



La géophysique d'exploration minière

Eric Deliac, Pierre Valla

► To cite this version:

Eric Deliac, Pierre Valla. La géophysique d'exploration minière. Sciences de l'ingénieur [physics]. 1980. hal-01909927

HAL Id: hal-01909927

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01909927>

Submitted on 31 Oct 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École Nationale Supérieure
des Mines de Paris

Bureau de Recherches
Géologiques et Minières
Service Géologique National

Consultation
sur place

LA GÉOPHYSIQUE D'EXPLORATION MINIÈRE
PRÉSENT ET AVENIR

Consultation
sur place



[106]



École Nationale Supérieure
des Mines de Paris

60, bd Saint-Michel
75006 PARIS
Tél. : (1) 329.21.05

Bureau de Recherches
Géologiques et Minières

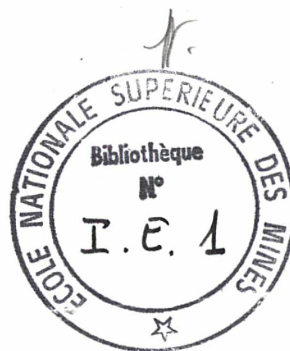
Service Géologique National
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS Cédex
Tél. : (38) 63.80.01

LA GÉOPHYSIQUE D'EXPLORATION MINIÈRE PRÉSENT ET AVENIR

par

[Éric] [Pierre]
E. DÉLIAC et P. VALLA
Ingénieurs des Mines

Consultation
sur place



Juin 1980

SOMMAIRE

Page

RESUME
SIGLES
INTRODUCTION

PRESENTATION DES METHODES GEOPHYSIQUES APPLIQUEES A L'EXPLORATION MINIERE

1.1 - CLASSIFICATION GENERALE DES METHODES GEOPHYSIQUES	2
1.2 - STRATEGIE DE LA GEOPHYSIQUE MINIERE	3
1.3 - EXEMPLES D'UTILISATION	3
1.4 - RECHERCHES ET DEVELOPPEMENTS ACTUELS	5

LA PLACE ECONOMIQUE DES METHODES GEOPHYSIQUES D'EXPLORATION MINIERE

2.1 - STATISTIQUES MONDIALES	7
2.2 - PART DE LA GEOPHYSIQUE DANS LES BUDGETS D'EXPLORATION	11
2.3 - LES PARTENAIRES DE L'ACTIVITE GEOPHYSIQUE	13

ARTICULATION DE LA GEOPHYSIQUE DANS L'EXPLORATION MINIERE

3.1 - LA GEOPHYSIQUE AU PRESENT : SYNTHESE	15
3.2 - GEOPHYSIQUE ET PROGRAMME D'EXPLORATIONS	15

INNOVATION ET PROSPECTIVE EN GEOPHYSIQUE MINIERE

4.1 - L'ACTION DE L'ETAT EN FRANCE	20
4.2 - PROSPECTIVE TECHNIQUE	21
4.3 - PROSPECTIVE ECONOMIQUE	22
4.4 - LES ECHANGES ENTRE LA FRANCE ET LES AUTRES PAYS	23

CONCLUSION	25
------------------	----

ANNEXE A - DESCRIPTION DES METHODES GEOPHYSIQUES APPLIQUEES EN RECHERCHE MINIERE

A.1 - LES METHODES DE CHAMP	26
A.2 - METHODES ELECTRIQUES ET ELECTROMAGNETIQUES	27
A.3 - LES METHODES SISMIQUES	28
A.4 - LES METHODES RADIOMETRIQUES	28
A.5 - LES DIAGRAPHIES	29

ANNEXE B - L'INNOVATION FRANCAISE EN GEOPHYSIQUE MINIERE

RESUME

L'utilisation des méthodes géophysiques dans l'exploration minière a connu de beaux succès mais aussi des déceptions, suscitant des débats contradictoires entre géologues et géophysiciens. C'est pour tenter de clarifier les "mythes et réalités" de cette géophysique minière qu'a été entreprise la présente étude. Celle-ci s'ouvre sur une présentation des différentes méthodes utilisées, de leurs applications et des développements récents, suivie par une analyse des données économiques de cette utilisation, d'une part au niveau mondial et d'autre part au niveau des compagnies françaises. L'articulation de la géophysique dans les programmes d'exploration est ensuite précisée par des indications de coûts et quelques exemples types. Enfin, des éléments de prospective sont présentés et l'on s'interroge sur ce que pourrait être la place de la France dans le domaine de la géophysique minière, en soulignant la nécessité d'un petit nombre de pôles de recherches rapprochant universités et industriels.

Ce travail a été effectué en tant que "dossier long" au cours de la 3ème année de formation des Ingénieurs des Mines à l'ENSM. Il a été demandé conjointement par le Service géologique national (BRGM) et le Service des Matières Premières et du Sous-sol (Ministère de l'Industrie).

SIGLES

Organismes

BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CGG	Compagnie Générale de Géophysique
CRG	Centre de Recherches Géophysiques
DGRST	Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique
INAG	Institut national d'Astronomie et de Géophysique
INPL	Institut National Polytechnique de Lorraine
SNEA	Société Nationale Elf-Aquitaine

Méthodes géophysiques

EM	Electromagnétisme
PP	Polarisation provoquée
PS	Polarisation spontanée
VLF	Very low frequency

INTRODUCTION

Alors que naguère les découvertes minières étaient probablement faites au hasard de randonnées ou à la suite de rumeurs, la démarche de la prospection minière se veut aujourd'hui plus rationnelle. Jusqu'au siècle dernier, l'arsenal des prospecteurs se limitait à la géologie, l'intuition et la chance ; depuis sont venues s'y ajouter la géochimie, la géophysique et également les techniques de sondage. Par ailleurs, la méthodologie a beaucoup évolué, de sorte qu'est actuellement employé le terme de stratégie de la recherche minière, articulée en trois phases principales :

- la phase stratégique à l'échelle d'une province ;
- la phase tactique à maille plus resserrée ;
- la phase de reconnaissance des indices.

La démarche consiste à restreindre à chaque pas la surface prospectée, en ne conservant pour l'étape ultérieure que les zones où la probabilité de découvrir la minéralisation recherchée est la plus forte. Cette stratégie peut être mise en parallèle avec les différents objectifs possibles d'une prospection minière, qui sont par ordre de spécificité croissante :

- l'estimation du potentiel minier d'une région,
- l'exploration tous azimuts d'une région favorable,
- la recherche de nouvelles provinces métallogéniques dans un environnement géologique connu,
- la recherche de nouveaux gisements dans une province,
- l'accroissement des réserves d'un gisement.

La géophysique minière est apparue au 17^e siècle en Suède avec l'utilisation du magnétisme dans la prospection pour les gisements de fer. Elle s'est développée très rapidement depuis l'entre deux guerres avec, en Europe, les expériences des frères SCHLUMBERGER. Vers les années cinquante, la géophysique commence à prendre une place importante dans la recherche minière : c'est le début d'une utilisation systématique des méthodes aéroportées au Canada. Depuis lors, son utilisation a suscité enthousiasmes et déceptions, et les prospecteurs ont souvent des attitudes contradictoires envers elle. Certains y voient un outil idéal pour la découverte de gisements cachés auxquels les autres méthodes ne permettraient pas d'aboutir ; d'autres, au contraire, estiment que son rôle sera toujours secondaire et que la géologie restera l'instrument fondamental du prospecteur.

Cette étude va s'efforcer de cerner la place actuelle de la géophysique dans l'exploration minière du monde non communiste, et de donner quelques réflexions sur son avenir.

PRESENTATION DES METHODES GEOPHYSIQUES APPLIQUEES A L'EXPLORATION MINIERE

A côté de la géophysique fondamentale dont l'objet est de comprendre la structure et l'évolution de la planète Terre dans son ensemble, la géophysique appliquée est utilisée pour élucider la structure de la partie de l'écorce terrestre dont l'industrie humaine est capable d'exploiter les ressources : essentiellement sur une épaisseur de quelques centaines de mètres pour les gisements miniers.

1.1 - CLASSIFICATION GENERALE DES METHODES GEOPHYSIQUES

Les méthodes géophysiques d'exploration du sous-sol se fondent sur des mesures de paramètres caractéristiques de propriétés physiques des roches : densité, susceptibilité magnétique, radioactivité, résistivité, chargeabilité, Il faut cependant noter que pour certaines méthodes (comme la polarisation spontanée ou la polarisation provoquée) la compréhension des phénomènes expliquant les anomalies de mesure physique est encore incomplète.

Pour la prospection minière, il est d'usage de classer les méthodes en deux catégories :

- directes, lorsque le paramètre mesuré est une propriété de la substance convoitée (par exemple la radioactivité d'un minerai uranifère) ;
- indirectes lorsque ce paramètre est lié à l'environnement de la minéralisation recherchée (par exemple dans l'utilisation du magnétisme pour suivre un contact géologique favorable au gîte).

Cette distinction est fondée sur la finalité d'une méthode et non sur son principe : la méthode gravimétrique est directe lorsque, connaissant des indices de wolfram, on cherche à mettre en évidence un amas, mais indirecte lorsqu'il s'agit de cartographier un substrat plus dense que les niveaux sus-jacents.

Du point de vue physique, les méthodes géophysiques se rangent en quatre grandes familles, à savoir :

- les méthodes de champ, où la mesure porte sur le champ gravimétrique ou magnétique naturel ;
- les méthodes électriques et électromagnétiques pour lesquelles le paramètre physique étudié est la résistivité ;
- les méthodes sismiques qui permettent, à travers des observations de vitesses de propagation d'ondes sonores, de représenter la stratigraphie des terrains ;

- les méthodes radiométriques qui enregistrent le rayonnement naturel des roches.

Le lecteur trouvera dans l'annexe A une description plus détaillée des diverses méthodes, incluant leur principe et leur champ d'application privilégié.

1.2 - STRATEGIE DE LA GEOPHYSIQUE MINIERE

La géophysique est présente sous différents aspects dans chacune des grandes phases de la recherche minière. L'exploration à l'échelle d'une province (phase stratégique) est le domaine des méthodes aéroportées. Il s'agit du magnétisme, de l'électromagnétisme (Digheem, Input par exemple) et de la radiométrie. L'espacement des lignes de vol est de 500 à 1 000 mètres et les méthodes sont souvent couplées, quoique les altitudes optimales de vol pour chacune d'elles ne soient pas identiques (le vol lui-même représente en effet l'essentiel du coût). En phase tactique, le relais est pris par les méthodes au sol où toutes les familles de méthodes décrites précédemment sont représentées. Le choix s'effectue en fonction de la cible recherchée et de l'environnement géologique. Quant à la reconnaissance des indices, elle utilise ces mêmes méthodes au sol avec une maille plus serrée, et également les diagraphies : rayons γ , activation neutronique, log électrique, log sonique.

