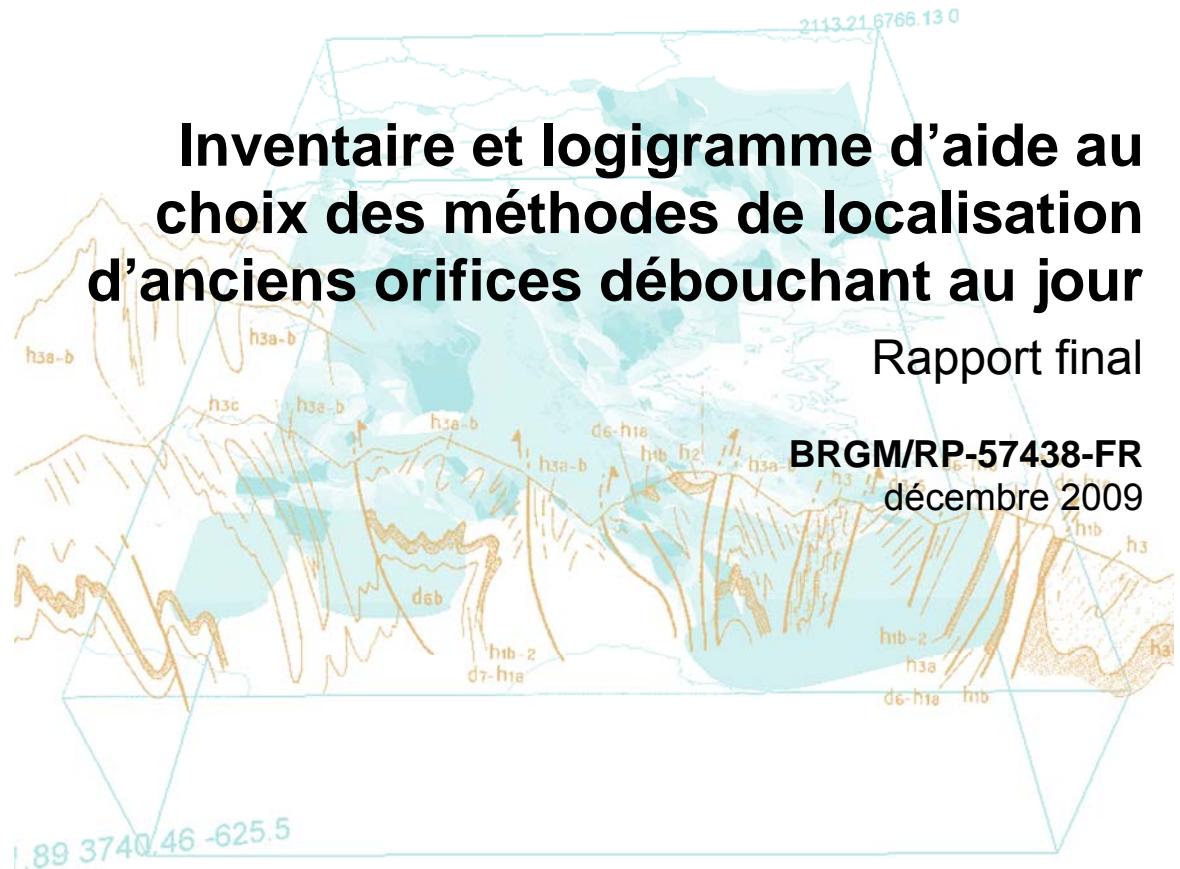




Inventaire et logigramme d'aide au choix des méthodes de localisation d'anciens orifices débouchant au jour

Rapport final

BRGM/RP-57438-FR
décembre 2009



Inventaire et logigramme d'aide au choix des méthodes de localisation d'anciens orifices débouchant au jour

Rapport final

BRGM/RP-57438-FR
décembre 2009

S. Grégoire, S. Chevrel, M. Thauvin

Vérificateur : Nom : E. Equilbey Date : Décembre 2009 Signature : 

Approbateur : Nom : D. Artignan Date : Décembre 2009 Signature : 
--

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots-clés : Après-Mine, ODJ, Cavités, Géophysique, Télédétection.

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

Grégoire S., Chevrel S., Thauvin M. (2009) - Inventaire et logigramme d'aide au choix des méthodes de localisation d'anciens orifices débouchant au jour. BRGM/RP-57438-FR, 161 p., 86 ill., 4 tab.

