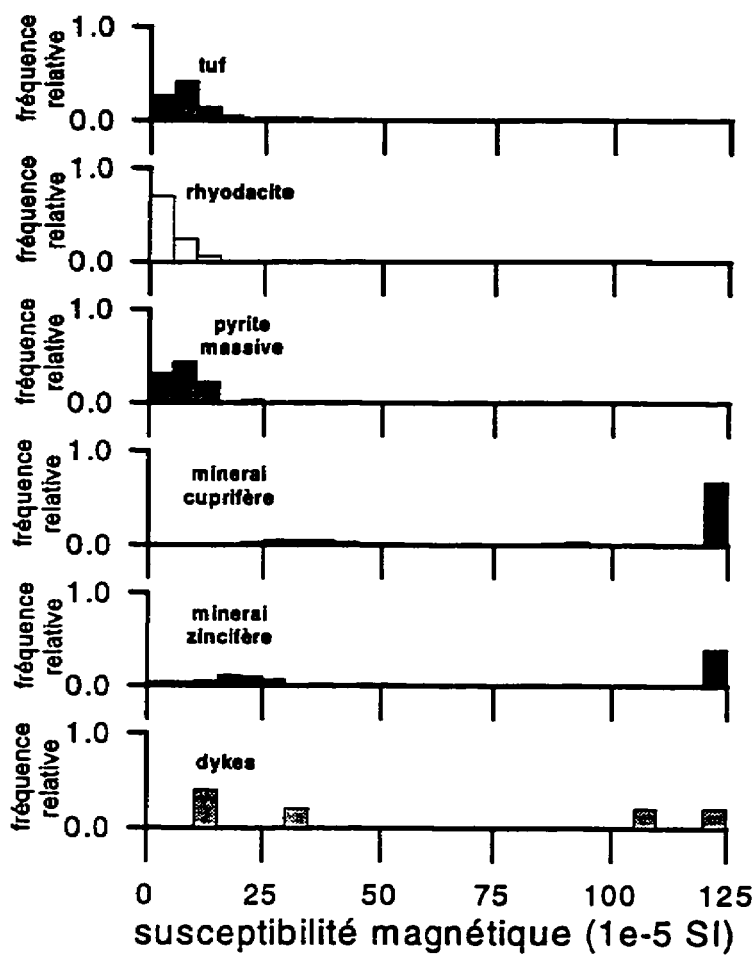


Figure 4.6 d) trou 565-027



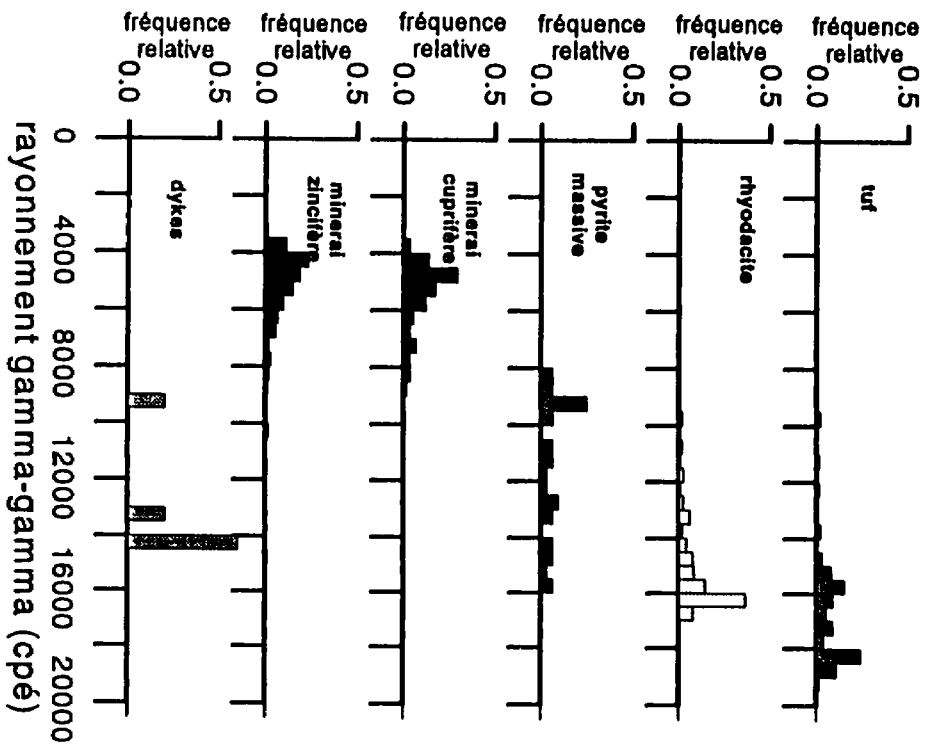
a)

Figure 4.7 Histogrammes des propriétés mesurées - groupe "565"



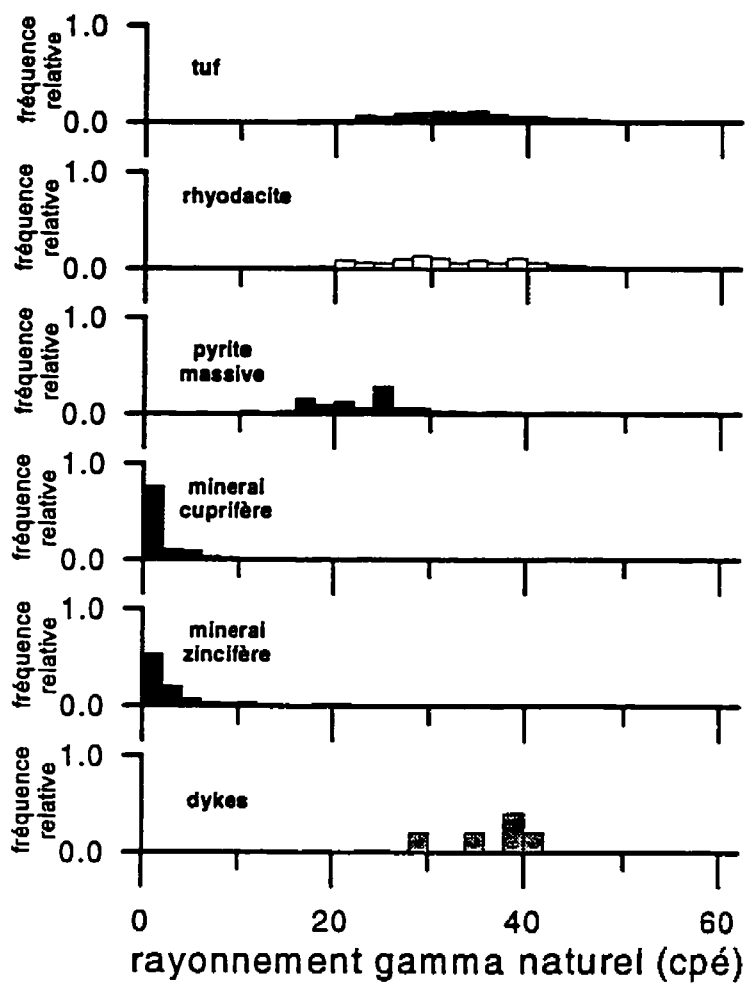
b)

Figure 4.7 (suite)



c)

Figure 4.7 (suite)



d)

Figure 4.7 (suite)

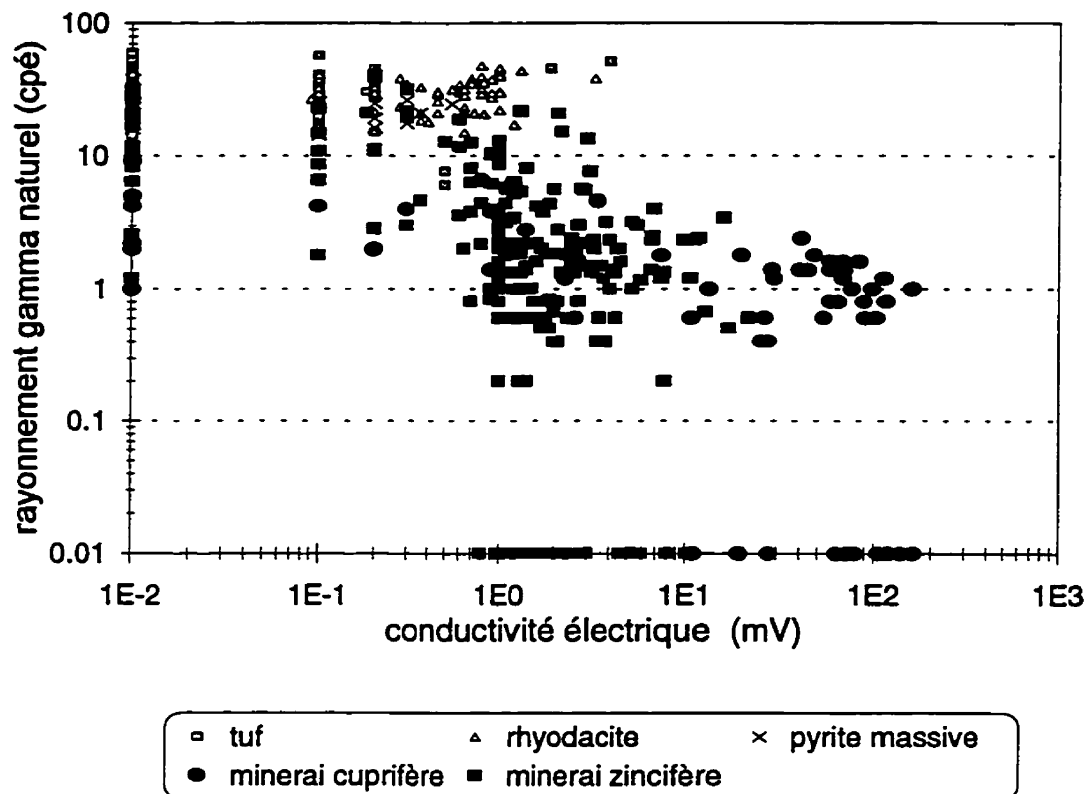


Figure 4.8 Diagramme binaire du rayonnement gamma naturel en fonction de la conductivité électrique

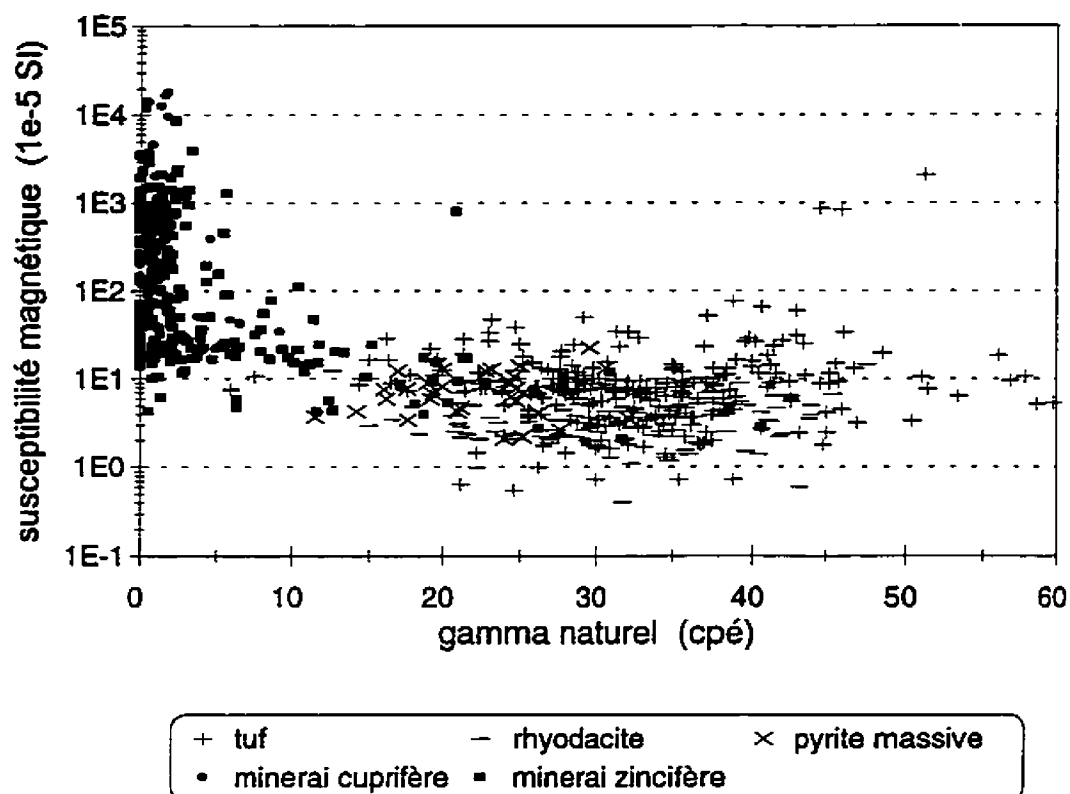


Figure 4.9 Diagramme binaire de la susceptibilité magnétique en fonction du rayonnement gamma naturel

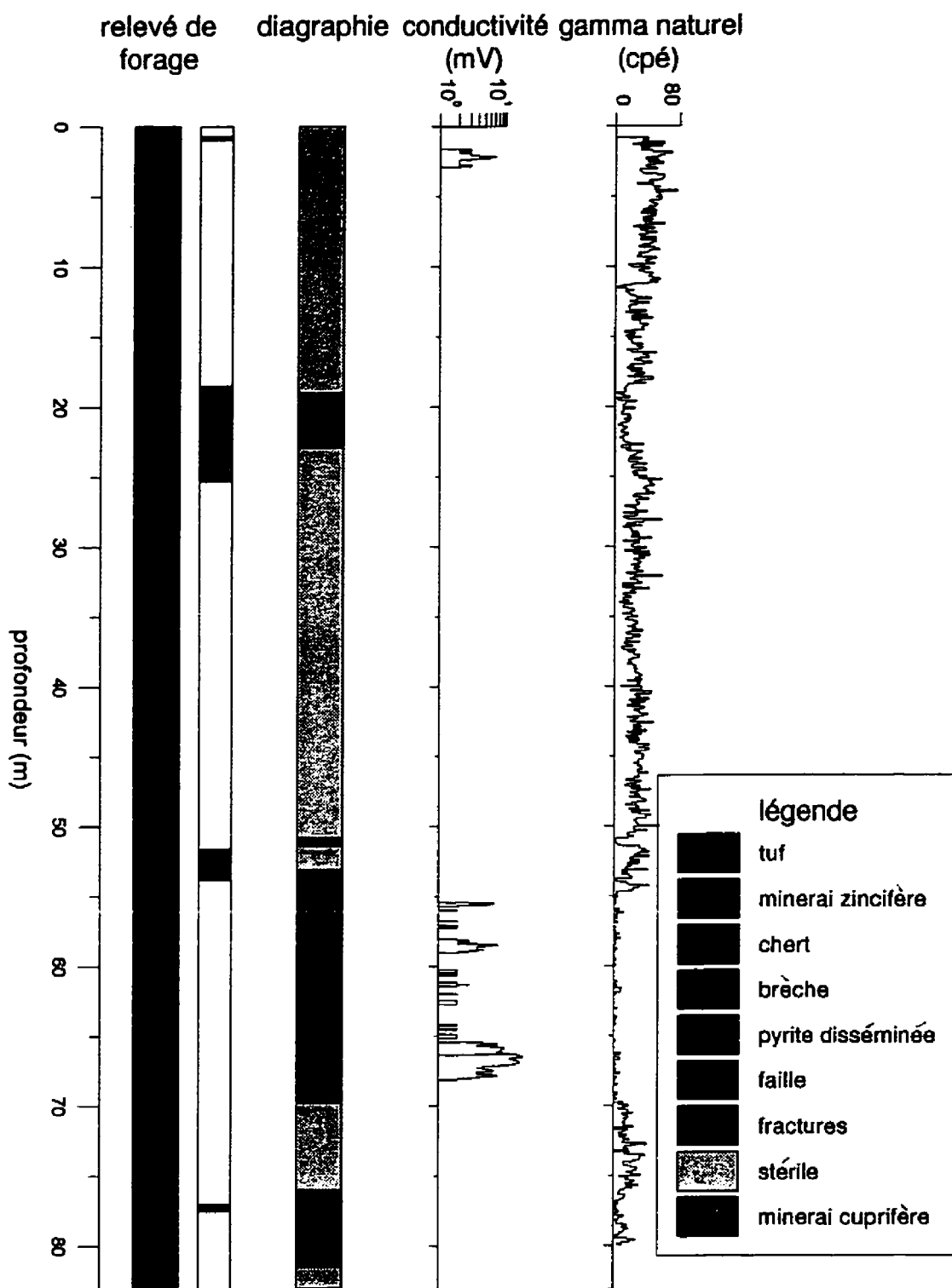


Figure 4.10 Comparaison des interprétations géologiques
a) trou 565-023

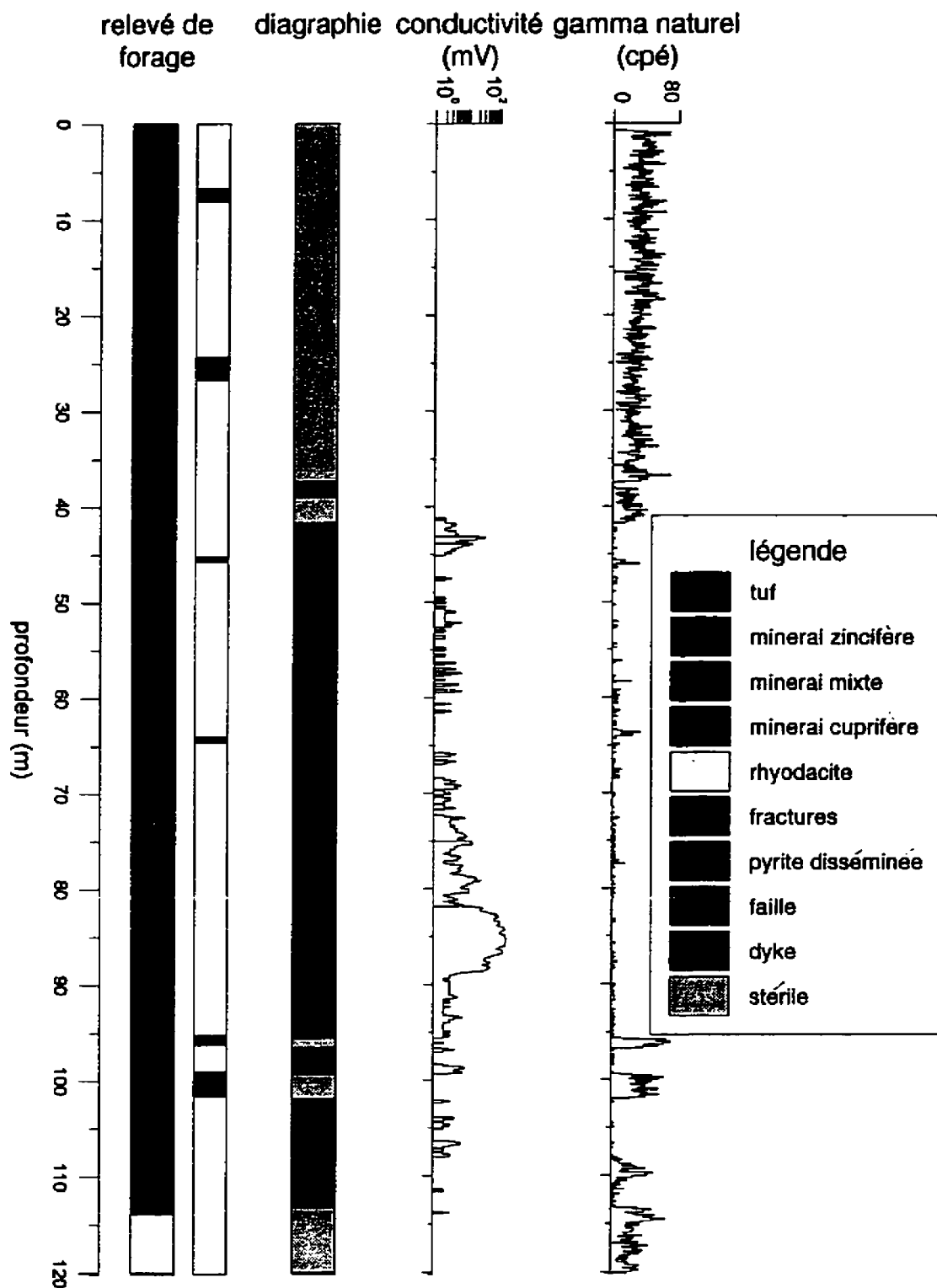


Figure 4.10 b) trou 565-025

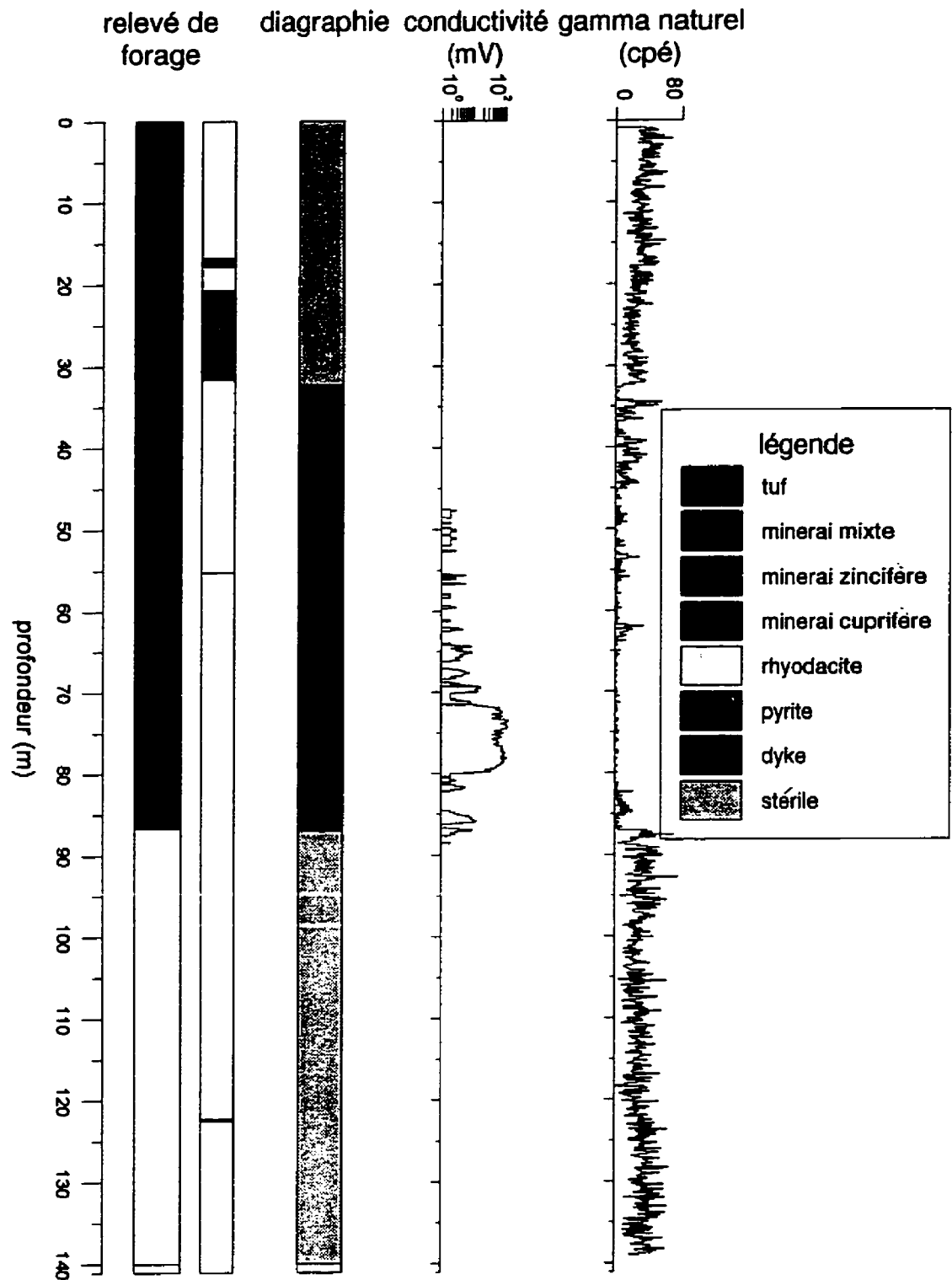


Figure 4.10 c) trou 565-026

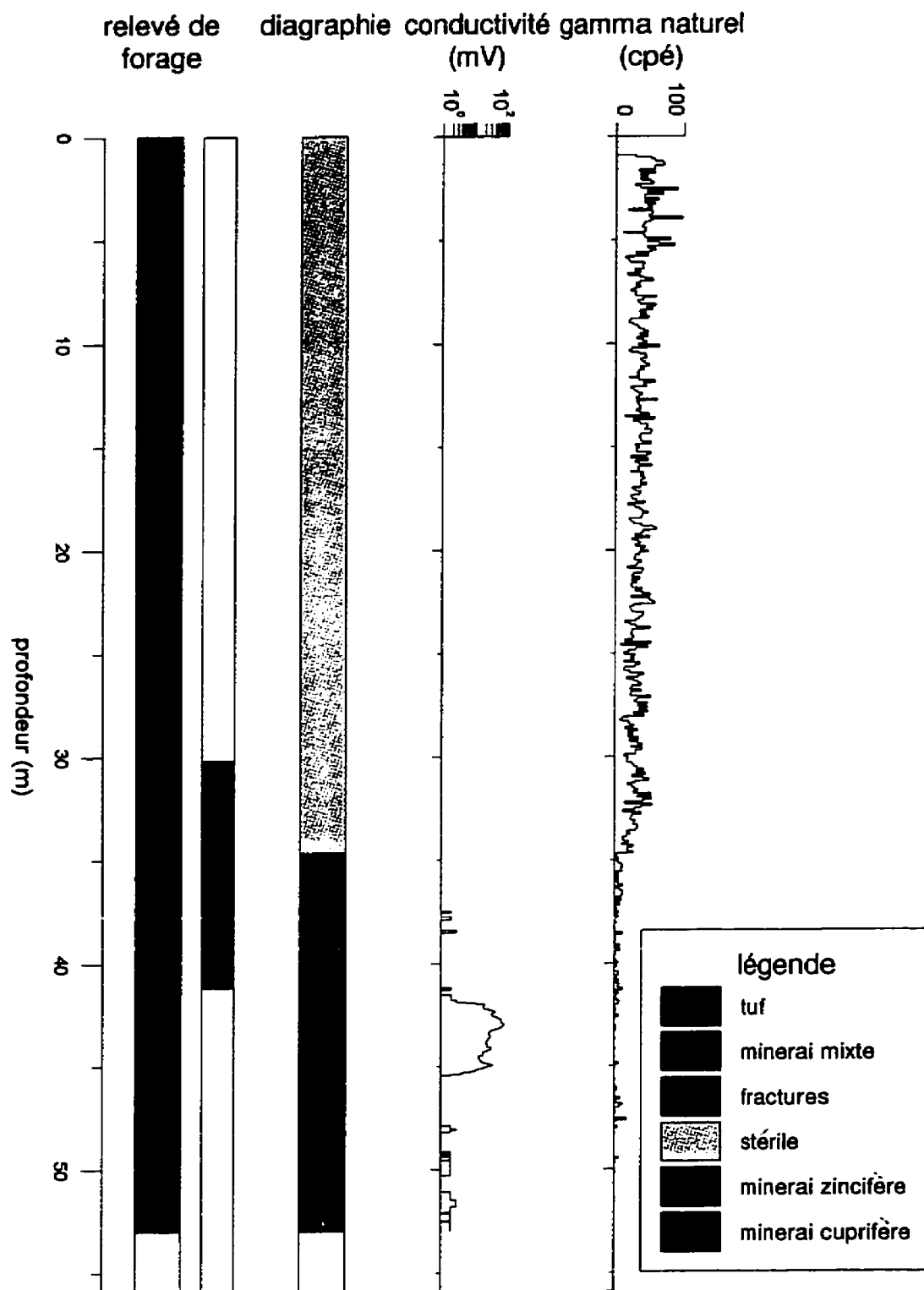


Figure 4.10 d) trou 565-027

5. ESTIMATION DES TENEURS

Ce chapitre étudie les relations entre les propriétés physiques et certains métaux, économiques (cuivre et zinc) ou non (fer), présents dans les roches du gisement Louvicourt. L'existence de fortes relations entre ces variables permettrait d'estimer les teneurs en cuivre, en zinc et en fer directement à partir des mesures physiques.

La capacité de calculer ainsi les teneurs serait un atout considérable au point de vue économique. Elle permettrait, par l'intermédiaire des levés de diagraphie, d'obtenir rapidement des teneurs tout au long des trous, et ce, même pour les trous de production, offrant ainsi la possibilité de modifier les interprétations géologiques et les plans des chantiers. De plus, on économiserait considérablement de temps et d'argent grâce à la diminution du nombre d'analyses chimiques d'échantillons et aussi parce que tous les trous de délimitation du minerai n'auraient plus à être forés au diamant. Le forage au diamant est plus lent et beaucoup plus dispendieux que le forage à percussion. Le sondage des trous par diagraphie est aussi considérablement plus rapide que la préparation et l'analyse en laboratoire d'échantillons de carottes.

Le même genre d'étude a été fait par Wänstedt (1992) pour la mine de zinc et de plomb de Zinkgruvan en Suède. Des trois unités géologiques majeures de cette mine, deux sont de type semblable à ce qu'on retrouve dans le gisement Louvicourt; une unité rhyolitique et une unité de tufs et autres roches volcaniques dans lesquelles on retrouve la minéralisation. Il a déterminé que les teneurs en zinc peuvent être

estimées de façon satisfaisante là où la minéralisation contient plus de 5 % Zn et moins de 5 % Fe.

Wänstedt (1992) rapporte aussi qu'à la mine de nickel de Enonkoski, en Finlande, des sondes de diagraphie sont utilisées de façon routinière dans les trous de production pour estimer les teneurs en nickel, et que la précision obtenue par ces sondages est presque équivalente à celle obtenue par analyse chimique des carottes de forage.

Notre étude statistique débute par l'observation des diagrammes binaires pour les différentes combinaisons de variables chimiques et physiques. Ceci nous permet de voir s'il existe des relations simples, linéaires ou non, entre ces variables. Les coefficients de corrélation simple entre les variables permettent de quantifier la force des relations linéaires pour chaque combinaison. Ensuite, par des calculs de régression linéaire à multiples variables et par un processus d'ajustement de courbes, on cherche à expliquer chaque teneur chimique d'importance par une variable ou par un groupe de variables physiques. Ces ajustements ainsi que les méthodes statistiques ont été décrits au chapitre 3. Aussi, Salisbury et *al.* (1996) offrent une technique d'estimation de la composition modale de pyrite, du mélange sphalérite/chalcopyrite et de gangue à partir des mesures de masse volumique et de vitesse des ondes de compression prises sur des échantillons contenant des sulfures. Cette technique peut donc être utilisée pour notre groupe "échantillons" afin de comparer ces estimations aux teneurs établies lors de la description géologique visuelle de nos échantillons.

Ainsi, pour chaque variable chimique que l'on désire estimer (teneurs en Cu, Zn, Cu équivalent et Fe), on ne retiendra que les formules permettant d'obtenir des prédictions fiables. Pour l'estimation faite à l'aide de la technique développée par Salisbury et *al.* (1996), ce sont les pourcentages de pyrite, de chalcopyrite/sphalérite et de gangue qui sont déterminés.

Pour les mêmes raisons qu'au chapitre précédent, les trois sources de données (groupes "échantillons", "655" et "565") sont étudiées de façon indépendante dans les trois sections qui suivent. Un résumé des résultats de chacune des trois études sera présenté à la fin de ce chapitre, permettant ainsi de comparer les différentes techniques d'évaluation des teneurs obtenues et de choisir celles qui seront les plus adéquates pour chaque situation.

5.1 Groupe "échantillons"

Nous disposons de 34 échantillons sur lesquels huit types de mesures physiques ont été prises; masse volumique, vitesse des ondes de compression, vitesse des ondes de cisaillement et conductivités électriques à cinq fréquences différentes. Les mesures de constantes diélectriques et de susceptibilités magnétiques n'ont pas été retenues dans cette partie de notre étude à cause des problèmes techniques survenus lors de la prise de mesure (voir chapitre 2). Les mesures prises en laboratoire sont très précises tant au point de vue chimique que physique puisqu'elles ont toutes été prises directement sur de petits échantillons. On a donc un groupe

d'observations fiables. Cependant, elles n'ont pas été prises dans les conditions dans lesquelles les mesures futures le seront grâce à la diagraphie (in situ). On devrait toutefois pouvoir déterminer grâce à ces données quelles sont les propriétés physiques qui sont fortement et distinctement influencées par les teneurs que l'on désire évaluer.

Le tableau suivant montre les coefficients de corrélation simple (r) obtenus pour chaque combinaison de variables. Il est important de noter qu'un faible coefficient de corrélation n'implique pas l'indépendance des variables, mais bien l'absence de forte relation *linéaire* entre celles-ci. Nous avons ajouté aux 8 mesures physiques les valeurs des impédances sismiques calculées à partir de la masse volumique et des vitesses sismiques pour chaque échantillon. Ces impédances permettent d'évaluer l'influence de deux variables physiques combinées (masse volumique et vitesse des ondes sismiques). Les coefficients de corrélation simple les plus élevés sont indiqués en caractères gras.