Comme indiqué sur le tableau 1.1. ci-après, la géophysique est utilisée conjointement avec la géologie et la géochimie aux différents stades de l'exploration. Ce tableau précise, phase par phase, la panoplie offerte au prospecteur.

1.3 - EXEMPLES D'UTILISATION

Les possibilités de la géophysique dans la prospection pour quelques cibles actuelles des compagnies minières (sulfures massifs, sulfures disséminés uranium) sont données ci-après avec des exemples de découvertes de gisements.

a - Sulfures massifs

En phase stratégique, un levé aéromagnétique aide à élucider les grandes structures géologiques. Par ailleurs, utilisant la bonne conductivité électrique des sulfures massifs, un levé d'électromagnétisme aéro ou héliporté donne un certain nombre d'anomalies qui vont être livrées à l'étude détaillée de la phase tactique. Cette recherche d'anomalies de conductivité est largement utilisée au Canada. Elle a été également pratiquée sur le massif armoricain à l'initiative de la SNEA, conduisant à la localisation de l'amas du Rouez.

Pour la phase tactique, le VLF ou la résistivité permettent de préciser l'emplacement et l'orientation des anomalies. Après quoi, les méthodes électriques de polarisation spontanée ou induite, et la gravimétrie sont utilisées pour discriminer les anomalies en éliminant, autant que faire se peut celles dues à des altérations superficielles ou à la présence de graphite.

Tableau 1.1 : Les outils de la prospection minière

Phase	Stratégique	Tactique	Reconnaissance des indices
maille	Kilométrique	hectométrique	sondage
surface prospectée	500 à 2 500 km ²	10 à 250 km ²	≤ à 5 km ²
GEOLOGIE	Cartographie prospection marteau prospection alluvionnaire	cartographie fine échantillonnage	géologie des carottes
GEOCHIMIE	Géochimie alluvionnaire Géochimie sol Stream-sédiments	prélèvements à maille fixe	analyse des cuttings analyse des carottes
GEOPHYSIQUE	Méthodes aéroportées (mag., EM, radiométrie)	magnétisme, gravimétrie électrique, électromagnétisme sismique radiométrie	gravimétrie, PS diagraphies mise à la masse

La gravimétrie peut également être le support d'une phase semi-tactique comme ce fut le cas dans la campagne de prospection dont est issu le gisement de Nèves au Portugal, en utilisant comme guide l'anomalie de densité des sulfures massifs.

b - Sulfures disséminés (de type porphyry-copper)

Hormis l'utilisation de l'aéromagnétisme comme aide à la géologie, la géophysique ne présente pas d'outil d'exploration stratégique pour les sulfures du type porphyry-copper.

Mais, à l'opposé, en phase tactique, la polarisation provoquée est une excellente méthode de localisation : c'est ainsi qu'ont été reconnus de nombreux gisements de porphyry-copper en Amérique, comme par exemple le gisement de Cuajone en 1952 au Pérou ou le gisement de Lornex (British Columbia) dans les années soixante au Canada.

c - Uranium

La prospection pour l'uranium possède une méthode spécifique : la radiométrie. En phase stratégique, des spectromètres à scintillation, permettant de discriminer entre les diverses sources radioactives, sont utilisés en couverture aérienne, souvent associés à la magnétométrie pour la cartographie des unités granitiques favorables. Les anomalies ainsi décelées font l'objet d'une prospection tactique comprenant toujours une investigation radiométrique détaillée. En environnement sédimentaire, la sismique peut être utilisée pour préciser les horizons stratigraphiques favorables. En environnement cristallin, la résistivité ou le VLF permettent de localiser les fractures propices aux filons uranifères. A titre d'exemple, la mine d'uranium du Bernardan à Lussac-les-Eglises (Haute-Vienne) de la Compagnie minière de Dong-Trieu doit être portée à l'actif d'une campagne de résistivité par la méthode du rectangle, un faible recouvrement tertiaire atténuant notablement le rayonnement radioactif à l'aplomb du gisement.

Il ne faut cependant pas déduire de ce qui précède que ces exemples d'utilisation sont toujours reproductibles. Pour chaque méthode, des limitations existent, liées à l'environnement géologique ou humain. Il est en effet nécessaire que l'anomalie créée par la minéralisation recherchée ne soit pas masquée par des anomalies de même ordre de grandeur dues à des structures géologiques voisines. A ce titre, on peut citer le problème de l'environnement basique pour la gravimétrie, celui des conducteurs superficiels (altérations tropicales ou canalisations) pour les méthodes électromagnétiques, l'inconvénient des schistes graphiteux ou pyriteux pour la polarisation provoquée, celui d'une tectonique trop importante pour les profils sismiques.

1.4 - RECHERCHES ET DEVELOPPEMENTS ACTUELS

Le développement principal de ces dernières années réside dans les progrès réalisés par les sociétés et les universités nord-américaines sur la méthode de polarisation provoquée. Grâce à une mesure plus complète de l'effet de polarisation, il est en effet possible d'obtenir des

informations sur la texture des roches, offrant ainsi une possibilité de séparer les anomalies des minéraux économiques de celles du graphite. Par ailleurs, l'introduction de la polarisation provoquée par induction permet de surmonter l'obstacle des recouvrements conducteurs.

En ce qui concerne les mesures magnétiques, des gains importants de précision ont été apportés grâce à une amélioration de l'appareillage. L'introduction de gradiomètres fournit quant à elle une parade aux orages magnétiques et donne une meilleure définition des anomalies.

Un effort important est actuellement porté sur les méthodes électromagnétiques dans le domaine transitoire, tant aériennes qu'au sol. Les progrès de l'électronique autorisent en effet un grand perfectionnement des appareillages. Il en est de même pour les équipements sismiques avec en plus dans ce cas la stimulation due à l'exploration pétrolière.

Enfin, pour la radiométrie, peu de développements existent actuellement, l'instrumentation jouissant déjà d'une excellente précision et d'une sophistication poussée.

En France, la recherche et le développement en géophysique minière sont orientés sur les domaines suivants :

a - Sismique réflexion haute résolution

Adaptée de la recherche pétrolière, cette méthode a été développée par la Cogéma et sa filiale Geomatic Services ; actuellement leur effort porte plus particulièrement sur les sources sismiques et les programmes de traitement des données (en liaison avec la CGG). La SNEA a également apporté une contribution dans ce domaine avec le Mini-sosie.

b - Magnéto-tellurique

Développée dès l'origine en France par le professeur Cagniard, la magnéto-tellurique fait l'objet de recherches sur l'appareillage de la part de l'INPL, tendant vers la mise au point d'un magnétomètre cryogénique. D'autre part le CRG maintient une réflexion sur cette méthode mais surtout dans l'optique de la physique du globe.

c - Electromagnétisme

Les méthodes électromagnétiques sont assez variées (la magnéto-tellurique en fait d'ailleurs partie mais a été mise à part ici à cause de son individualité plus marquée). Le CRG a mis au point une méthode de profilage à l'aide d'un traineau muni d'une électrode capacitive. Le B.R.G.M. a développé l'appareil multifréquentiel Mélos pour les sondages électromagnétiques et poursuit une réflexion méthodologique. Enfin la SNEA effectue une recherche sur les problèmes d'interprétation et met au point un récepteur multi-usages ; d'autre part, elle participe financièrement à l'élaboration d'un nouveau dispositif aéroporté, le Cotran, élaboré en Amérique du Nord.

LA PLACE ECONOMIQUE DES METHODES GEOPHYSIQUES

D'EXPLORATION MINIERE

2.1 - STATISTIQUES MONDIALES

Les statistiques annuelles publiées par la revue "Geophysics" montrent la place somme toute modeste qu'occupe la géophysique minière dans l'ensemble de l'activité de géophysique appliquée du monde non communiste : les dépenses qui lui sont consacrées sont de l'ordre du vingtième de celles réalisées en géophysique pétrolière. Le tableau 2.1 ci-après illustre cette caractéristique par les données des années 1974 à 1978. Ce fait explique le développement relativement lent de la géophysique minière, compte tenu en outre de la diversité des méthodes utilisées, alors que des moyens lourds sont consacrés à l'exploration pétrolière par géophysique, sur pratiquement une seule méthode, la sismique réflexion.

En ce qui concerne la répartition des dépenses géophysiques de recherche minière selon le stade d'exploration et selon la méthode employée, les résultats sont assez variables d'une année à l'autre, en particulier pour ce qui est du poids relatif de l'exploration aéroportée et de l'exploration au sol, comme l'indiquent les données statistiques de la revue "Geophysics" reproduites au tableau 2.2.

Enfin, pour ce qui est de la ventilation géographique des dépenses, les données figurent dans le tableau 2.3 : l'Amérique du Nord et l'Europe constituent les deux centres principaux.

Il faut toutefois observer ces résultats avec précaution pour diverses raisons. Le rapport entre la géophysique aéroportée et la géophysique au sol est manifestement beaucoup plus fort que dans la réalité, surtout en 1978 ; de plus les chiffres concernant les diagaphies en 1978 sont manifestement erronés. Cela peut être dû à ce que les indications données par les sociétés sont faussées par le système de comptabilité interne des opérateurs miniers : les levés de magnétisme, de radiométrie ou de VLF effectués par le géologue minier semblent ne pas être pris en compte dans les chiffres de "Geophysics", ce qui diminue considérablement les sommes consacrées à la géophysique au sol. Par ailleurs, la part d'interprétation et de mise sur carte, souvent réalisées par les compagnies minières en ce qui concerne la géophysique au sol et qui sont de l'ordre de 20 % du total d'une prospection géophysique n'a pas toujours été pris en compte. En outre, il faut s'interroger sur la fiabilité des chiffres donnés et en particulier sur le système de collecte de ces renseignements, fondé sur la bonne volonté et la bonne foi des sociétés minières.