Synthèse

Dans le cadre des missions de surveillances et de maintien en sécurité liées à l'après-mine, la localisation d'orifices miniers débouchant au jour est une nécessité. Ces orifices miniers sont des points privilégiés d'accès aux travaux souterrains, ainsi que des éléments importants pour permettre un meilleur calage des plans et report des travaux du fonds en surface.

Suivant cette optique, un inventaire et un logigramme d'aide au choix des méthodes utilisées et utilisables pour relocaliser un orifice débouchant au jour (ODJ) ont été réalisés.

L'inventaire des méthodes de localisation a été réalisé à partir de la problématique suivante : un orifice débouchant au jour est cité dans différentes archives, sans mention précise de sa localisation. On assimile l'ODJ recherché à une cavité cylindrique de diamètre métrique et d'une hauteur indéterminée, dont le toit est situé à moins de 10 m de la surface.

Dans ce rapport, on présente un logigramme, qui utilise des critères assez généraux pour permettre un choix parmi des méthodes ayant déjà été utilisées pour la détection d'ODJ ou de cavités. De nombreux autres critères peuvent être ajoutés (nature de l'encaissant, configuration géologique, limite de budget, résistivité des sols...) pour compléter et affiner ce logigramme.

Certaines des méthodes présentées (méthodes géochimiques, microtopographie...) n'ont pas été intégrées dans le logigramme car elles restent encore à valider dans le cas de notre problématique.

Sommaire

1. Problématique, contexte et champs d'investigastions.....	15
1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL	15
1.2. LES ORIFICES DÉBOUCHANT AU JOUR (ODJ).....	15
1.2.1. Typologie.....	15
1.2.2. État des orifices	16
1.2.3. Environnement proche de l'ODJ.....	20
1.3. PROBLÉMATIQUE	22
1.4. APPROCHES.....	22
2. Études documentaires préliminaires.....	25
2.1. LA RECHERCHE D'ARCHIVES ET D'INFORMATIONS.....	25
2.2. L'ENQUÊTE ORALE	28
2.3. L'ÉTUDE GÉOLOGIQUE.....	28
2.4. CONCLUSION	28
3. Le géoréférencement de plans miniers.....	29
3.1. PRINCIPE	29
3.2. MÉTHODOLOGIE	29
3.2.1. Plans miniers et incertitudes liées	29
3.2.2. Numérisation des plans miniers	32
3.2.3. Points de calage et de contrôle	32
3.2.4. Rectification et incertitude moyenne.....	33
3.3. RÉSULTATS ATTENDUS.....	34
3.4. LIMITES	34
3.5. CONCLUSION	34
4. La télédétection	35
4.1. GÉNÉRALITÉS	35
4.2. LES MÉTHODES D'ACQUISITION	35

4.2.1. La photographie aérienne	35
4.2.2. Les radiomètres (ou scanners) aéroportés ou satellitaires	38
4.2.3. L'imagerie satellitaire à très haute résolution spatiale	41
4.2.4. La thermographie infrarouge	41
4.2.5. Les MNT LIDAR	42
4.3. LA PHOTO-INTERPRÉTATION	44
4.3.1. Les indices à rechercher	44
4.3.2. La méthodologie	44
4.3.3. Conclusion	48
4.4. LE TRAITEMENT INFORMATIQUE D'IMAGES NUMÉRIQUES	48
4.4.1. Traitements de thermographie infrarouge	49
4.4.2. Traitement d'images hyperspectrales	52
4.4.3. Traitement et interprétation de MNT et MNE LIDAR	53
4.5. CONCLUSION SUR LES MÉTHODES DE TÉLÉDÉTECTION	53
5. La microgravimétrie	55
5.1. PRINCIPE ET GÉNÉRALITÉS SUR LA GRAVIMÉTRIE ET LA MICROGRAVIMÉTRIE	55
5.1.1. Grandeur mesurée	56
5.1.2. Résultats attendus	57
5.2. MÉTHODOLOGIE	57
5.2.1. Domaine d'application	57
5.2.2. Déroulement d'une campagne	57
5.2.3. Interprétation	58
5.3. LIMITES DE LA MÉTHODE	58
5.4. EXEMPLES DE LOCALISATION DE TRAVAUX MINIERS SOUTERRAINS	59
5.4.1. Exemple du bassin houiller de la Chapelle-sous-Dun (71)	59
5.4.2. Autres résultats	62
5.5. BILAN ET LIMITATIONS	63
6. Les méthodes sismiques	65
6.1. PRINCIPE ET GÉNÉRALITÉS	65
6.1.1. Les types d'ondes	65
6.1.2. Trains d'ondes et angle critique	66
6.1.3. Les différents dispositifs	67