Tableau 5.1 Coefficients de corrélation simple pour le groupe "échantillons"

	Cu	Zn	Fe
masse volumique	0,67	0,22	0,77
vitesse des ondes P	-0,12	-0,07	0,33
vitesse des ondes S	-0,27	0,17	-0,13
impédance des ondes P	0,55	0,18	0,81
impédance des ondes S	0,45	0,28	0,66
log (conductivité à 1 kHz)	0,61	0,12	0,66
log (conductivité à 10 kHz)	0,63	0,12	0,68
log (conductivité à 100 kHz)	0,64	0,13	0,69
log (conductivité à 1 MHz)	0,66	0,13	0,70
log (conductivité à 10 MHz)	0,70	0,13	0,70

Wänstedt (1992), pour deux ensembles d'échantillons de la mine Zinkgruvan, obtient des coefficients de corrélation de 0,53 et 0,66 entre la masse volumique et le fer, de 0,67 et 0,37 entre la masse volumique et le zinc.

Les diagrammes binaires des pourcentages de cuivre en fonction de chaque mesure physique sont présentés à la figure 5.1. Les observations (mesures) sont représentées par des ronds et les fonctions d'ajustement (voir chapitre 3) par des lignes pleines. On y retrouve aussi les graphes des erreurs d'estimation de la teneur en cuivre en fonction des teneurs en cuivre observées; ces erreurs sont représentées par des croix.

Le coefficient de corrélation simple entre la teneur en cuivre et la masse volumique est relativement élevé ($r = 0,67$), mais l'ajustement de type exponentiel permet de mieux estimer le pourcentage de cuivre des échantillons, en particulier pour les faibles teneurs (figure 5.1 a et b). La masse volumique est fortement influencée par la silice ($r = -0,95$) et par le fer ($r_{Fe} = 0,77$ et $r_{Fe_2O_3} = 0,94$) contenus dans les échantillons, c'est ce qui explique la présence de quelques observations ayant des teneurs de cuivre particulièrement faibles ou élevées par rapport à la courbe de prédiction. C'est le grand nombre d'observations contenant de faibles quantités de cuivre qui forcent la courbe d'ajustement provoquant ainsi des erreurs élevées pour les teneurs élevées. La masse volumique peut donc donner une idée de la quantité de cuivre, mais elle est plus fortement reliée au fer et à la silice. Ainsi, l'utilisation de la masse volumique n'est pas idéale pour estimer les teneurs en cuivre.

Aucun ajustement satisfaisant ne peut être développé pour expliquer la teneur en cuivre à partir des vitesses sismiques (figure 5.1 c et d). En effet, la quantité de cuivre seule n'affecte pas ces mesures de façon directe et simple à modéliser. L'influence de la masse volumique n'est pas assez grande dans les impédances sismiques pour permettre un ajustement satisfaisant (voir figure 5.1 e et f).

Les ajustements développés pour estimer la teneur en cuivre par la conductivité électrique confirment que cette propriété est directement influencée par le cuivre. En effet, des composants principaux de nos roches, le cuivre est le plus conducteur. Les meilleurs ajustements utilisent des courbes exponentielles et prédisent la teneur en

cuivre en fonction du logarithme des conductivités électriques, et ce aux cinq fréquences mesurées. En effet, l'utilisation d'une échelle linéaire pour les conductivités ne permet pas de trouver de meilleurs ajustements. De plus, à part pour les valeurs élevées de conductivité où la réponse pourrait être aléatoire à cause de la saturation, les mesures ne suivent pas les courbes théoriques de façon évidente (voir chapitre 2).

On retrouve sur les diagrammes de la figure 5.1g à p deux courbes d'estimation de la teneur en cuivre. La première, la ligne continue, représente la courbe permettant le meilleur ajustement au point de vue des moindres carrés. La seconde, en traits non-continus, montre une courbe d'ajustement évaluée "à l'oeil". Cette courbe n'est pas aussi bien ajustée au sens des moindres carrés, mais représente mieux la tendance générale des observations. En effet, à cause de la nature exponentielle de ces courbes, l'ajustement au sens des moindres carrés crée une fonction qui enveloppe toutes les observations de conductivité électrique élevées plutôt que d'avoir des observations distribuées de part et d'autre de la courbe. On retrouve au tableau 5.2 les équations de chacune de ces courbes. Les équations identifiées d'un astérisque (*) sont celles des courbes ajustées "à l'oeil". Sur les diagrammes binaires des erreurs, les erreurs obtenues en utilisant les formules d'estimation ajustées "à l'oeil" sont représentées par des losanges. Les estimations faites à l'oeil donnent des erreurs moyennes plus élevées, mais ces courbes représentent mieux les tendances des données que les ajustements au sens des moindres carrés. L'estimation des teneurs en cuivre est bonne pour les faibles valeurs de cuivre, mais l'erreur augmente

avec la teneur à partir d'environ 2 % Cu. Les faibles teneurs de cuivre sont bien estimées, alors que les valeurs plus élevées sont sous-estimées. Cette situation n'est pas idéale, mais elle permet d'obtenir des estimés conservateurs. Il est préférable de sous-estimer plutôt que de sur-estimer les teneurs puisque ceci ne laisse place qu'aux bonnes surprises. Notons qu'à cause de ces sous-estimations, il serait possible de laisser du minerai en place. Les meilleurs estimés, ceux pour lesquels on n'a pas de surestimation ni de sous-estimation connues, sont donc ceux obtenus grâce aux courbes ajustées à l'oeil. Nos estimés deviennent meilleurs avec l'augmentation de la fréquence. L'ajout d'une ou de plusieurs autres variables physiques à la conductivité électrique par le biais de régressions à variables multiples ne permet pas d'améliorer la qualité de nos estimés. La conductivité électrique est donc de loin la meilleure des propriétés physiques mesurées sur nos échantillons pour estimer les teneurs en cuivre.

Le tableau 5.2 liste les formules d'estimation de la teneur en cuivre ainsi que l'erreur moyenne obtenue pour chaque type d'estimation.

Tableau 5.2 Formules d'estimation des teneurs en cuivre - groupe "échantillons"

propriété physique retenue	formule d'estimation de la teneur en cuivre (%)	erreur moyenne (% Cu)
masse volumique (g/cm ³)	$Cu = \frac{mv^{15,0161}}{e^{18,8857}}$	1,20
conductivité électrique à 1 kHz (S/m)	$Cu = e^{0,741486 \log(\sigma)} \times 0,809807$	1,00
conductivité électrique à 1 kHz (S/m)	• $Cu = e^{1,5 \log(\sigma)} \times 1,25$	1,72
conductivité électrique à 10 kHz (S/m)	$Cu = e^{0,811708 \log(\sigma)} \times 0,832288$	0,95
conductivité électrique à 10 kHz (S/m)	• $Cu = e^{1,7 \log(\sigma)} \times 1,20$	2,44
conductivité électrique à 100 kHz (S/m)	$Cu = e^{0,91298 \log(\sigma)} \times 0,845864$	0,89
conductivité électrique à 100 kHz (S/m)	• $Cu = e^{1,8 \log(\sigma)} \times 1,10$	2,60
conductivité électrique à 1 MHz (S/m)	$Cu = e^{1,05107 \log(\sigma)} \times 0,845753$	0,85
conductivité électrique à 1 MHz (S/m)	• $Cu = e^{1,9 \log(\sigma)} \times 1,00$	2,31
conductivité électrique à 10 MHz (S/m)	$Cu = e^{1,22394 \log(\sigma)} \times 0,889047$	0,86
conductivité électrique à 10 MHz (S/m)	• $Cu = e^{2,1 \log(\sigma)} \times 1,00$	1,54

Aucun de nos échantillons ne contient une forte quantité de zinc; ils en contiennent tous moins de 1 %. En fait, 28 des 34 échantillons contiennent moins de 0,1% de

zinc. Ainsi, les formules obtenues pour prédire la teneur en zinc ne seraient fiables que pour les très faibles teneurs en zinc, mais on remarque qu'aucun des diagrammes illustrant le zinc ne montre une forte relation (linéaire ou non) entre cette composante chimique et les propriétés physiques mesurées (figure 5.2). L'absence de forts liens linéaires est confirmée par les faibles coefficients de corrélation du tableau 5.1. De plus, même une association de variables physiques ne permet pas de trouver une façon sûre de quantifier les teneurs en zinc avec la régression linéaire à multiples variables. Finalement, aucun type simple de courbe ne peut être ajusté à nos observations pour trouver une formule permettant d'évaluer les teneurs en zinc. L'évaluation de ces teneurs reste donc impossible à faire à partir des données du groupe "échantillons". Le zinc, en faible quantité, n'influence fortement et de façon distincte aucune des mesures physiques prises sur nos échantillons.

Aucune formule n'est développée pour prédire la teneur en cuivre ^{équivalent} puisqu'on n'a pas les teneurs en or et en argent des échantillons et à cause des très faibles quantités de zinc présentes dans ces derniers.

On retrouve à la figure 5.3 les diagrammes binaires utilisés pour l'estimation des quantités de fer. La masse volumique montre une forte relation linéaire avec le fer, $r = 0,77$ (voir figure 5.3a et b). En effet, le fer a une masse volumique plus élevée que les autres éléments majeurs des roches du gisement ($mv_{pyrite} = 5,02 \text{ g/cm}^3$, $mv_{chalcopyrite} = 4,2 \text{ g/cm}^3$, $mv_{sphalérite} = 4,0 \text{ g/cm}^3$). Ainsi, la quantité de fer des roches est directement reliée à leur masse volumique. Ceci est confirmé par le coefficient de

corrélation linéaire simple élevé du tableau 5.1. Les erreurs obtenues sont plus élevées que pour le cuivre, mais les teneurs en fer le sont souvent aussi.

Aucun ajustement ne peut être établi pour estimer les teneurs en fer à partir des vitesses sismiques (figure 5.3 c et d).

Le fort lien linéaire reliant le fer et l'impédance des ondes de compression (Z_p) est principalement dû à la masse volumique (l'impédance est le produit de la masse volumique par la vitesse sismique). Toutefois, l'apport de V_p permet une meilleure estimation des teneurs en fer (figure 5.3 e et f). Le coefficient de corrélation simple entre Fe et Z_p est un peu plus élevé que celui entre la masse volumique et Fe (0,81 au lieu de 0,77). Ainsi, l'ajout de V_p permet un ajustement un peu meilleur. Il est toutefois plus simple d'estimer la teneur en fer avec seulement la masse volumique puisqu'on a ainsi qu'une propriété physique à mesurer. Les levés diagaphiques de rayonnement gamma-gamma mesurent indirectement la masse volumique.

Le diagramme binaire du fer en fonction de l'impédance des ondes de cisaillement (Z_s) de la figure 5.3g indique qu'un ajustement linéaire serait possible, mais il ne serait pas fort et n'apporterait pas d'information supplémentaire à l'estimation des teneurs en fer puisqu'il serait plus faible que celui du fer et de la masse volumique uniquement. Cette information pourrait toutefois être intéressante dans d'autres contextes. Par exemple, lors de l'interprétation de tomogrammes pour lesquels V_s est disponible ou lors d'études d'imagerie par réflexion.

Les meilleurs ajustements d'estimation de la teneur en fer par le logarithme des mesures de conductivité électrique sont de forme exponentielle (figure 5.3h à q). Ces ajustements deviennent meilleurs avec l'augmentation de la fréquence. Ici, comme lors de l'estimation des teneurs de cuivre, deux types de courbes d'ajustement sont tracées sur les diagrammes binaires. L'ajustement au sens des moindres carrés est en ligne continue, alors que l'ajustement "à l'oeil" est en traits pointillés. Ces équations établies par ajustement "à l'oeil" sont identifiées par des astérisques au tableau 5.3. Le fer des échantillons provient majoritairement de deux types de minéraux conducteurs; la pyrite (FeS) et la chalcopryrite (CuFeS_2). On remarque que les erreurs d'estimation de la teneur en fer, obtenues en utilisant l'ajustement au sens des moindres carrés, sont distribuées de façon aléatoire pour les teneurs observées de moins de 15 % Fe, alors que les fortes teneurs sont sous-estimées. Encore une fois, ceci nous donne un type d'estimés conservateur. Les estimations obtenues à l'aide des ajustements à l'oeil sont encore une fois les meilleures.

Ainsi, pour évaluer les teneurs en fer, deux possibilités s'offrent à nous: l'utilisation de la masse volumique ou celle de la conductivité électrique. Ces deux propriétés physiques sont mesurables par diagraphie. Le tableau suivant liste les formules d'estimation de la teneur en fer.

Tableau 5.3 Formules d'estimation des teneurs en fer - groupe "échantillons"

propriété physique retenue	formule d'estimation de la teneur en fer (%)	erreur moyenne (% Fe)
masse volumique (g/cm ³)	$Fe = 17,5654 \times mv - 43,0761$	3,27
impédance (ondes P) (km.g/s.cm ³)	$Fe = 2,51653 \times Z_p - 37,7714$	3,51
impédance (ondes S) (km.g/s.cm ³)	$Fe = 3,71498 \times Z_s - 30,943$	—
conductivité électrique à 1 kHz (S/m)	$Fe = e^{0,223743 \log(\sigma)} \times 13,8618$	3,96
conductivité électrique à 1 kHz (S/m)	* $Fe = e^{0,30 \log(\sigma)} \times 17$	3,65
conductivité électrique à 10 kHz (S/m)	$Fe = e^{0,243929 \log(\sigma)} \times 13,9418$	3,89
conductivité électrique à 10 kHz (S/m)	* $Fe = e^{0,36 \log(\sigma)} \times 18$	4,04
conductivité électrique à 100 kHz (S/m)	$Fe = e^{0,27274 \log(\sigma)} \times 13,9589$	3,84
conductivité électrique à 100 kHz (S/m)	* $Fe = e^{0,37 \log(\sigma)} \times 16$	3,70
conductivité électrique à 1 MHz (S/m)	$Fe = e^{0,312211 \log(\sigma)} \times 13,9099$	3,83
conductivité électrique à 1 MHz (S/m)	* $Fe = e^{0,42 \log(\sigma)} \times 17$	3,93
conductivité électrique à 10 MHz (S/m)	$Fe = e^{0,364837 \log(\sigma)} \times 14,1487$	3,76
conductivité électrique à 10 MHz (S/m)	* $Fe = e^{0,46 \log(\sigma)} \times 16$	3,58

Comme dernière technique, nous utilisons le diagramme ternaire superposé au diagramme binaire de la vitesse des ondes de compression en fonction de la masse volumique tel qu'établi par Salisbury et *al.* (1996) pour des roches composées de pyrite, de chalcopryrite et/ou de sphalérite et de gangue. Les axes du diagramme ternaire sont les quantités de pyrite (py), d'un mélange sphalérite/chalcopryrite (cpy/sph) et de gangue. Le mélange sphalérite/chalcopryrite est dû au fait que ces deux minéraux sont acoustiquement indifférenciables. On retrouve sur ces diagrammes la courbe Nafe-Drake à la figure 5.4. Les ronds noirs représentent nos échantillons par rapport à leurs mesures de vitesse des ondes de compression et de masse volumique. Une fois les échantillons ainsi localisés sur le graphe binaire, on utilise les axes du diagramme ternaire pour évaluer les pourcentages de pyrite, du mélange sphalérite/chalcopryrite et de gangue. Par rapport aux descriptions visuelles de nos échantillons, il semble que la technique des diagrammes de Salisbury et *al.* (1996) permet de bien identifier nos échantillons de minerai cuprifère mais surestime les pourcentages du mélange chalcopryrite/sphalérite. Les estimations des pourcentages de pyrite sont raisonnables. Pour être utilisable et sure, cette technique devrait être adaptée aux roches du gisement Louvicourt. Pour ce faire, il faudrait prendre des mesures sur un grand nombre d'échantillons représentant toutes les catégories de teneurs retrouvées dans le gisement. L'application de cette méthode modifiée pourrait se faire grâce aux mesures diagraphiques de vitesse des ondes de compression et de masse volumique.

En conclusion, ce sont les mesures de conductivité électrique et de masse volumique qui permettent de mieux modéliser les pourcentages de cuivre et de fer de nos échantillons. De plus, ces deux propriétés peuvent être mesurées de façon directe ou indirecte par des sondages diagraphiques. Les mesures de constantes diélectriques et de susceptibilités magnétiques n'ont pu être utilisées. Aucun modèle satisfaisant n'a pu être développé pour expliquer les quantités de zinc ni de cuivre équivalent.

Il serait recommandé pour étoffer cette partie de l'étude, d'augmenter le nombre d'échantillons, d'avoir des échantillons représentant tout l'éventail des teneurs rencontrées dans le gisement, spécialement en cuivre et en zinc, d'avoir des échantillons d'origine moins localisée spatialement et de mesurer les teneurs en or et en argent de ces derniers. Ces mesures pourraient aussi être utilisées pour adapter les diagrammes de Salisbury et *al.* (1996) à nos roches. Il serait aussi intéressant d'étudier les mesures de constante diélectrique et de susceptibilité magnétique des échantillons de minerai. On doit toutefois tenir compte que les mesures de susceptibilité magnétique prises lors des levés de diagraphie ne semblent pas être particulièrement affectées par les quantités de zinc et de cuivre retrouvées dans nos roches.

5.2 Groupe "655"

On procède ici de la même façon qu'à la section précédente mais cette fois le nombre d'observations disponibles est plus important. On en possède en effet 133. Les

propriétés physiques mesurées sont le rayonnement gamma naturel, la susceptibilité magnétique et la vitesse des ondes de compression. Ces mesures diagraphiques ont été prises à des intervalles réguliers très courts tout au long des trois trous. Les mesures chimiques de cuivre, zinc, fer, or et argent proviennent des relevés de forage. Grâce à la disponibilité des teneurs en or et en argent pour ces observations, il devient possible d'étudier aussi les relations entre les mesures physiques et les teneurs en cuivre équivalent. Les carottes ont été analysées chimiquement à un intervalle moyen de deux mètres. Ainsi, selon les données disponibles par les relevés de forage, chaque observation "chimique" représente deux mètres de carotte. Afin d'associer les mesures physiques à ces observations, la moyenne des mesures physiques a été calculée sur l'intervalle correspondant à chacune des observations chimiques de deux mètres. Ainsi, on a plus d'observations, mais la précision des mesures chimiques pour nos observations est moins grande que celle des mesures prises sur nos échantillons, et les valeurs calculées des mesures physiques sont des moyennes. On note aussi que les carottes n'ont pas été analysées sur toute la longueur des trous. En effet, seulement les intersections contenant des sulfures possiblement économiques ont été analysés chimiquement. Les "observations" étudiées ici représentent donc majoritairement des sulfures.

Le tableau suivant liste les coefficients de corrélation simple entre les teneurs et les mesures physiques.

Tableau 5.4 Coefficients de corrélation simple pour le groupe "655"

	Cu	Zn	Cu équivalent	Fe
gamma naturel	-0,29	-0,03	-0,31	-0,38
susceptibilité magnétique	0,15	0,02	0,18	0,22
vitesse des ondes P	-0,04	-0,07	-0,04	0,63

L'étude des coefficients de corrélation simple ne montre aucun coefficient très élevé. En effet, le plus élevé est de 0,63 et relie la vitesse des ondes de compression au pourcentage de fer.

Les études de Wänstedt (1991 et 1992) obtiennent des coefficients de corrélation très variables entre les mesures de susceptibilité magnétique et le cuivre, le zinc et le fer pour des groupes d'échantillons provenant des mines de Zinkgruvan et Malmberget (Malmberget est une mine de fer située en Suède). En effet, il obtient pour deux populations d'échantillons de la mine Zinkgruvan, des coefficients de 0,11 et -0,42 pour le zinc, de 0,20 et -0,11 pour le cuivre et de 0,80 et 0,97 pour le fer. Une si vaste étendue de valeurs permet de réaliser pleinement l'importance de bien caractériser les roches de la région qui nous intéresse. Ainsi, les fonctions d'estimation des teneurs doivent être établies de façon individuelle pour chaque site.

Les diagrammes binaires des teneurs en cuivre, zinc et cuivre équivalent en fonction des trois propriétés physiques ne permettent pas d'estimer ces teneurs (figure 5.54 a à i). En effet, les graphes ne montrent pas de tendances assez fortes des observations pour tracer des courbes d'ajustement satisfaisantes. De plus, aucune combinaison

des variables physiques n'a pu aider à développer des formules d'estimation par régression à variables multiples.

La particularité du cuivre est sa grande conductivité électrique, mais cette propriété n'a pu être mesurée lors des levés diagraphiques de ces trous. Les susceptibilités magnétiques mesurées appartiennent presque toutes à un court intervalle de valeurs. Une droite d'ajustement sur ces observations prédirait que toutes les valeurs de cuivre sont possibles; on aurait une droite de pente parallèle à l'axe des y. Le rayonnement gamma naturel dépend de la quantité de rayons gamma produits par la désintégration des radio-éléments. Pour le gisement Louvicourt, on considère que la majorité de ces rayons sont dus à la désintégration du potassium (K^{40}) (R. McCreary, communication personnelle, 1995). Cet élément se retrouve particulièrement dans les dykes et dans les roches non-sulfurées et n'est pas relié à la quantité de cuivre. On a remarqué dans les relevés de diagraphie que le rayonnement gamma naturel est généralement faible dans le minerai cuprifère, mais la relation n'est pas assez forte pour pouvoir prédire la teneur en cuivre.

Les diagrammes de la teneur en zinc observée en fonction des trois types de mesures physiques disponibles ne montrent pas non plus de tendances permettant d'ajuster une courbe d'estimation des teneurs (figure 5.5d à f). Aucune des propriétés physiques mesurées n'est affectée particulièrement et distinctement par le zinc. Pour ce qui est de la susceptibilité magnétique, on obtiendrait encore une droite de pente parallèle à l'axe des y, qui indiquerait que toutes les valeurs de zinc sont possibles.

La combinaison du cuivre avec le zinc, l'or et l'argent (cuivre *équivalent*) n'est pas non plus estimable à partir des observations disponibles (figure 5.5g à i). Elle l'aurait été grâce à la conductivité électrique fortement affectée par la quantité de cuivre, élément le plus important dans le calcul du cuivre *équivalent*.

Le meilleur ajustement possible pour le fer est une régression linéaire simple avec la vitesse des ondes de compression (figure 5.5j). Cette combinaison a un coefficient de corrélation simple de 0,63. La pente est positive, ce qui est surprenant puisque théoriquement, la vitesse des ondes de compression diminue lorsque la masse volumique augmente. On se rappelle de l'équation de cette vitesse:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (5.1)$$

où λ et μ sont les coefficients de Lamé et ρ est la masse volumique. En considérant les coefficients de Lamé comme étant constants, on aurait obtenu un coefficient de corrélation négatif entre Fe et V_p ; ce qui n'est pas le cas. Toutefois, Salisbury et *al.* (1996) observent sur de nombreuses mesures de vitesse des ondes de compression prises sur des échantillons contenant des sulfures, que la vitesse sismique augmente linéairement avec la quantité de pyrite des échantillons. Malgré ces résultats non-intuitifs, cette observation est en accord avec les nôtres.

Tel que l'on pouvait le prévoir, le graphe des erreurs sur la prédiction de la teneur en fer (figure 5.5k) montre que les faibles teneurs observées (< 6 % Fe) sont toutes

surestimées par notre équation, alors que les très hautes teneurs ($> 25 \% \text{ Fe}$) sont sous-estimées. Il reste impossible de trouver un meilleur ajustement au point de vue des moindres carrés à cause de la distribution étendue des observations. En effet, ces observations suivent la droite d'ajustement mais pas de façon serrée. Chaque valeur de V_p est associée à un intervalle possible de $20 \% \text{ Fe}$.

Aucun ajustement n'a pu être développé pour estimer les teneurs de fer à partir des mesures de susceptibilité magnétique et de rayonnement gamma naturel (figure 5.5l et m).

Une régression à multiples variables permet d'estimer les teneurs en fer. En effet, le rayonnement gamma naturel combiné à la vitesse des ondes de compression permet d'estimer le fer avec une erreur moyenne de $5,07 \%$ (au lieu de $5,22 \%$ lorsqu'on utilise V_p seulement). Le coefficient de corrélation est aussi légèrement amélioré (R^2 passe de 40 à 46%). Le graphe de la teneur en fer en fonction de la vitesse des ondes de compression est illustré à la figure 5.5n. Les observations sont représentées par des ronds et les prédictions par des étoiles. Les prédictions suivent l'allure générale de la droite d'ajustement du fer par V_p , mais l'ajout du rayonnement gamma naturel permet de transformer cette droite en plan de prédiction et ainsi de mieux représenter les observations. La distribution des erreurs ressemble beaucoup à celle obtenue en n'utilisant que V_p , mais les erreurs sont moins grandes. Le tableau suivant donne les deux équations développées pour estimer les teneurs en fer ainsi que l'erreur moyenne et le coefficient de corrélation obtenus pour chacune.

Tableau 5.5 Formules d'estimation des teneurs en fer - groupe "655"

propriété(s) physique(s) retenue(s)	formule d'estimation de la teneur en fer (%)	erreur moyenne (% Fe)	coefficient de corrélacion
vitesse des ondes P (km/s)	$Fe = 20,4831 \times Vp - 115,658$	5,22	$R^2 = 0,40$
vitesse des ondes P (km/s) et rayonnement gamma naturel (cpé)	$Fe = 18,6959 \times Vp - 0,0738 \times \gamma_{nat} - 99,9832$	5,07	$R^2 = 0,46$

Ainsi, des teneurs à estimer, le fer est le seul élément pour lequel on peut trouver des formules d'estimation satisfaisantes. La vitesse des ondes de compression est la propriété qui l'explique le mieux. Une seconde formule d'estimation de la teneur en fer a été développée à l'aide de Vp et du rayonnement gamma naturel. Cette formule explique un peu mieux les observations et devrait être utilisée lorsque les mesures de Vp et de rayonnement gamma naturel sont toutes deux disponibles. Toutefois, l'apport du rayonnement gamma naturel n'est pas assez important pour justifier des levés supplémentaires; les mesures de Vp seulement suffisent. La figure 5.6 compare les résultats obtenus à l'aide de la formule d'estimation du fer par la vitesse des ondes de compression aux analyses chimiques. Les lignes rouges représentent les estimations et les histogrammes en noir et blanc les analyses. Les X noirs indiquent

les intervalles entre lesquels aucune analyse chimique n'est disponible. On remarque qu'en général, pour les trois trous, les estimations réussissent à bien estimer les tendances des teneurs de fer.

Les teneurs en cuivre et en zinc n'ont pu être estimées puisqu'aucune des propriétés physiques mesurées ne répond de façon forte et distincte à ces éléments. Comme il a déjà été établi, des mesures de conductivité électrique seraient nécessaires pour évaluer les teneurs en cuivre.

5.3 Groupe "565"

On procède ici de la même façon que dans les deux sections précédentes. On dispose de 101 observations pour lesquelles les mesures physiques et chimiques ont été obtenues de la même façon que pour les observations du groupe "655". Les propriétés physiques mesurées sont au nombre de quatre; conductivité électrique, susceptibilité magnétique et les rayonnements gamma naturel et gamma-gamma.

Le tableau suivant donne la liste des coefficients de corrélation simple obtenus pour chaque combinaison de variables. Les coefficients les plus élevés sont indiqués en caractères gras.

Tableau 5.6 Coefficients de corrélation simple pour le groupe "565"

	cuivre	zinc	fer	cuivre équivalent
conductivité électrique	0,84	-0,19	0,23	0,80
susceptibilité magnétique	0,14	-0,05	0,26	0,15
gamma-gamma	-0,23	-0,55	-0,85	-0,41
gamma naturel	-0,26	-0,05	-0,78	-0,42

On remarque quatre combinaisons prometteuses; cuivre et conductivité électrique, fer et rayonnement gamma naturel, fer et rayonnement gamma-gamma et finalement cuivre équivalent et conductivité électrique. Encore une fois, aucun lien linéaire fort ne relie le zinc aux propriétés mesurées.

McCreary et Wänstedt (1995) obtiennent avec les mêmes sondes que celles utilisées à Louvicourt Mine, un coefficient de corrélation simple de -0,49 entre le zinc et le rayonnement gamma-gamma pour des mesures prises à la mine Heath Steele, exploitée pour le zinc, le plomb et l'argent, et un coefficient de 0,93 entre le cuivre et la conductivité électrique à la mine Isle Dieu, exploitée pour le cuivre et le zinc.

Les coefficients de corrélation entre les teneurs et la susceptibilité magnétique (tableau 5.6) sont très près des valeurs obtenues pour le groupe 655 de la section précédente (voir tableau 5.4). Le fer n'est pas fortement lié à la susceptibilité magnétique car on le retrouve principalement sous forme de pyrite, minéral non magnétique. La quantité de minéraux magnétique contenant du fer n'est pas assez

importante ici pour faire augmenter la qualité du lien linéaire entre le fer et la susceptibilité magnétique.

Le coefficient reliant le fer et le rayonnement gamma naturel du groupe "655" est de -0,38 alors qu'il est ici de -0,78. L'observation des diagrammes binaires du fer en fonction du rayonnement gamma naturel pour ces deux groupes (figures 5.5m et 5.11e) montre que la faiblesse du lien linéaire pour le groupe "655" est due à la grande quantité de mesures faibles de rayonnement gamma naturel pour les observations à faibles teneurs en fer.

La figure 5.7 illustre les graphes binaires de la teneur en cuivre en fonction des différentes propriétés physiques mesurées. Tel que quantifié par le coefficient de corrélation simple, il est possible de tracer une droite pour estimer les teneurs de cuivre à partir de la conductivité électrique (figure 5.7a). Les mesures de conductivité électrique y sont exprimées en millivolts. Cette unité ne représente pas directement des conductivités mais bien des différences de potentiel telles que fournies par la sonde. Comme il a déjà été mentionné dans les chapitres précédents, l'élaboration d'une table de conversion entre ces lectures et des valeurs de conductivité en siemens par mètres ne fait pas partie des objectifs du présent travail. À l'examen de la figure 5.7a, on remarque que l'ajustement illustré est loin d'être idéal. La majorité des observations correspond à de faibles teneurs ($< 5\%$ Cu) et à de faibles lectures de conductivité (< 15 mV) mais ces observations ne se comportent pas de façon linéaire (voir figure 5.7b) et ne permettent pas de trouver un ajustement fiable. La

droite de régression ne suit pas ces observations, elle est guidée par les fortes valeurs de conductivité et occasionne ainsi d'importantes erreurs. Ainsi, on peut affirmer que toutes les valeurs de conductivité plus élevées que 20 mV correspondent à des teneurs d'au moins 3 % Cu, mais c'est tout. Ce même ajustement linéaire illustré sur un diagramme du cuivre en fonction du logarithme de la conductivité (figure 5.7c) montre que les estimés pour les très faibles valeurs de conductivité (< 1 mV) sont satisfaisants, et confirme que la majorité des observations (entre 1 et 10 mV) ne peuvent être adéquatement ajustées.

Ainsi, pour la majorité de nos observations, les lectures de conductivité électrique ne peuvent aider à prédire les teneurs de cuivre de façon sûre. On peut toutefois constater certains faits. 1- Les valeurs de conductivité électrique de moins d'un millivolt correspondent à de très faibles teneurs de cuivre (moins de 0,5 % Cu). 2- Les valeurs de conductivité électrique de plus de 10 millivolts correspondent à des teneurs en cuivre plus élevées que la teneur de coupure (2 % Cu_{eq}). 3- Les valeurs de conductivité électrique entre 1 et 10 millivolts correspondent à des teneurs de cuivre variant entre 0 et 5 pourcent, mais ne peuvent être estimées avec précision. L'estimation difficile du cuivre s'explique par la fenêtre de conductivité électrique que peut mesurer la sonde utilisée (entre 10^{-8} et 10^6 S/m). Ainsi, les roches résistantes obtiennent toutes des mesures de 0 millivolt.

Les diagrammes du cuivre en fonction de la susceptibilité magnétique et des rayonnements gamma naturel et gamma-gamma ne permettent pas de trouver d'ajustements décrivant bien les observations (figure 5.7e à g).

Le tableau suivant donne l'équation d'estimation de la teneur en cuivre obtenue ainsi que l'erreur moyenne et le coefficient de corrélation associés.

Tableau 5.7 Formule d'estimation des teneurs en cuivre - groupe "565"

propriété physique retenue	formule d'estimation de la teneur en cuivre (%)	erreur moyenne (% Cu)	coefficient de corrélation
conductivité électrique (mV)	$Cu = 0,1577 \times \sigma + 0,5092$	1,23	$r = 0,84$

La figure 5.8 montre les estimations de la teneur de cuivre obtenues grâce à la formule du tableau 5.7. Les lignes rouges représentent les estimations et les histogrammes en noir et blanc les analyses. Les X noirs indiquent les intervalles pour lesquels les analyses chimiques sont disponibles. On remarque, surtout pour le trou 565-023 qui n'a que de faibles quantités de cuivre, que l'estimation minimum de la teneur en cuivre est de 0,5 % et que les faibles valeurs de Cu sont sur-estimées. Toutefois, pour les autres trous, on observe que les estimations de la teneur en cuivre localisent et reproduisent assez bien la teneur de la minéralisation cuprifère. La minéralisation de la zone du trou 565-027 pour laquelle la teneur en cuivre a nettement été sous-estimée (profondeur entre 35 et 41 mètres environ) est formée

d'un mélange massif de sphalérite, de chalcopryrite et de pyrite. On ne peut expliquer de façon sûre pourquoi la teneur en cuivre y est si fortement sous-estimée. Un examen d'échantillons en lames minces permettrait peut-être de voir si ce phénomène est dû à un changement dans le type de connection entre les grains.