Il est néanmoins possible de tirer de ces tableaux quelques conclusions générales caractérisant l'utilisation de la géophysique minière dans ses tendances. Tout d'abord, les sommes consacrées à la

Tableau 2.1 : Dépenses géophysiques mondiales (hors pays de l'Est) de 1974 à 1978

(d'après "Geophysics", milliers de \$ US)

	1974		1975		1976		1977		1978	
		%		%		%		%		%
Hydrocarbures	1.231.637	96,0	1.185.334	92,8	1.073.336	93,8	1.092.630	93,6	1.600.144	95,7
Mine	27.047	2,1	51.408	4,0	44.151	3,9	52.166	4,5	31.684	1,9
Génie Civil	4.357	0,3	14.077	1,1	8.837	0,8	6.930	0,6	8.917	0,5
Géothermie	1.276	0,1	2.783	0,2	1.007	0,1	2.302	0,2	2.132	0,1
Hydrogéologie	1.522	0,1	13.363	1,1	6.311	0,5	4.595	0,4	3.277	0,2
Océanographie	17.417	1,4	10.192	0,8	10.341	0,9	4.093	0,3	13.790	0,8
Recherches	-		-		-		4.878	0,4	12.390	0,8
Total	1.283.256	100,0	1.277.279	100,0	1.143.983	100,0	1.167.594	100,0	1.672.329	100,0

Tableau 2.2 : Détail des dépenses en géophysique minière
hors pays de l'Est
(milliers de \$ US)

	1974	1975	1976	1977	1978
Aéroporté :					
magnétisme	7.388	19.548	12.182	15.734	11.481
EM et mag.	1.836	2.808	1.435	2.468	2.201
électromagnétisme	57	80	74	145	160
input	1.795	3.067	4.187	4.914	1.334
radio-activité	1.044	3.722	8.291	9.765	6.994
remote-sensing	-	24	114	11	50
divers	16	28	305	15	-
	12.136	29.277	26.588	33.052	22.220
Au sol :					
sismique	3.275	6.630	5.484	2.038	3.816
gravité	1.219	3.218	2.005	1.922	746
magnétisme	1.454	2.658	1.510	1.651	136
résistivité	1.449	1.514	738	7.568	1.161
polarisation spontanée	79	4	49	6	5
électromagnétisme	695	1.087	814	1.362	379
EM et mag.	1.141	605	1.201	1.015	816
VLF	82	198	216	86	13
polarisation provoquée	2.632	3.009	2.953	2.192	802
magnétotellurique et tellurique	245	221	29	21	259
radio-activité	1.795	863	1.156	422	125
divers	365	1.041	82	223	19
	14.431	21.048	16.237	18.506	8.277
Diagraphies :					
activation neutronique	-	-	-	217	-
radio-activité	50	181	337	214	2
magnétisme	130	105	126	10	-
résistivité	10	204	100	61	72
polarisation spontanée	48	-	15	-	2
électromagnétisme	7	11	-	-	-
polarisation induite	113	167	31	79	-
divers	190	35	33	-	2
	548	703	642	581	78

(D'après "Geophysics")

Tableau 2.3 : Répartition géographique des dépenses en
géophysique minière hors pays de l'Est
(milliers de \$ US)

	1974	1975	1976	1977	1978
1 - Géophysique aéroportée					
U.S.A	1.466	3.697	4.399	9.511	7.156
Canada	3.453	7.944	7.937	8.257	6.738
Mexique	-	-	208	-	-
Amérique du Sud	1.021	5.963	6.693	1.856	773
Europe	1.116	1.807	2.265	4.313	2.740
Afrique	3.868	7.230	3.172	5.134	3.654
Moyen-Orient	376	860	786	2.451	710
Extrême-Orient	175		30	168	
Australie et Nelle-Zélande	650	1.748	1.090	1.360	447
	12.125	29.249	26.580	33.051	22.220
2 - Géophysique au sol					
U.S.A.	3.005	3.303	3.236	7.986	1.845
Canada	2.609	2.785	3.318	2.079	1.684
Mexique	163	67	349	64	5
Amérique du Sud	540	2.042	1.247	254	20
Europe	4.731	7.276	3.227	3.918	3.582
Afrique	842	2.899	3.386	1.370	313
Moyen-Orient	88	1.419	201	915	380
Extrême-Orient	389	847	602	1.120	-
Australie et Nelle-Zélande	2.545	968	1.255	824	445
	14.922	20.908	16.183	18.530	8.274

(D'après "Geophysics")

géophysique sont plutôt stagnantes, voire décroissantes, depuis 1974, en outre, les diagraphies représentent une très faible part du montant des dépenses engagées. Enfin, la sismique voit son importance croître de façon quasiment constante, en valeur relative parmi les méthodes au sol. Le chiffre donné sur la radiométrie en sondage pour 1978 ne peut qu'être faux puisqu'il est inférieur de plusieurs décades aux dépenses correspondantes des seules compagnies françaises !

2.2 - PART DE LA GEOPHYSIQUE DANS LES BUDGETS D'EXPLORATION

Les opérateurs miniers ont envers la géophysique des attitudes très diversifiées : ils constituent un monde étroit où les personnalités jouent un grand rôle. Ce comportement se reflète dans les parts consacrées à la géophysique dans les budgets d'exploration. Certains ne dépensent que quelques pourcents de ce budget en géophysique, alors que d'autres vont jusqu'au cinquième ou même au quart. Par ailleurs les emplois de la géophysique ou de la géochimie varient énormément avec la substance recherchée : si dans la recherche de l'uranium la première est beaucoup plus utilisée que la seconde, en particulier à cause de l'usage intensif de la radiométrie, au contraire, dans le cas de petits gisements de sulfures polymétalliques (cuivre, plomb, zinc, argent) peu profonds, il est surtout fait appel à la géochimie. Du fait de cette dispersion des usages, il est difficile de citer un chiffre qui puisse représenter la part relative de la géophysique dans l'exploration minière. Néanmoins, pour fixer des ordres de grandeur, dans la partie de l'exploration qui s'arrête au moment des premiers travaux miniers (incluant donc les sondages de reconnaissance des indices), la répartition des dépenses est généralement la suivante :

- étude géologique	: 10 à 20 %
- géochimie et géophysique	: 15 à 25 %
- sondages	: 60 à 70 %.

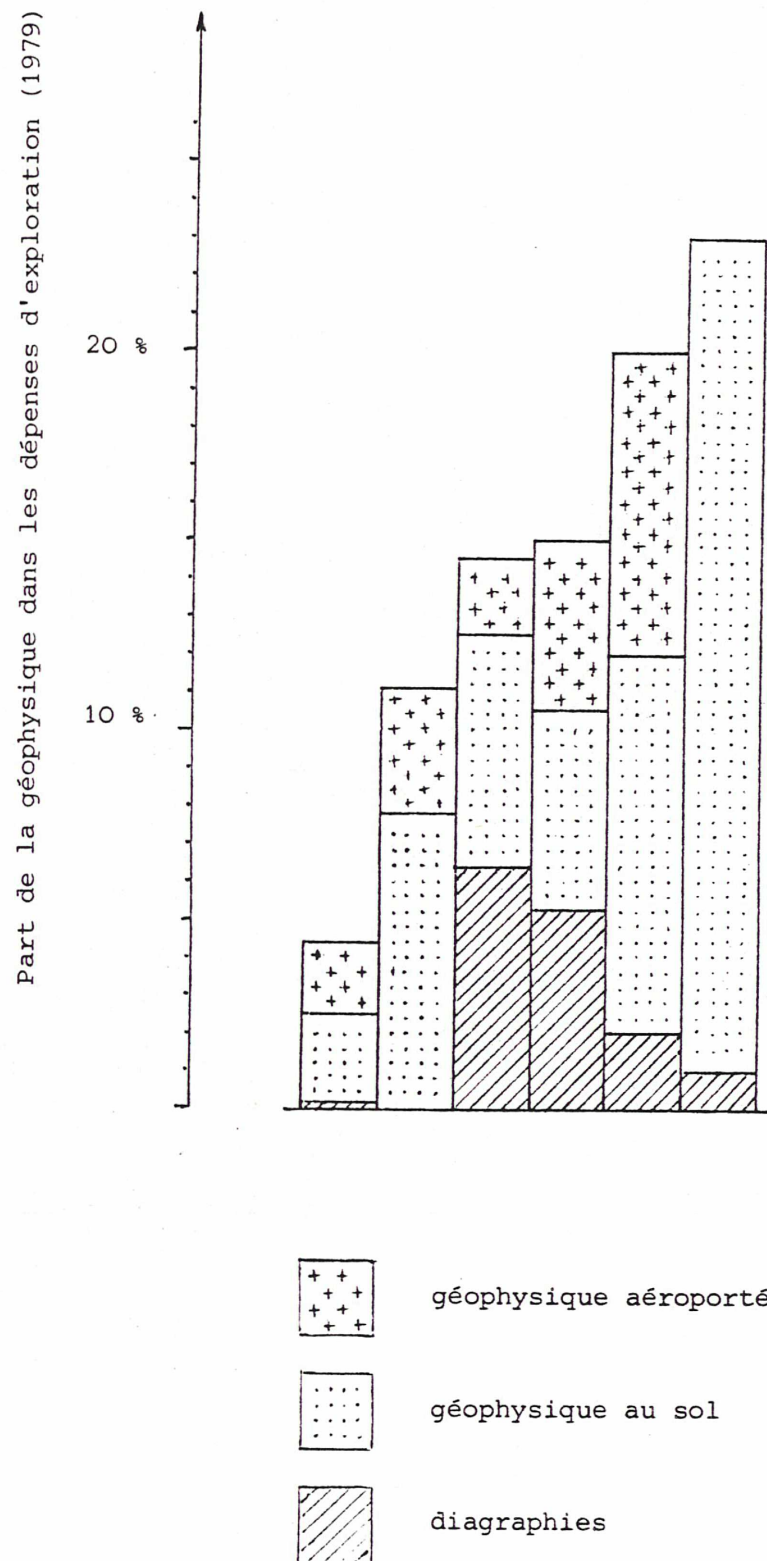
La géochimie et la géophysique n'ont pas été dissociées car elles sont en fait employées simultanément aux mêmes stades de l'exploration mais avec des proportions très variables. Au Canada la géophysique a une part quasi exclusive car la couverture glaciaire rend inefficace la géochimie et difficile la géologie seule ; au contraire, certains objectifs comme l'or ne présentent pas de signature en géophysique et celle-ci n'est alors utilisée que marginalement comme aide à la cartographie géologique. On retrouve ainsi une fourchette allant de 0 à 25 %.

En ce qui concerne les compagnies minières françaises, la part des dépenses géophysiques est présentée sur le graphique 2.4, avec la répartition entre géophysique aéroportée, géophysique au sol et diagraphies, pour l'année 1979.

De même que dans le paragraphe précédent, il faut garder présent à l'esprit que la répartition des dépenses est très variable d'une année à l'autre. En effet, un programme d'exploration s'étale sur plusieurs années, avec au début, des campagnes aéroportées, tandis que les années suivantes verront la reconnaissance au sol des anomalies aériennes.

Les diagraphies correspondent uniquement pour les compagnies concernées à une exploration pour l'uranium.

Graphique 2.4 : Répartition des dépenses en géophysique selon les opérateurs miniers français en 1979.



2.3 - LES PARTENAIRES DE L'ACTIVITE GEOPHYSIQUE

Les services de géophysique des opérateurs miniers sont très inégaux. Chez certains, ils se limitent à une personne, chargée de superviser l'emploi de cette science, et surtout d'assurer le suivi de son utilisation, confiée à des sociétés spécialisées. Dans ce cas il est nécessaire que les géologues chefs de mission aient une culture géophysique de base qui leur permette de faire appel aux prestataires de services. Chez d'autres compagnies, au contraire, il existe un véritable département géophysique qui suit étroitement les activités d'exploration et ne confie que les méthodes lourdes (surtout les levés aéroportés) aux sociétés de géophysique. Pour certains même, l'activité géophysique a donné naissance à une filiale spécialisée, permettant à la fois une plus grande flexibilité d'utilisation et une commercialisation de techniques propres : c'est le cas de la Cogéma et de sa filiale Geomatic Services.