6.2. DOMAINE D'APPLICATION	67
6.3. SISMIQUE RÉFLEXION HAUTE RÉSOLUTION	68
6.3.1. Principe	68
6.3.2. Méthodologie	70
6.3.3. Précaution et limites	74
6.3.4. Exemples	74
6.3.5. Conclusion	76
6.4. SISMIQUE RÉFRACTION	76
6.4.1. Principe	76
6.4.2. Méthodologie	78
6.4.3. Exemple de détection de cavités	78
6.4.4. Conclusion	79
6.5. SISMIQUE EN ONDES DE SURFACES (SASW)	80
6.5.1. Principe	80
6.5.2. Méthodologie	81
6.5.3. Exemples de détection de cavités	82
6.5.4. Conclusion	84
6.6. CONCLUSION GÉNÉRALE	85
7. Les méthodes électriques	87
7.1. GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉTHODES ÉLECTRIQUES	87
7.2. LA POLARISATION SPONTANÉE (PS)	87
7.2.1. Principe	87
7.2.2. Méthodologie	88
7.2.3. Limites	90
7.2.4. Exemple d'application	91
7.2.5. Conclusion	91
7.3. LES MÉTHODES EN COURANT CONTINU	92
7.3.1. Principe des méthodes en courant continu	92
7.3.2. Méthodologie pour le panneau électrique	97
7.3.3. Exemple d'application	98
7.3.4. Conclusion	100
8. Les méthodes électromagnétiques	103
8.1. GÉNÉRALITÉS ET PRINCIPE	103
8.1.1. Généralités	103

8.1.2. Régime de propagation et régime de diffusion	104
8.1.3. Les différentes méthodes électromagnétiques	104
8.2. MÉTHODES BASSE FRÉQUENCE EN CHAMP LOINTAIN (VLF ET RMT).....	106
8.2.1. Principe	106
8.2.2. Méthodologie	109
8.2.3. Limites de la méthode	111
8.2.4. Exemples	111
8.2.5. Modélisation	112
8.2.6. Conclusion	112
8.3. MÉTHODES BASSE FRÉQUENCE EN CHAMP PROCHE (SLINGRAM)	113
8.3.1. Principe	113
8.3.2. Méthodologie	115
8.3.3. Limites de la méthode	115
8.3.4. Modélisation	115
8.3.5. Conclusion	116
8.4. MÉTHODES HAUTE FRÉQUENCE : LE RADAR GÉOLOGIQUE	116
8.4.1. Principe	116
8.4.2. Méthodologie	118
8.4.3. Exemples d'application	120
8.4.4. Conclusion	122
8.5. CONCLUSION GÉNÉRALE	123
9. Méthode magnétique	125
9.1. PRINCIPE	125
9.2. DOMAINE D'APPLICATION	126
9.3. CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE	126
9.4. LIMITATIONS	128
9.5. EXEMPLES D'APPLICATION	128
9.6. CONCLUSION	129
10. Autres méthodes	131
10.1. LA RÉSONANCE MAGNÉTIQUE PROTONIQUE	131
10.1.1. Principe de la méthode	131
10.1.2. Méthodologie	132

10.1.3. Conclusion.....	132
10.2. LES MÉTHODES GÉOCHIMIQUES.....	132
10.3. MICROTOPOGRAPHIE	133
10.4. CONCLUSION GÉNÉRALE.....	134
11. Les techniques géophysiques en forage	135
11.1. AVANT-PROPOS.....	135
11.2. FORAGES.....	135
11.3. LES DIAGRAPHIES.....	135
11.3.1. Diagraphies de forage	136
11.3.2. Diagraphies géophysiques	138
11.4. LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES EN FORAGES.....	139
12. Logigramme des méthodes de localisation d'orifices miniers débouchant au jour.....	141
12.1. PRÉSENTATION DU LOGIGRAMME	141
12.2. UTILISATION ET FONCTIONNEMENT DU LOGIGRAMME.....	145
12.3. CONCLUSION	147
13. Références	149