Les diagrammes du zinc en fonction des quatre propriétés physiques sont présentés à la figure 5.9. Encore une fois, il demeure impossible de trouver des courbes d'ajustement permettant d'estimer les teneurs en zinc de façon précise. Il est malheureux qu'aucune propriété physique mesurée dans ces trous ne soit affectée distinctement par le zinc puisque la grande variété de teneurs en zinc de cette région aurait permis une bonne couverture des teneurs retrouvées dans le gisement.

Wänstedt (1992) réussit à estimer les teneurs en zinc d'un type de minéralisation ZnS-PbS (mine Zinkgruvan) là où les teneurs en zinc sont plus élevées que 5 % et les teneurs en fer plus faibles que 5 %. Il utilise la masse volumique qui montre un fort lien linéaire (0,94) avec le zinc dans ces conditions. Aussi, il y obtient des relations linéaires assez élevées entre les teneurs en zinc et les mesures de sondages diagraphiques de polarisation provoquée. Ce type de mesures devrait être testé à Louvicourt Mine afin d'évaluer la possibilité d'estimer les teneurs en zinc.

Deux combinaisons de variables (conductivité électrique et rayonnement gamma-gamma et conductivité électrique et rayonnement gamma naturel) obtiennent par régressions linéaires des coefficients de corrélation multiple de 57 % et 51 % respectivement pour l'estimation des teneurs en zinc. Mais les erreurs obtenues lors

des estimations des teneurs sont tellement élevées (plus élevées que la valeur de la teneur de coupure) que l'utilisation de telles formules n'est pas recommandée.

Le meilleur ajustement pour l'estimation du cuivre équivalent par la conductivité électrique est de type linéaire (figure 5.10a et b). Cet ajustement se comporte comme celui du cuivre par la conductivité électrique mais obtient des erreurs plus élevées. La conductivité explique bien le cuivre, facteur le plus important dans le calcul du cuivre équivalent, mais l'influence du zinc détériore la qualité de la corrélation.

Des ajustements adéquats n'ont pu être développés pour expliquer les teneurs en cuivre équivalent à partir de la susceptibilité magnétique et du rayonnement gamma naturel (figure 5.10c et d). Par contre, un ajustement de type exponentiel a été développé pour expliquer la quantité de cuivre équivalent à partir du rayonnement gamma-gamma (figure 5.10e et f). Cet ajustement est toutefois grossier et provoque des erreurs d'estimation importantes pour les teneurs de cuivre équivalent de plus de 10 %. Une seconde courbe d'ajustement respectant mieux les tendances des observations a été tracée en pointillés. On retrouve son équation identifiée d'un astérisque au tableau 5.8.

Deux combinaisons de propriétés physiques (conductivité électrique et rayonnement gamma-gamma et conductivité électrique et rayonnement gamma naturel) expliquent les teneurs en cuivre équivalent avec chacune un coefficient de régression R^2 de 0,69. On note une légère amélioration du coefficient de corrélation par rapport à celui

calculé entre le cuivre *équivalent* et la conductivité électrique ($R^2 = 0,64$). On retrouve les graphes à la figure 5.10g à j. Les erreurs deviennent élevées à partir de 5 % Cu *équivalent* mais les erreurs moyennes sont légèrement plus faibles que celles obtenues par les autres méthodes. Le tableau suivant liste les formules d'estimation obtenues pour les teneurs en cuivre *équivalent*.

Tableau 5.8 Formules d'estimation des teneurs en cuivre équivalent - groupe "565"

propriété(s) physique(s) retenue(s)	formule d'estimation de la teneur en cuivre équivalent (%)	erreur moyenne (% Cu _{eq})	coefficient de corrélation
conductivité électrique (mV)	$Cu_{eq} = 0,178497\sigma + 2,63667$	2,22	$R^2 = 0,64$
rayonnement gamma- gamma (cpé)	$Cu_{eq} = e^{-0,000355384\gamma\gamma} \times 23,2114$	2,46	
rayonnement gamma- gamma (cpé)	* $Cu_{eq} = e^{-0,0016\gamma\gamma} \times 70000$	25,81	
conductivité électrique (mV) et rayonnement gamma- gamma (cpé)	$Cu_{eq} = 0,1663\sigma - 0,00036\gamma\gamma + 5,2745$	1,90	$R^2 = 0,69$
conductivité électrique (mV) et rayonnement gamma naturel (cpé)	$Cu_{eq} = 0,1654\sigma - 0,1035\gamma_{nat} + 3,7300$	1,88	$R^2 = 0,69$

Aucun ajustement n'a pu être développé pour expliquer le fer en fonction de la conductivité électrique et de la susceptibilité magnétique (voir figure 5.11a et b).

Toutefois, des régressions linéaires avec les rayonnements gamma-gamma et

gamma naturel ont réussi à déterminer les teneurs en fer (voir figure 5.11c à f). Tel que mentionné au tableau 5.7, le lien linéaire entre la quantité de fer et le rayonnement gamma naturel est de -0,78 et celui entre le fer et le rayonnement gamma-gamma de -0,85. L'existence d'un fort lien linéaire entre le fer et le rayonnement gamma-gamma n'est pas surprenante puisque cette propriété mesure indirectement la masse volumique, que l'on sait fortement liée à la quantité de fer dans les roches du gisement Louvicourt. Ce qui étonne toutefois est la force du lien linéaire entre le fer et le rayonnement gamma naturel. Ce lien semble indiquer que la quantité de potassium, si c'est bien le radio-élément influençant les lectures de rayonnement gamma naturel dans le gisement Louvicourt, est inversement proportionnelle à celle de fer dans nos roches. On peut expliquer ce résultat par l'hypothèse que le potassium se retrouve en moindre quantité dans les sulfures (contenant beaucoup de fer) que dans les autres roches. Pourtant, ce fort lien linéaire n'a pas été observé dans les observations du groupe "655" et le coefficient de corrélation linéaire entre les quantités de potassium et de fer de nos échantillons n'est que de -0,5. De plus, il semble improbable que la petite différence entre les fenêtres de lecture des appareils utilisés pour les deux levés diagraphiques de rayonnement gamma naturel soit la cause d'une telle incohérence entre les levés. Une investigation serait nécessaire afin d'expliquer ce phénomène, mais une telle étude ne fait pas partie du cadre de la présente recherche.

La tableau suivant liste les formules d'estimation des teneurs en fer ainsi que les erreurs et les coefficients de corrélation associés.

Tableau 5.9 Formules d'estimation des teneurs en fer - groupe "565"

propriété physique retenue	formule d'estimation de la teneur en fer (%)	erreur moyenne (% Fe)	coefficient de corrélation
rayonnement gamma naturel (cpé)	$Fe = -0,69588 \gamma_{nat} + 33,112$	4,16	$R^2 = 0,61$
rayonnement gamma-gamma (cpé)	$Fe = -0,00251364 \gamma\gamma + 44,1774$	3,67	$R^2 = 0,72$

La figure 5.12 compare les estimations de la teneur en fer obtenues à l'aide des mesures de rayonnement gamma-gamma aux teneurs mesurées. Les lignes rouges représentent les estimations et les histogrammes en noir et blanc les analyses. On remarque que pour les trois trous, les estimations sont fiables. Selon les relevés de forage, la zone du trou 565-025 où le fer est nettement surestimé (à une profondeur d'environ 98 mètres) est composée de sulfures massifs et est située directement entre deux dykes.

Ainsi, pour les levés du groupe "565", ce sont encore une fois les teneurs en cuivre et en fer qui sont le plus fiablement estimables. Des quatre propriétés mesurées, c'est la conductivité électrique qui réagit le plus avec la quantité de cuivre, et ce sont les rayonnements gamma-gamma et gamma naturel qui expliquent le mieux les quantités de fer. Le zinc n'a pu être estimé de façon convenable. Ces résultats sont en accord avec les méthodes de délimitation du minerai utilisées à la mine de cuivre et zinc de

Pyhäsalmi en Finlande où l'on utilise les sondes de conductivité électrique et de rayonnement gamma-gamma développées par Outokumpu Metals and Resources (R. McCreary, communication personnelle, 1994).

5.4 Conclusion

Nous avons donc développé des formules permettant d'estimer les teneurs en cuivre, cuivre équivalent et en fer. Cette information est un atout considérable au point de vue économique. Elle permet, grâce aux levés diagraphiques, d'obtenir rapidement des estimés des teneurs tout au long des trous, et ce, même pour les trous de production, rendant ainsi possible la modification des interprétations géologiques et les plans des chantiers. Elle permet aussi une économie de temps et d'argent considérable grâce à la diminution du nombre d'analyses chimiques d'échantillons et aussi parce que tous les trous de délimitation du minerai n'ont plus à être forés au diamant. En connaissant quelles sont les mesures physiques nécessaires à la détermination des teneurs, on peut se contenter de mesurer que ces dernières.

Selon les données disponibles dans le cadre de cette étude, il est possible d'estimer les teneurs en cuivre, cuivre équivalent et en fer des roches du gisement Louvicourt. Certaines estimations manquent de précision, mais heureusement le cuivre, élément économique le plus important à Louvicourt Mine, peut être estimé de façon assez satisfaisante, et ce, à l'aide des mesures de conductivité électrique.

Plusieurs formules d'estimation de la teneurs en cuivre ont été développées. Toutes utilisent la conductivité électrique comme propriété-clé.

Les teneurs en zinc sont difficiles à estimer puisque de toutes les propriétés physiques étudiées, aucune n'est particulièrement influencée par le zinc ou la sphalérite (minéral zincifère économique). De plus, les échantillons et les roches du levé "655" ne contenaient que de très faibles quantités de zinc et n'ont pu permettre de déterminer des façons d'estimer ces teneurs. Grâce aux levés du groupe "565", quelques formules ont été établies, mais elles produisaient des erreurs tellement élevées que leur utilisation devient inutile.

Les formules d'estimation des teneurs en cuivre ^{équivalent} sont fortement inspirées de celles du cuivre. Comme pour ce dernier, la conductivité électrique est la propriété-clé. Ceci n'est pas surprenant lorsqu'on regarde comment la teneur en cuivre ^{équivalent} est calculée: $Cu_{eq} (\%) = Cu (\%) + 0,197 Zn (\%) + 0,006 Ag (g/t) + 0,540 Au (g/t)$.

C'est en effet la composante en cuivre qui est la plus importante et qui explique le choix de la conductivité électrique comme première propriété permettant d'évaluer ces teneurs. La composante en zinc compte pour beaucoup moins dans cette équation et, comme aucune propriété mesurée ne peut décrire le zinc, son influence, tout comme celle de l'argent et de l'or devient faible, voir même presque négligeable.

Les teneurs en fer sont le mieux évaluées grâce aux mesures de masse volumique, de vitesse des ondes de compression et de rayonnement gamma-gamma. En effet, la masse volumique du fer est élevée par rapport à la plupart des éléments majeurs

constituant les roches du gisement. Celles qui en contiennent le plus sont les sulfures massifs. Quelques formules ont donc été développées afin d'estimer les teneurs en fer.

Il serait préférable de procéder à d'autres levés de diagraphie dans des trous de délimitation du minerai pour lesquels la géochimie est déjà disponible et pour lesquels toutes les variétés majeures de roches et de teneurs de Louvicourt Mine seraient rencontrées. Ceci permettrait d'augmenter le nombre et la qualité des observations disponibles et ainsi de valider et possiblement d'améliorer les formules d'estimation présentées dans ce chapitre.

La masse volumique ou le rayonnement gamma-gamma ainsi que la conductivité électrique sont les propriétés les plus utiles pour estimer les teneurs en cuivre et en fer. Les estimations des teneurs en fer ne donnent pas le caractère économique de la roche, mais indique la présence de sulfures massifs.

Si l'on trouvait une propriété influencée par le zinc, son estimation deviendrait possible et en même temps améliorerait les estimés des teneurs en cuivre ^{équivalent}. On pourrait prendre à Louvicourt Mine des mesures de polarisation provoquée et étudier les relations entre ces mesures et les teneurs en zinc. En effet, cette méthode permet d'évaluer la teneur en zinc de la minéralisation massive à la mine Zinkgruvan en Suède (Wänstedt, 1992).

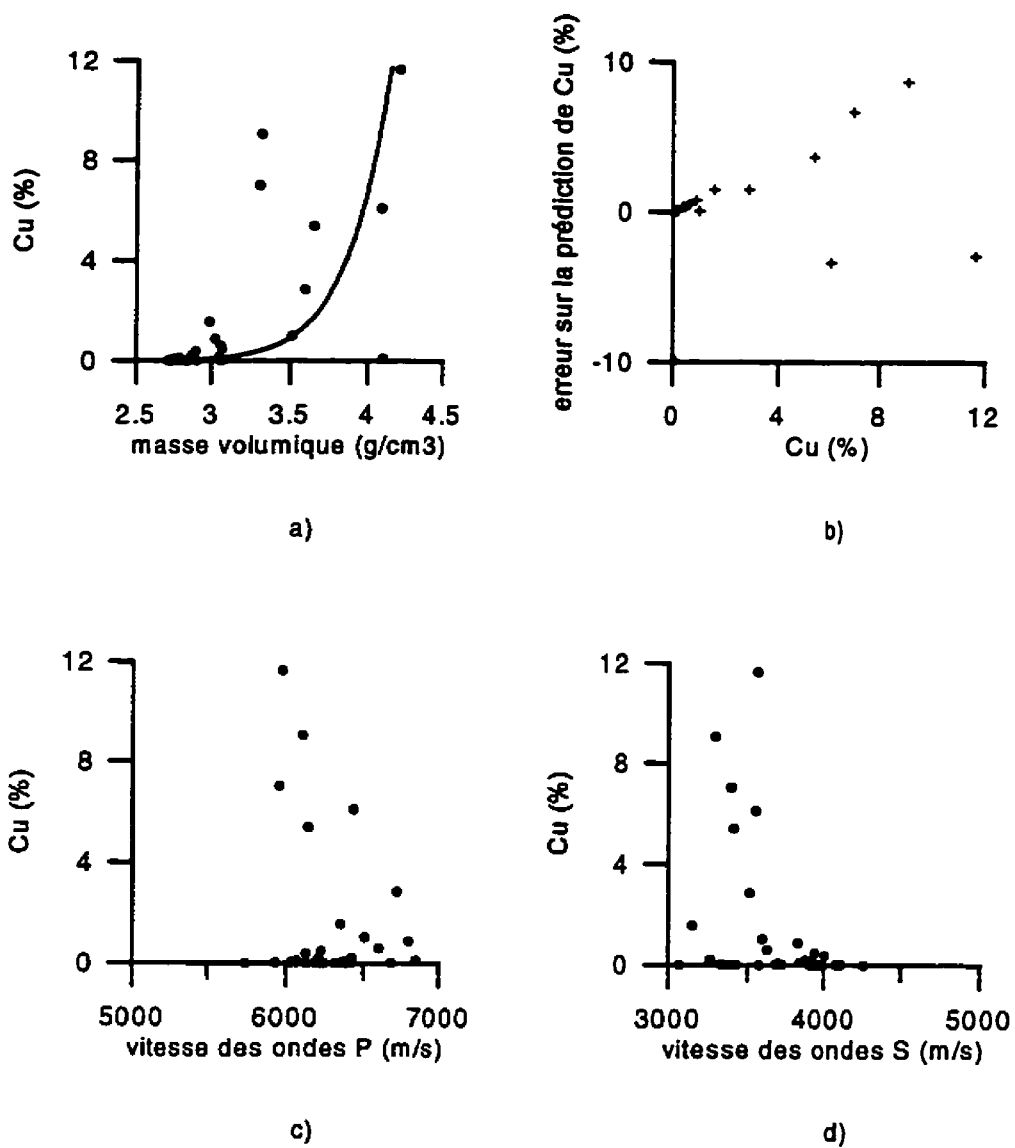


Figure 5.1 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en cuivre - groupe "échantillons"

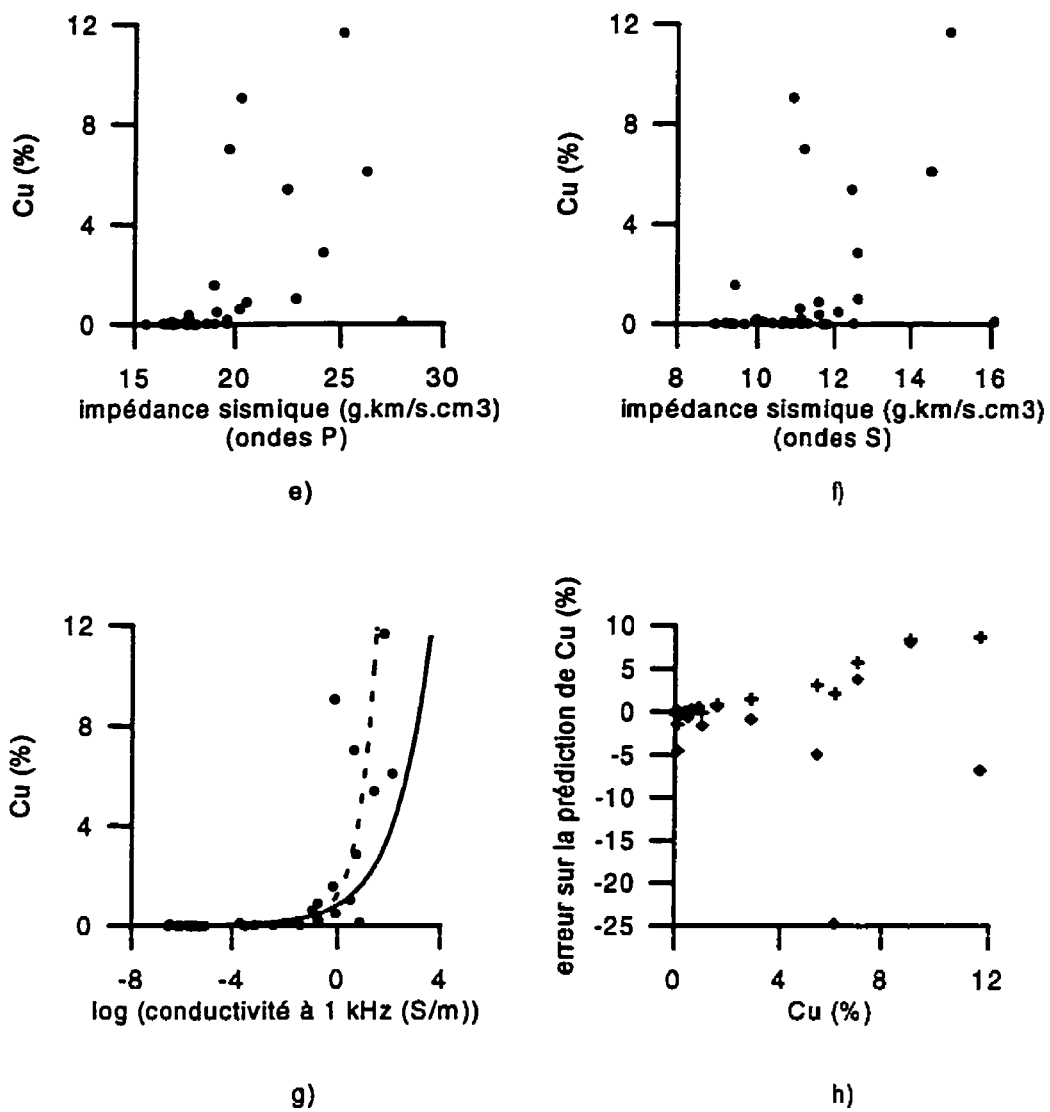


Figure 5.1 (suite)

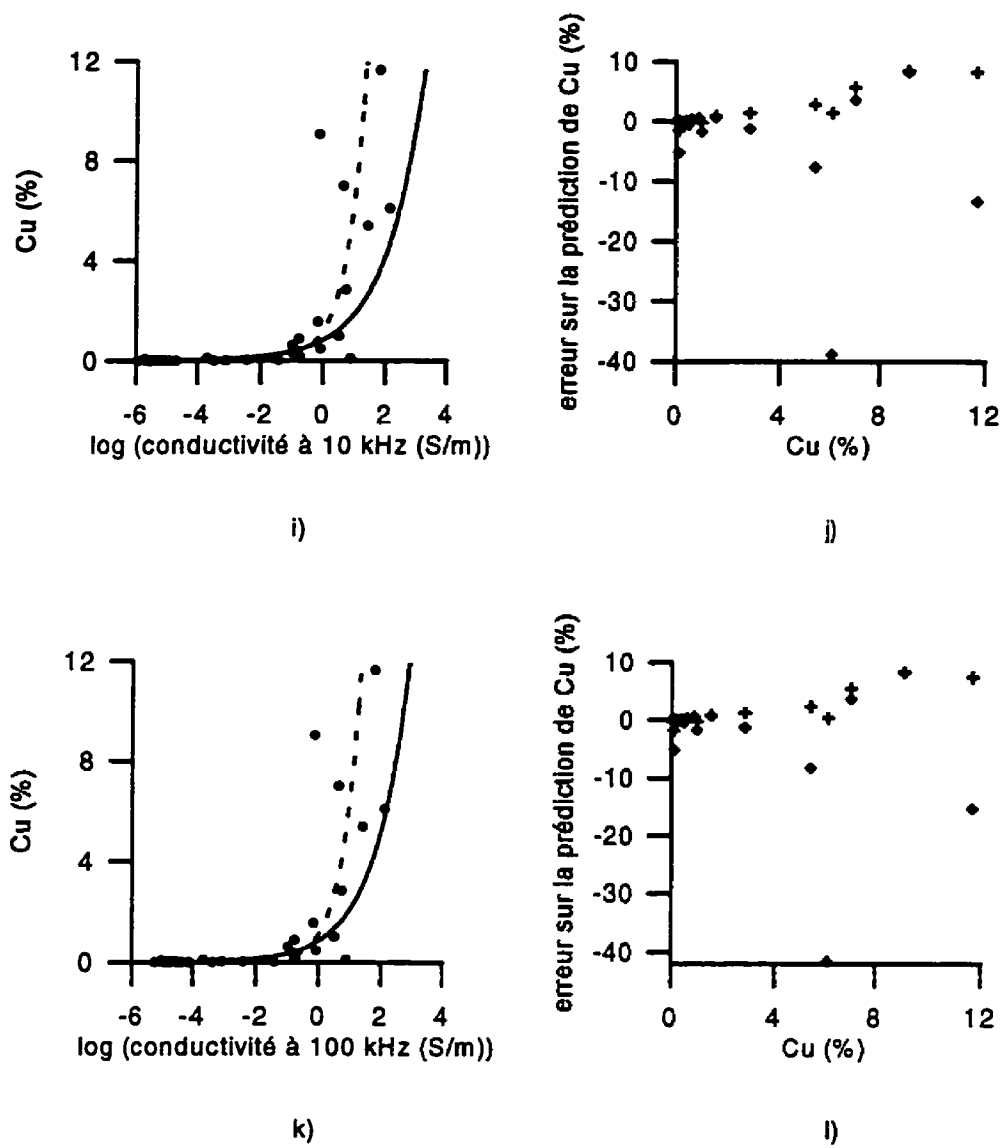


Figure 5.1 (suite)

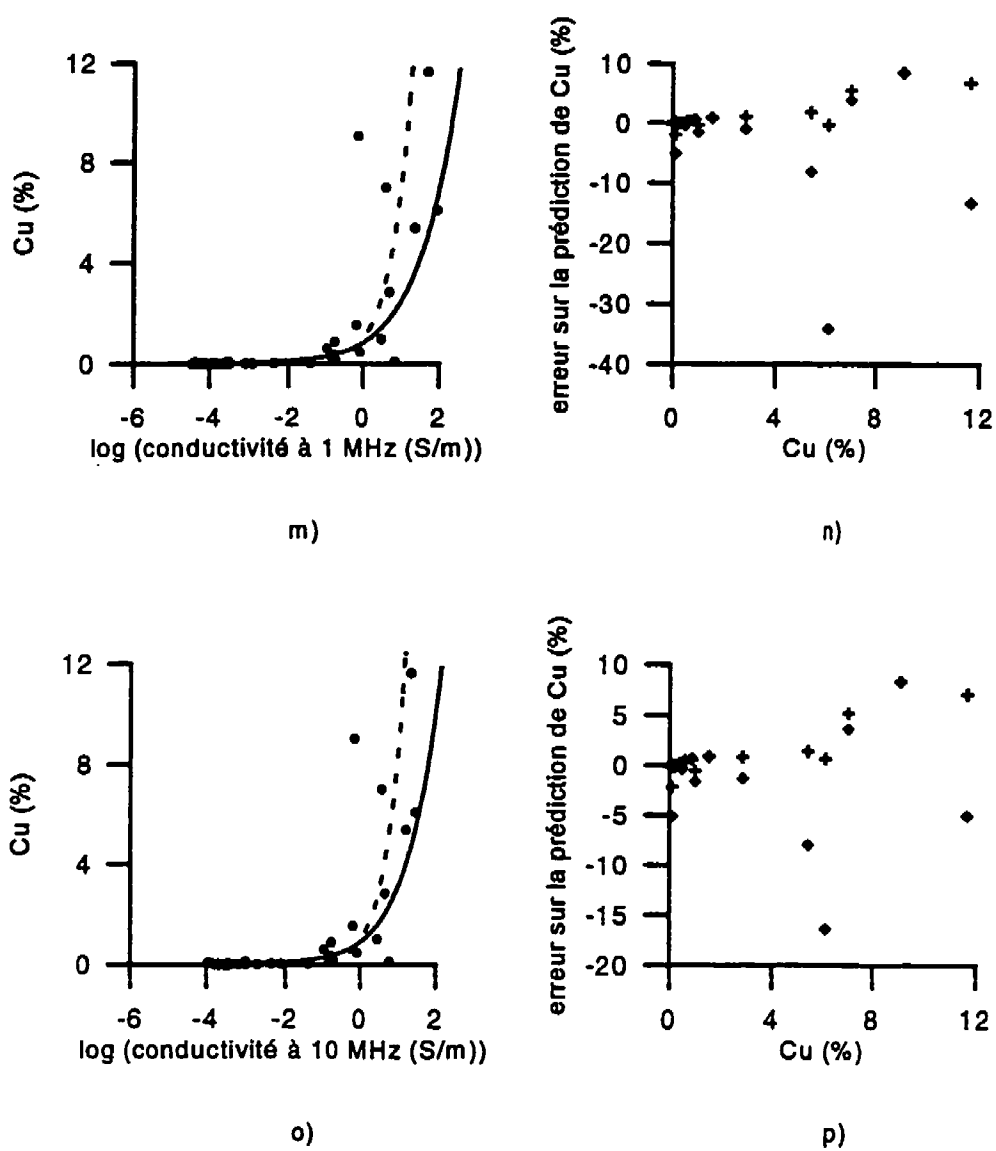


Figure 5.1 (suite)

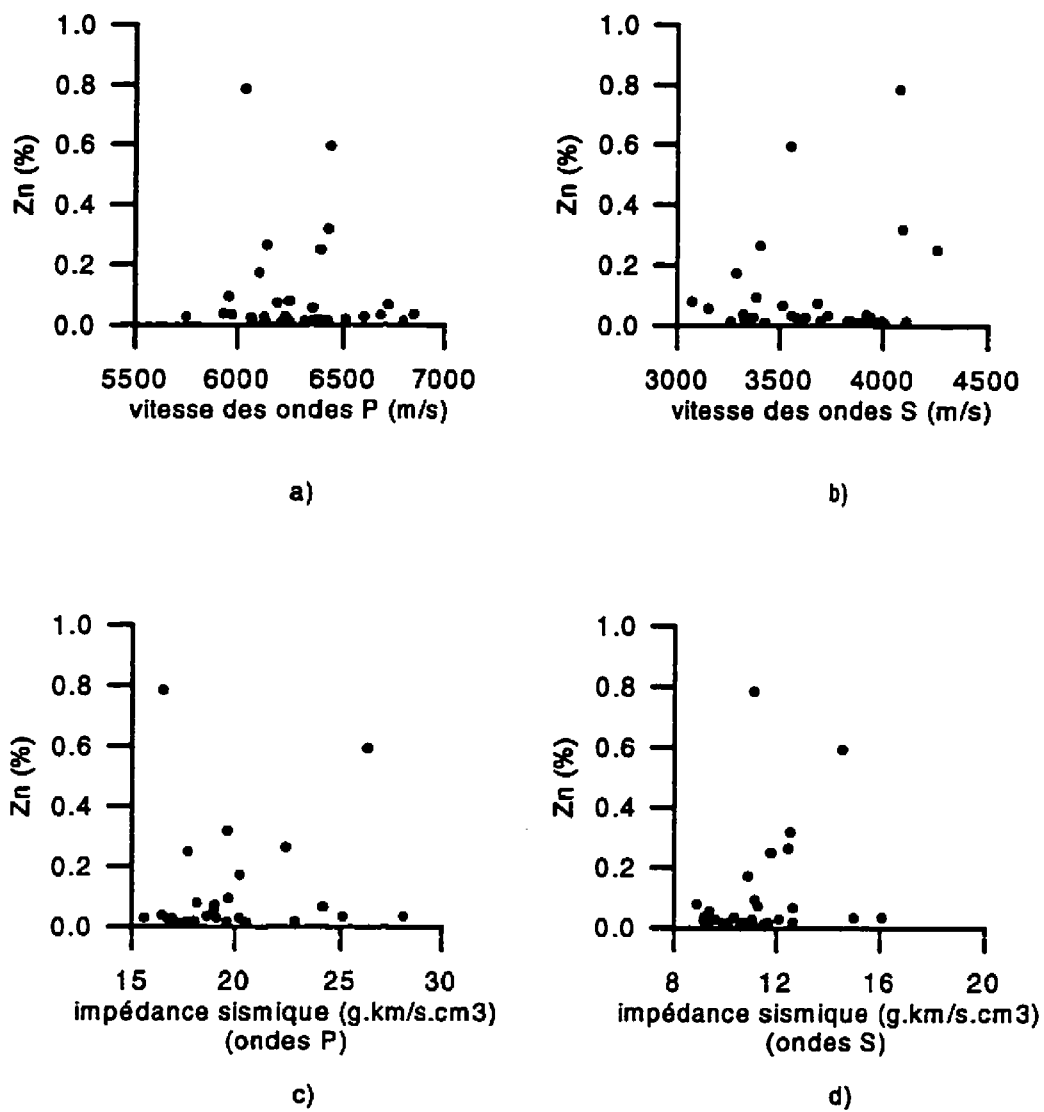
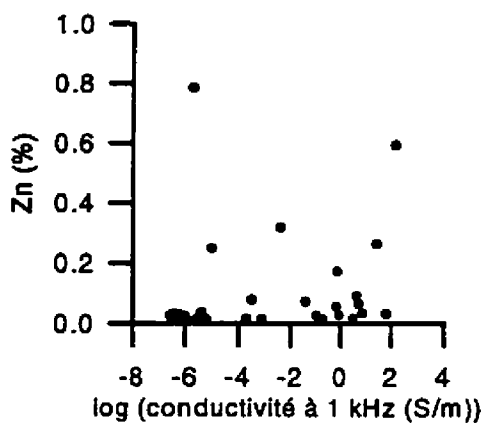
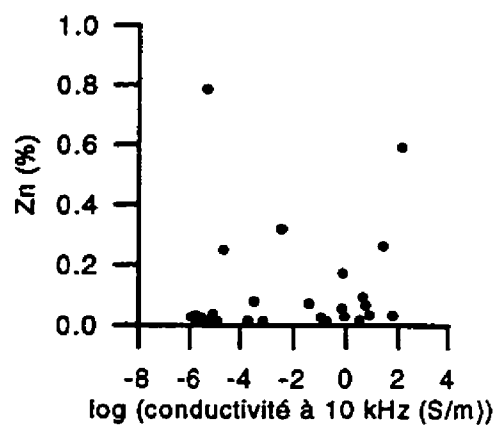


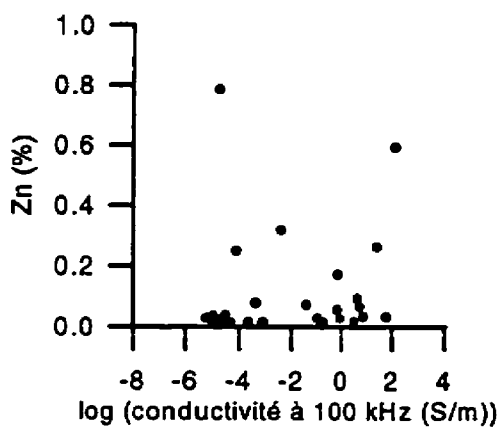
Figure 5.2 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en zinc - groupe "échantillons"



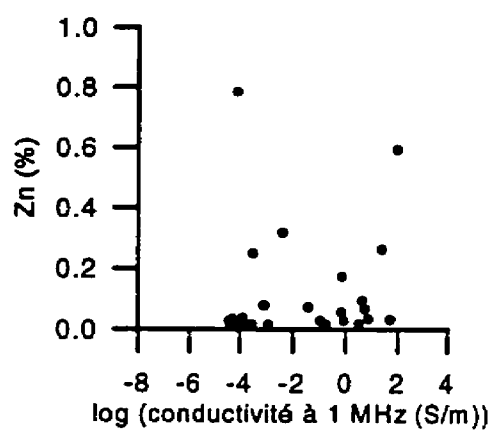
e)



f)