Cette diversité corrobore une nouvelle fois celle des attitudes des opérateurs miniers envers l'utilisation de la géophysique. Tous sous-traitent une partie de leur prospection géophysique, mais de façon inégale. De même leur confiance envers les sociétés de service est très variable. Dans tous les cas, l'interprétation des mesures réalisées sur le terrain est reprise par l'opérateur minier.

Les sociétés de service sont assez peu nombreuses en France. Celles qui comptent plus de vingt personnes et qui s'intéressent à l'exploration minière sont la CGG, Geomatic Services et Géoconsult. En Europe, les grands noms sont l'anglais HUNTING et l'allemand PRAKLA. Au Canada, ces sociétés sont plus nombreuses, l'une des plus importantes étant Géoterrex, filiale de la CGG.

Lorsqu'une compagnie minière veut utiliser de façon fructueuse la géophysique, il importe qu'une bonne liaison existe entre géologues et géophysiciens. Ces derniers ont le plus souvent une formation géologique de base. La réciproque n'est malheureusement pas toujours vraie et il en a résulté parfois un conflit entre les deux disciplines. Ce problème d'interface se focalise sur la notion d'anomalie, le géophysicien livrant des anomalies, localisations possibles de minéralisation, et le géologue recevant ces anomalies comme indicateur quasi certain d'une minéralisation. Et chacun considère alors l'autre comme incompetent, le géologue jugeant tel le géophysicien dont l'anomalie trop vite sondée s'est avérée stérile, et le géophysicien jugeant tel le géologue qui n'a pas compris que les anomalies n'ont pas qu'une cause unique. Ce conflit tend heureusement à disparaître et l'on assiste à une évolution très positive des relations entre géologues et géophysiciens. Certaines compagnies ont attaqué le problème en créant un "brain-trust" constitué de géologues, de géophysiciens et de géochimistes, chargé de conduire les projets d'exploration minière. Chez d'autres l'accent a été mis sur la formation géophysique des géologues, en leur donnant progressivement la charge du levé de mesures relativement simples comme la radiométrie, le magnétisme ou la polarisation spontanée. Par ailleurs, les géophysiciens, conscients de n'être pas payés à l'anomalie, améliorent le dialogue avec les géologues, en expliquant les possibilités de chaque méthode et en indiquant la plus adéquate, pour le problème posé.

L'attitude très inégale des géologues miniers envers les géophysiciens explique pour partie l'utilisation très irrégulière de la géophysique chez certaines compagnies pendant les trente dernières années. Au début, quelques succès, au Canada notamment, ont provoqué une vague d'euphorie, et l'on a voulu faire de la géophysique de façon généralisée, sans tenir assez compte du contexte géologique : il en est naturellement découlé une série de déceptions qui ont condamné l'outil géophysique aux yeux de certains géologues. Il a fallu attendre de nouveaux succès pour assister à une reprise. En France l'intérêt se manifeste à la suite de quelques succès comme la minéralisation du Rouez, le gisement de Neves-Corvo ou celui du Bernardan. Comme après toute période un peu désordonnée, un effort de rationalisation est effectué : l'utilisation de la géophysique devient plus sélective chez ceux qui en avaient abusée, plus soutenue chez ceux qui l'avaient négligée.

ARTICULATION DE LA GEOPHYSIQUE

DANS L'EXPLORATION MINIERE

3.1 - LA GEOPHYSIQUE AU PRESENT : SYNTHESE

Les différentes méthodes géophysiques et leurs principales applications minières sont regroupées dans le tableau 3.1 ci-après. Une indication du coût des méthodes est également donnée : il s'agit d'une estimation moyenne, des écarts du simple au double, voire au triple, étant fréquents sur ces coûts qui sont fonctions de l'ampleur de la campagne géophysique, de la précision des mesures, des conditions d'accès, A titre de comparaison, une analyse géochimique aurait un coût de 100 à 150 francs par échantillon, tandis que les sondages, destructif et carotté, reviendraient à 70 et 700 francs par mètre respectivement.

La diversité des paramètres mesurés et la variabilité de leur signification géologique selon les environnements ne permettent pas de faire une classification des méthodes géophysiques en termes d'un rapport "quantité d'information sur coût de la méthode", et encore moins d'arbitrer entre la géophysique et la géochimie, qui ont chacune certains domaines d'applications exclusifs et sont, par ailleurs, le plus souvent complémentaires. L'opposition qui a pu se faire jour en France entre une prospection géochimique de type inventaire BRGM et une prospection géophysique de type couverture aéroportée SNEA, est plus une querelle d'écoles qu'un débat essentiel. Les Sciences de la Terre sont d'ailleurs un terrain propice à ce type de querelles, l'impossibilité de procéder à des vérifications expérimentales précises et immédiates éloignant les disciplines concernées des sciences exactes. Ainsi la géophysique elle-même n'est pas exempte de rivalités internes : au début de l'essor de la polarisation provoquée, deux écoles se sont affrontées farouchement en Amérique du Nord pendant plusieurs années, l'une utilisant une méthode fréquentielle et l'autre une méthode transitoire (soit deux points d'observations différents d'un même type de phénomènes) ; cette rivalité est désormais apaisée et certains, dans un excès contraire, vont jusqu'à rendre ces deux méthodes équivalentes, attribuant à la transformation de Fourier des vertus exagérées. De même pour le VLF, réagissant uniquement sur leurs expériences propres, les prospecteurs émettent des avis totalement divergents. Ce type d'attitudes est à l'origine des grands élans et des grandes déceptions qui jalonnent l'histoire de la géophysique.

3.2 - GEOPHYSIQUE ET PROGRAMME D'EXPLORATIONS

Le tableau 3.2 donne trois budgets-types, d'enveloppes globales et d'objectifs différents, pour une région de l'ordre de 500 km². Là encore il est fait abstraction de la grande diversité des environnements et il ne s'agit que d'indiquer des ordres de grandeur. Le premier budget pourrait être celui d'une prospection orientée vers les sulfures massifs ou les gisements de nickel-chrome ; la géophysique stratégique serait alors respectivement de l'électromagnétisme aéroporté et du magnétisme aéroporté ; quant à la géophysique tactique, elle pourrait combiner des levés de VLF et de gravimétrie. Le deuxième budget peut correspondre à

Tableau 3.1 : Les méthodes géophysiques minières, leurs coûts
et leurs applications

AEROPORTE					AU SOL			
Coût	Applications	Dispositifs	Méthodes	Paramètre Physique Mesure	Dispositifs Appareillage	Applications	Coût	
	Cartographie géologie structurale	téledétection photo-aérienne	Remote-sensing	signature spectrale				
			Gravimétrie	champ de pesenteur (densité)	Gravimétrie	Minéralisation de forte densité-Dôme de sel - Cartographie du substratum	150F/point	
120F/km	Cartographie minéralisations associées à la magnétite	Magnétomètre	Magnétisme	champ magnétique (susceptibilité magnétique)	Magnétomètre	Minéralisations associées à la magnétite	20F/point	
			Electrique	Résistivité	Trainnées de résistivité - Rectangle de résistivité	Sulfures massifs - cartographie détaillée des fractures		
				Polarisation spontanée	potentiel électrique	Millivoltmètre	Amas minéralisés	25F/point
				Polarisation induite	chargeabilité	Générateur de fréquences millivoltmètre	Sulfures massifs ou disséminés	100F/point
				Mise à la masse	potentiel électrique	Potentiomètre	Cartographie d'un gisement conducteur	40kF/km ²
				Tellurique	champ électrique	Potentiomètre	Axes structuraux	5kF/km ²
			Electromagnétique	Magnétotellurique	champ électromagnétique	Potentiomètre et magnétomètre	Amas minéralisés réservoirs géothermaux	
200F/km	amas conducteurs	Dighem, Afmag		Fréquentiel	résistivité	Mélos, Turam	Amas conducteurs	2kF/km
200F/km	amas conducteurs	INPUT (Copro)	Transitoire	résistivité	Sirotem	Amas conducteurs	2kF/km	
			Sismique	VLF	champ électromagnétique	Récepteur VLF	Ames conducteurs - cartographie des fractures	20F/point
				Réfraction	vitesse de propagation	Enregistreurs sismiques	Structures sédimentaires	10kF/km
				Réflexion	contrastes de vitesse	Enregistreurs sismiques Mini-sosie	Structures sédimentaires (uranium, charbon)	40kF/km
150F/km	gisements uranifères, cartographie de granite	Scintillomètre Spectromètre	Radiométrie	rayonnement γ	Scintillomètre Compteur Geiger	Gisements uranifères		

une exploration pour l'uranium dans un contexte sédimentaire, avec une campagne de radiométrie aéroportée en stratégique, et, en tactique, des profils sismiques haute résolution et une cartographie des résistivités (par la méthode des rectangles ou par VLF) ; des diagraphies de rayonnement γ seraient dans ce cas systématiquement effectuées dans les sondages. Quant au troisième budget, il illustre une situation peu favorable à la géophysique, par exemple celle d'un gisement aurifère ou de minerai carbonaté, pour laquelle, seule par exemple l'étude des axes de fracturation peut être effectuée par géophysique à l'aide de méthodes électriques.

Tableau 3.2
Quelques budgets types d'exploration (en kF)

Objectif	Sulfure massif	Uranium	Gisement carbonaté ou oxydé
Etude préliminaire	50	50	50
Géophysique stratégique	200	300	0
Géochimie stratégique	100	150	200
Géologie semi-tactique	400	500	500
Géophysique tactique	350	1 000	100
Géochimie tactique	200	200	300
Géologie détaillée	400	500	350
Sondages (dont diagraphies)	3 200	7 100(700)	3 400
Synthèse géologique	100	200	100
Total	5 000	10 000	5 000
Part de la géophysique	11 %	20 %	2 %

Mais il faut se souvenir qu'un programme d'exploration peut être grandement modifié au cours de son déroulement, soit écourté à cause de résultats décevants dans les premières phases (ou inversement d'ailleurs à cause d'une découverte économique trop rapide), soit prolongé à cause d'éléments encourageants requérant une investigation plus poussée.