Table des figures

Figure 1 - Exemples de puits de mine.....	15
Figure 2 - Exemple de cheminée d'aérage et descenderie.....	16
Figure 3 - Exemples d'entrées de galerie.....	16
Figure 4 - Illustration de différents degrés de consolidation.....	17
Figure 5 - a. Puits bouché par une dalle en béton insuffisamment dimensionnée ; b. Exemple de galerie bouchée (Grand'Combe).....	18
Figure 6 - Exemples d'ODJ ouverts	19
Figure 7 - a. Puits Sainte-Barbe ennoyé (Pontgibaud) ; b. entrée de la galerie du Moulin du Coudray, Martingé-Ferchaud.....	19
Figure 8 - Exemples de vestiges de la période d'exploitation.....	20
Figure 9 - Présence insolite de végétation liée à des ODJ.....	20

Figure 10 - Orifices dissimulés dans la végétation.....	21
Figure 11 - Projection frontale de la mine des Combes (puits, galeries débouchant au jour). Source RP-55451-FR.	22
Figure 12 - Forges proches de la mine de Baburet. Vallé de l'Ouzom (Cassini, feuille Pau, 1779).....	26
Figure 13 - Extrait du cadastre d'Urville, section E - Mine de Fer de Gouvix-Urville (source Rapport BRGMRR-40714).	26
Figure 14 - Situation du puits de Doyenné – Pavillon d'Angers-Saint-Barthélemy.	27
Figure 15 - Situation probable du puits de l'Hôtellerie – Pavillon d'Angers – Saint-Barthélemy.	27
Figure 16 - Géoréférencement d'un ancien plan minier en Lambert 2 étendu.	30
Figure 17 - Exemple de différence de tracé et de l' incertitude liée.	31
Figure 18 - Exemple de plans miniers abimés - Grand'Combe.....	32
Figure 19 - Exemple de plan minier géoreférencé superposé à un fond orthorectifié.	33
Figure 20 - Technique de prises de vues à axe vertical permettant la vision stéréoscopique (Pothérat <i>et al.</i> , 1999).	36
Figure 21 - Photographie panchromatique normale et infrarouge.	36
Figure 22 - Détection de vestiges archéologiques par photographie aérienne en visée oblique.....	38
Figure 23 - Principe du radiomètre aéroporté.	39
Figure 24 - Spectres de mélange minéral ternaire vu par un capteur multispectral et un capteur hyperspectral.....	40
Figure 25 - MNT et MNE LIDAR.....	43
Figure 26 - Schéma interprétatif sur photo infrarouge montrant des anomalies de drainages, des fontis et des puits (source LRPC de Clermont-Ferrand).	46
Figure 27 - Détection visuelle de subsidences de surface liées à d'anciennes exploitations de charbon à partir d'une image IKONOS.	47
Figure 28 - Exemple d'utilisations d'imagerie Google Earth à très haute résolution pour la détection d'effondrements liés à des mines souterraines en activité.	48
Figure 29 - Exemples d'anomalies thermiques correspondant : (a) à un puits de marnière protégé par un buisson ; (b) à un puits de marnière invisible sur le terrain ; (c) à une zone perturbée (Source : Guide technique du LCPC détection de cavités souterraines).	51
Figure 30 - Changement de l'état végétatif d'une plantation de pins lié à un phénomène de subsidence.	53
Figure 31 - Principe du gravimètre.	55
Figure 32 - Anomalie résiduelle représentée sous forme de carte de couleur.	56
Figure 33 - Exemple de modèles équivalents en gravimétrie (d'après M. Chouteau, 2000). ...	58
Figure 34 - Microgravimétrie : mesures et résultats.	60