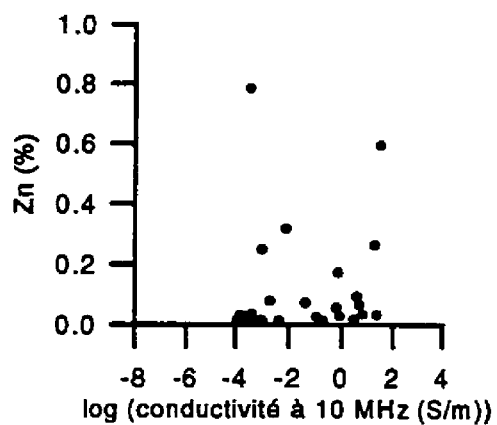


g)

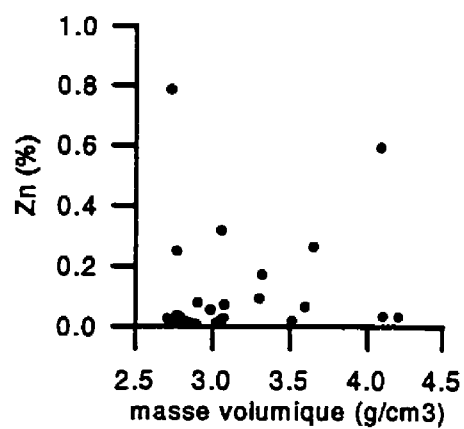


h)

Figure 5.2 (suite)



i)



j)

Figure 5.2 (suite)

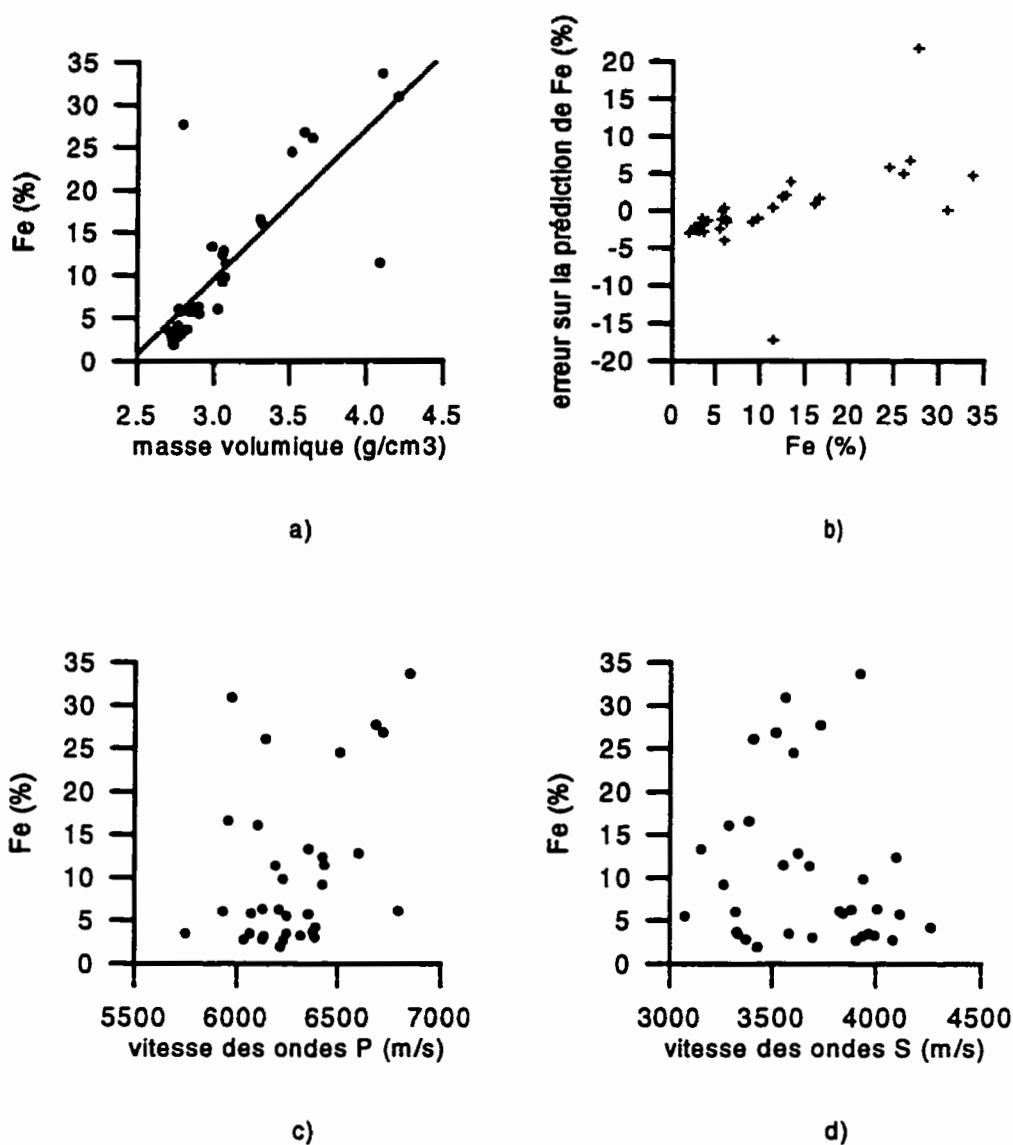


Figure 5.3 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en fer - groupe "échantillons"

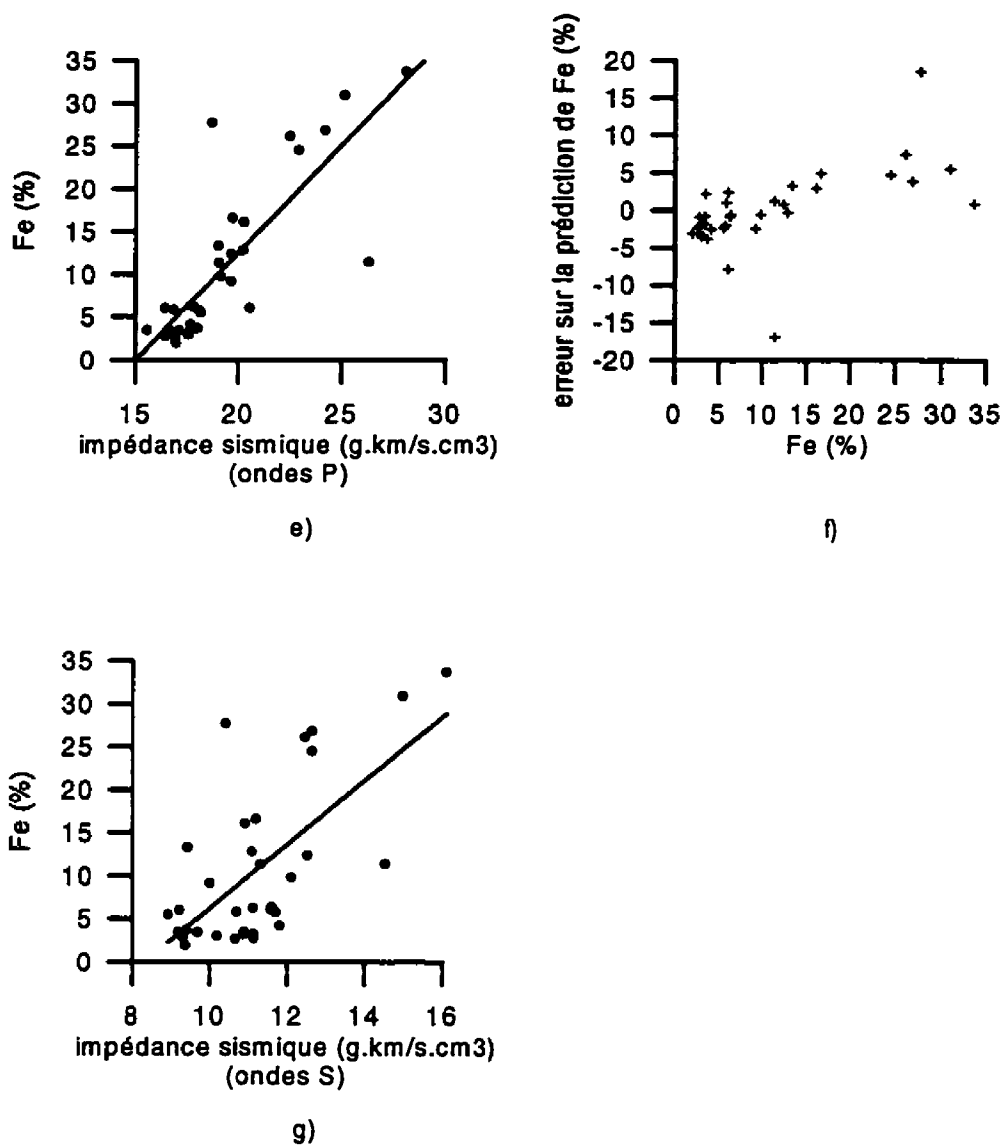
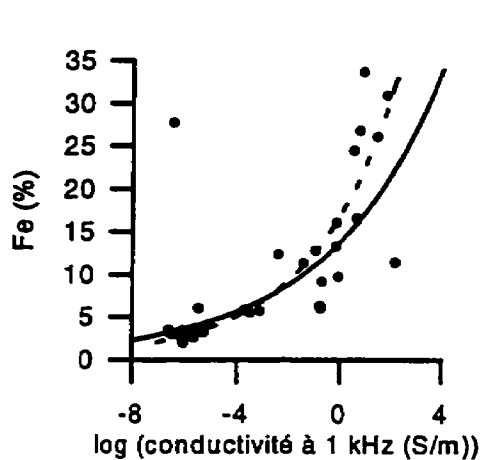
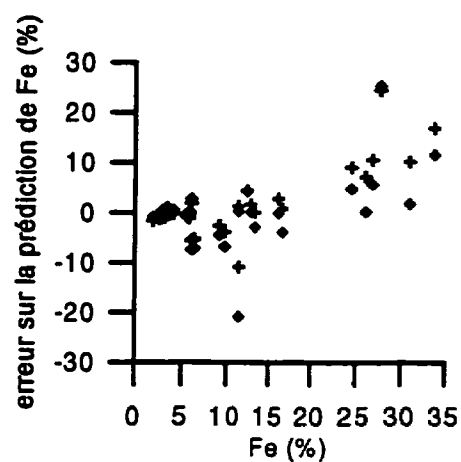


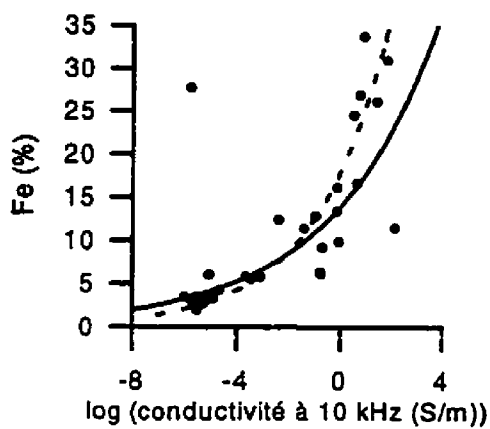
Figure 5.3 (suite)



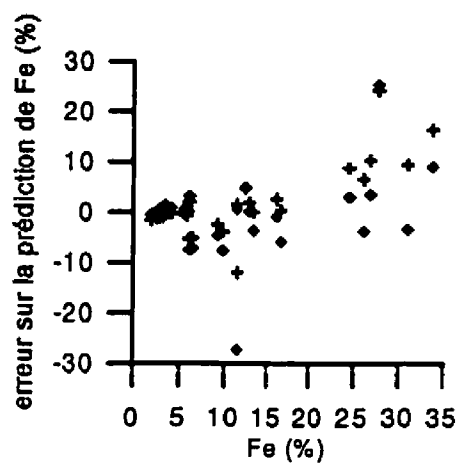
h)



j)



i)



k)

Figure 5.3 (suite)

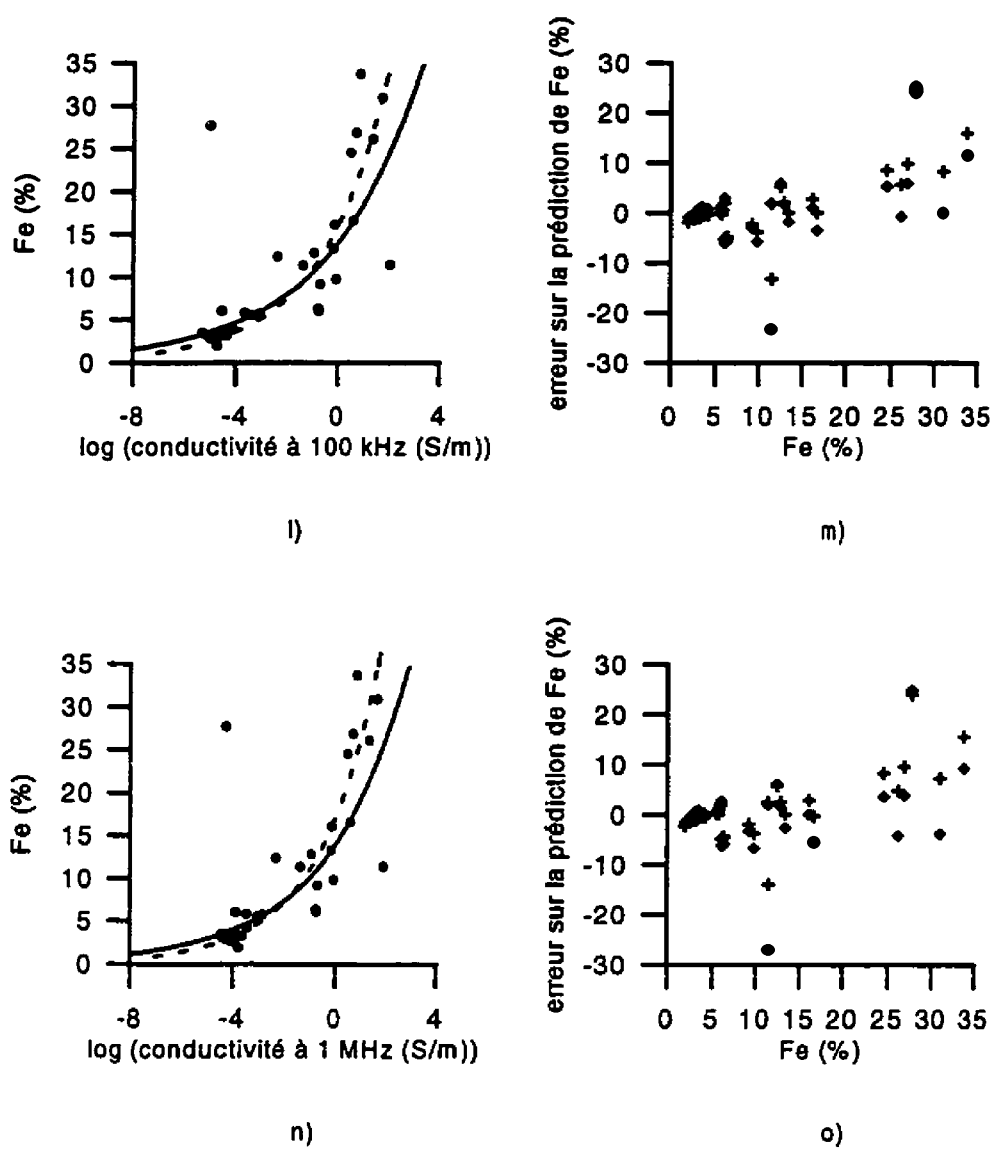


Figure 5.3 (suite)

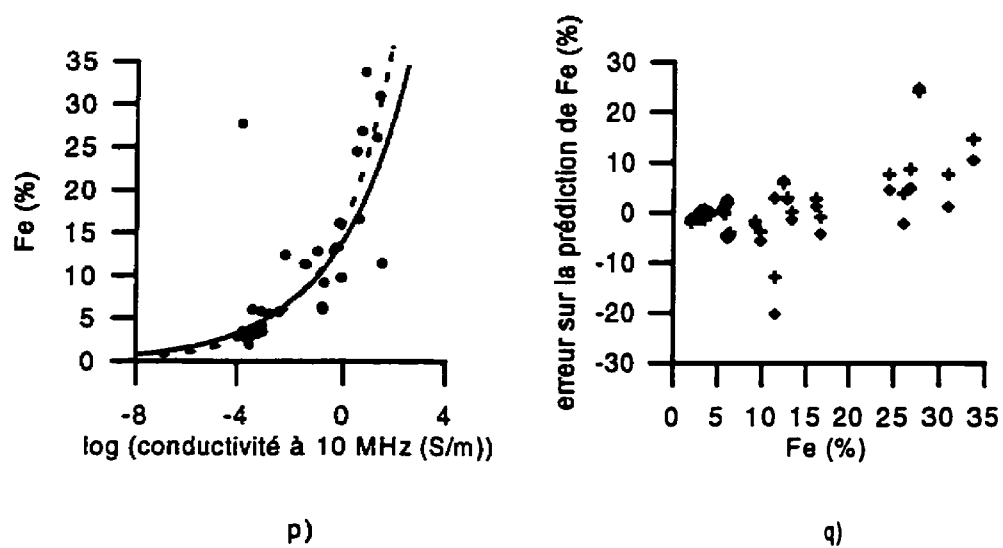


Figure 5.3 (suite)

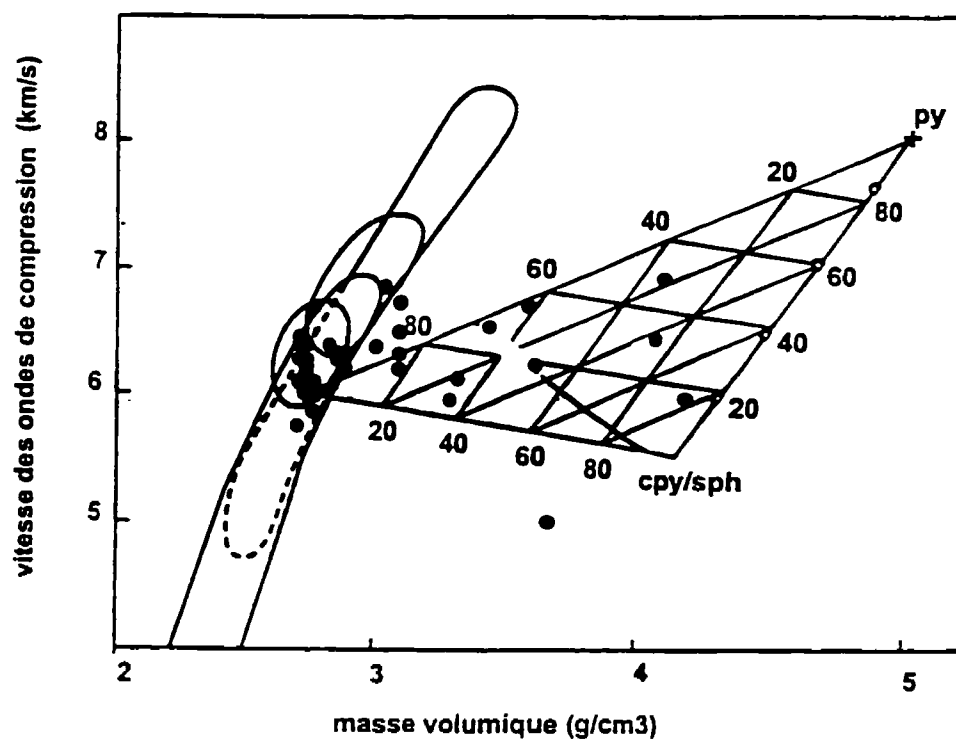


Figure 5.4 Diagrammes binaire et tertiaire utilisés pour l'estimation des quantités de pyrite, du mélange sphalérite/chalcopyrite et de gangue des échantillons (adaptée de Salisbury et *al.*, 1996)

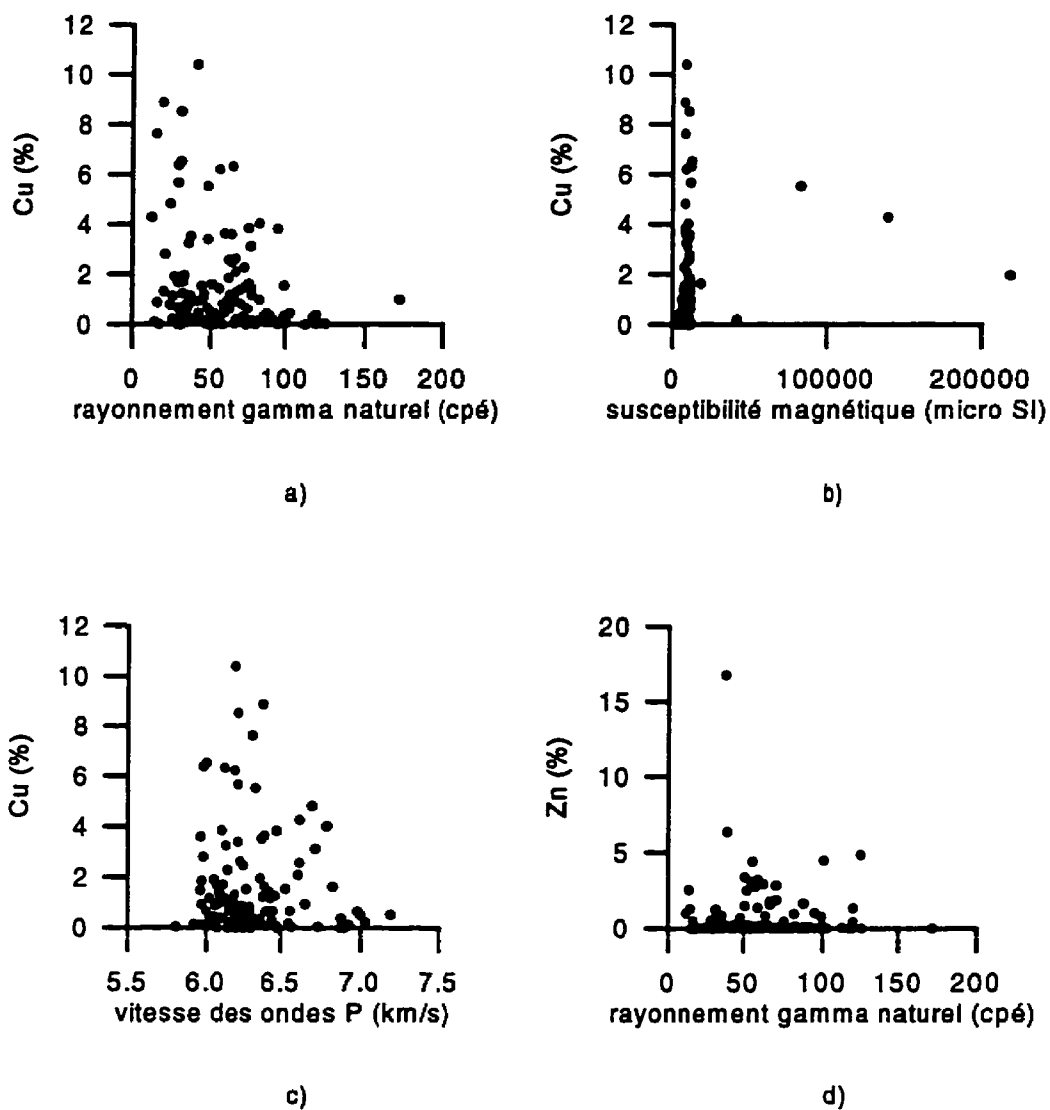
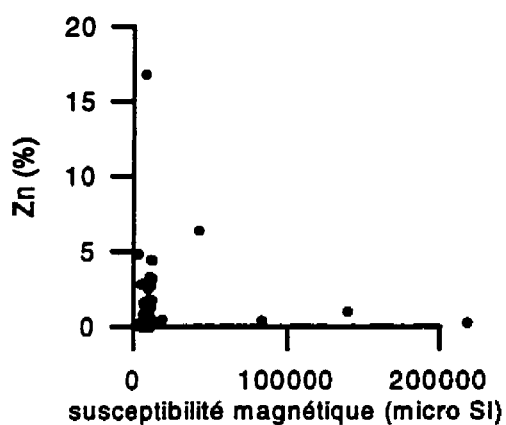
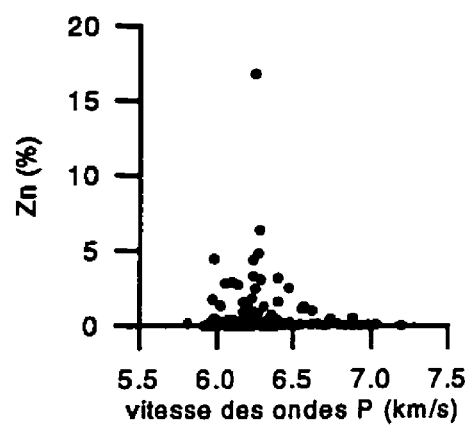


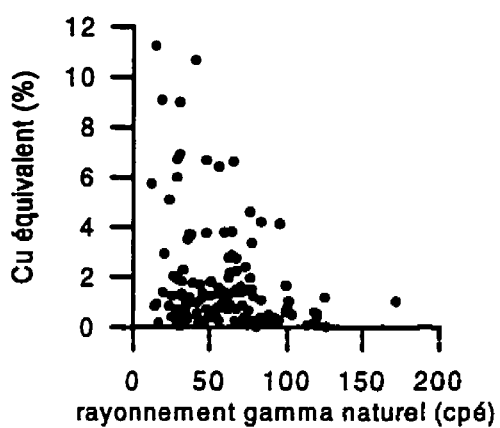
Figure 5.5 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs - groupe "655"



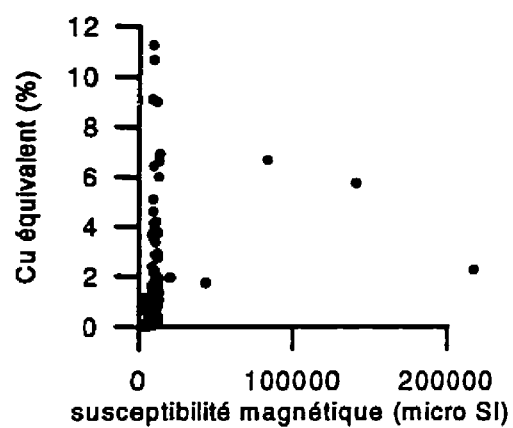
e)



f)

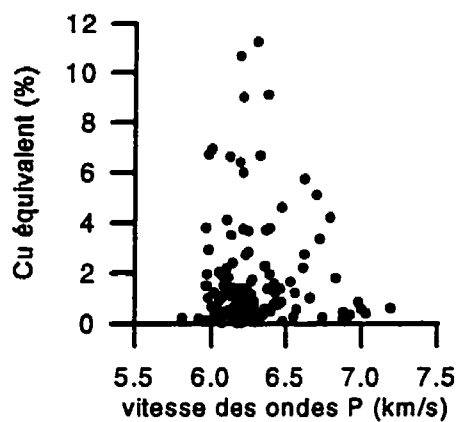


g)

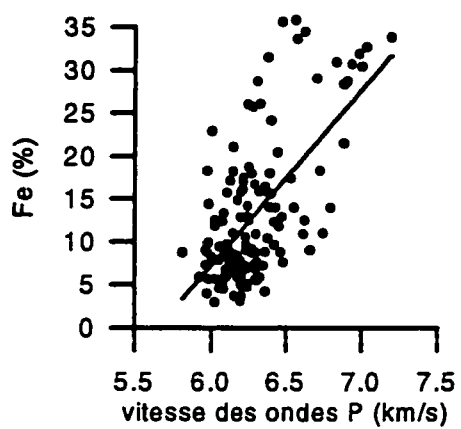


h)

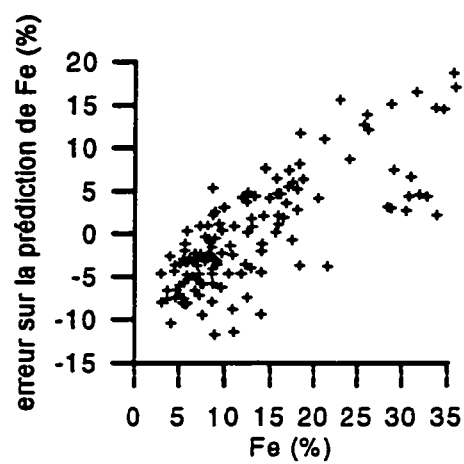
Figure 5.5 (suite)



i)

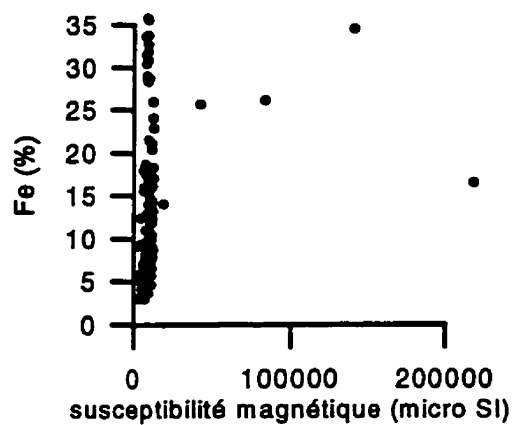


j)

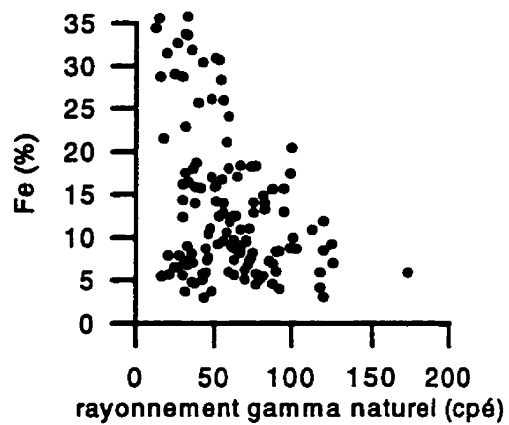


k)

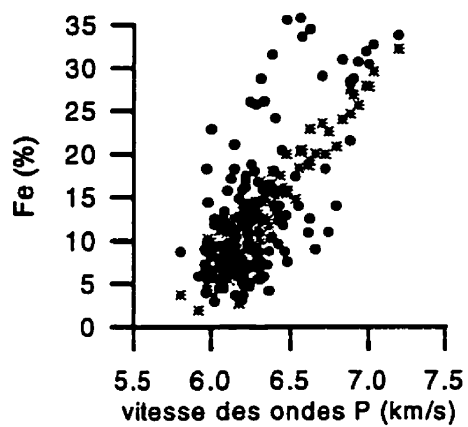
Figure 5.5 (suite)



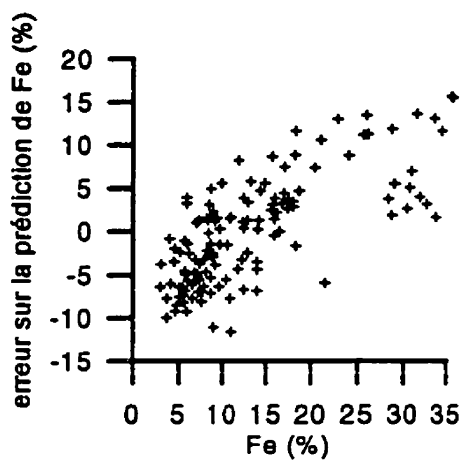
l)



m)



n)



o)

Figure 5.5 (suite)

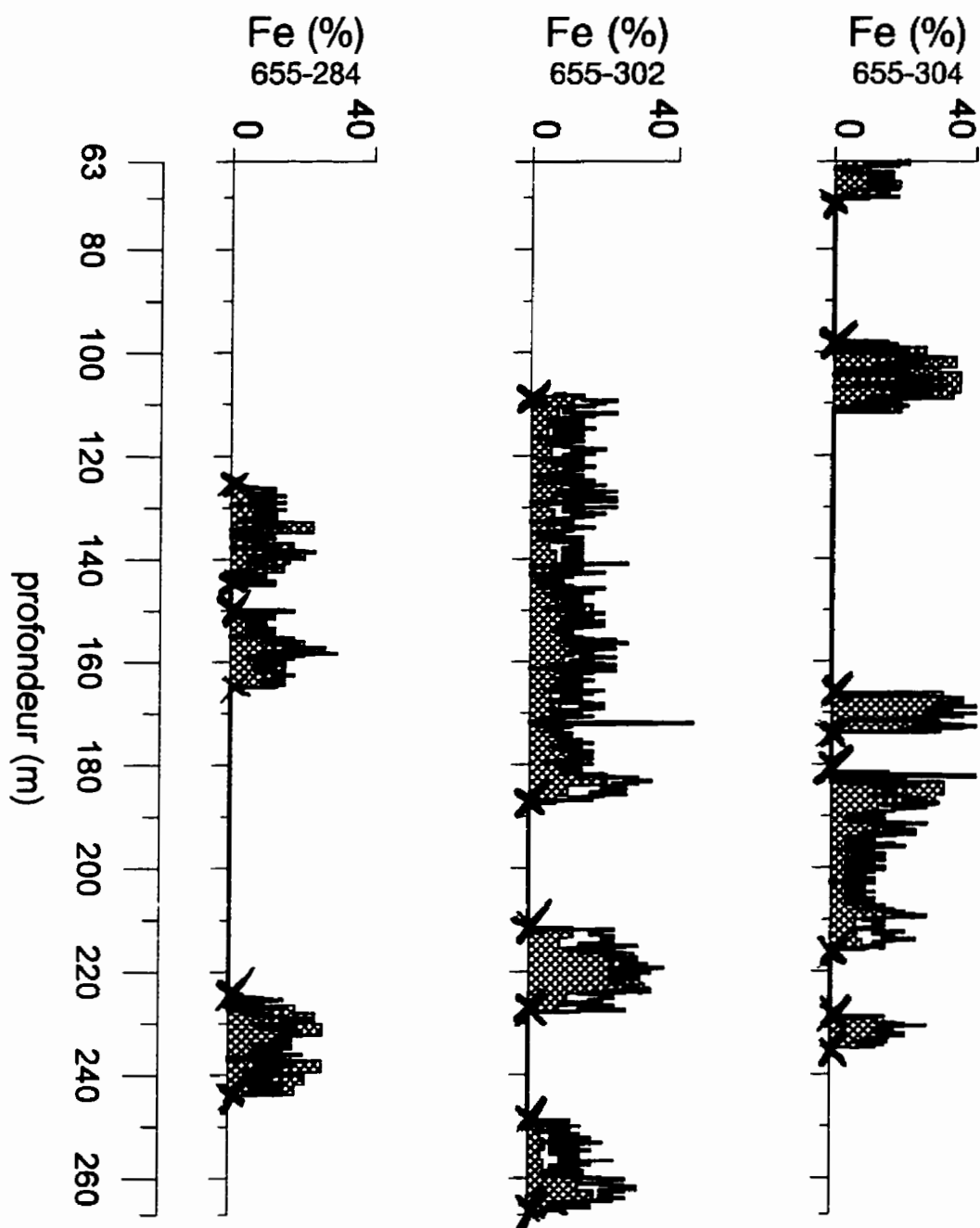


Figure 5.6 Estimation du fer à l'aide de la vitesse des ondes de compression pour les trous du groupe "655"