Pour faire mieux apparaître l'articulation de la géophysique dans un programme d'exploration, un certain nombre d'objectifs de prospection vont être considérés de façon plus détaillée. Dans tous les cas, il sera supposé que les données existantes sur la région prospectée se limitent à celles fournies par une carte géologique régionale, des photographies aériennes ou des images de télédétection.

a - Recherche de gisements oxydés ou carbonatés (nickel, chrome, plomb, zinc)

L'étude géologique ayant permis de définir un contexte favorable, et une prospection alluvionnaire ayant délimité conjointement des zones anormales, le stade tactique pourra réunir une prospection géologique de détail, une prospection géochimique à maille resserrée (hecto-

métrique par exemple) et une campagne de gravimétrie (même maille). Cette dernière méthode est en effet bien adaptée à la recherche de formations basiques, plus denses et susceptibles de porter la minéralisation recherchée. L'étape suivante de la prospection consistera alors en sondages, percutants d'abord à cause de leur moindre prix de revient, puis carottés si l'analyse géochimique des cuttings est encourageante. Il faut noter que ce type d'exploration est particulièrement peu adapté à la géophysique, les méthodes classiques, électriques, magnétiques ou électromagnétiques ne donnant que peu de résultats. La part de la géophysique dans un tel type d'exploration ne peut donc pas dépasser 5 % du budget total.

b - Recherche de sulfures disséminés (cuivre, nickel, plomb)

Ce cas se prête beaucoup plus à l'usage de la géophysique. Il s'agit de chercher des gisements de type "porphyry-copper" ou des sulfures de nickel, dont on sait que la teneur peut être très basse (inférieure à 1 %), à cause de la relation facilité de traitement du minerai. Au premier stade de l'exploration, couplé avec la géologie et la géochimie alluvionnaire, un levé aéroporté de magnétisme pourra, d'une part aider à délimiter les grandes structures régionales, et d'autre part détecter la présence de minéraux magnétiques pouvant être associés au gisement. Au deuxième stade, la géologie et la géochimie seront complétées par l'arsenal des méthodes électriques, et principalement la polarisation provoquée qui est, de loin, la plus employée car très efficace. Le stade suivant est alors comme précédemment celui des sondages. Pour ce cas, la géophysique peut représenter de 10 % à 20 % des dépenses d'exploration.

c - Recherche de sulfures massifs (cuivre, plomb, zinc, argent)

L'éventail des méthodes varie avec la taille et la profondeur des gisements cherchés. En phase stratégique, un levé aéroporté d'électromagnétisme sera effectué, surtout si l'environnement n'est pas trop parasité par des lignes électriques ou des canalisations conductrices. Les amas de sulfures massifs ont généralement une bonne réponse à l'électromagnétisme. Comme dans tous les programmes d'exploration, géologie et géochimie alluvionnaire interviennent à ce stade (cette dernière est peu onéreuse, comparée au prix d'une campagne aéroportée, lorsque les communications terrestres sont aisées). Pour la phase tactique, on pourra utiliser la polarisation spontanée (gisements peu profonds) ou provoquée, le profil électrique ou électromagnétique au sol, et la gravimétrie pour les tonnages substantiels, cette dernière méthode pouvant permettre une investigation plus profonde que les précédentes. A cause de son faible coût et de l'information quantifiée qu'elle apporte sur les métaux recherchés, la géochimie sera poursuivie à maille relativement serrée (50 m par 50 m). Pour la reconnaissance des indices, une mise à la masse donne des informations précieuses sur l'extension et la continuité des minéralisations. Là encore, la géophysique peut occuper une part importante du budget d'exploration, de l'ordre de 15 % à 20 %.

d - Recherche d'uranium

C'est le type de recherche où la géophysique est la plus employée. Dès le premier stade, elle intervient par un levé aéroporté de radiométrie (et de magnétisme pour préciser les structures géologiques).

La géochimie est pratiquée systématiquement à cause de son coût relativement faible. Au deuxième stade, on opère un levé radiométrique à maille serrée (mi-hectométrique) avec, si possible, un scintillomètre à discrimination d'énergie afin de séparer l'uranium des autres substances radioactives. Des profils électriques seront réalisés simultanément pour cartographier le réseau de fractures (les fractures secondaires sont de bons pièges à uranium), de plus, certains contextes peuvent échapper à la radiométrie. En milieu sédimentaire, la sismique réflexion permet également de localiser les pièges possibles ; elle donne une très bonne image des couches rencontrées jusqu'au socle, à condition que les contrastes de vitesse soient suffisants. Son coût étant très élevé, seuls les budgets importants peuvent permettre son utilisation ; mais l'uranium est encore une substance rémunératrice. Au dernier stade de la prospection, enfin, il existe toute une gamme de méthodes de diagaphies dont l'emploi va croissant : outre le rayonnement γ naturel déjà mentionné, ce sont l'activation neutronique, le log γ - γ , et le log sonique. Ce dernier présente l'avantage de restituer la porosité de la roche, d'où sa capacité de retenir l'uranium. Dans un tel programme, la géophysique peut représenter 20 % du budget d'exploration.

INNOVATION ET PROSPECTIVE EN GEOPHYSIQUE MINIERE

4.1 - L'ACTION DE L'ETAT EN FRANCE

L'action de l'Etat envers la recherche en géophysique minière se manifeste à travers celle du ministère de l'Industrie et celle de la DGRST.

Le Ministère de l'Industrie intervient indirectement par l'intermédiaire de programmes de soutien à l'exploration minière (inventaire des richesses minérales françaises, plan cuivre, plan uranium). L'inventaire a surtout profité à la géochimie qui en constitue l'ossature. Pour le plan cuivre, on peut citer la découverte du gisement de Nevès-Corvo au Portugal, pour lequel le plan a financé la moitié des recherches (financement remboursable après découverte), permettant ainsi une importante campagne de gravimétrie qui venait en complément de la carte gravimétrique générale faite à l'initiative de l'état portugais. De même le plan uranium permet d'aider une recherche méthodologique sur la prospection, principalement par géophysique, des gisements d'uranium profonds, sur les bordures nord-ouest et nord-est du Massif Central.

L'aide directe à la recherche et au développement en géophysique est du ressort de la DGRST, surtout à travers l'action concertée "Valorisation des Ressources du Sous-Sol" (VRSS), et le contrat de programme sur les diagraphies avec le BRGM. Sur l'action concertée VRSS, dont l'enveloppe globale est de l'ordre de 10 MF par an, la géophysique a une part de 5 à 10 %. Les sommes distribuées à ce titre sur les cinq dernières années s'échelonnent de 50 à 500 kF. Ces aides, allouées à la suite d'un appel d'offres auprès d'organismes publics et privés ne reçoivent qu'un accueil limité. En effet, au niveau universitaire, il n'existe pas à proprement parler de pôle puissant en géophysique appliquée non pétrolière. Par ailleurs, au niveau industriel, les PMI, pour lesquelles les aides pourraient être significatives, se heurtent souvent à des difficultés d'ordre administratif (constitution du dossier et délai de déblocage des fonds), tandis que certaines grandes entreprises ont des moyens financiers suffisants pour conduire leurs propres recherches sans regards extérieurs. Il faut accessoirement noter que sur certains thèmes, l'action de la DGRST est complétée par des programmes financés au niveau de la CEE.

Pour dynamiser la recherche, il apparaît essentiel de créer et de renforcer un petit nombre de structures concentrées, jouant le rôle de pôles d'activités et de recherches en matière de géophysique minière. On assiste à une évolution positive en ce sens avec, d'une part, le développement à Nancy (INPL) d'une équipe de recherches orientées sur les applications de la géophysique, et, d'autre part, l'installation prochaine du CRG à Orléans, installation financée par la DGRST, avec l'idée de localiser dans la même région un organisme de recherches (CRG), un industriel (BRGM) et une université. Il serait peut-être souhaitable qu'un troisième pôle se cristallise dans le Sud-Ouest, à partir du centre de recherches de la SNEA à Pau, qui accueille déjà quelques étudiants stagiaires et chercheurs préparant une thèse.

On peut s'étonner que la région parisienne, avec l'Ecole des mines de Paris, l'INAG, les universités, et les industriels concernés par la géophysique minière, ne soit par le foyer d'une activité de recherches dans ce domaine. Une des raisons pourrait être une préférence des chercheurs et des universitaires pour la physique du globe. Une autre explication réside en ce que la formation des géologues et des géophysiciens miniers échappe de plus en plus à Paris pour se concentrer à Nancy et à Strasbourg, où des industriels ont une part dans certains enseignements.

Le développement de ces pôles de géophysique appliquée pourrait permettre d'améliorer la liaison entre universitaires et industriels à laquelle ces derniers semblent être favorables ; ils seraient ainsi directement associés à des recherches en milieu universitaire, à travers leur financement et leur suivi. D'autre part il permettrait de redonner aux universitaires un intérêt pour la géophysique appliquée, intérêt qui ne semble pas avoir survécu au professeur CAGNIARD. Sans vouloir ravir à l'Amérique du Nord sa prédominance sur les méthodes aéroportées ou la polarisation provoquée, la France peut néanmoins s'efforcer de jouer un rôle moteur pour certaines méthodes, en particulier celles qui y font actuellement l'objet de travaux et qui ont été citées précédemment : la sismique haute résolution, la magnétotellurique, l'électromagnétisme et les diagraphies. Il faut pour cela maintenir un effort prolongé et continu sur les domaines choisis. Enfin la cristallisation de ces centres serait l'occasion d'attirer les compétences de théoriciens et de praticiens du traitement des données et des mathématiques appliquées pour développer des programmes d'interprétation nécessaires au développement d'une géophysique minière plus quantitative.

4.2 - PROSPECTIVE TECHNIQUE

Les progrès à attendre en géophysique minière portent sur deux axes principaux : l'instrumentation et l'interprétation.

a - L'instrumentation

Le développement actuel de l'électronique et sa miniaturisation ouvrent des perspectives importantes en géophysique. Elle permet en effet une rapidité accrue de l'acquisition des données ; de plus, du fait de la légèreté qui peut être gagnée dans les appareillages, la souplesse d'emploi augmente et la part de traitement automatique des données qui peut être intégrée dans les dispositifs de terrain va croissant et autorise un contrôle in situ sur les mesures.

Un développement spécifique important pourrait être la liaison entre les mesures électromagnétiques et de polarisation provoquée. En effet ces deux méthodes tendent à être toutes deux utilisées dans le domaine transitoire, la seule différenciation entre elles au niveau de l'acquisition des mesures se situant dans les fenêtres de temps d'échantillonnage des réponses. Un double point de vue pourrait alors être obtenu à l'aide d'un seul levé.

Un autre développement potentiel est celui des diagraphies qui font déjà l'objet d'un important travail d'adaptation à partir des dispositifs pétroliers. Les diamètres des forages miniers sont en effet plus petits et une miniaturisation est nécessaire. L'état d'avancement de la technique dans ce domaine peut même paraître en avance sur la demande des prospecteurs miniers qui, hormis pour l'uranium, n'utilisent pas les diagraphies. L'augmentation du coût de l'énergie, et donc celui des forages, pourrait renverser cette tendance.

Enfin le développement des mesures en transparence (de forage à forage ou entre forage et surface) est verbalement souhaité par la profession minière, tant pour la reconnaissance des indices que pour la recherche d'extensions de gisements connus, et aucun obstacle théorique ne semble s'y opposer : un important travail reste à faire en ce domaine.

b - Interprétation

Essentiellement qualitative jusqu'à présent, la démarche du géophysicien minier doit pouvoir progresser vers le quantitatif. Le développement du traitement des données permet en effet de dépasser le stade du contourage d'anomalies. L'utilisation des moyens informatiques est pour cela un atout appréciable. L'informatique de bureau ouvre la voie à l'automatisation et la systématisation des interprétations faites autrefois à l'aide d'abaques ; le sens de la géologie étant difficilement programmable, un contrôle étroit du géophysicien doit cependant se maintenir : les systèmes interactifs peuvent le permettre. D'autre part, la rapidité et la capacité de mémoire des nouvelles générations d'ordinateurs laissent augurer des progrès dans l'interprétation des structures bidimensionnelles et peut-être dans certains cas simples tridimensionnelles (utilisation de la modélisation par éléments finis, par exemple).