Figure 35 - Coupe géologique interprétée et modélisation gravimétrique quantitative : la Chapelle-sous-Dun.....	62
Figure 36 - Principe des méthodes sismiques.....	65
Figure 37 - Propagation des ondes sismiques dans le milieu (source en $z = 0$, $x = 0$; récepteurs en $z = 0$, x).....	66
Figure 38 - Principe de la sismique réflexion haute résolution.source LCPC.....	69
Figure 39 - a. Regroupement en collection CMP, b. Sondage vertical équivalent.....	72
Figure 40 - Exemple réel de profil sismique réflexion réalisé au-dessus de galeries de carrières de gypse.....	72
Figure 41 - a. Représentation qualitative de l'effet de masquage ; b.Coupe géologique du terrain ausculté ; c. Plan de carrières souterraines (inspection des carrières souterraines de Douai) ; d. Sismogramme réalisé au-dessous des carrières.	73
Figure 42 - Sismique SHR : stack final montrant l'interruption des réflecteurs à l'aplomb des travaux miniers (d'après Grandjean <i>et al.</i> , 1999).	74
Figure 43 - Sismique SHR : modèle de vitesse et section synthétique (d'après Grandjean <i>et al.</i> , 1999).	75
Figure 44 - Le nouveau stack met en évidence une réflexion profonde vers 0,22 s qui est masquée par la zone exploitée (d'après Baltassat et Bitri, 2002).	75
Figure 45 - a. Principe de la réfraction des ondes sismiques avec représentation des tirs en offset direct et inverse ; b. Représentation qualitative d'un sismogramme brut ; c. Dromochronique.	77
Figure 46 - Résultats du profil sismique réfraction – Source Documents Geostock.	79
Figure 47 - Principe de l'interaction des ondes de surfaces avec une cavité.....	80
Figure 48 - Représentation qualitative du principe de détection de cavités par analyse du diagramme de dispersion des ondes de surface.....	81
Figure 49 - Anomalie SASW détectée à Annet-sur-Marne : image du stack et de sa représentation en fréquence (d'après Grandjean <i>et al.</i> , 1999).	83
Figure 50 - Imagerie SASW à Falaise à l'aplomb d'une galerie non maçonnerée.	84
Figure 51 - Exemple de diagramme présentant : à gauche une réponse théorique en absence de cavité dans le sous-sol ; à droite, la présence d'une cavité se manifeste par une rupture dans le diagramme pour certaines fréquences.....	85
Figure 52 - Profils présentant des signaux PS d'origine anthropique superposés au signal naturel créé par le remplissage d'une paléo-vallée.....	88
Figure 53 - Exemple type d'anomalie P.S. en surface.....	90
Figure 54 - Anomalie P.S. déplacée par un effet topographique.....	90
Figure 55 - Principe des méthodes électriques en courant continu.....	93
Figure 56 - Dispositifs et facteurs géométriques associées.	93
Figure 57 - Principe du sondage électrique en dispositif de Wenner.	94
Figure 58 - Principe du traîné électrique, cas d'un dispositif Wenner.	95
Figure 59 - Principe du panneau électrique et exemple de résultats (documents SNCF).	96

Figure 60 - Modélisation 2-D de la cavité remplie de saumure, argilites et insolubles (d'après Miehé <i>et al.</i> , 2003)	98
Figure 61 - Pseudo-coupe de résistivité apparente et de polarisation provoquée (d'après Miehé <i>et al.</i> , 2003)	99
Figure 62 - Coupe de résistivité et de polarisation interprétée (d'après Miehé <i>et al.</i> , 2003)...	100
Figure 63 - Illustration du principe	103
Figure 64 - Principe des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain, polarisation et modes de mesure.	106
Figure 65 - Exemple de résultats de mesure avec la méthode VLF en mode inclinaison à a) 234 kHz et b) 16 kHz (Borsch et Gurk, 2000).....	108
Figure 66 - Représentation qualitative des réponses en phase et en quadrature des champs électriques et magnétiques au-dessus d'anomalies (conductrices et résistantes) suivant le mode de polarisation. (McNeil et Labson, 1991).	110
Figure 67 - Détection de galeries superficielles par VLF résistivité (d'après Ogilvy <i>et al.</i> ,1991).	112
Figure 68 - Principe de la méthode Slingram à dipôle magnétique horizontal.....	114
Figure 69 - Principe de la méthode radar.....	117
Figure 70 - Onde plane : représentation en régime harmonique des champs électriques et magnétique suivant le vecteur \vec{k} , vecteur de propagation ici dirigé suivant (Oz).	117
Figure 71 - Exemple de radargramme interprété.	118
Figure 72 - Fosse Girard : a. anomalie radar du profil 11, b. anomalie radar du profil 12.	121
Figure 73 - Fosse Girard: plan de situation des profils géoradar, position des anomalies radar et électrique.	121
Figure 74 - Principe de la mesure magnétique. Source : http://www.archeo.ens.fr/spip.php?article591	126
Figure 75 - Anomalie d'une sphère magnétique à 45 ° de latitude nord (à gauche) et au pôle magnétique nord (à droite).	127
Figure 76 - Détection de tubage métallique par magnétisme (d'après Miehé, 2002).	129
Figure 77 - Principe de mesure RMP, source RP-51426-FR.....	131
Figure 78 - Microtopographie : relevé sur le terrain.	134
Figure 79 - Microtopographie : traitement des données.....	134
Figure 80 - Exemple de détection de vide minier sur une diagraphe instantanée (V.I.A. Vitesse instantanée d'avancement, P.I. Pression d'injection, P.O. Pression sur l'outil, C.R. couple rotation) - Campagne de reconnaissance d'une concession minière (GEODERIS- BRGM).	138
Figure 81 - Performances de quelques techniques géophysiques entre deux forages distants de 10 m, pour la détection d'une petite cavité sphérique de 2 m de diamètre , vide ou remplie d'eau ou d'argile (Lagabrielle, 2007).	140
Figure 82 - Logigramme d'aide au choix des méthodes de localisation d'un ODJ.	141
Figure 83 - Cas d'un ODJ dont la localisation est estimée à 200 mètres près.	145