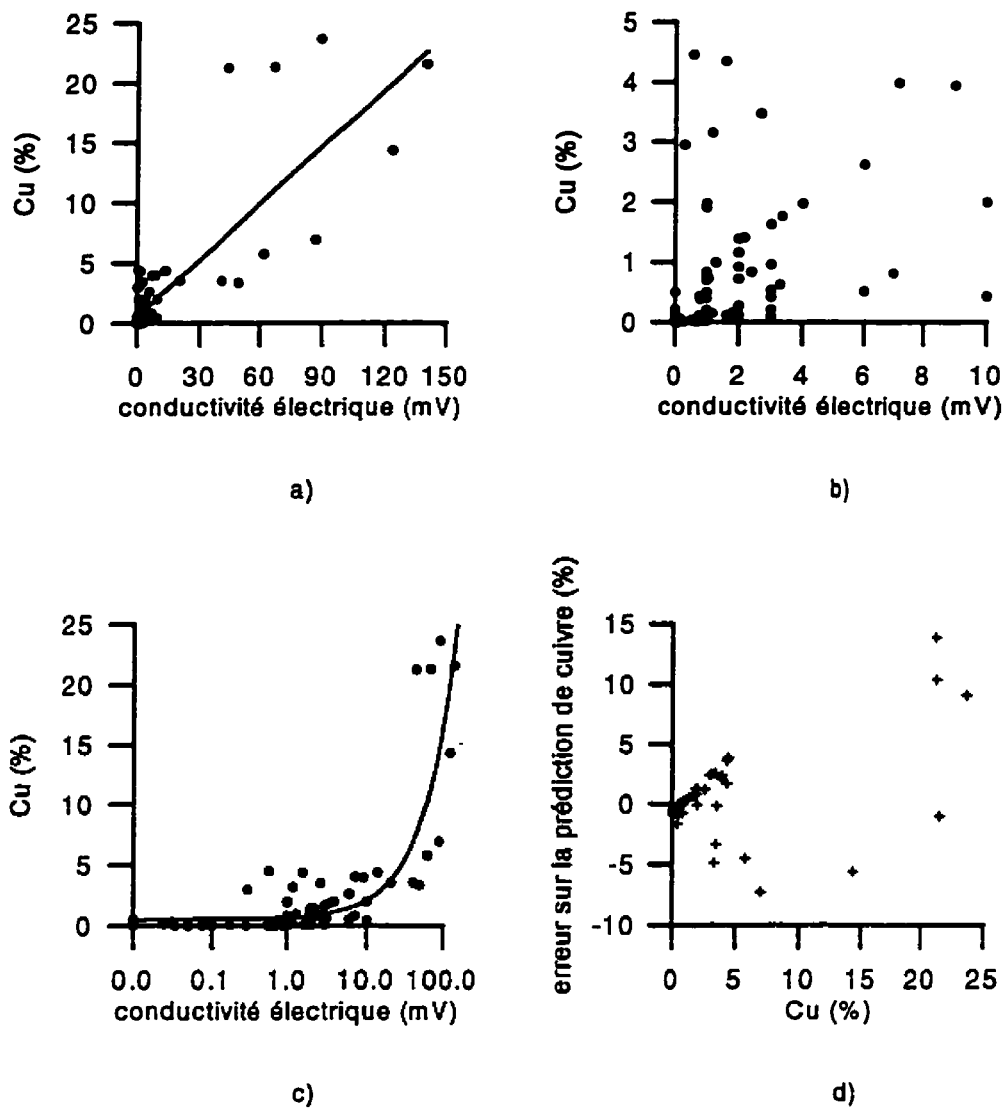
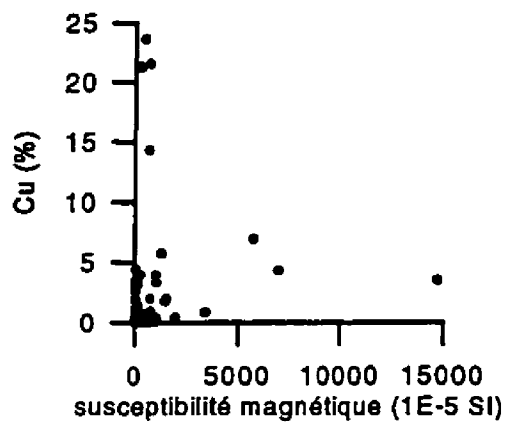
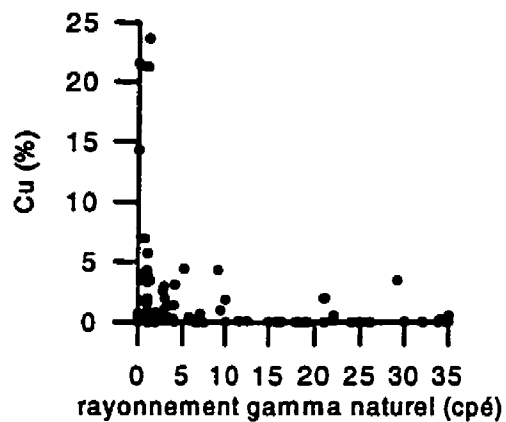


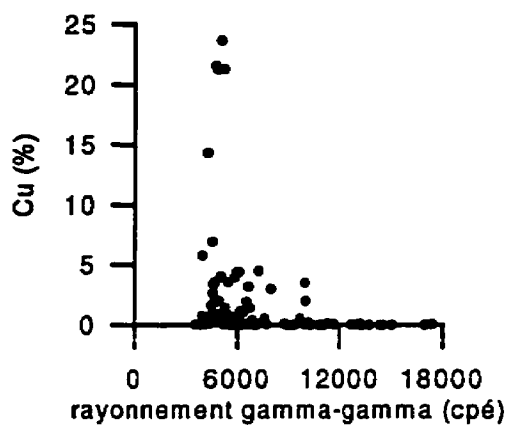
Figure 5.7 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en cuivre - groupe "565"



e)



f)



g)

Figure 5.7 (suite)

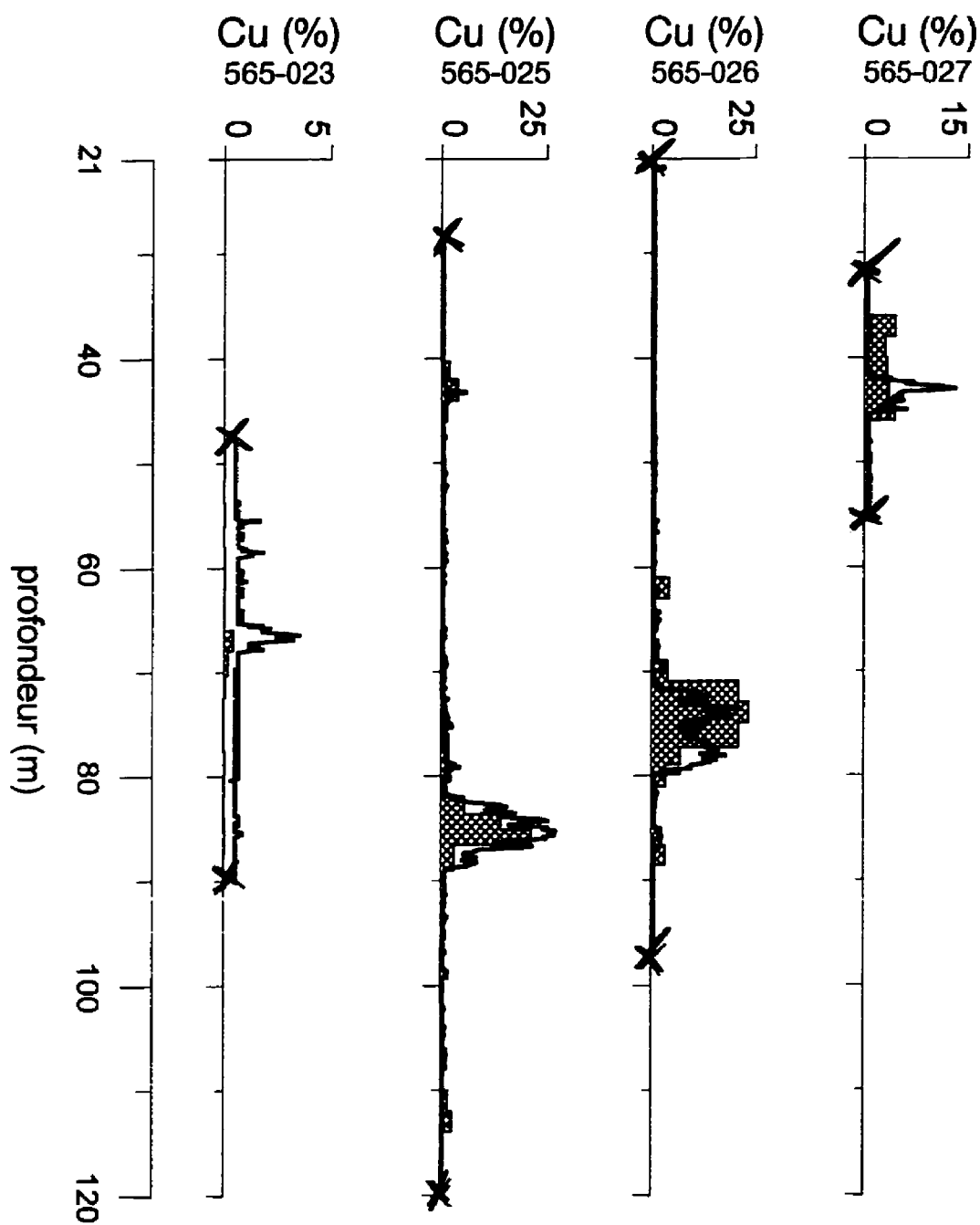


Figure 5.8 Estimation du cuivre à l'aide de la conductivité électrique pour les trous du groupe "565"

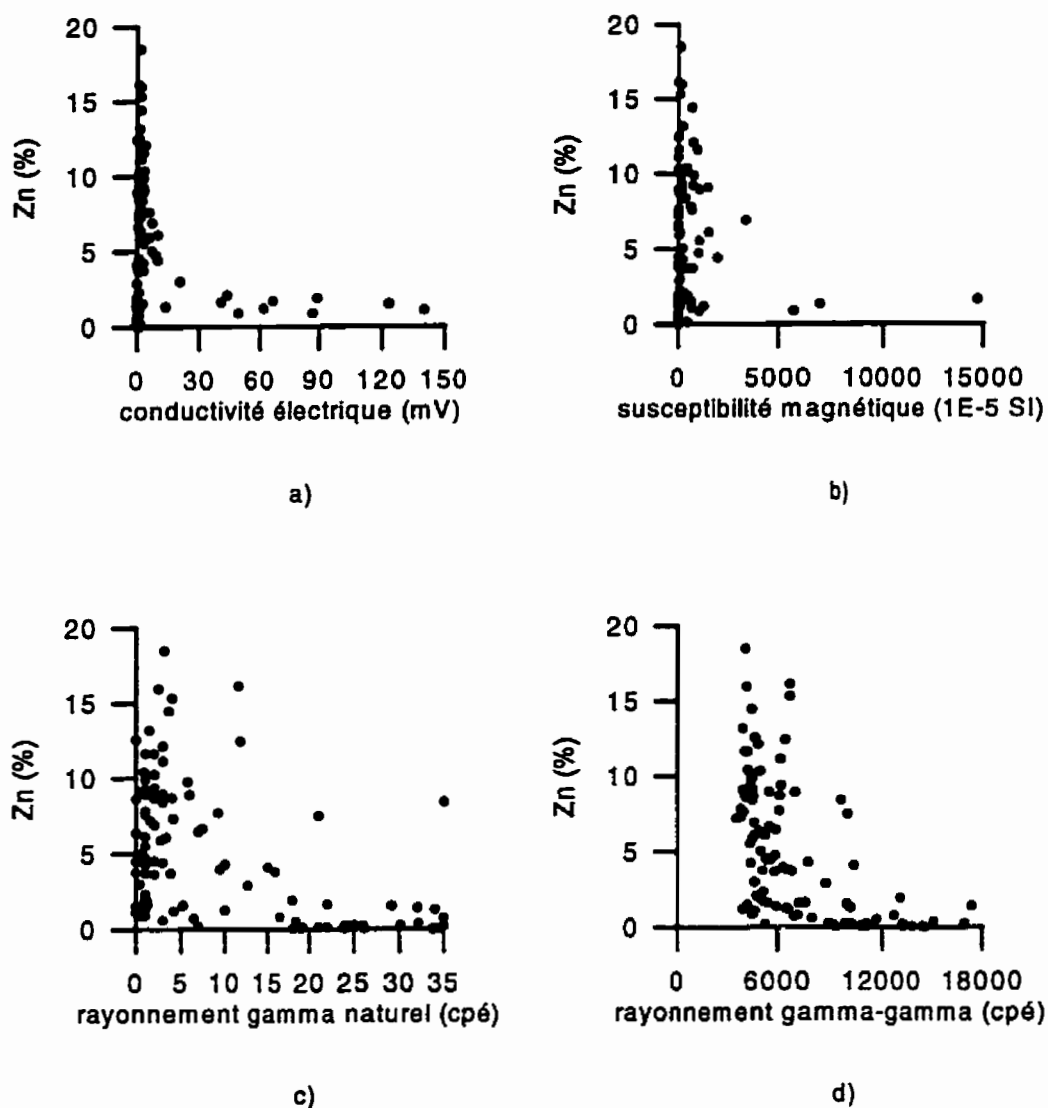
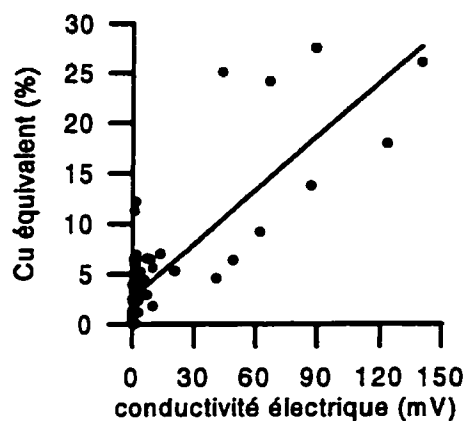
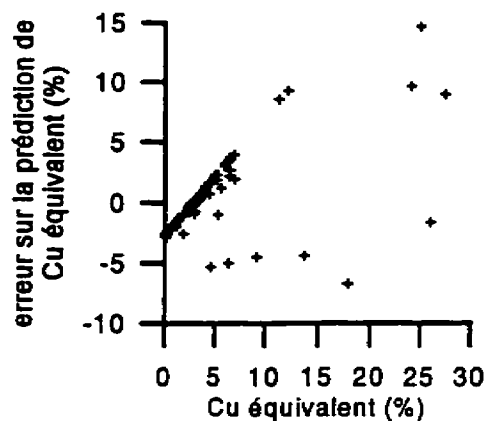


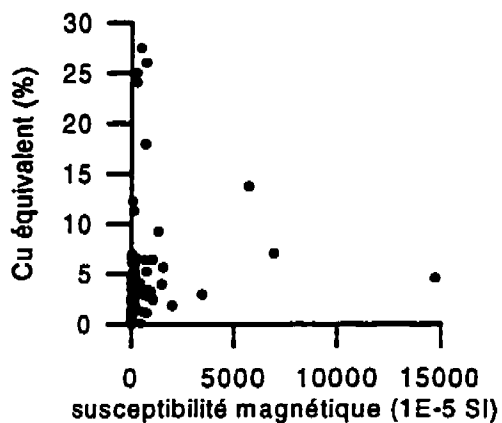
Figure 5.9 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en zinc - groupe "565"



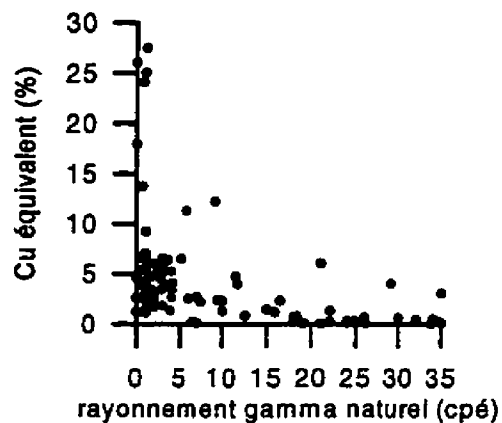
a)



b)

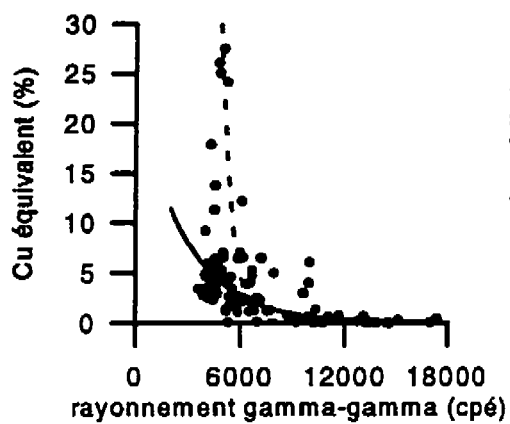


c)

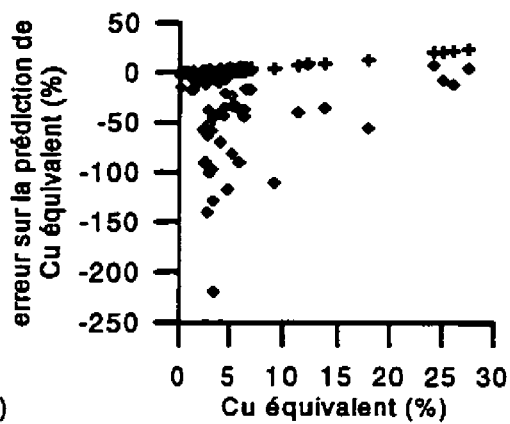


d)

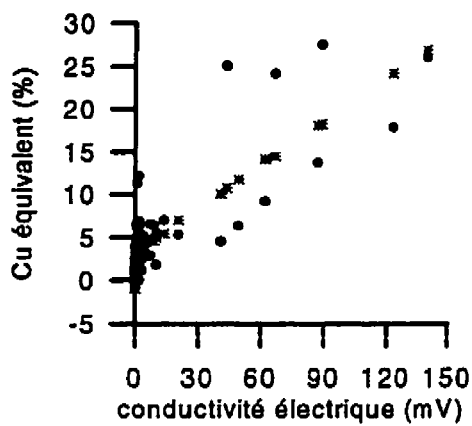
Figure 5.10 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en cuivre équivalent - groupe "565"



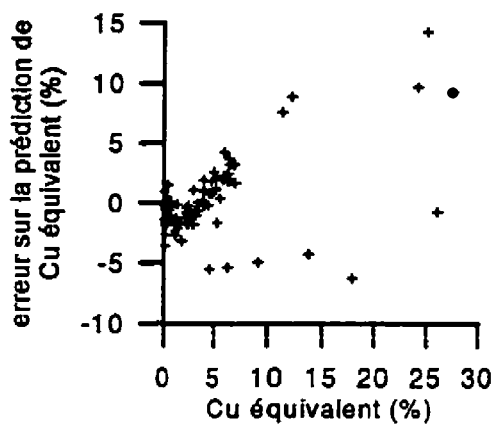
e)



f)

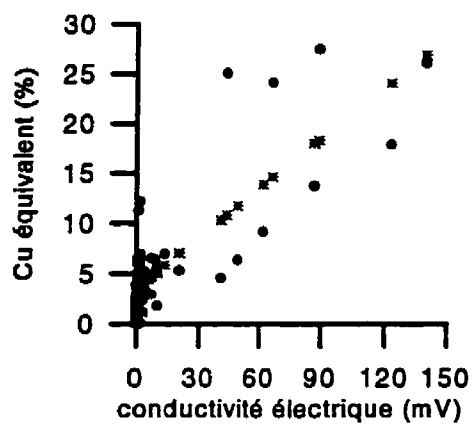


g)

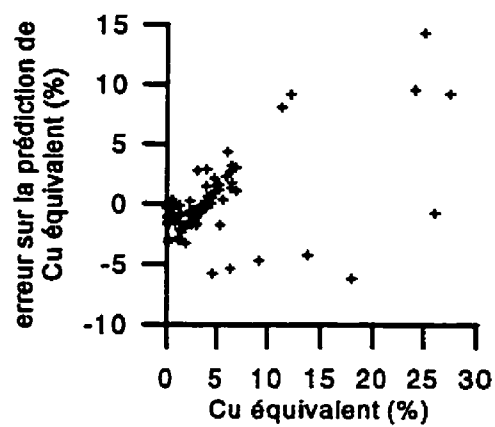


h)

Figure 5.10 (suite)



i)



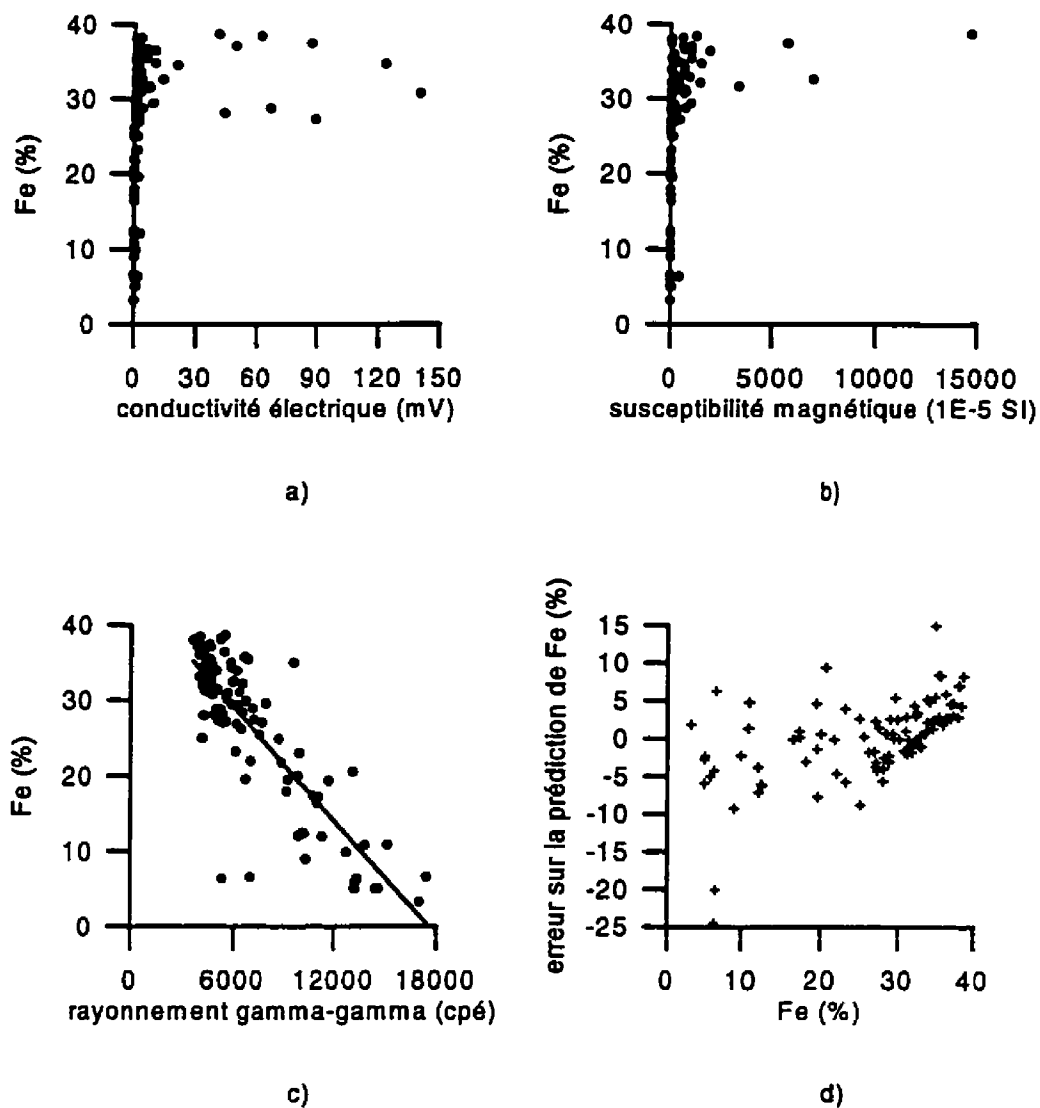


Figure 5.11 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction des teneurs en fer - groupe "565"

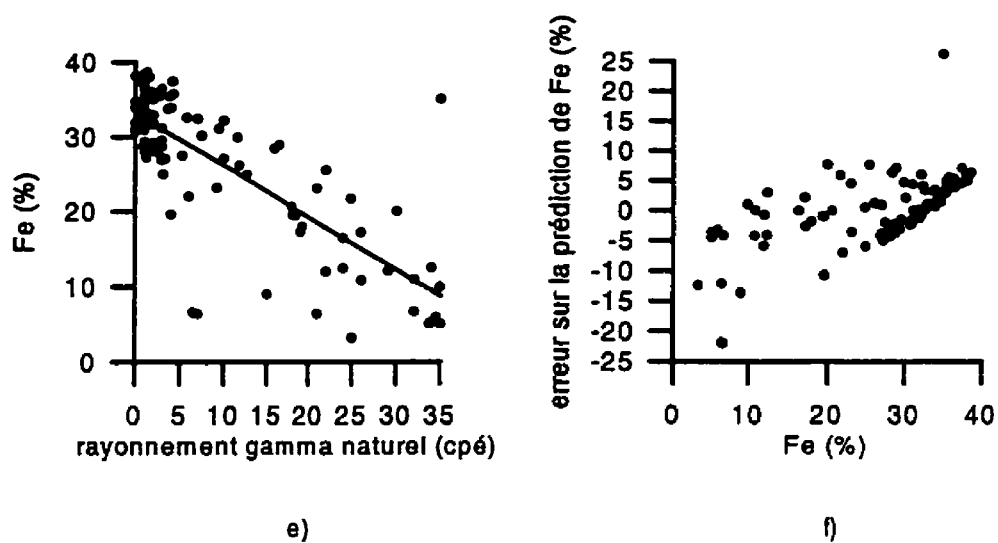


Figure 5.11 (suite)

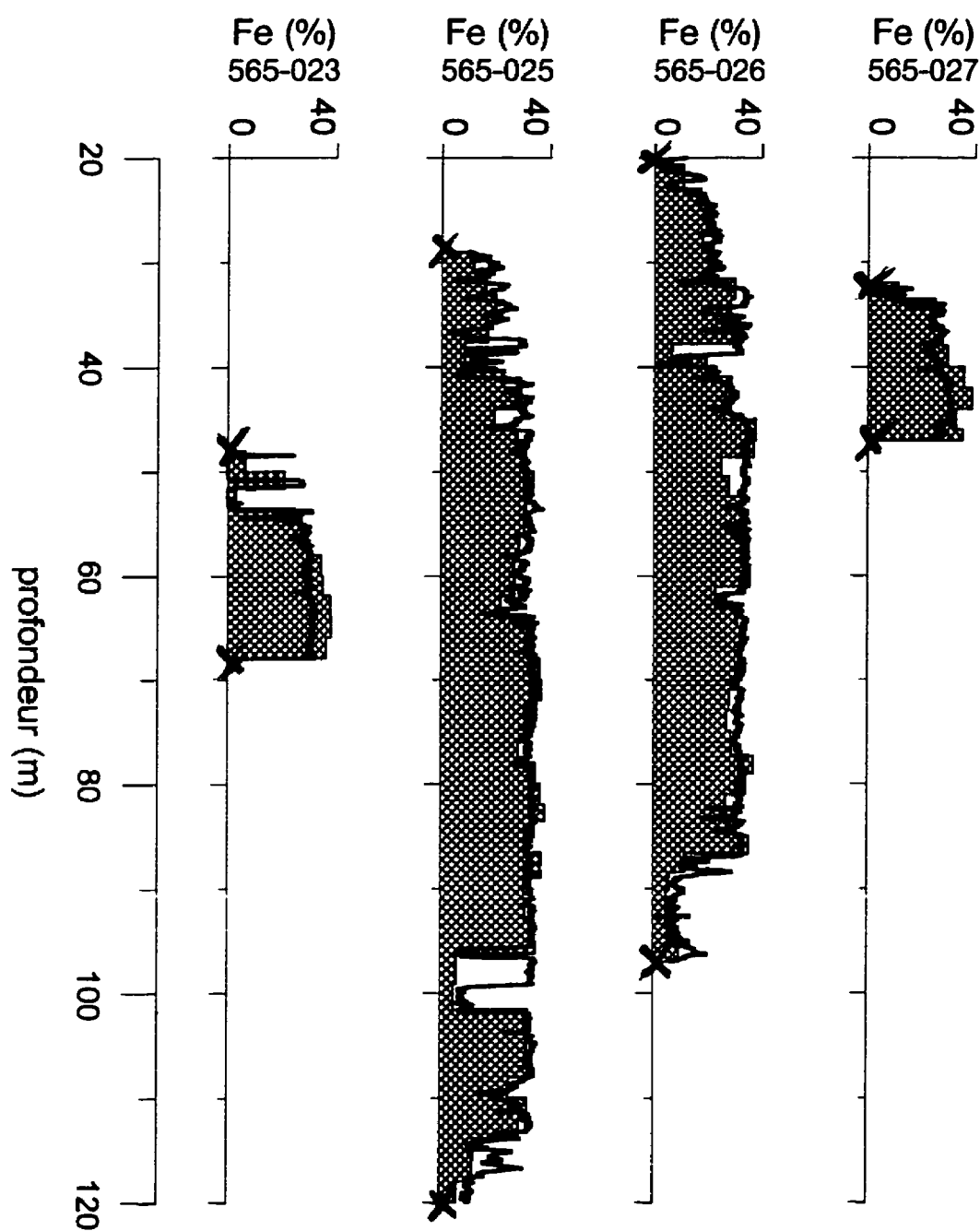


Figure 5.12 Estimation du fer à l'aide du rayonnement gamma-gamma pour les trous du groupe "565"

6. MODÈLES 3D GÉOLOGIQUE ET GÉOPHYSIQUES

L'étude des relations entre les teneurs des métaux et les propriétés physiques nous permet de modéliser ces propriétés de façon tridimensionnelle dans la partie du gisement pour laquelle les teneurs en cuivre, zinc et fer sont connues. Tous ces modèles géophysiques seront propres au gisement et pourront être utilisés comme modèles de départ fiables pour des simulations géophysiques. Ces simulations, qu'elles soient en deux ou trois dimensions, permettraient entre autres d'évaluer le potentiel des méthodes géophysiques entre trous de forage, que ce soit pour la délimitation du minerai ou dans d'autres buts. Ainsi, l'existence des modèles des propriétés physiques rend possible une vaste gamme d'études et d'évaluations géophysiques spécifiques à la région étudiée. On peut aussi utiliser ces modèles en comparant les interprétations géologiques aux résultats géophysiques des simulations et des levés réels. Ces comparaisons et évaluations exhaustives ne font pas partie du présent ouvrage mais sont rendues possibles grâce ce dernier. En plus, nous désirons modéliser, en trois dimensions, les contacts lithologiques majeurs de cette région.

Ce chapitre débute donc par la modélisation tridimensionnelle du contact lithologique majeur rencontré dans la zone étudiée. Ensuite, on présente des formules d'estimation pour trois propriétés physiques (masse volumique, conductivité électrique et vitesse des ondes sismiques de compression) et finalement, pour créer nos modèles géophysiques, on applique ces formules à un modèle tridimensionnel des teneurs fourni par la mine. Le chapitre suivant donne un exemple d'application où l'on

utilise un des modèles géophysiques comme modèle de départ pour des simulations géophysiques que l'on compare aux résultats d'un levé entre trous de forage effectué à Louvicourt Mine en septembre et octobre 1994.

Ainsi, les données dont nous disposons sont de trois types; lithologique, géochimique et géophysique. Nous possédons pour chaque niveau de la mine, les plans de la lithologie. Les mesures chimiques et physiques utilisées pour développer les formules d'estimation proviennent des trois groupes étudiés jusqu'à maintenant dans ce mémoire, et finalement, un modèle tridimensionnel des teneurs en fer, cuivre et zinc nous a été fourni par la mine. C'est sur ce modèle que nous appliquerons les formules d'estimation des propriétés physiques développées à partir des données de nos trois groupes de mesures ("échantillons", "655" et "565").