4.3 - PROSPECTIVE ECONOMIQUE

L'effort d'investissement consacré à la géophysique minière est fonction de trois facteurs : le cours des métaux de base, la nature des opérateurs miniers, et le type de gisement recherché.

La géophysique étant d'un emploi souvent coûteux, son développement exige des budgets d'exploration importants. Or on constate que ce budget est directement soumis, chez les compagnies minières, aux fluctuations des cours des métaux. En période favorable, les budgets de recherche sont conséquents, tandis qu'ils deviennent très faibles en périodes de bas cours. On peut d'ailleurs noter que, de manière générale, ils sont trop faibles dans la conjoncture actuelle chez les compagnies minières. Peut-être la hausse des cours à la fin de l'année 1979 et au début de 1980 permettra-t-elle de relancer l'investissement de recherche minière. Il est donc, en tout état de cause, difficile d'avancer des prévisions quant au développement de la géophysique à cause de ce facteur d'évolution que constitue les cours des métaux. Il semble toutefois que, malgré leurs fluctuations, se dessine un renchérissement progressif après la longue période de dépréciation des trente dernières années en monnaie constante.

Le deuxième critère est la nature des opérateurs miniers. Les compagnies classiques sont actuellement rejointes par les sociétés pétrolières et les exploitants de l'uranium qui se trouvent dans une situation financière favorable et qui souhaitent se diversifier vers d'autres substances minérales. Ces nouveaux opérateurs miniers disposant de moyens importants peuvent consacrer à l'exploration minière des budgets substantiels. C'est une des raisons de l'utilisation poussée qu'ils font de la géophysique et comme il a été vu précédemment de leur participation active à l'innovation en matière de géophysique. Par ailleurs, ils ont tendance à employer des méthodes qu'ils connaissent bien, de par leur expérience traditionnelle ; les statistiques mondiales montrent bien une augmentation relative des dépenses de sismique et de radiométrie. Cette tendance devrait se poursuivre dans le proche avenir.

Quant au troisième critère, le type de gisements recherchés, deux tendances apparaissent : ou bien, grâce aux progrès de la minéralurgie et des techniques d'extraction à ciel ouvert, on exploitera des gisements à basse teneur affleurants ou subaffleurants, ou bien grâce aux progrès des techniques souterraines (économie d'énergie dans les broyages et concassages, amélioration du transport des minerais vers la surface,...), on se tournera vers les gisements cachés (profonds ou masqués) à teneur plus élevée. En fait, il est vraisemblable que ces deux tendances se cotoieront, les problèmes d'environnement et de protection des sites influant peut-être en faveur de la seconde. La première favorise la géochimie au détriment de la géophysique. La seconde au contraire ouvre de larges possibilités aux méthodes comme la gravimétrie, l'électromagnétisme, la sismique, tandis que la géochimie et même la géologie sont handicapées par la profondeur de la cible. A l'heure actuelle, la géophysique permet une investigation jusqu'aux 200 mètres pour les ressources minières, et même 400 mètres avec certaines méthodes pour les plus gros gisements. Il est prévisible que pour les recherches de ce deuxième type de gisements, des investissements seront faits pour améliorer la profondeur d'investigation des méthodes géophysiques.

Pour finir, il faut noter que le regain d'attention actuel dont bénéficie le charbon devrait conduire à une utilisation plus importante des méthodes sismiques qui sont particulièrement bien adaptées aux structures sédimentaires.

En conclusion, il semble donc, à travers cette analyse rapide, que des investissements puissent être attendus en géophysique, à la fois dans les méthodes héritées des spécialistes du pétrole et de l'uranium et dans celles qui peuvent donner une image relativement profonde de la structure géologique.

4.4 - LES ECHANGES ENTRE LA FRANCE ET LES AUTRES PAYS

Quoique de nombreuses méthodes et appareillages aient été naguère développés en France, nos exportations vers l'étranger sont actuellement très limitées. Il faut toutefois préciser que deux géants mondiaux de la géophysique pétrolière sont Schlumberger, compagnie d'origine française, et la CGG, totalement française. En géophysique minière, Geoterrex, filiale canadienne de CGG est une des sociétés de service les

plus importantes dans ce domaine. Cela étant, il existe des "chasses gardées" nord-américaines (surtout canadiennes) parmi lesquelles figurent des méthodes électriques (PP) et électromagnétiques (aéroportées) : celles-ci, mises au point pour la plupart aux Etats-Unis et au Canada y ont été constamment développées et il semble difficile que la France occupe une position de pointe dans chacun de ces domaines, du fait de l'étroitesse du marché. En revanche, il existe des techniques que les sociétés françaises dominent, comme la sismique haute résolution, mise au point par les équipes du CEA et maintenant développée par Geomatic Service. De même, si les recherches menées à Nancy (INPL) et par le CRG sur la magnétotellurique débouchent sur la mise au point d'un nouveau magnétomètre et d'une nouvelle méthodologie, cela constituera une autre position de premier plan international. Notre effort sur les diagraphies peut également conduire à une position intéressante si le marché correspondant se développe. Il importe donc de mettre l'accent sur ces méthodes, et, à ce titre, la création de pôles, tel qu'il a été suggéré plus haut, permettrait de maintenir la continuité de ces programmes.

CONCLUSION

Du fait de l'expérience importante qui a maintenant été accumulée, dans toutes les parties du monde, en géophysique minière, il apparaît que cette dernière est désormais dans une phase de maturité, après les grands élans et les grandes déceptions dont elle a été l'objet. Même si les expériences personnelles ont encore une grande part dans les opinions vis-à-vis de telle ou telle méthode, la démarche de la géophysique est mieux comprise du géologue qui en utilise désormais directement certaines méthodes légères. L'accès des compagnies pétrolières au monde minier a été un facteur favorable du fait de leur expérience propre en sismique et en magnétisme. De même, la part croissante de l'uranium dans les programmes d'exploration augmente l'emploi de la géophysique qui possède, en la radiométrie, une méthode spécifique. Enfin, le développement prévisible de la production charbonnière s'accompagne d'un effort de prospection dans lequel la sismique et les diagraphies pourraient prendre une place significative.

De nombreux gisements subaffleurants sont encore sans doute à découvrir dans les pays en voie de développement ou d'industrialisation et la géochimie, mais aussi la géophysique aéroportée, sont alors de bons outils d'exploration. Cependant, au moins dans les pays explorés de longue date, la prospection de gisements plus profonds devient également nécessaire et l'utilisation de la géophysique ne peut qu'y être croissante. De plus, la plupart des compagnies minières s'accordent sur les services que pourraient rendre l'emploi des diagraphies et surtout des mesures en transparence dans la phase ultime de l'exploration. Si enfin une phase haussière des cours des métaux de base se dessine, il est apparent que la géophysique va tendre à consolider et élargir sa place dans les programmes de prospection, et que le maintien d'un effort de recherche et de développement dans cette discipline est par là tout à fait justifié. Un rapprochement des compétences des universitaires et des industriels, par l'intermédiaire d'un petit nombre de pôles de recherche, est pour cela, nécessaire.

ANNEXE A

DESCRIPTION DES METHODES GEOPHYSIQUES

APPLIQUEES EN RECHERCHE MINIERE

A.1 - LES METHODES DE CHAMP

a - Gravimétrie

La prospection gravimétrique utilise le champ de gravitation naturel et se pose le problème de déterminer la répartition des masses qui sont à l'origine de ce dernier. Ce problème dit inverse (par opposition au problème direct du calcul du champ dû à une répartition donnée de masses) comporte en théorie une infinité de solutions, mais des limitations interviennent dues à la plage restreinte des densités plausibles et à la géométrie de la structure recherchée, et de fait, certains paramètres comme la profondeur d'une masse anormale peuvent être estimés avec une fiabilité raisonnable.

Le principe des gravimètres est fondé sur la mesure du déplacement de la position d'équilibre d'une masse à l'extrémité d'un fléau, masse dont le poids est équilibré par l'action d'un ressort.

Avant toute interprétation, les mesures de terrain subissent un certain nombre de corrections qui ont pour objet d'éliminer l'influence de toutes les causes connues ; ce sont :

- la correction luni-solaire effectuée à partir de tables publiées annuellement et supprimant l'attraction de la lune et du soleil ;
- la correction de latitude qui tient compte de ce que la Terre est un ellipsoïde en rotation et non pas une sphère statique ;
- la correction topographique qui élimine l'effet des défauts ou des excès de masse des vallées et collines avoisinant la station ;
- la correction d'altitude, somme de la correction à l'air libre, qui compense le fait que chaque station est à une distance différente du centre de la Terre, et de la correction de Bouguer qui élimine l'effet d'une couche infinie entre le plan de référence et le plan de la station. Pour effectuer ces corrections avec la précision nécessaire, un levé topographique et un positionnement très précis sont nécessaires et représentent une part importante du coût d'une prospection gravimétrique.

L'usage de la gravimétrie est principalement direct pour la détection d'amas lourds (chromite, sulfures massifs) ou de structures

légères (dômes de sel, cavités). Cette méthode permet de localiser une masse supplémentaire de un million de tonnes à une profondeur de cent mètres, et les anomalies sont inversement proportionnelles au carré de la distance à la source.

b - Magnétisme

La prospection magnétique utilise le champ magnétique naturel terrestre dont les variations locales reflètent les propriétés magnétiques des roches. Employée dès le 17^e siècle en Suède pour essayer de découvrir des gisements de magnétite à l'aide d'une boussole, c'est la plus ancienne des méthodes de géophysique appliquée. Les anomalies sont causées par la présence de minéraux ferromagnétiques, principalement la magnétite mais aussi la pyrrhotine et l'ilménite.

Les levés magnétiques miniers au sol ou aéroportés sont effectués le plus souvent avec des magnétomètres à protons : fondés sur le phénomène de la précession dont la fréquence est liée à l'intensité des champs. L'utilisation directe de la prospection magnétique concerne la recherche de magnétite, mais l'utilisation indirecte pour la cartographie et la géologie structurale occupe une place prépondérante.