Figure 84 - Codes d'utilisation des méthodes pour un ODJ urbain ayant une structure métallique avec un zonage de 200 à 50 m.....	146
Figure 85 - Codes d'utilisation des méthodes > ou = à 1 pour un ODJ urbain ayant une structure métallique avec un zonage de 200 à 50 m.....	146
Figure 86 - Cas d'un ODJ urbain ayant une structure métallique avec un zonage de 200 à 50 m localisé à 50 m près en milieu rural.....	147

Liste des tableaux

Tableau 1 - Utilisation des méthodes en fonction des zonages.....	142
Tableau 2 - Utilisation des méthodes en fonction des milieux.....	143
Tableau 3 - Utilisation des méthodes en fonction de l'état de l'ODJ.....	144
Tableau 4 - Utilisation des méthodes en fonction de l'environnement souterrain proche de l'ODJ.....	144

Liste des annexes

Annexe 1 - Méthodologie de la RMP	155
---	-----

1. Problématique, contexte et champs d'investigastions

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL

Dans le cadre des missions de surveillances et de maintien en sécurité liées à l'après-mine, la localisation d'orifices miniers débouchant au jour est une nécessité. Ces orifices miniers sont des points privilégiés d'accès aux travaux souterrains, ainsi que des éléments importants pour permettre un meilleur calage des plans et report des travaux du fonds en surface.

Suivant cette optique dans le présent rapport, un inventaire et un logigramme d'aide au choix des méthodes utilisées et utilisables pour relocaliser un orifice débouchant au jour (ODJ) vont être présentés. Mais tout d'abord, il faut préciser les caractéristiques des ODJ : type d'ouvrages, environnement, taille...

1.2. LES ORIFICES DÉBOUCHANT AU JOUR (ODJ)

1.2.1. Typologie

Les orifices miniers débouchant au jour sont de différents types :

- les puits de mine (Figure 1) ;
- les cheminées d'aérage (Figure 2a) ;
- les descenderies (Figure 2b) ;
- les entrées de galerie (Figure 3).



a. Puits de la mine de Beaulieu, Nozay (44)



b. Puits de mine abandonné à Shildon

Figure 1 - Exemples de puits de mine.

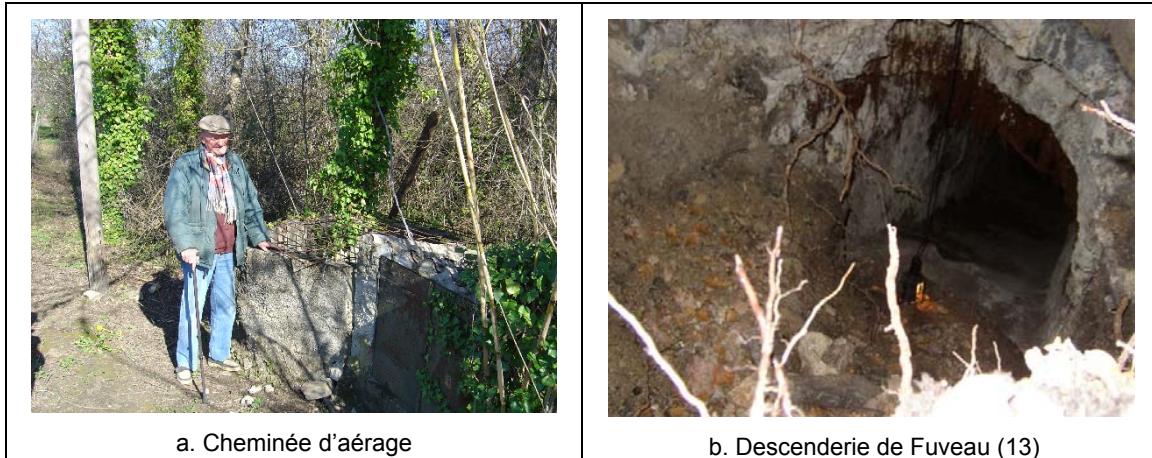


Figure 2 - Exemple de cheminée d'aérage et descenderie.