Les propriétés qui nous intéressent sont la conductivité électrique pour modéliser des levés électromagnétiques, la vitesse des ondes de compression pour modéliser des levés de tomographie sismique par transmission, et finalement la masse volumique pour les levés de sismique réflexion et de gravimétrie.

La région où l'on désire modéliser ces propriétés fait partie de la zone minéralisée et est limitée par les coordonnées suivantes: de 29746N à 29965N (219 mètres), de 30594E à 30864E (270 mètres) et de 2399 à 2723 mètres d'élévation (324 mètres). Les données des groupes "échantillons" et "655" proviennent de trous de forage situés

à l'intérieur de cette zone, tandis que les trous du groupe "565" sont situés juste au-dessus de celle-ci (voir figure 2.1).

La zone étudiée sera divisée en 73 x 90 x 54 blocs (au total 354 780 blocs) de 3 x 3 x 6 mètres auxquels on attribuera des valeurs de conductivité électrique, de vitesse des ondes de compression et de masse volumique. Le choix de la taille des blocs a été fait afin de correspondre au modèle chimique tridimensionnel des teneurs du gisement fait par le personnel de la mine. En effet, ces données géochimiques, telles que fournies par Louvicourt Mine, constituent un modèle tridimensionnel régulier d'une partie de la zone étudiée et pour lequel on a des valeurs de cuivre (%), de zinc (%), d'or (g/t), d'argent (g/t) et de masse volumique (g/cm^3) aux 3 mètres à l'horizontale et aux 6 mètres à la verticale. Les données de masse volumique sont disponibles parce qu'à Louvicourt Mine, cette propriété a été pendant longtemps mesurée de façon routinière sur les échantillons analysés chimiquement.

Pour déterminer les formules d'estimation des propriétés physiques à partir de la géochimie, nous procédons de la même façon qu'au chapitre précédent; par ajustement de courbes représentant les observations et leurs tendances, ainsi que par régression linéaire à multiples variables.

Il reste important de noter qu'on effectue ici ce qu'on appelle en statistique un changement de support. En effet, les régressions développées pour estimer la conductivité électrique et la vitesse des ondes de compression sont établies sur des supports de la

taille d'une carotte de forage mais on les applique ici à des blocs de 3 x 3 x 6 mètres. Ainsi, pour respecter rigoureusement les règles de la statistique, nos équations ne devraient pas être utilisées pour de tels blocs. On se permet toutefois de les utiliser ici en étant conscient que les modèles obtenus seront des approximations. De plus, on doit réaliser que les teneurs des blocs sont estimées et non mesurées, amplifiant ainsi le caractère approximatif des modèles. Une technique plus élaborée d'approximation statistique appelée cokrigage serait plus appropriée à notre cas.

6.1 Modélisation de la géologie

Le logiciel Gocad®, développé à l'École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, a été utilisé pour créer la surface de contact lithologique. C'est ce même logiciel qui est utilisé pour imager la zone étudiée et pour créer les modèles géophysiques de blocs.

On retrouve à la figure 6.1 une image de cette surface qui représente le contact géologique majeur entre les deux lithologies les plus importantes de cette région (rhyodacite et tuf) ainsi que la trace des trous 655-284 et -302. Le prisme rectangulaire noir représente les limites de la zone étudiée. Il devient important de mentionner que cette surface de contact géologique ne donne pas une représentation exacte de la géologie puisqu'elle a été développée à partir des descriptions géologiques faites seulement dans les galeries de la mine (les niveaux d'exploitation sont situés environ à chaque 30 mètres). Ainsi, il n'est pas surprenant que les

contacts entre le tuf et la rhyodacite tels qu'imaginés sur cette figure ne correspondent pas exactement à ceux décrits dans les relevés de forage des trous. La surface nous donne toutefois une idée de la tendance générale du contact réel.

Si l'on remplit la zone étudiée par de petits cubes de 3 par 3 par 6 mètres auxquels on assigne une couleur représentant un type rocheux, on obtient l'image de la figure 6.2 où la rhyodacite est représentée en jaune et le tuf en vert. Les lentilles de sulfures massifs (minéral) se retrouvent dans le tuf mais ne sont pas modélisées et ni illustrées dans ces images à cause de la grande complexité de leur géométrie et d'un manque de temps et de ressources. La modélisation de ces lentilles serait la prochaine étape logique à cette étude. Ces deux représentations de la géologie (surface de contact lithologique et modèle de blocs) seront utiles afin de comparer les interprétations de levés géophysiques (réels ou simulés) avec l'interprétation géologique faite à partir des descriptions des galeries à chaque niveau d'exploitation de la mine. Aussi, on peut assigner à chaque lithologie (modèle de la figure 6.2) des valeurs moyennes constantes des propriétés géophysiques telles que calculées au chapitre quatre. Ces modèles peuvent alors servir de modèles de départ pour des simulations de levés géophysiques ou lors de l'inversion de données réelles recueillies lors de levés.

6.2 Modélisation de la vitesse des ondes de compression

Deux sources de données sont disponibles. En effet, des mesures de la vitesse des ondes de compression ont été prises en laboratoire sur nos échantillons (groupe

“échantillons”) et des mesures in situ ont été prises par diagraphie dans les trous du groupe “655”. Il est important de noter que les mesures de ces deux groupes de données ont été prises dans des conditions de stress, ainsi qu’à des fréquences et des échelles différentes. La géochimie mesurée sur les échantillons est plus précise, tel que mentionné au chapitre 4, par contre le levé de diagraphie offre des mesures in situ et un nombre d'observations beaucoup plus élevé (133 par rapport à 34). Par l'étude du chapitre cinq, on sait que la teneur en fer est la plus fortement liée aux mesures de V_p . Les coefficients de corrélation simple qui relient ces variables sont présentés aux tableaux 5.2 et 5.5.

Les diagrammes binaires de la vitesse des ondes de compression mesurée sur les échantillons en fonction du cuivre, du zinc et du fer sont présentés à la figure 6.3. Aucun type d'ajustement ni la régression linéaire à multiples variables n'a permis de déterminer une formule fiable pour estimer la vitesse ondes de compression par les teneurs puisqu'aucun lien fort ne semble relier cette propriété aux teneurs des échantillons.

La figure 6.4 montre les diagrammes binaires utilisés pour estimer la vitesse des ondes de compression mesurée en diagraphie à partir des teneurs. Le cuivre et le zinc ne peuvent de façon individuelle estimer V_p , mais le fer en permet une approximation. En effet, un lien linéaire de force $r = 0,63$ relie le fer à V_p . Il ne faut toutefois pas négliger l'étendue des observations de chaque côté de la droite et les erreurs commises. La droite produite est la meilleure au sens des moindres carrés

mais ne permet pas un ajustement idéal des données. La figure 6.4e montre le résultat obtenu par régression linéaire à multiples variables. Cette régression utilise le fer, le cuivre et le zinc et obtient un coefficient R^2 de 0,50 (à comparer à $R^2 = 0,63^2 = 0,4$ pour le fer seulement) et une erreur moyenne de 144 mètres par seconde. L'ajout des variables cuivre et zinc permet de transformer la droite de régression en un volume et donc d'expliquer un peu mieux les observations. L'or et l'argent n'ont pas permis d'améliorer la régression de façon significative. Le tableau suivant liste les deux formules d'estimation de V_p par les mesures chimiques.

Tableau 6.1 Formules d'estimation de la vitesse des ondes de compression basées sur les levés diagraphiques du groupe "655"

éléments chimiques retenus	formule d'estimation de la vitesse des ondes de compression (km/s)	erreur moyenne (km/s)	coefficient de corrélation
fer (%)	$V_p = 0,0193943 \text{ Fe} + 6,03477$	0,16	$R^2 = 0,40$
fer (%), cuivre(%), zinc (%)	$V_p = 0,0230\text{Fe} - 0,0350\text{Cu} - 0,0364\text{Zn} + 6,0628$	0,14	$R^2 = 0,50$

Ces équations concordent très bien avec les résultats de Salisbury et *al.* (1996). En effet, leur recherche démontre qu'à pression constante, la vitesse des ondes de compression croît avec la quantité de pyrite (fer) et décroît avec les quantités de chalcoppyrite (cuivre) et de sphalérite (zinc). Ils trouvent aussi que c'est la pyrite qui influence le plus V_p . De plus, la relation linéaire entre V_p et les quantités de pyrite de

leurs échantillons a une pente d'environ 0,02 et une ordonnée à l'origine de 6,0 km/s. Les équations d'estimation listées au tableau 6.1 ont ces mêmes valeurs de pente et d'ordonnée à l'origine.

Ainsi, la vitesse des ondes de compression n'est que grossièrement estimable, et ce à l'aide principalement de la teneur en fer. Nos estimations du tableau 6.1 sont toutefois les meilleures possibles à partir des données disponibles. Il faudra donc être vigilant lors de l'utilisation des modèles des vitesses sismiques puisque l'erreur associée à nos estimations est particulièrement élevée. En effet, les modèles de V_p montrés aux figures 6.5 et 6.6 ne sont pas uniques ni précis. Dans le premier modèle (figure 6.5), nous avons utilisé directement la formule d'estimation de la vitesse des ondes de compression à partir du fer seulement et dans le second (figure 6.6) nous avons utilisé la formule d'estimation établie à partir du fer, du cuivre et du zinc. Les vitesses des régions non-minéralisées, pour lesquelles les données géochimiques ne sont pas disponibles, ont des valeurs de 6,03 et 6,06 km/s respectivement. Ces valeurs correspondent aux ordonnées à l'origine de nos équations de prédictions. Afin de créer ces deux modèles géophysiques, les formules d'estimation déterminées à partir d'un support de la taille d'une carotte de forage ont été appliquées directement aux teneurs estimées fournies dans le modèle chimique de la mine (blocs). Les figures ne montrent que trois plans faisant partie des modèles 3D mais des valeurs de vitesse des ondes de compression ont été calculées pour chacun des petits blocs constituant ces modèles. Les lignes rouges représentent les traces des trous 655-284 et -302.

6.3 Modélisation de la conductivité électrique

Les mesures de conductivité électrique proviennent aussi de deux sources. Des mesures ont été prises à cinq fréquences sur les échantillons, et des mesures in situ ont été prises par diagraphie dans les trous du groupe "565".

Pour expliquer les conductivités électriques par les mesures chimiques, on utilise la même technique qu'à la section précédente.

À partir des mesures prises sur les échantillons, on obtient, tel que prévu par le chapitre précédent, que le cuivre et le fer sont les deux éléments permettant le mieux d'expliquer les mesures de conductivité. Les figures 6.7, 6.8 et 6.9 montrent les diagrammes binaires et les courbes d'estimation obtenues pour prédire le logarithme conductivité à partir du cuivre, du zinc et du fer respectivement. Les courbes respectant le mieux les données au sens des moindres carrés sont de type "logarithmique avec puissance". Les équations transformées pour prédire les conductivités ainsi que les erreurs moyennes sont listées au tableau 6.2. On doit noter que le fait d'avoir estimé le logarithme des conductivités plutôt que les conductivités directement introduit un biais et provoque une légère sous-estimation des valeurs. On observe sur les graphes des erreurs en fonction de la conductivité des figures 6.7 et 6.9 que les erreurs sont faibles pour les valeurs de conductivité inférieures à 1 S/m (roches résistantes), et plus élevées pour les autres mesures

(minéral). Aucune équation n'a pu être développée pour estimer la conductivité électrique à partir du zinc.

Tableau 6.2 Formules d'estimation de la conductivité des échantillons

élément chimique retenu	fréquence de la conductivité	formule d'estimation de la conductivité électrique en S/m	erreur moyenne (S/m)
cuivre (%)	1 kHz	$\sigma_{1\text{kHz}} = \text{Cu}^{2,33311} \times 0,347465$	7,84
cuivre (%)	10 kHz	$\sigma_{10\text{kHz}} = \text{Cu}^{2,18287} \times 0,394957$	6,81
cuivre (%)	100 kHz	$\sigma_{100\text{kHz}} = \text{Cu}^{1,97756} \times 0,45608$	5,52
cuivre (%)	1 MHz	$\sigma_{1\text{MHz}} = \text{Cu}^{1,72773} \times 0,51709$	4,46
cuivre (%)	10 MHz	$\sigma_{10\text{MHz}} = \text{Cu}^{1,48082} \times 0,5134$	1,97
fer (%)	1 kHz	$\sigma_{1\text{kHz}} = \text{Fe}^{6,36951} \times 4,96697 \times 10^{-9}$	7,02
fer (%)	10 kHz	$\sigma_{10\text{kHz}} = \text{Fe}^{5,835041} \times 1,89782 \times 10^{-8}$	6,85
fer (%)	100 kHz	$\sigma_{100\text{kHz}} = \text{Fe}^{5,34502} \times 1,1403 \times 10^{-7}$	6,37
fer (%)	1 MHz	$\sigma_{1\text{MHz}} = \text{Fe}^{4,64328} \times 9,30825 \times 10^{-7}$	4,91
fer (%)	10 MHz	$\sigma_{10\text{MHz}} = \text{Fe}^{3,99368} \times 5,94926 \times 10^{-6}$	2,19

Aucune combinaison de mesures chimiques n'a pu, grâce à la régression linéaire à multiples variables, expliquer la conductivité des échantillons de façon plus satisfaisante que les formules ci-haut mentionnées. Une relation non-linéaire à multiples variables (cuivre et fer) pourrait être plus adéquate pour estimer la conductivité électrique. Le développement d'une telle équation n'a toutefois pas été

tenté ici. En effet, dans le domaine multi-variables, notre étude se restreint aux régressions linéaires.

Les diagrammes binaires de la conductivité électrique des levés de diagraphie du groupe "565" sont présentés à la figure 6.10. On trouve seulement un ajustement pour expliquer la conductivité. Il est de type linéaire (mais illustré avec un axe logarithmique) et utilise la teneur en cuivre comme seule variable explicative. Aucune combinaison des mesures chimiques n'a pu formuler une façon plus appropriée pour estimer la conductivité. La formule d'estimation développée à partir du cuivre, ainsi que l'erreur moyenne associée et le coefficient de corrélation simple sont donnés au tableau suivant. Malheureusement, cette formule estime la conductivité électrique en millivolt. Cette unité n'est pas directement une mesure de conductivité, et des modèles de conductivité ainsi définis ne pourraient servir directement de base lors de simulation géophysique électromagnétique. Il faudrait, avant de faire de telles simulations, établir une table de conversion entre les mesures prises en millivolts et l'unité standard de conductivité électrique, le siemens par mètre. La création d'une telle table de conversion ne fait toutefois pas partie de la présente étude.

Tableau 6.3 Formule d'estimation de la conductivité - groupe "565"

élément chimique retenu	formule d'estimation de la conductivité électrique en mV	erreur moyenne (mV)	coefficient de corrélation
cuivre (%)	$\sigma = 4,44603\text{Cu} + 0,396224$	5,22	$r = 0,84$

Ainsi, le cuivre et le fer sont les éléments permettant le mieux d'estimer la conductivité électrique. Plusieurs formules ont été développées. On les retrouvent dans les deux tableaux précédents.

L'image de la figure 6.11 montre le modèle de la conductivité électrique à une fréquence de 1 MHz directement estimée à partir du cuivre (quatrième équation du tableau 6.2). Encore une fois, on ne montre que certains plans du modèle 3D. Les régions non-minéralisées ont des valeurs nulles de conductivité.

6.4 Modélisation de la masse volumique

La masse volumique a été mesurée de façon systématique sur quelques milliers d'échantillons analysés pour leur contenu chimique. Par la suite, la formule suivante a été développée à Louvicourt Mine afin de l'estimer là où elle n'est pas directement mesurée.

$$mv = \frac{\frac{22680}{8400 - 83,094Fe - 13,698Cu - 38,6876Zn} - 0,094884}{0,97099} \quad (6.1)$$

Dans cette formule, mv représente la masse volumique en g/cm³, et Fe, Cu et Zn les teneurs en fer, cuivre et zinc en pourcentages. On remarque dans cette formule que l'élément influençant le plus la masse volumique est le fer. Ceci, en accord avec nos analyses précédentes.

Le modèle de la figure 6.12 représente donc quelques plans du modèle créé grâce aux valeurs de masse volumique fournies par Louvicourt Mine. Les régions non-minéralisées, pour lesquelles les données géochimiques ne sont pas disponibles, ont des valeurs nulles de masse volumique. Il serait toutefois préférable et beaucoup plus réaliste de remplacer ces valeurs nulles par $2,68 \text{ g/cm}^3$, valeur obtenue par l'équation 6.1 lorsque les quantités de fer, de cuivre et de zinc sont nulles, avant d'utiliser ce modèle.

6.5 Conclusion

Une surface représentant le contact lithologique entre la rhyodacite et le tuf a été dessinée (en trois dimensions) à partir de tracés bidimensionnels provenant des niveaux d'exploitation de la mine. Elle permet d'établir des régions géologiques et de leur approprier des valeurs propres de mesures physiques telles qu'établies selon les types rocheux au chapitre 4. Ce modèle pourra servir de modèle de départ pour des simulations de levés géophysiques. Aussi, ces représentations tridimensionnelles de la géologie serviront à titre de base lors de l'interprétation des résultats de levés géophysiques réels ou simulés.

De nombreuses formules d'estimations ont été établies pour estimer de façon approximative la conductivité électrique et la vitesse des ondes de compression à partir des quantités de cuivre, fer et zinc mesurées dans nos échantillons et fournies dans les relevés de forage de la mine. La vitesse des ondes de compression est le

mieux expliqué par le fer et la conductivité électrique par le cuivre. La masse volumique à chaque bloc de notre modèle a été directement fournie par Louvicourt Mine.

Une fois que chaque bloc des modèles s'est vu attribué des valeurs approximatives de conductivité, de vitesse sismique ou de masse volumique à partir des formules d'estimation, les possibilités d'utilisation des modèles de propriétés physiques deviennent infinies. Une vaste gamme d'applications est en effet possible. On peut utiliser les modèles pour simuler des levés, pour évaluer leur faisabilité et prévoir le type et l'utilité de résultats à anticiper ou encore pour planifier la géométrie de futurs levés. La comparaison entre des tomogrammes de simulations et de levés réels permet aussi toutes sortes d'études géophysiques (voir chapitre 7).

De plus, comme les valeurs utilisées pour créer nos modèles sont propres aux roches du gisement Louvicourt, elles sont beaucoup plus fiables que des valeurs tirées de diverses publications pour lesquelles les mesures ont été prises sur des roches possiblement de même type, mais sûrement pas identiques.

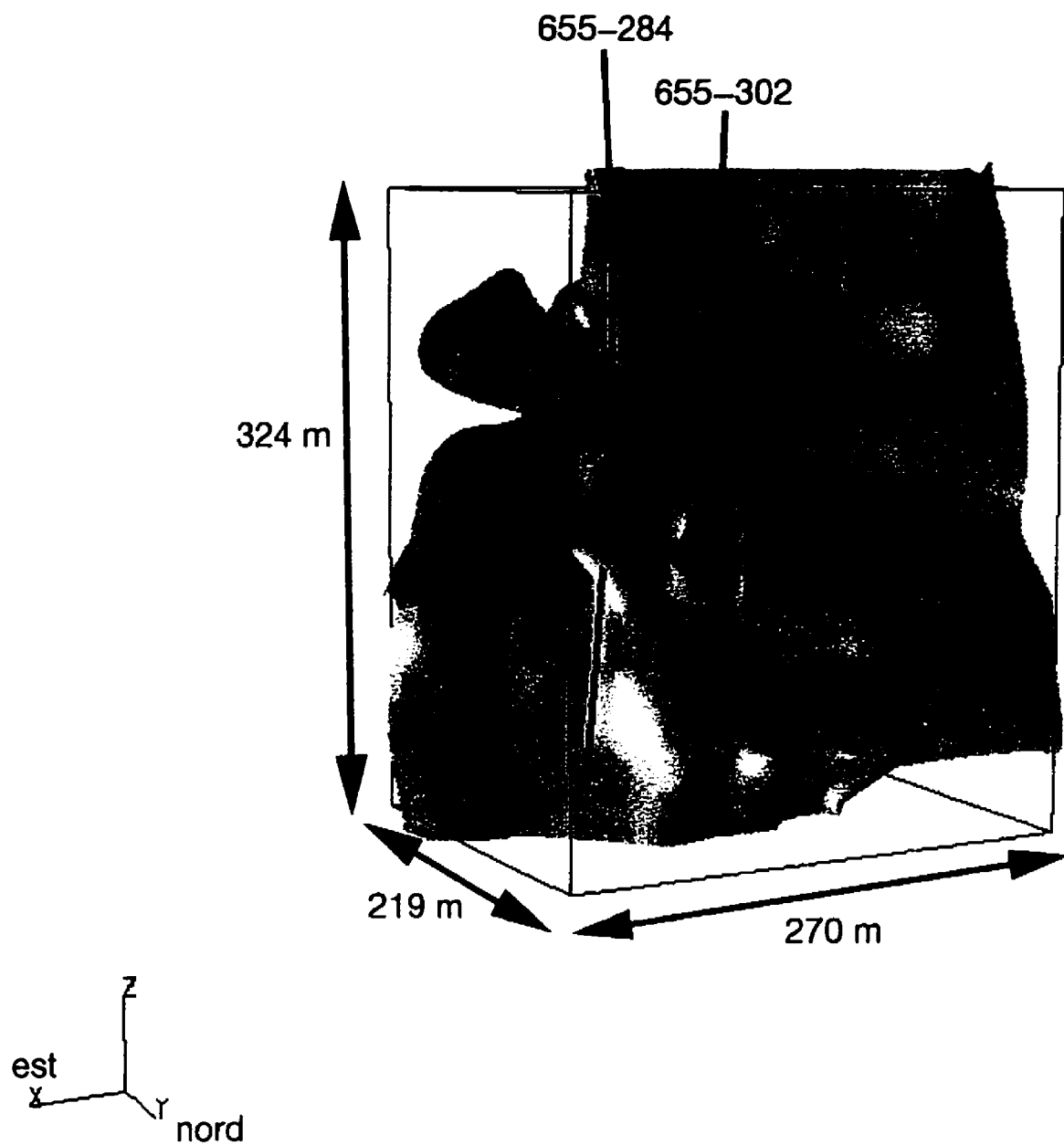


Figure 6.1 Surface de contact lithologique entre le tuf et la rhyodacite

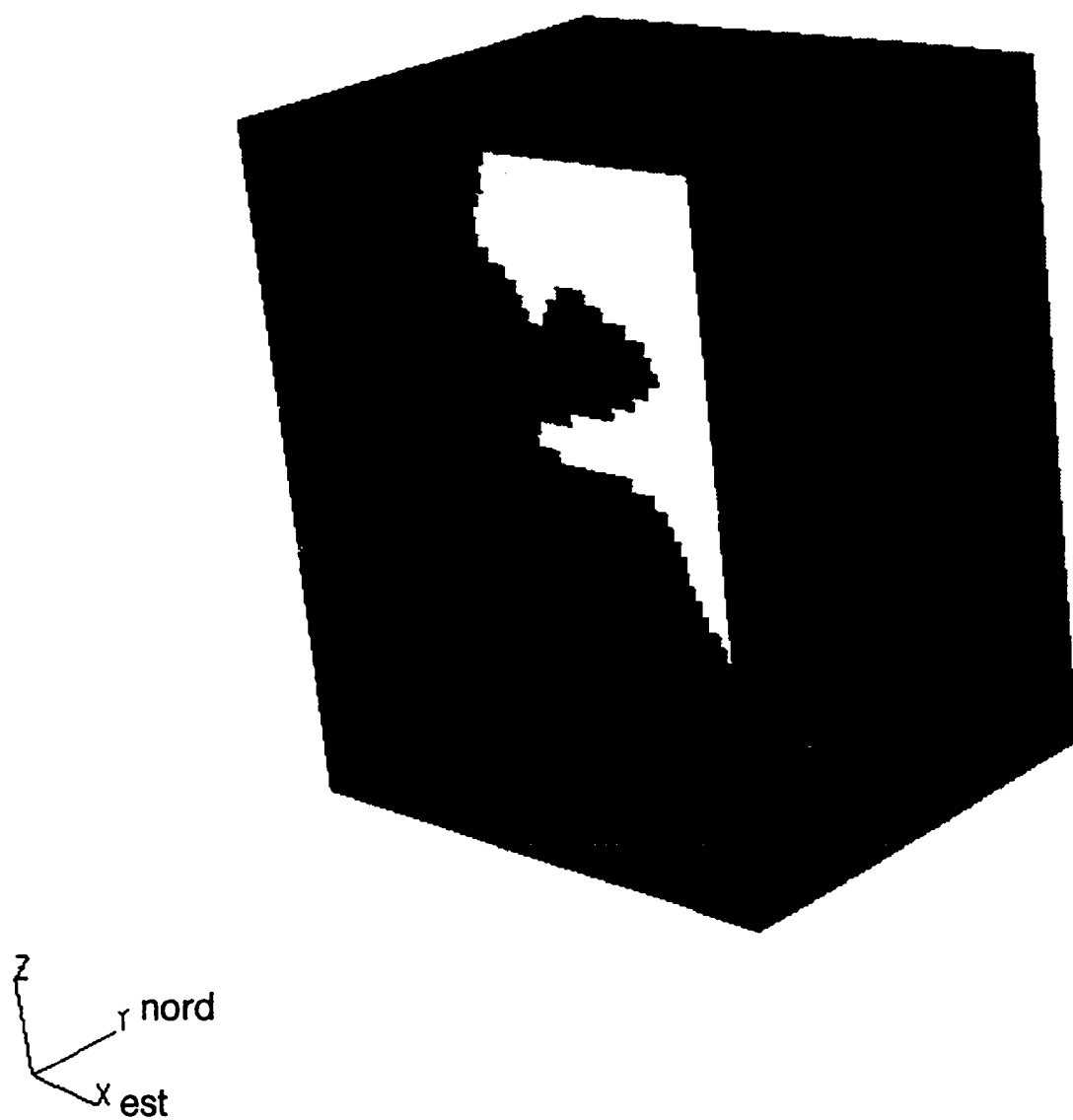
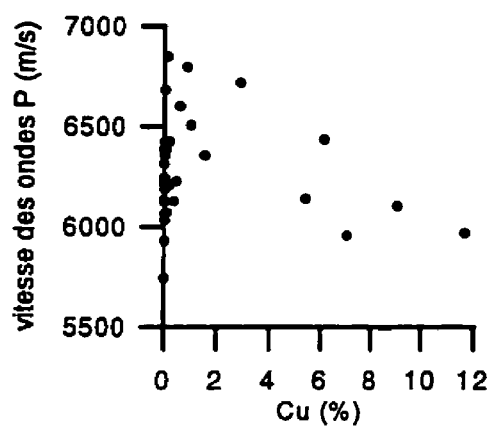
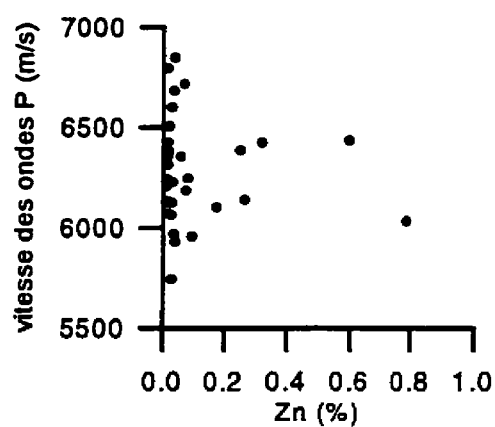


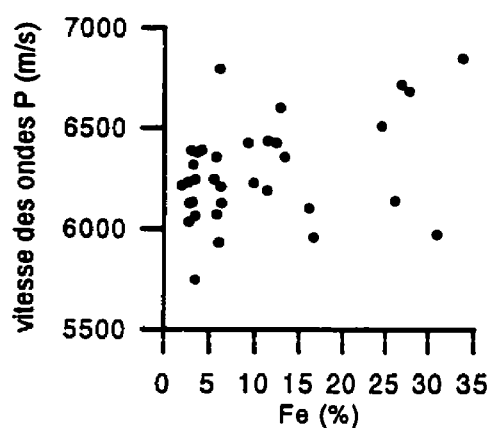
Figure 6.2 Modèle de blocs des types lithologiques



a)

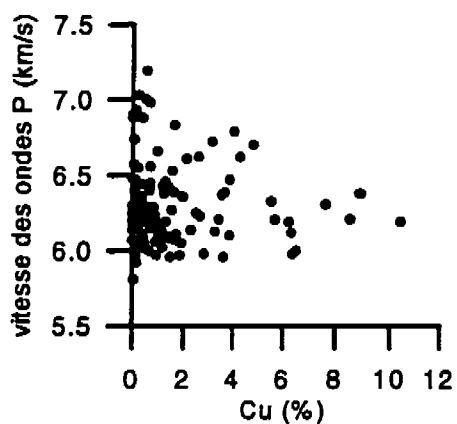


b)

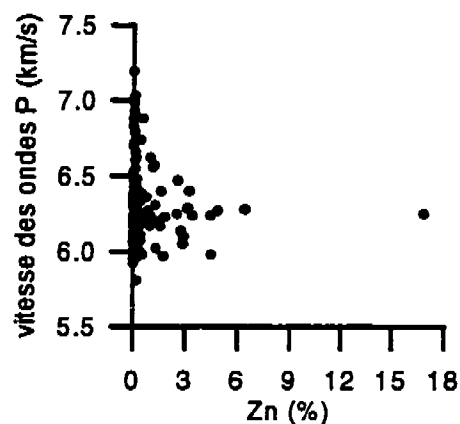


c)

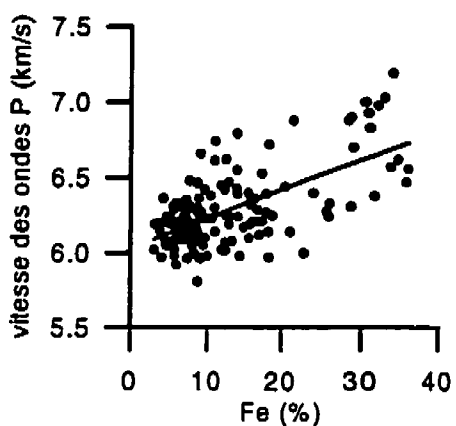
Figure 6.3 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la vitesse des ondes de compression pour le groupe "échantillons"



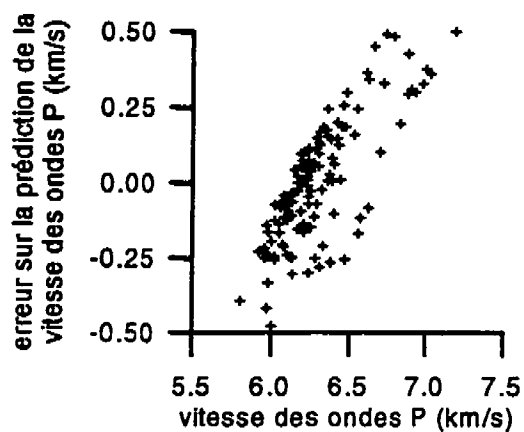
a)



b)

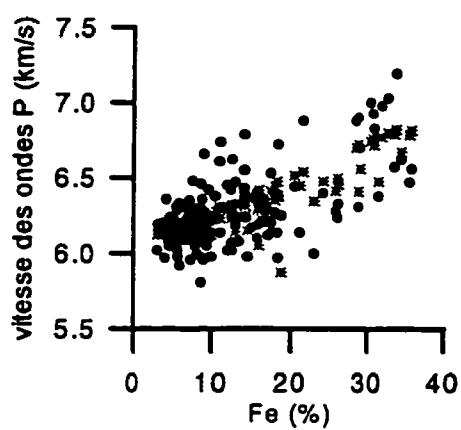


c)

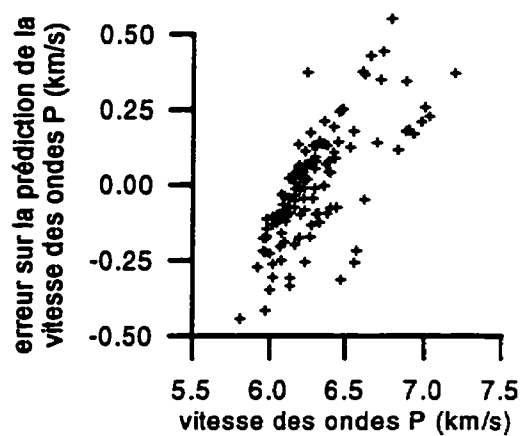


d)

Figure 6.4 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la vitesse des ondes de compression à partir des levés du groupe "655"



e)



f)

Figure 6.4 (suite)