A.2 - METHODES ELECTRIQUES ET ELECTROMAGNETIQUES

a - Les sondages électriques et électromagnétiques

Ces méthodes visent à la détermination de la distribution des résistivités dans le sous-sol à l'aide de mesures effectuées en surface. Les sondages électriques classiques utilisent le champ électrique créé par l'injection d'un courant continu dans le sol à l'aide de deux électrodes. Les sondages électromagnétiques utilisent quant à eux le champ électromagnétique créé par le passage dans une boucle d'un courant alternatif ou transitoire ; il est également possible de procéder par injection dans le sol d'un courant alternatif ou transitoire, ou même dans le cas particulier du sondage magnétotellurique, d'utiliser le champ électromagnétique associé aux courants telluriques naturels et culturels. L'utilisation du vocable "sondage" provient de ce que, pour un sous-sol tabulaire, la résistivité en fonction de la profondeur est déterminée biunivoquement par le champ en fonction de la distance (en courant continu), de la fréquence (en courant alternatif et en magnétotellurique) ou du temps (en courant transitoire). Le nombre des variantes de sondage est élevé, avec, outre les différents courants utilisés, la possibilité d'utiliser des dispositifs de géométrie variée. En prospection minière, ces méthodes sont le plus souvent utilisées sous forme de profilage avec un nombre restreint de mesures pour chaque station. Ainsi en électromagnétisme aéroporté, les dispositifs fréquentiels actuels comportent-ils deux fréquences et le dispositif transitoire Input quatre instants d'échantillonnage. De même, au sol, les études VLF utilisent les fréquences des émetteurs militaires à destination des sousmarins.

Les anomalies détectées par les dispositifs actuels se situent rarement à une profondeur supérieure à deux cent mètres.

b - La polarisation spontanée

La polarisation spontanée ou PS procède par la cartographie des équipotentiels naturelles. Les causes de ce potentiel ne sont pas complètement élucidées : une explication partielle du phénomène est celle d'un effet de pile dû à l'oxydation d'une masse minéralisée conductrice. Très simple d'usage et donc très peu coûteuse, cette méthode est très employée en prospection minière dans les phases tactique et de reconnaissance des indices.

c - La polarisation provoquée

C'est aussi un effet de pile qu'utilise la polarisation provoquée : un courant injecté dans le sol induit des échanges ioniques entre grains métalliques et liquide interstitiel et crée un potentiel électrochimique dont on observe la décroissance dans le temps après arrêt de l'injection du courant, ou la dépendance avec la fréquence lorsqu'une source alternative est utilisée. En fait la cause du phénomène mesuré n'est pas uniquement celle indiquée ci-dessus et est encore à ce jour sujette à débats. Cette méthode a connu un développement très important dans les années cinquante et soixante à la suite de quelques beaux succès en exploration minière, pour les sulfures disséminés. Des efforts sont actuellement déployés pour la rendre plus sélective en essayant de différencier les réponses (ou signatures) des différentes minéralisations.

d - Mise à la masse

La mise à la masse est également une méthode de potentiel dont l'objectif est de délimiter un gisement une fois connu un indice de minéralisation. Son principe est de créer une différence de potentiel entre un "infini" et le gisement (supposé infiniment conducteur) pour évaluer la forme et les dimensions du gisement grâce à la cartographie des équipotentiels.

A.3 - LES METHODES SISMIQUES

Les méthodes sismiques utilisent les contrastes de vitesse de propagation des ondes. La sismique réfraction enregistre les temps d'arrivée en différents points d'un ébranlement pour détecter les couches plus rapides du sous-sol. Quant à la sismique réflexion, elle enregistre les échos successifs d'un même ébranlement, échos renvoyés par les différents interfaces ; la précision des profils sismiques dépend de la qualité de la source de l'ébranlement (de son contenu fréquentiel) et de la réussite du filtrage des ondes superficielles. Ces méthodes ne sont interprétables que dans des structures essentiellement tabulaires et sont donc utilisées dans un contexte sédimentaire (uranium et charbon essentiellement).

A.4 - LES METHODES RADIOMETRIQUES

La prospection radiométrique est fondée sur la mesure du rayonnement γ émis par les éléments radioactifs contenus dans les roches (uranium, potassium, thorium). Elle utilise donc une source naturelle. Deux types d'instruments sont employés, à savoir :

- le classique compteur Geiger, basé sur l'ionisation provoquée par le rayonnement γ , et utilisé par les géologues sur le terrain ;
- le scintillomètre, basé sur la transformation des rayons γ en rayons lumineux par un cristal d'iodure de sodium et utilisé principalement en prospection aéroporté ; son usage au sol va néanmoins croissant ; grâce à un spectromètre, il est possible de différencier les éléments radioactifs émetteurs de rayons γ .

L'application directe quasi exclusive de cette méthode est bien entendu la recherche d'uranium, l'application indirecte étant la cartographie des granites.

A.5 - LES DIAGRAPHIES

Les méthodes géophysiques décrites précédemment permettent d'inférer à distance la structure du sous-sol à partir de mesures de surface. Les diagraphies effectuées en forage valorisent celui-ci en donnant des indications sur les structures environnant ce forage, avec un rayon de pénétration variable suivant les différentes méthodes. Les différents types de diagraphies sont les suivants :

- diagraphies électriques ou électromagnétiques ;
- diagraphie de rayons γ (radiométrie) ;
- diagraphie d'activation neutronique qui est une indication du contenu en hydrogène ;
- diagraphie γ - γ qui est une mesure de la densité des formations traversées ;
- diagraphie sonique qui donne une information sur la porosité.

A l'exception de la diagraphie de rayons γ systématiquement utilisée dans la prospection pour l'uranium, les autres types de diagraphies sont peu utilisées actuellement en prospection minière.

ANNEXE B

L'INNOVATION FRANCAISE EN GEOPHYSIQUE MINIERE

Les centres de l'innovation française et leurs activités

Les trois sociétés de services françaises qui interviennent régulièrement dans le domaine la géophysique minière sont la Compagnie Générale de Géophysique, Géomatic Service et Geoconsult. Pour la première, cette activité minière est néanmoins marginale, la quasi-totalité de ces prestations étant axée sur la recherche pétrolière ; son effort d'innovation est donc essentiellement tourné vers ce domaine, et ne concerne qu'indirectement l'exploration minière, par le biais éventuel de l'adaptation de techniques pétrolières. La seconde, de chiffre d'affaires plus modeste mais quasi spécifiquement orientée vers les applications minières de la géophysique (qui représentent 80 % de son activité contre 20 % au Génie civil), consacre 10 % de son budget à la recherche et au développement, essentiellement sur la technique de sismique réflexion haute résolution et l'adaptation des logs soniques aux forages miniers. Quant à la troisième, son activité est surtout tournée vers le Génie civil bien qu'elle maintienne des prestations régulières en géophysique minière avec la majorité des méthodes au sol.

L'activité géophysique du BRGM se partage entre les travaux propres et la prestation de services qui, hormis celles réalisées dans le cadre de contrats de coopération entre états, est surtout orientée vers le Génie civil. Son effort d'innovation a été fructueux dans le domaine du traitement des données gravimétriques et magnétiques. Dans le domaine de l'appareillage, l'apport a été plus modeste ; le dispositif électromagnétique Mélos est en concurrence directe avec un grand nombre de dispositifs analogues d'origine nord-américaine. Un effort important est actuellement porté sur l'appareillage et la méthodologie des diagraphies.

La SNEA, dans le cadre de sa politique de diversification minière, fait également un effort de recherche et de développement en géophysique minière. Après le Mini-Sosie, appareil de sismique réflexion légère, qui est dans le prolongement des techniques d'exploration pétrolière, l'accent est aujourd'hui porté sur les méthodes électromagnétiques, tant en ce qui concerne l'appareillage que le traitement des données et l'interprétation. Pour ce qui est de l'appareillage, l'effort est interne avec la mise au point d'un dispositif électromagnétique polyvalent et externe avec une participation au financement du développement d'un nouveau système électromagnétique transitoire aéroporté, le Cotran.

Un désir souvent exprimé chez les équipes des milieux industriels est celui d'une concertation et d'un travail de coopération avec les équipes universitaires. La liaison université-industrie est en effet assez réduite en géophysique minière, probablement du fait de la dissémi-

nation très importante des laboratoires universitaires ayant un intérêt dans cette discipline, intérêt qui reste d'ailleurs le plus souvent limité.

Dans le milieu universitaire, les plus actifs en géophysique appliquée à l'exploration minière sont les équipes de l'Ecole de géologie de Nancy (au sein de l'INPL) dont les travaux sur la mise au point d'un magnétomètre cryogénique pourraient faire progresser la magnétotellurique, du Centre de Recherches Géophysiques dont l'intérêt majeur est également la magnétotellurique, sans oublier l'Institut de physique du Globe de Strasbourg et les universités de Lille, Bordeaux et Montpellier. En outre par certaines applications de ses recherches, l'Institut français du pétrole participe à l'innovation en géophysique minière.

LA GEOPHYSIQUE D'EXPLORATION MINIERE

PRESENT ET AVENIR

Eric DELIAC

Pierre VALLA

Au cours du XXème siècle, les outils de l'exploration minière ont connu un formidable développement. Le prospecteur, avec son marteau et sa loupe, a vu apparaître la géophysique, la géochimie, les techniques de sondages ou d'observations aéroportées. La géophysique en particulier, après de beaux succès au Canada, a été l'objet d'un véritable engouement qui, comme tout excès, a conduit à des déceptions. Des questions ont alors été posées sur la validité de l'outil, les progrès à attendre, les investissements à effectuer compte tenu du coût élevé des méthodes. C'est ainsi qu'ont surgi des débats contradictoires, et qu'on assiste semble-t-il depuis quelques années à une stagnation de l'emploi de la géophysique.

On a donc essayé, à travers la présente étude, de clarifier d'aspect "mythes et réalité" de la géophysique, en passant en revue les différentes méthodes utilisées, tant du point de vue technique qu'économique, et de faire un peu de prospective tout en s'interrogeant sur ce que pourrait être la place de la France dans le domaine de la géophysique minière.

1 - PRESENTATION DES METHODES GEOPHYSIQUES MINIERES

Les méthodes géophysiques consistent à mesurer des paramètres physiques des roches (densité, radio-activité, résistivité, ...). Elles peuvent être directes lorsque le paramètre mesuré est spécifique de la substance recherchée, ou indirectes lorsque le paramètre est lié à l'environnement de la minéralisation.

Ces méthodes se divisent en quatre grandes familles : les méthodes de champ, les méthodes électriques et électromagnétiques, les méthodes sismiques, les méthodes radiométriques. Leur articulation parmi les divers outils d'exploration minière est résumée dans le tableau 1.1. Comme exemples d'application, figurent l'amas sulfuré du Rouez (électromagnétisme aéroporté, SNEA), le gisement de sulfures massifs de Neves-Corvo (gravimétrie, syndicat Penarroya - BRGM - état portugais), le gisement d'uranium du Bernardan (résistivité, Cie minière de Dong-Trieu).

L'effort actuel de recherche en géophysique appliquée porte en France sur la sismique haute résolution, la magnéto-tellurique, les diagraphies, les méthodes électromagnétiques.

2 - PLACE ECONOMIQUE DES METHODES GEOPHYSIQUES

La revue "Geophysics" publie chaque année des statistiques sur les dépenses engagées en géophysique. Les tableaux 2.1, 2.2 et 2.3 indiquent le détail de ces dépenses pour la géophysique minière de 1974 à 1978. Quoiqu'il en soit, ces chiffres soient imparfaits, il faut néanmoins remarquer que 95 % des dépenses de géophysique appliquée concernent les hydrocarbures, que les dépenses de géophysique minière demeurent stagnantes et que l'Amérique du Nord est le centre le plus important d'utilisation.

...

Quant à la part de la géophysique dans l'exploration des compagnies minières françaises et sa ventilation en méthodes aéroportées, au sol, et diagraphies, elles sont données par le graphique 2.4.

3 - ARTICULATION DE LA GEOPHYSIQUE DANS L'EXPLORATION MINIERE

Le tableau 3.1 résume les applications et les coûts moyens des différentes méthodes géophysiques. Celles-ci sont le plus souvent complémentaires de la géochimie quoi que certains environnements obligent à privilégier les unes par rapport aux autres. Dans tous les cas, l'objectif primordial est la reconnaissance des structures géologiques en profondeur.

4 - INNOVATION ET PROSPECTION EN GEOPHYSIQUE MINIERE

En France, le soutien de l'Etat à l'innovation en matière de géophysique minière est double. Il est indirect par les plans Cuivre et Uranium qui permettent de soutenir les recherches méthodologiques. Il est direct par la DGRST avec l'action concertée "valorisation des ressources du sous-sol" dont une partie est consacrée à la géophysique. Néanmoins, les pôles de recherche en ce domaine apparaissent encore relativement faibles.

Les progrès que l'on peut attendre en géophysique appliquée découlent pour la plupart de l'utilisation de la miniaturisation électronique pour développer des appareillages plus performants et plus sophistiqués permettant un meilleur contrôle de l'acquisition des données sur le terrain. Les possibilités nouvelles, quant à l'interprétation, apparaissent également substantielles. Enfin, les diagraphies et surtout les mesures en transparence semblent être l'objet d'un besoin des opérateurs et devraient donc se développer substantiellement.

C O N C L U S I O N

Du fait de l'expérience importante qui a maintenant été accumulée dans toutes les parties du monde en géophysique minière, il apparaît que cette dernière est désormais dans une phase de maturité, après les grands élans et les grandes déceptions dont elle a été l'objet. Sa démarche est mieux comprise du géologue qui en utilise désormais directement les méthodes simples, et elle est acceptée par la plupart comme complémentaire de la géochimie. L'accès des compagnies pétrolières au monde minier a été en cela un facteur favorable du fait de leur expérience en sismique et en magnétisme ; de même la part de plus en plus importante de l'uranium dans les programmes d'exploration favorise l'emploi de la géophysique qui possède avec la radiométrie une méthode spécifique.

L'utilisation de la géophysique ne peut qu'être croissante dans la prospection de gisements plus profonds qui, au moins dans les pays explorés de longue date, devient nécessaire. La majorité des compagnies minières s'accordent également sur les services que pourraient rendre l'emploi des diagraphies et surtout des mesures en transparence dans la phase ultime d'exploration. Il est donc apparent que la géophysique va tendre à consolider et élargir sa place dans les programmes de prospection, et que le maintien d'un effort de recherche et de développement dans cette discipline est par là tout à fait justifiée.

Tableau 1.1 : Les outils de la prospection minière

Phase	Stratégique	tactique	Reconnaissance des indices
maille	Kilométrique	hectométrique	sondage
surface prospectée	500 à 2 500 km ²	10 à 250 km ²	≤ à 5 km ²
GEOLOGIE	Cartographie prospection marteau prospection alluvionnaire	cartographie fine échantillonnage	géologie des carottes
GEOCHIMIE	Géochimie alluvionnaire Géochimie sol Stream-sédiments	prélèvements à maille fixe	analyse des cuttings analyse des carottes
GÉOPHYSIQUE	Méthodes aéroportées (mag., EM, radiométrie)	magnétisme, gravimétrie électrique, électromagnétisme sismique radiométrie	gravimétrie, PS diagraphies mise à la masse

Tableau 2.1 : Dépenses géophysiques mondiales (hors pays de l'Est) de 1974 à 1978

(d'après "Geophysics", milliers de \$ US)

	1974		1975		1976		1977		1978	
		%		%		%		%		%
Hydrocarbures	1.231.637	96,0	1.185.334	92,8	1.073.336	93,8	1.092.630	93,6	1.600.144	95,7
Mine	27.047	2,1	51.408	4,0	44.151	3,9	52.166	4,5	31.684	1,9
Génie Civil	4.357	0,3	14.077	1,1	8.837	0,8	6.930	0,6	8.917	0,5
Géothermie	1.276	0,1	2.783	0,2	1.007	0,1	2.302	0,2	2.132	0,1
Hydrogéologie	1.522	0,1	13.363	1,1	6.311	0,5	4.595	0,4	3.277	0,2
Océanographie	17.417	1,4	10.192	0,8	10.341	0,9	4.093	0,3	13.790	0,8
Recherches	-		-		-		4.878	0,4	12.390	0,8
Total	1.283.256	100,0	1.277.279	100,0	1.143.983	100,0	1.167.594	100,0	1.672.329	100,0

Tableau 2.2 : Détail des dépenses en géophysique minière

hors pays de l'Est

(milliers de \$ US)

	1974	1975	1976	1977	1978
Aéroporté :					
magnétisme	7.388	19.548	12.182	15.734	11.481
EM et mag.	1.836	2.808	1.435	2.468	2.201
électromagnétisme	57	80	74	145	160
input	1.795	3.067	4.187	4.914	1.334
radio-activité	1.044	3.722	8.291	9.765	6.994
remote-sensing	-	24	114	11	50
divers	16	28	305	15	-
	12.136	29.277	26.588	33.052	22.220
Au sol :					
sismique	3.275	6.630	5.484	2.038	3.816
gravité	1.219	3.218	2.005	1.922	746
magnétisme	1.454	2.658	1.510	1.651	136
résistivité	1.449	1.514	738	7.568	1.161
polarisation spontanée	79	4	49	6	5
électromagnétisme	695	1.087	814	1.362	379
EM et mag.	1.141	605	1.201	1.015	816
VLF	82	198	216	86	13
polarisation provoquée	2.632	3.009	2.953	2.192	802
magnétotellurique et tellurique	245	221	29	21	259
radio-activité	1.795	863	1.156	422	125
divers	365	1.041	82	223	19
	14.431	21.048	16.237	18.506	8.277
Diagraphies :					
activation neutronique	-	-	-	217	-
radio-activité	50	181	337	214	2
magnétisme	130	105	126	10	-
résistivité	10	204	100	61	72
polarisation spontanée	48	-	15	-	2
électromagnétisme	7	11	-	-	-
polarisation induite	113	167	31	79	-
divers	190	35	33	-	2
	548	703	642	581	78

(D'après "Geophysics")

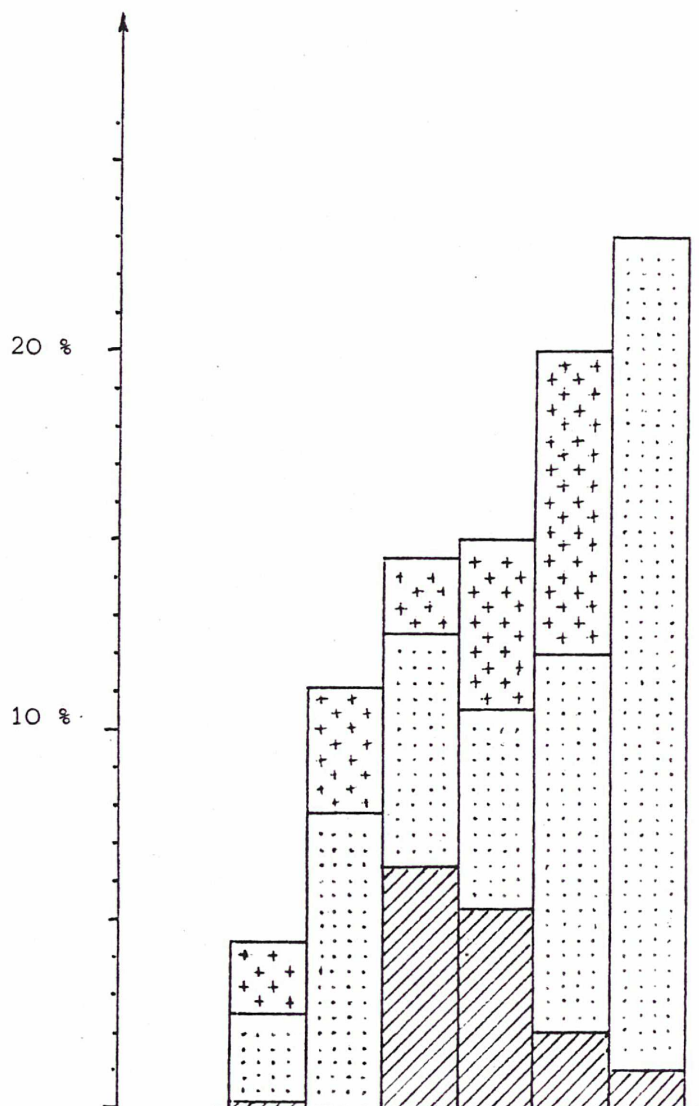
Tableau 2.3 : Répartition géographique des dépenses en
géophysique minière hors pays de l'Est
(milliers de \$ US)

	1974	1975	1976	1977	1978
1 - Géophysique aéroportée					
U.S.A	1.466	3.697	4.399	9.511	7.156
Canada	3.453	7.944	7.937	8.257	6.738
Mexique	-	-	208	-	-
Amérique du Sud	1.021	5.963	6.693	1.856	773
Europe	1.116	1.807	2.265	4.313	2.740
Afrique	3.868	7.230	3.172	5.134	3.654
Moyen-Orient	376	860	786	2.451	710
Extrême-Orient	175		30	168	
Australie et Nelle-Zélande	650	1.748	1.090	1.360	447
	12.125	29.249	26.580	33.051	22.220
2 - Géophysique au sol					
U.S.A.	3.005	3.303	3.236	7.986	1.845
Canada	2.609	2.785	3.318	2.079	1.684
Mexique	163	67	349	64	5
Amérique du Sud	540	2.042	1.247	254	20
Europe	4.731	7.276	3.227	3.918	3.582
Afrique	842	2.899	3.386	1.370	313
Moyen-Orient	88	1.419	201	915	380
Extrême-Orient	389	847	602	1.120	-
Australie et Nelle-Zélande	2.545	968	1.255	824	445
	14.922	20.908	16.183	18.530	8.274

(D'après "Geophysics")

Graphique 2.4 : Répartition des dépenses géophysiques
selon les opérateurs miniers français

Part de la géophysique dans les dépenses d'exploration (1979)



géophysique aéroportée



géophysique au sol



diagraphies