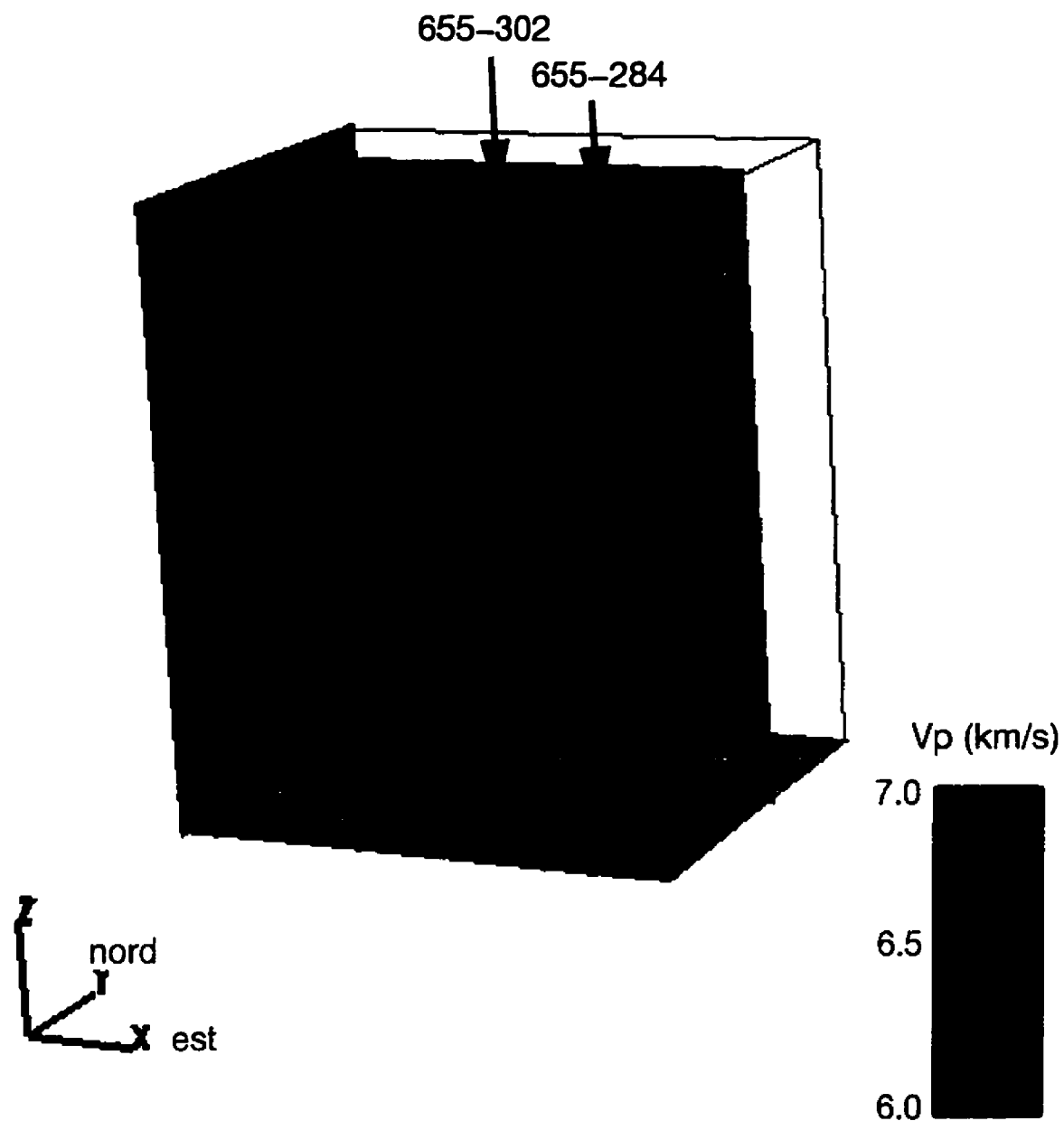


Figure 6.5 Modèle de la vitesse des ondes de compression estimée à partir du fer

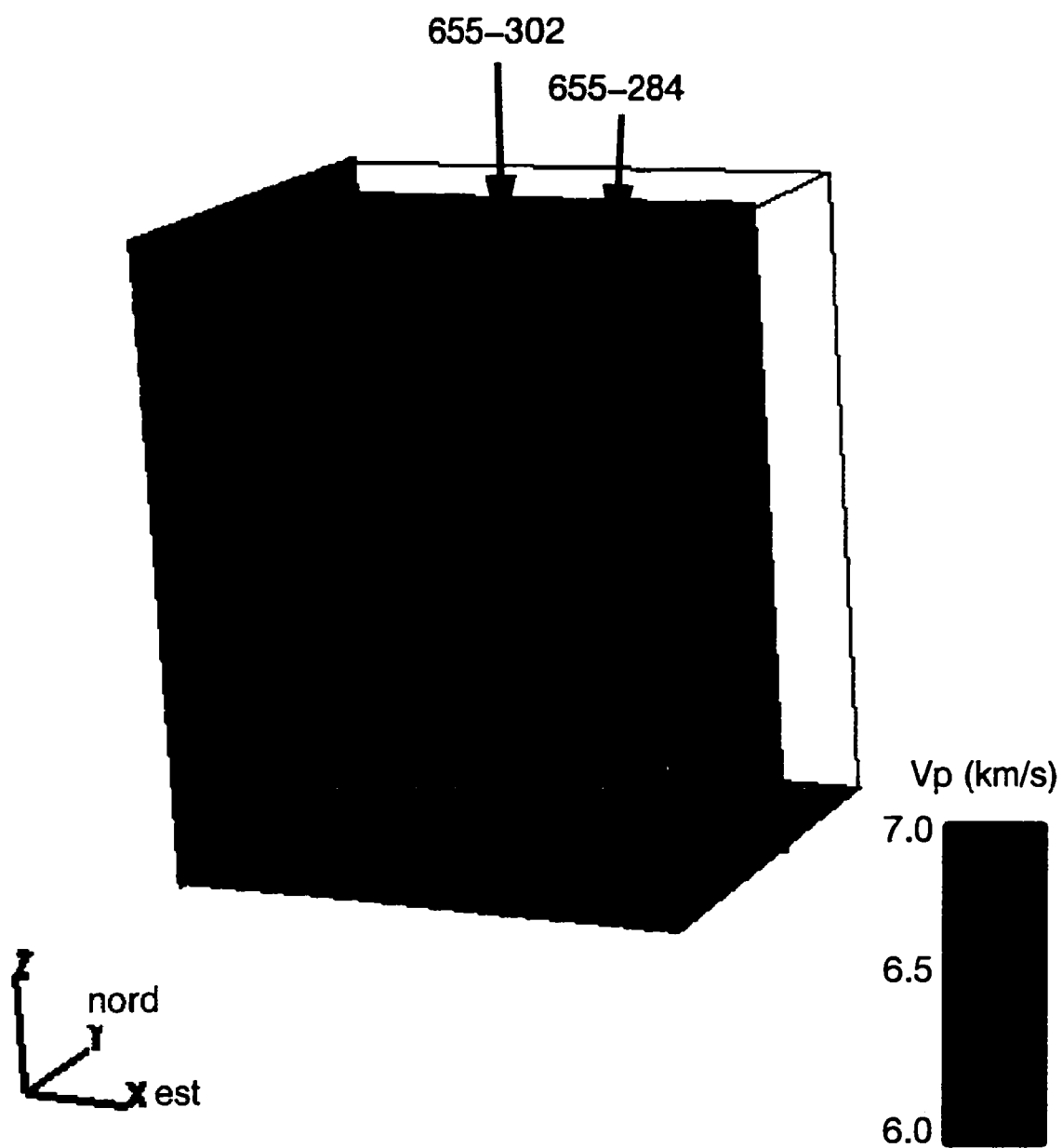


Figure 6.6 Modèle de la vitesse des ondes de compression estimée à partir du fer, du cuivre et du zinc

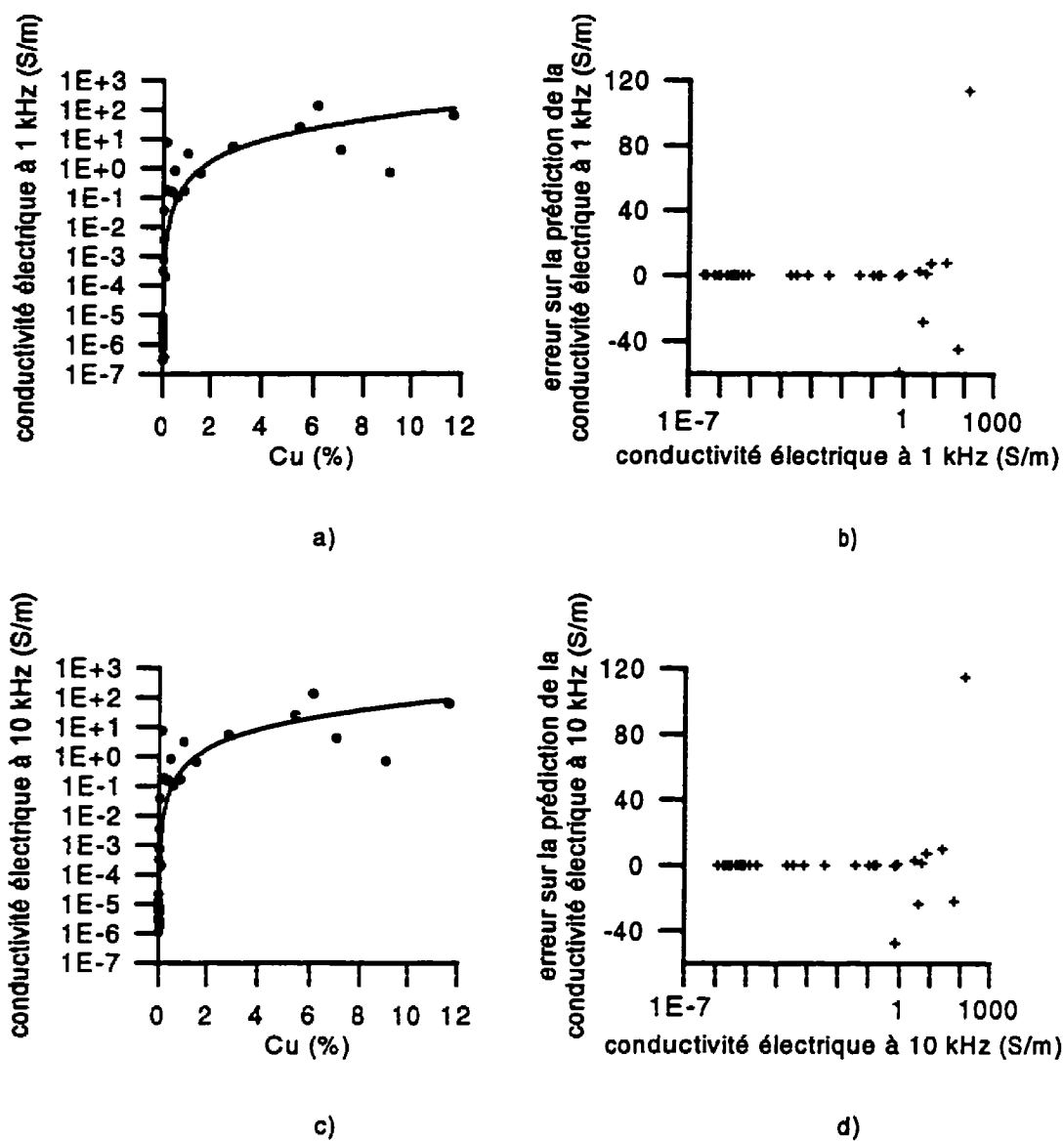
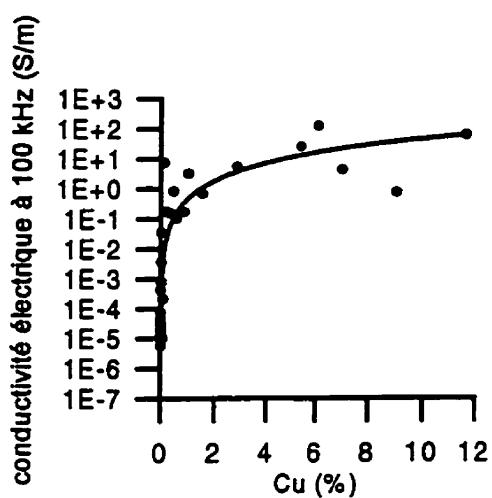
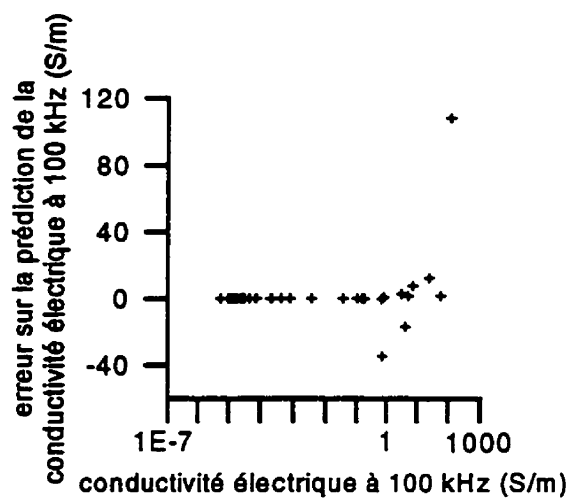


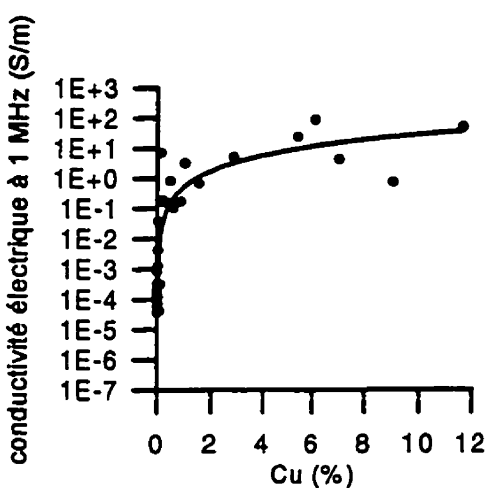
Figure 6.7 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la conductivité électrique à partir du cuivre



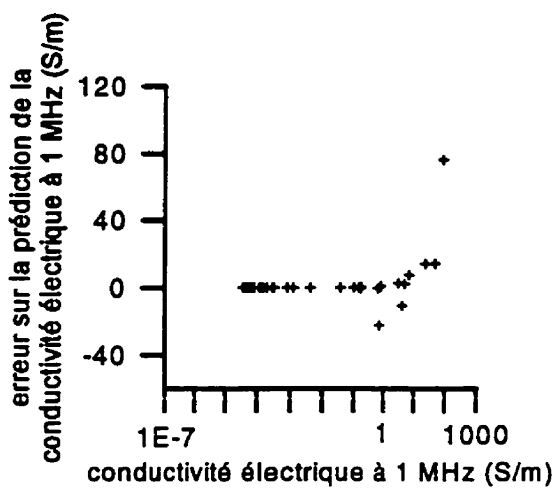
e)



f)

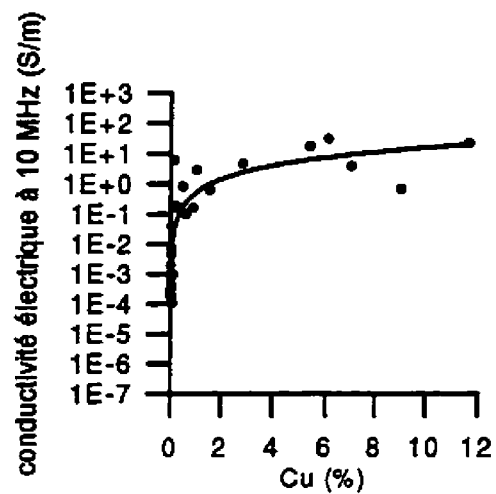


g)

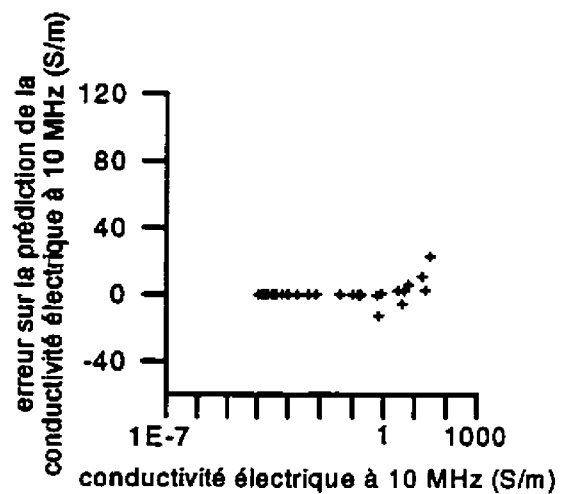


h)

Figure 6.7 (suite)



i)



j)

Figure 6.7 (suite)

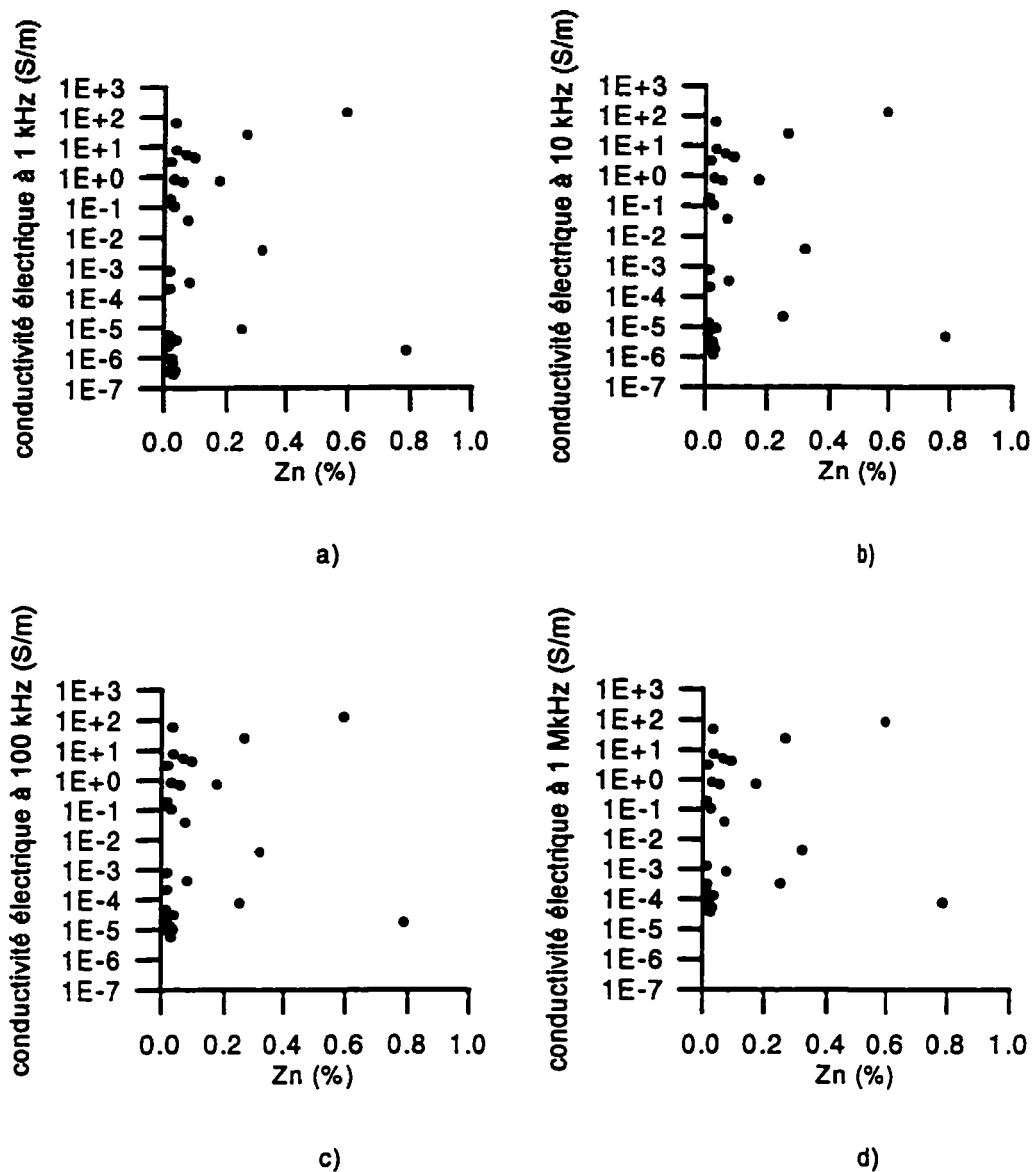
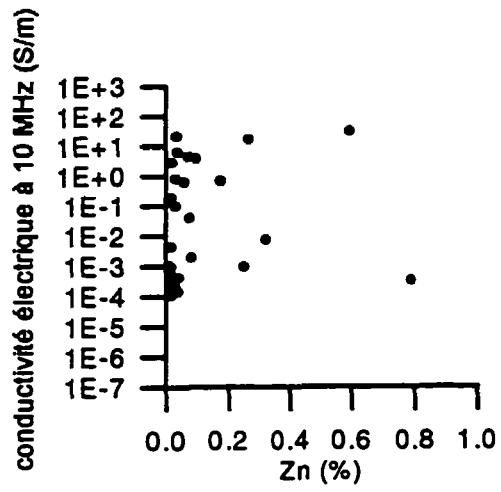


Figure 6.8 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la conductivité électrique à partir du zinc



e)

Figure 6.8 (suite)

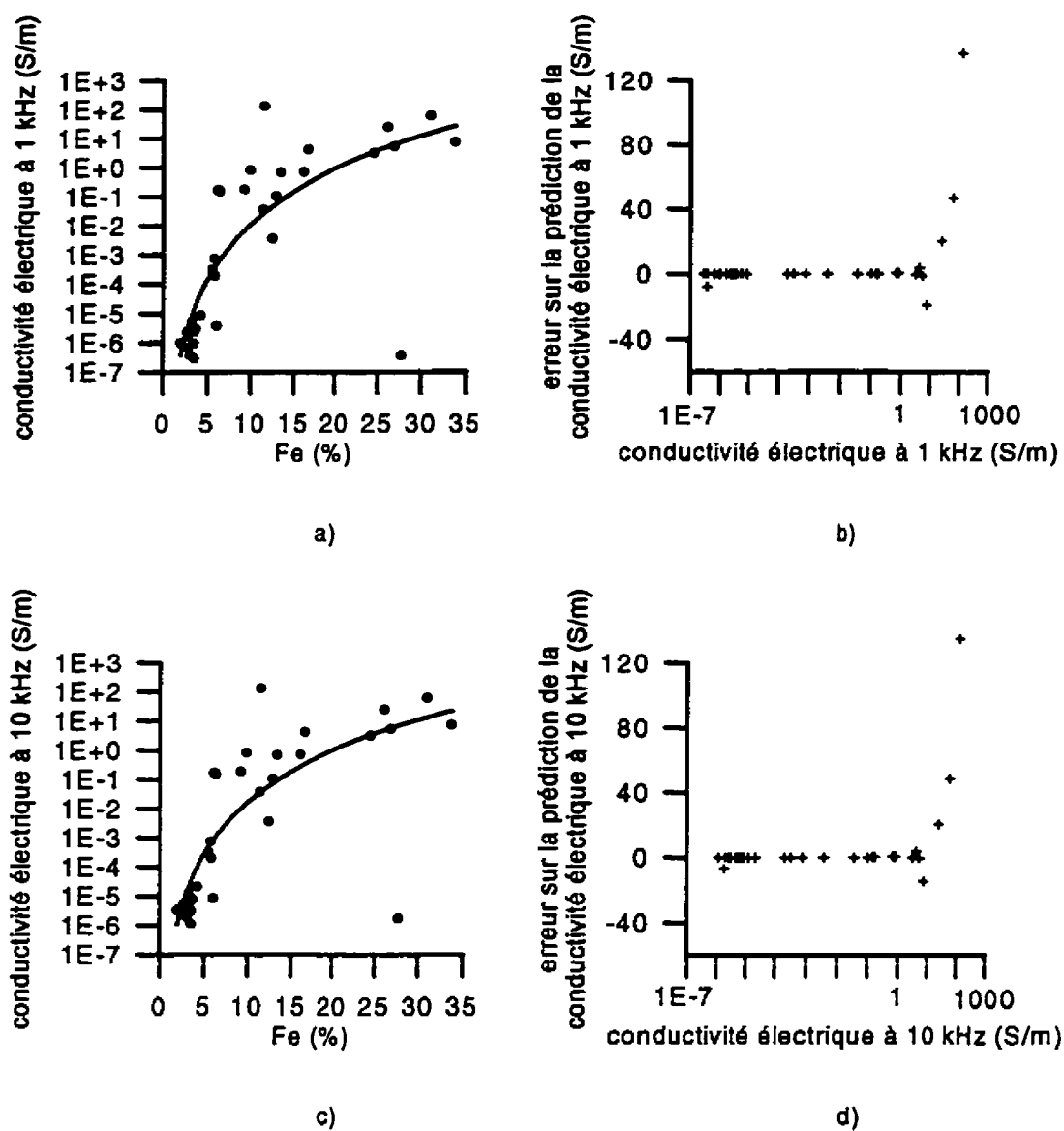
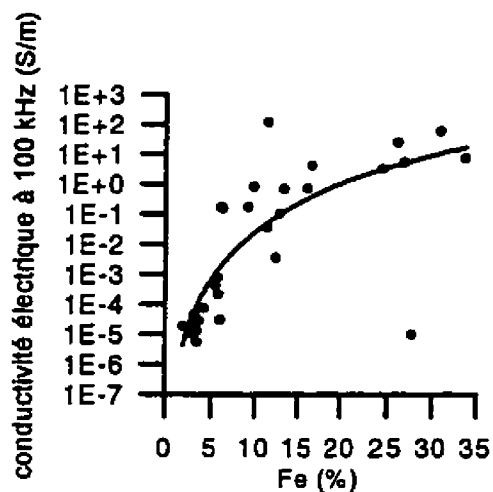
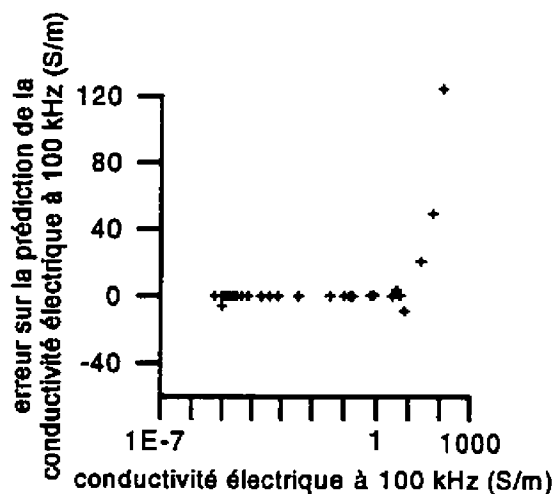


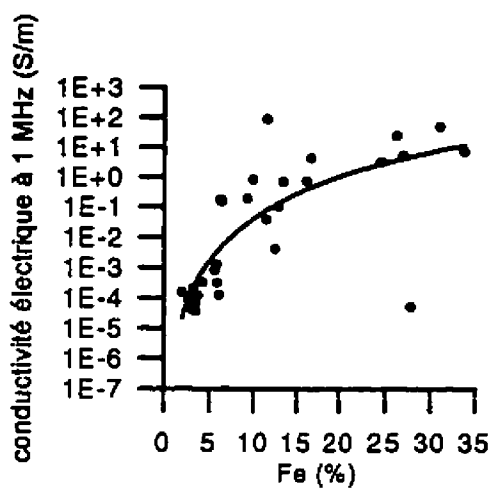
Figure 6.9 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la conductivité électrique à partir du fer



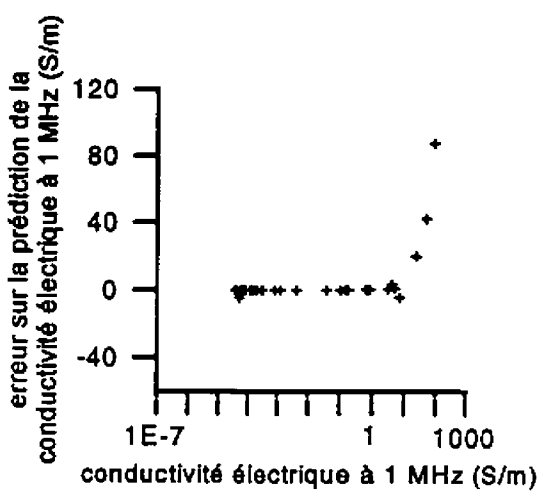
e)



f)

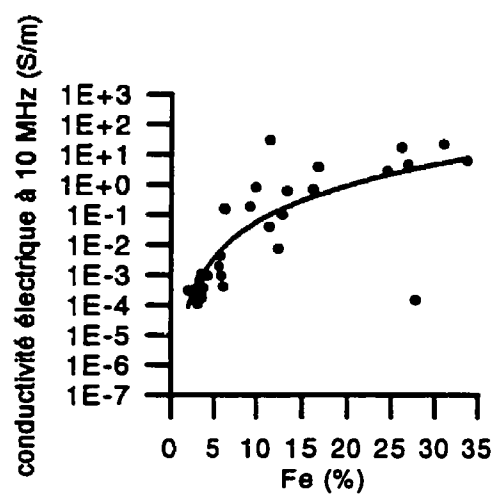


g)

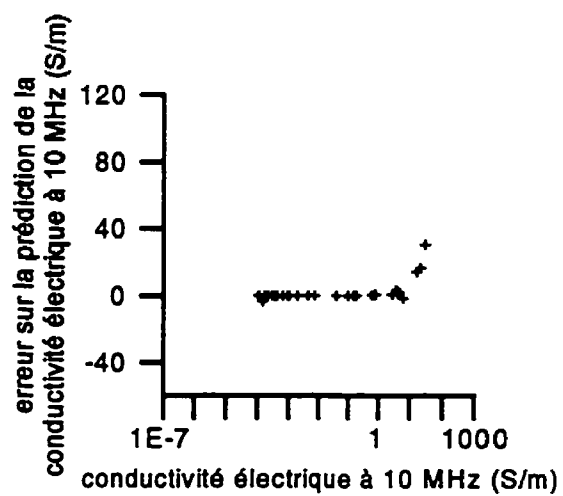


h)

Figure 6.9 (suite)



i)



j)

Figure 6.9 (suite)

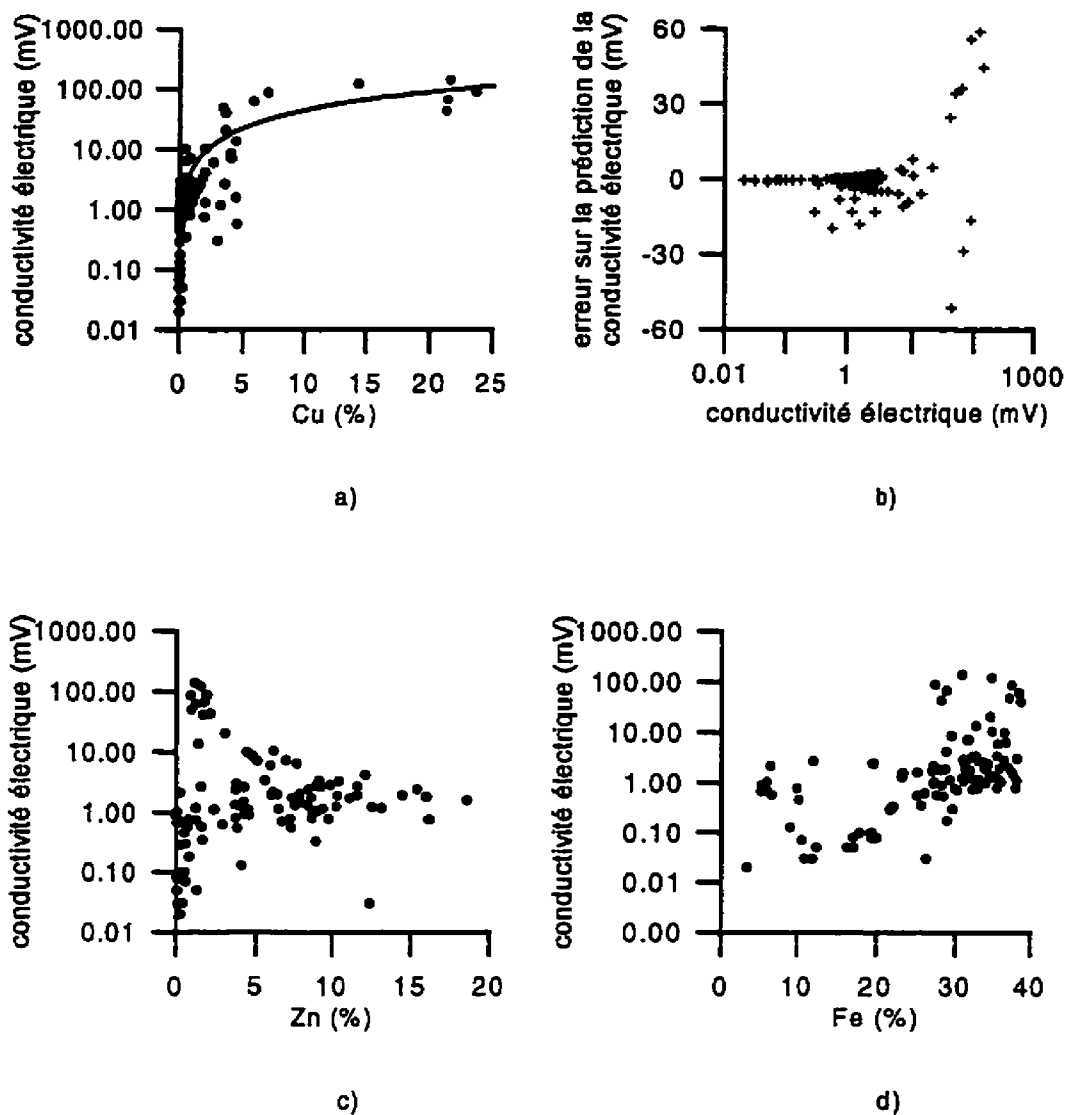


Figure 6.10 Diagrammes binaires utilisés pour la prédiction de la conductivité électrique à partir des levés diagraphiques du groupe "565"

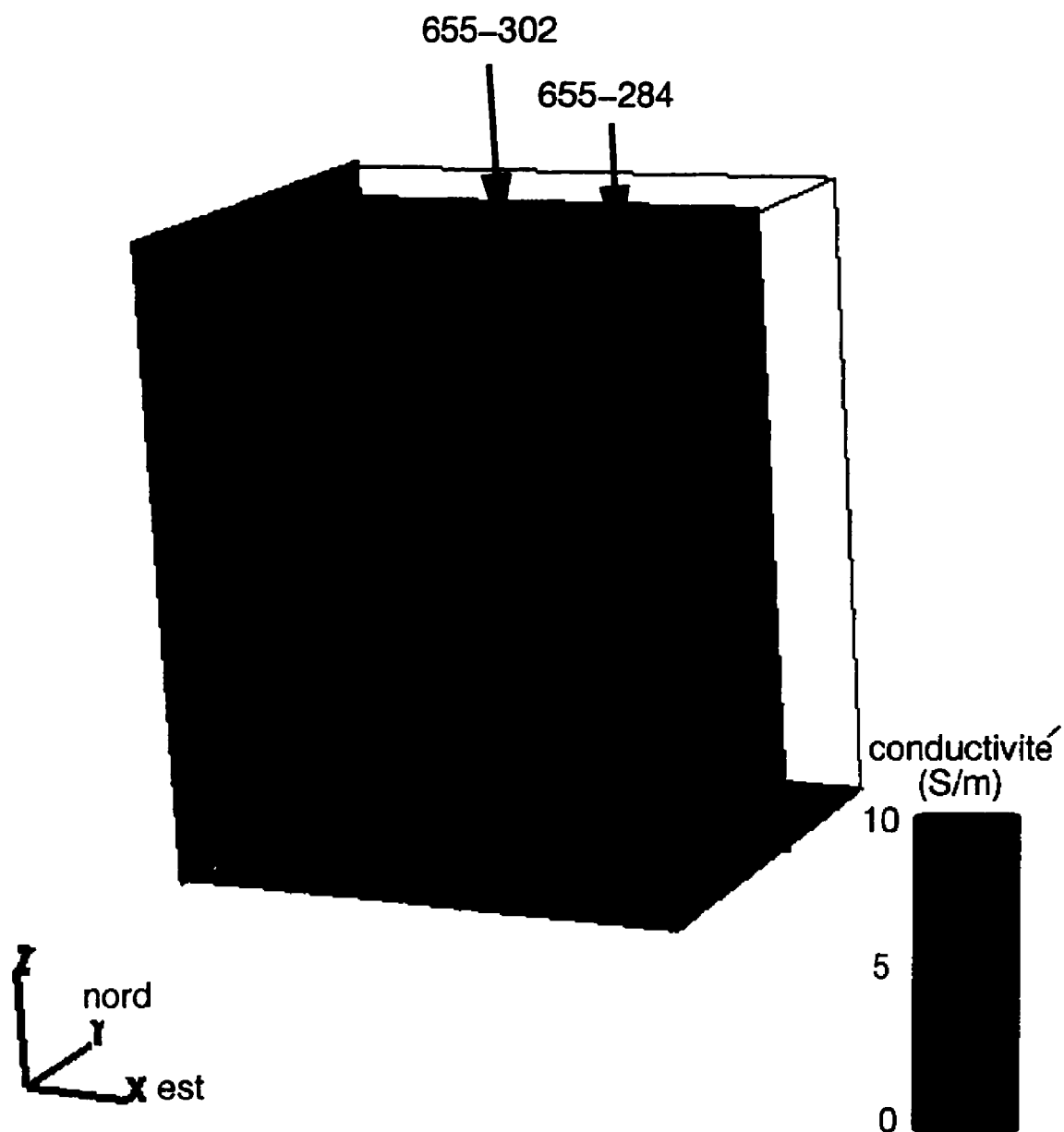


Figure 6.11 Modèle de la conductivité électrique à 1 MHz estimée à partir du cuivre

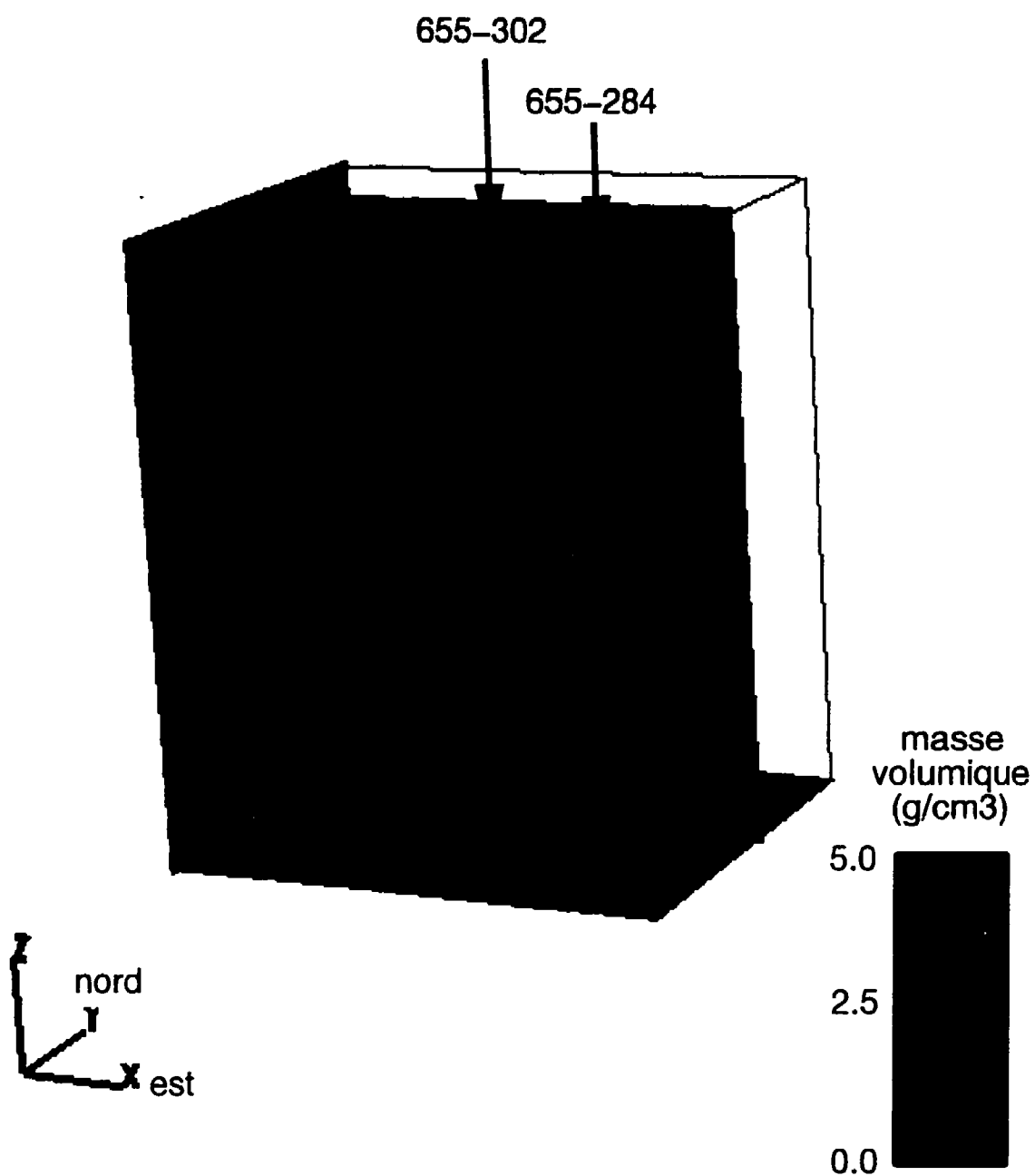


Figure 6.12 Modèle de la masse volumique

7. EXEMPLE D'UTILISATION DES MODÈLES

Nous présentons maintenant un exemple d'utilisation des modèles de propriétés physiques développés au chapitre précédent. Cet exemple est de type sismique et utilise le modèle de la vitesse des ondes de compression estimée à partir du fer, du cuivre et du zinc. On extrait les propriétés physiques du modèle (3D) sur un plan (2D) par lequel passent les trous de forage 655-284 et -302 et on utilise ensuite les vitesses des ondes de compression transposées sur ce plan comme modèle de départ pour générer des temps de premières arrivées synthétiques et les comparer à des valeurs de premières arrivées mesurées lors du levé entre trous de forage effectué durant l'automne 1994.

Ce chapitre ne se veut pas une étude exhaustive mais bien une introduction aux possibilités offertes grâce aux modèles de propriétés physiques développés au chapitre précédent.

7.1 Modèle de la vitesse des ondes de compression

La figure 7.1a montre, sur le plan par lequel passent les trous de forage 655-284 (à droite du plan) et 655-302 (à gauche du plan), les vitesses des ondes de compression (V_p) transposées à partir des valeurs de V_p des blocs formant le modèle géophysique tridimensionnel (figure 6.6). Ce modèle, tel que généré au chapitre précédent, utilise les quantités de fer, de cuivre et de zinc pour estimer la vitesse sismique.

En observant cette image, du haut vers le bas, on remarque que le tiers supérieur a une vitesse homogène lente, d'environ 6100 m/s. On note ensuite une zone centrale pour laquelle V_p est plus élevée et se situe environ à 6250 m/s. Le bas de l'image montre une large zone comprenant trois anomalies ayant des V_p d'environ 6300 m/s et une géométrie assez complexe.

La modélisation lithologique de la surface de contact entre la rhyodacite et le tuf indique que la partie supérieure du plan de la figure 7.1a ferait partie de la rhyodacite alors que le tiers inférieur serait situé dans le tuf. La présence de sulfures dans le tuf expliquerait ainsi la large zone anormale du bas de l'image. Les valeurs moyennes de V_p calculées au chapitre 4 en fonction des types rocheux ne permettent toutefois pas d'interpréter la géologie directement à partir des vitesses de la figure 7.1a. En effet, tel qu'il a été mentionné au chapitre 4, les distributions des V_p selon les types rocheux se chevauchent et ne permettent pas de différencier les lithologies.

7.2 Temps de premières arrivées synthétiques

La figure 7.1b montre le tomogramme obtenu par l'inversion des temps de premières arrivées synthétiques. Pour générer ces données, nous avons utilisé des programmes-maison développés au Centre de technologie Noranda. Les mêmes positions de sources et d'hydrophones que lors du sondage réel ainsi que la même grille d'inversion (plan divisé en 40 x 13 cellules) ont aussi été utilisées. La couverture du plan est formée de 2497 rayons. Les temps de premières arrivées ont été calculés

à l'aide d'une routine de création de modèle direct utilisant des rayons droits et nous leur avons ajouté du bruit. Le bruit, distribué de façon aléatoire pour chaque temps de première arrivée, suit une distribution normale ayant une moyenne de zéro et un écart-type équivalent au double de la fréquence d'échantillonnage des données réelles ($2 \times 0,05$ ms). Ainsi, l'inversion de ces premières arrivées, en considérant un modèle de départ homogène de 6000 m/s et en utilisant les mêmes techniques d'inversion que pour les données réelles, donne les résultats illustrés sur le tomogramme de la figure 7.1b.

On observe, en comparant les tomogrammes de la figure 7.1, que la combinaison des programmes utilisés (type de rayons, méthode d'inversion, etc) avec la géométrie des sources et des hydrophones et le bruit ajouté aux données provoquent une diminution de la vitesse des ondes de compression dans les zones où l'on sait V_p être élevée ainsi qu'une modification de la forme géométrique de ces zones. La résolution est meilleure à la verticale qu'à l'horizontale à cause de la couverture des rayons, qui sont en effet bien plus nombreux à l'horizontale que dans des directions sub-verticales. Aussi, aucun rayon vertical n'est possible dans ce genre de levé.

Ainsi, notre modèle de V_p permet d'évaluer à quel point les méthodes géophysiques peuvent reproduire les V_p originales. Bien qu'elle ne permette pas de reproduire avec précision la géométrie des zones ayant des V_p élevées, cette expérience réussit bien à les localiser.

7.3 Levé réel entre trous de forage

Le traitement des temps de premières arrivées mesurés lors du levé a débuté avec une étude d'anisotropie qui a démontré que les vitesses des ondes de compression dans cette région sont plus élevées à la verticale qu'à l'horizontale. Ainsi, afin de diminuer les effets dus à cette anisotropie, nous avons corrigé les temps de premières arrivées en fonction de la direction des ondes les plus rapides (à la verticale). Par la suite, l'inversion des données à partir d'un modèle de départ homogène à 6000 m/s a donné les résultats illustrés par le tomogramme de la figure 7.2a. On observe sur ce tomogramme une zone anormale située au centre de l'image et ayant des V_p d'environ 6300 m/s. Le tiers supérieur du plan a des V_p très faibles (5900 m/s) et le tiers inférieur a des petites zones de V_p élevées qui seraient possiblement interconnectées.

En comparant ce tomogramme à celui de la figure 7.2b (tomogramme des données synthétiques), on s'aperçoit que les données réelles produisent un tomogramme ayant de plus grands contrastes dans ses valeurs de V_p . En effet, le tiers supérieur du plan (figure 7.21) a des valeurs V_p beaucoup plus faibles que celles du tomogramme synthétique (5900 m/s en comparaison à 6100 m/s) et la zone anormale située au centre du plan obtient des V_p d'environ 6300 m/s comparativement à 6150 m/s pour le tomogramme synthétique. Ces écarts seraient possiblement dus aux corrections apportées afin d'atténuer les effets de l'anisotropie ainsi qu'au fait que les mesures utilisées pour créer l'équation d'estimation des vitesses des ondes de compression ont été prises en diagraphie (en une seule dimension), à plus petite échelle que les

mesures entre trous de forage, et donc interceptant différents types de discontinuités, ainsi qu'à une fréquence différente. De plus, on doit aussi considérer le changement de support effectué pour la régression et le fait que les teneurs des blocs sont estimées et non mesurées. La zone anormale située au centre du plan a été détectée, mais le tiers inférieur de l'image suggère une toute autre géologie que celle du modèle synthétique. Il semblerait en effet que la zone anormale du bas de la figure 7.2b soit réellement située un peu plus haut à la verticale, ou du moins, qu'elle ne s'étende pas autant vers le bas. Cette observation pourrait impliquer que le modèle des teneurs en fer, cuivre et zinc fourni par la mine n'est pas représentatif de la réalité pour cette région, que notre équation d'estimation des V_p ne réussit pas à estimer correctement la situation retrouvée à cet endroit, ou encore que la présence d'éléments perturbateurs (ayant des V_p basses ou élevées) près de cette région, mais pas situés directement dans le plan, affecte les mesures prises lors du sondage. En effet, la tomographie ne permet ici que de tenir compte de la géologie bidimensionnelle alors que les données réelles sont affectées par des corps tridimensionnels. Le fait d'avoir un modèle tridimensionnel de V_p devient alors un atout considérable si l'on désire étudier le genre de questionnement établi par des observations telles que cette dernière possibilité (éléments perturbateurs situés près du plan, mais ne le traversant pas directement).

7.4 Conclusion

Ainsi, la modélisation des propriétés physiques de la région étudiée ouvre un très grand nombre de portes aux études futures. Elle permet de tester par simulation de divers scénarios si un levé peut réussir à résoudre des zones anormales d'intérêt, permettant ainsi d'éviter de coûteux levés mal conçus, de comparer les résultats de levés réels et simulés, de faire des simulations géophysiques bi- et tridimensionnelles. Les possibilités sont maintenant nombreuses et ne s'arrêteront qu'avec les besoins et l'imagination des utilisateurs.

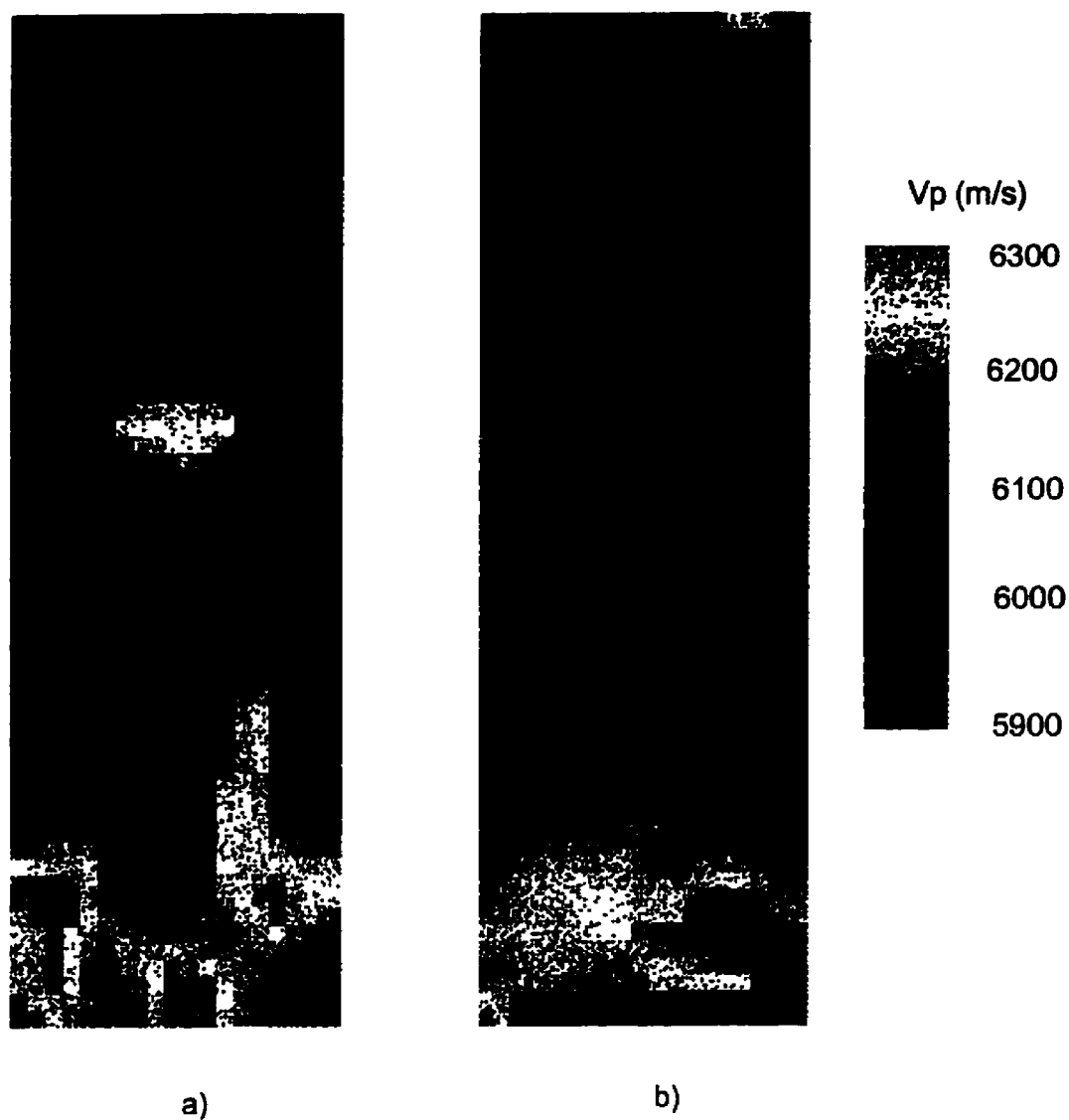


Figure 7.1 Modèle de la vitesse des ondes de compression estimée à partir du fer, du cuivre et du zinc et tomogramme synthétique

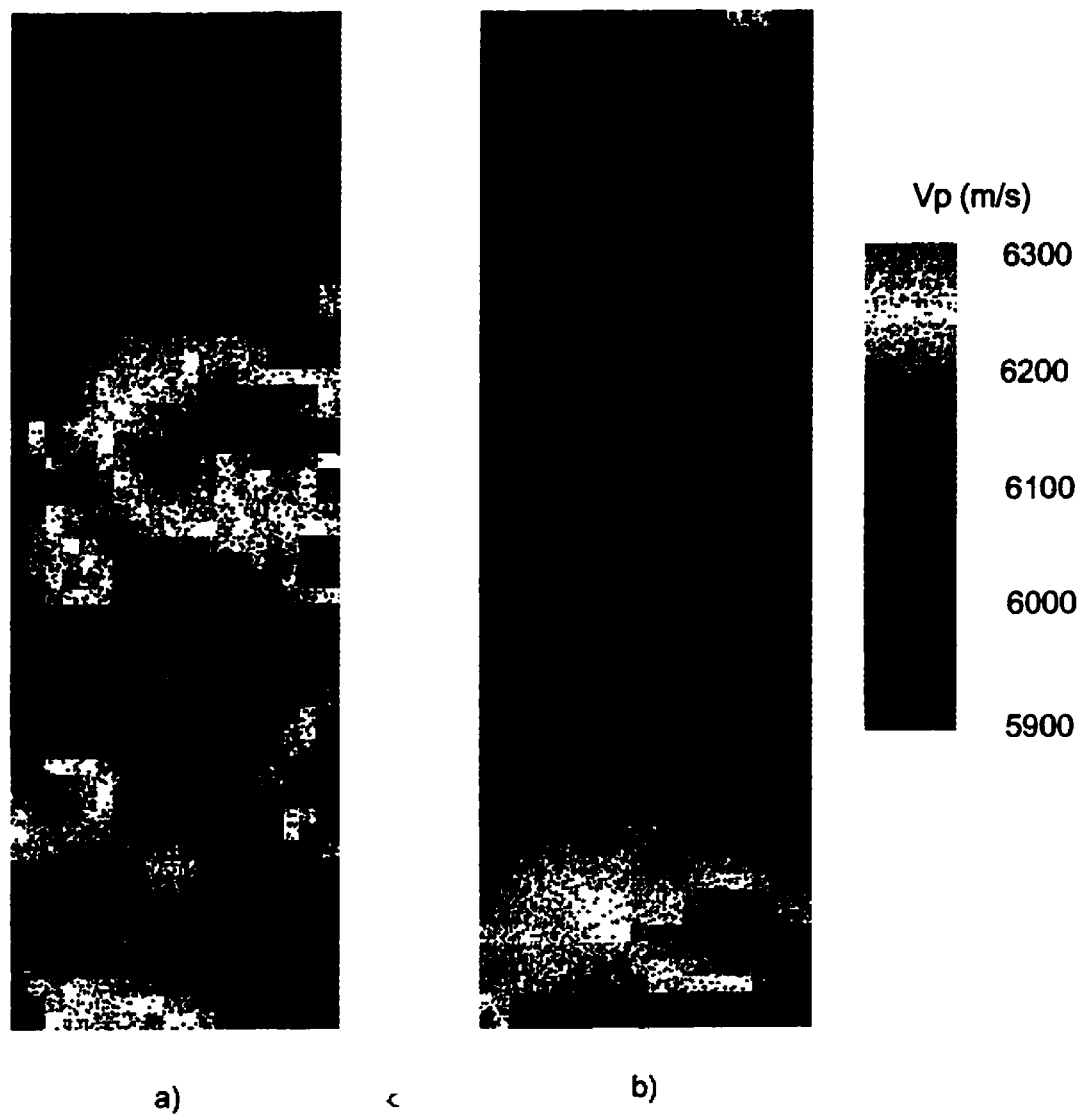


Figure 7.2 Tomogrammes illustrant la vitesse des ondes de compression

8. CONCLUSION

Nous avons étudié les relations entre les propriétés physiques mesurables par techniques géophysiques et les propriétés géologiques (lithologie et teneurs des zones minéralisées) des roches du gisement Louvicourt.

On démontre que l'interprétation lithologique faite lors de la description de carottes de forage peut être reproduite de façon à séparer le stérile du minéral et le minéral cuprifère du zincifère à l'aide de mesures diagraphiques de rayonnement gamma naturel et de conductivité électrique. En effet, au chapitre 3, on détermine pour un type de sonde, qu'un seuil de rayonnement gamma naturel de 12 comptes par échantillon de temps permet d'identifier si la roche est économique ou non, et qu'une différence de potentiel de 5 millivolts sur un type de sonde mesurant la conductivité électrique sépare le minéral riche en cuivre de celui qui est plus riche en zinc. Cette technique ne permet pas une interprétation géologique aussi détaillée que l'interprétation visuelle faite lors de l'examen des carottes, mais est beaucoup plus rapide et peut être utilisée même dans les trous de forage pour lesquels il est impossible de récupérer les carottes. Aussi, elle fournit les informations les plus importantes, à savoir la localisation et l'identification du type de minéral.

À partir des propriétés physiques mesurées, un ensemble de valeurs propres aux types majeurs de roches du gisement a été déterminé afin de caractériser ces roches de façon fiable pour pouvoir ultérieurement faire des simulations géophysiques

réalistes. Ces types rocheux sont la rhyodacite, le tuf, la pyrite massive, les dykes, le minéral cuprifère et le minéral zincifère. On s'aperçoit toutefois que les propriétés physiques sont plus fortement influencées par des éléments-clés (métaux ou minéraux) que par la nature même de la roche. Ainsi, la conductivité électrique du minéral cuprière est le plus influencé par les quantités de cuivre de la roche, la masse volumique des tufs par les sulfures (contenant du fer) qu'ils contiennent, et la susceptibilité magnétique du minéral cuprifère par l'association de pyrrhotite à la chalcoppyrite. De la même façon, les roches stériles (rhyodacite, tuf, pyrite massive et les dykes) sont identifiées grâce la quantité de potassium qu'elles contiennent plutôt que par leur nature lithologique.

Des formules ont été établies pour expliquer les teneurs en cuivre et en fer de la roche à partir des mesures physiques de conductivité électrique, de vitesse des ondes de compression et de masse volumique. En effet, le chapitre 5 étudie les relations entre les quantités de fer, de cuivre et de zinc des roches et les propriétés physiques mesurées en laboratoire et par diagraphie. On trouve que le cuivre, élément le plus conducteur des roches étudiées, est fortement lié aux mesures de conductivité électrique et que le fer est lié à la masse volumique et à la vitesse des ondes de compression. Une fois le type de relations établi entre ces variables, on peut estimer les teneurs. Le zinc ne montre pas de relation assez forte avec les mesures physiques prises lors des levés ni sur les échantillons de carottes. On n'arrive donc pas à estimer les teneurs en zinc à partir des données disponibles.

Une fois les relations établies entre les mesures géophysiques et les teneurs en cuivre, en zinc et en fer des roches, il devient possible de modéliser certaines propriétés physiques dans une zone minéralisée du gisement pour laquelle les teneurs sont disponibles à intervalle régulier. Ainsi, le chapitre 6 liste des formules permettant d'estimer la conductivité électrique, la vitesse des ondes de compression et la masse volumique à partir des données chimiques. La conductivité est expliquée grâce au cuivre et au fer et la vitesse des ondes de compression et la masse volumique sont expliquées par une combinaison des teneurs en cuivre, en fer et en zinc dans laquelle le fer est le facteur le plus influent. Les modèles des propriétés physiques ainsi créés sont propres au gisement Louvicourt et pourront servir de base pour des études de simulations géophysiques afin d'évaluer, entre autres, le potentiel des méthodes géophysiques entre trous de forage au point de vue de la délimitation du minerai. On pourra aussi se servir de ces modèles en les comparant aux interprétations de résultats de levés réels. Les possibilités sont maintenant nombreuses et ne s'arrêteront qu'avec les besoins et l'imagination des utilisateurs.

Ainsi, on conclut que les liens les plus forts entre les propriétés physiques mesurées, les teneurs et les types des roches lient le cuivre et le fer à la conductivité électrique, et le fer à la vitesse des ondes de compression et la masse volumique. Le stérile est différenciable du minerai à cause de sa plus grande quantité de potassium, mesurée par l'intermédiaire des levés de rayonnement gamma naturel, et la grande conductivité électrique du cuivre par rapport à celle du zinc permet de séparer ces types de minerai.

RÉFÉRENCES

CINQ-MARS, A. (1990). Multiparameter Geophysical Logging for the Yava Lead Deposit. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal, Canada.

CINQ-MARS, A., MWENIFUMBO, C. J., KILLEEN, P. G. et CHOUTEAU, M. (1992). Multiparameter Geophysical Logging at the Yava Lead Deposit; A Statistical Approach. Geophysical Prospecting, 40, 829-848.

DAVIS, J. C. (1987). Statistics and Data Analysis in Geology. Wiley, New York.

GLENN, W. E. et NELSON, P. H. (1979). Borehole Logging Techniques applied to base metal ore deposits. Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores. Peter J. Hood, editor, Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, 273-294.

KILLEEN, P. G. (1991). Géophysique des sondages: Introduction de la géophysique dans la troisième dimension. GEOS 1991/2.

PFLUG, K. A., KILLEEN, P. G. et MWENIFUMBO, C. J. (1994). Acoustic Velocity Logging at the McConnell nickel deposit, Sudbury area, Ontario: preliminary measurements. Current Research 1994-C, Geological Survey of Canada, 279-286.

KNIGHT, R. et NUR, A., (1987). The Dielectric Constant Of Sandstones, 60 kHz to 4 MHz. Geophysics, vol. 52, no 5, 644-654.

LAPPALAINEN, P. et LEHTO, J. (1994). Geophysical Borehole Logging in Ore Boundary Detection at Outokumpu Mines. Rapport interne, Outokumpu Metals and Resources Oy, Mining Services, Finland.

LO, T. et INDERWIESEN, P. (1994). Geophysical Monograph Series number 6, Fundamentals in Seismic Tomography. David V. Fitterman, editor. Society of Exploration Geophysicists.

MARCOTTE, D. (1995). Traitement statistique des données géologiques. Notes du cours 7.431. Version 2.0. École Polytechnique de Montréal, Canada.

McCREARY, R. et WÄNSTEDT, S. (1995). Application of Multivariate Statistics and Pattern Recognition to Geophysical Logging at Noranda, Sixth International Symposium on Borehole Geophysics for Minerals, Geotechnical, and Groundwater Applications, October 22-25, 1995, Santa Fe, New Mexico.

MWENIFUMBO, C. J. et KILLEEN, P. G. (1987). Natural gamma ray logging in volcanic rocks: the Mudhole and Clementine base metal prospects, Buchans geology, Newfoundland, ed. R. V. Kirkham; Geological Survey of Canada, Paper 86-24, 263-272, report 16.

MWENIFUMBO, C. J., KILLEEN, P. G., ELLIOTT, B. E. et PFLUG, K. A. (1993). The borehole geophysical signature of the McConnell nickel deposit, Sudbury area, Proceedings of the 5th International Symposium of the Minerals and Geotechnical Logging Society, Tulsa, 24-28 October 1993.

SALISBURY, M., MILKEREIT, B. et BLEEKER, W. (1996) Seismic Imaging of Massive Sulphide Deposits - Rock Properties. Sous-presse pour Economic Geology.

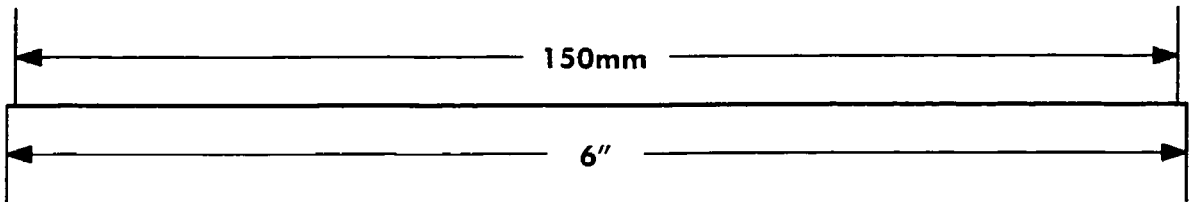
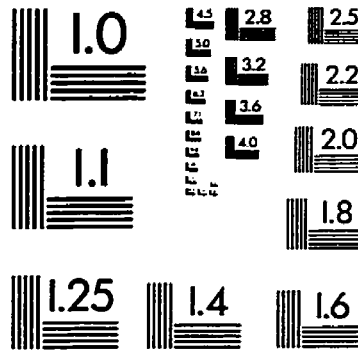
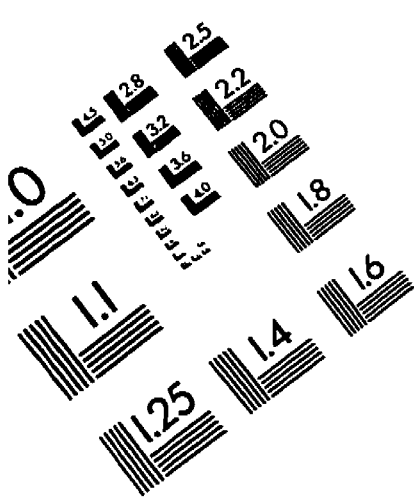
STUART, E. (1995). Le gisement Louvicourt. Rapport interne; Louvicourt Mine, Aur-Novicourt-Teck.

TOURIGNY, G., STUART, E., PELZ, P., ROUGERIE, Y. et MARTIN, L. (1995). Geology of the Louvicourt Massive Sulphide Deposit, Val d'Or District, Québec, Metallogeny of Base Metal Deposits of the Abitibi Greenstone Belt. Field Trip Guidebook edited by Ghislain Tourigny. Geological Survey of Canada, Open File 3144.

WÄNSTEDT, S. (1991). Geofysisk borrhalsloggning i Malmberget. Division of Mining and Rock Excavation, Lulea University of Technology, Teknisk Rapport 1991:14 T, G2000 88:14.

WÄNSTEDT, S. (1992) Geophysical Borehole Logging Applied to the Location and Characterisation of Base Metal Ores. Licentiate thesis. Lulea University of Technology, Sweden.

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved