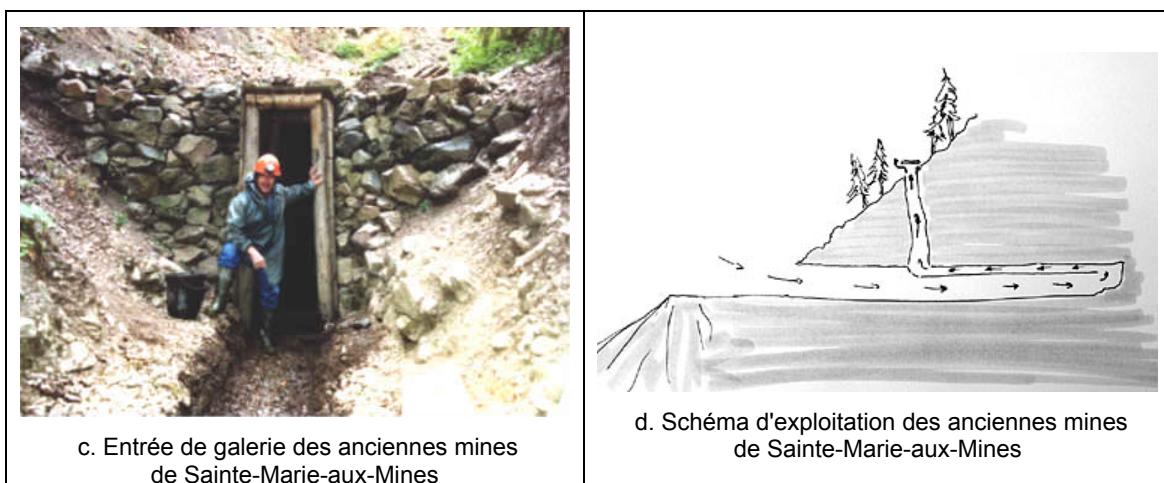


Figure 3 - Exemples d'entrées de galerie.

Ces orifices peuvent être verticaux, inclinés ou horizontaux à flanc de coteau suivant la géométrie du gisement exploité. Comme on a pu le remarquer sur les figures précédentes, les orifices sont de dimension submétrique à métrique, les objets recherchés sont donc comparables à des cylindres de diamètre métrique. **On peut alors assimiler la recherche de l'ODJ à la recherche d'une cavité cylindrique de diamètre métrique en subsurface.**

1.2.2. État des orifices

Les orifices débouchant au jour peuvent, après l'arrêt des travaux, se présenter sous différents états : ouvrages, couverts ou bouchés, ouverts ou ennoyés, remblayés.

ODJ plus ou moins ouvragés

Suivant les époques, la substance exploitée, la nature de l'encaissant, l'importance de l'exploitation... les orifices peuvent avoir été plus ou moins ouvragés.

Ainsi, on peut retrouver des entrées de galeries et des puits maçonnés, certains orifices peuvent avoir été étayés avec des structures métalliques (figure 4 a et b), et à l'inverse des orifices souvent anciens et de petites tailles, peuvent n'avoir été que peu ou pas consolidé (Figure 4c et d).



Figure 4 - Illustration de différents degrés de consolidation.

Connaître le soin qui a été apporté au fonçage et au maintien en état de l'orifice apporte des informations relatives à l'état dans lequel l'orifice est susceptible d'être retrouvé (effondré ou proche de son état d'origine), ainsi que des indices pour le choix des méthodes de relocalisation à tester.

ODJ couverts ou obstrués

Certains ODJ ont pu être bouchés, soit naturellement (effondrement des parois), soit dans le cadre de la remise en état ou de la mise en sécurité des sites miniers.

La figure 5a montre un puits bouché par une dalle en béton dont la taille et le scellement sont inappropriés, se traduisant par des phénomènes d'érosion et une mise en sécurité¹ inopérante.

La figure 6 b montre une entrée de galerie de la Grand'Combe (Gard) bouchée.



*Figure 5 - a. Puits bouché par une dalle en béton insuffisamment dimensionnée ;
b. Exemple de galerie bouchée (Grand'Combe).*

Pour ces ODJ couverts ou obstrués, le bouchon présente généralement une épaisseur de l'ordre de deux fois le diamètre de l'orifice. Ce bouchon, quand il ne s'agit pas d'une mise en sécurité récente, est souvent constitué de tout venant, de stérile d'exploitation, de terre, ou d'argile, et il peut avoir une structure de composition variée (tronc d'arbres, rails...).

ODJ ouverts ou ennoyés

Après la fin de l'exploitation, certains puits peuvent être restés ouverts sans mise en sécurité. La Figure 6 illustre ces ODJ restés ouverts.

L'arrêt des travaux miniers signifie aussi à l'arrêt du pompage des eaux de mines, ce qui conduit à l'ennoyage de certains ODJ (Figure 7).

¹ Les normes de mise en sécurité d'ouvrages miniers ont évolués au cours du temps. Par exemple, en 1910, une clôture grillagée et des panneaux indiquant la présence d'un puits pouvaient être considérés comme une mise en sécurité.

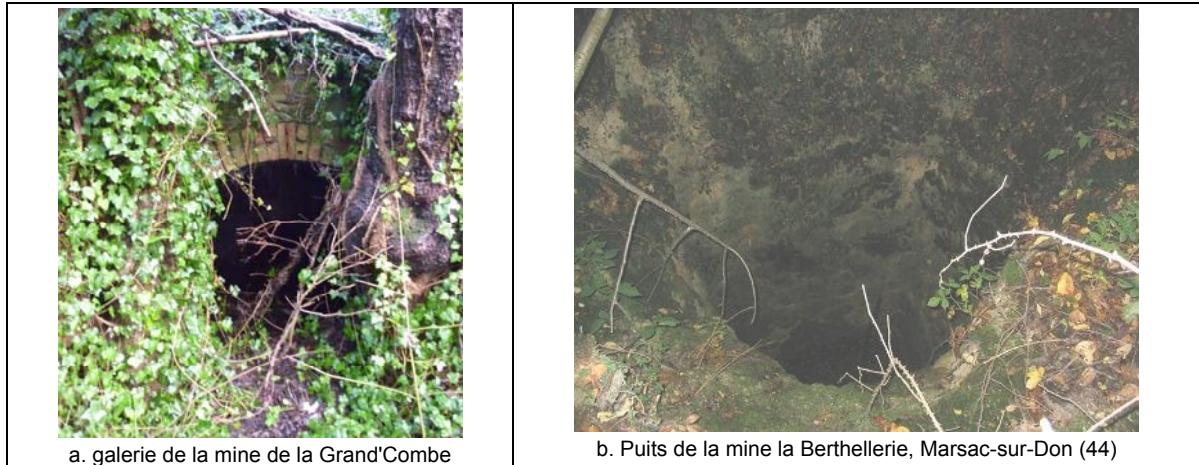


Figure 6 - Exemples d'ODJ ouverts



Figure 7 - a. Puits Sainte-Barbe ennoyé (Pontgibaud) ; b. entrée de la galerie du Moulin du Coudray, Martingé-Ferchaud.

ODJ remblayés

Certains orifices peuvent avoir été remblayés à la fin de leur utilisation. C'est souvent le cas des ouvrages de recherche. Différents matériaux peuvent avoir été utilisés comme remblai :

- stériles extraits lors du fonçage pour un puits de recherche ;
- structures et bâtiments en surface (morceaux du chevalement, rails, wagons...) ;
- parfois le puits ayant été utilisé comme décharge sauvage, des ordures ménagères diverses...

L'état actuel d'un ODJ peut jouer un rôle sur le choix des méthodes de localisation à utiliser pour le retrouver. La présence de structures métalliques ou l'ennoyage des travaux, par exemple, pourront discriminer certaines méthodes.

1.2.3. Environnement proche de l'ODJ

Indépendamment de son état, l'environnement proche de l'ODJ peut faciliter ou compliquer la relocalisation de l'ODJ.

Environnement en surface

En surface, tant qu'il reste des vestiges de la période d'exploitation (chevalement, bâtiments de la mine...), une localisation ou un premier zonage de l'ODJ restent relativement aisés à réaliser (Figure 8).

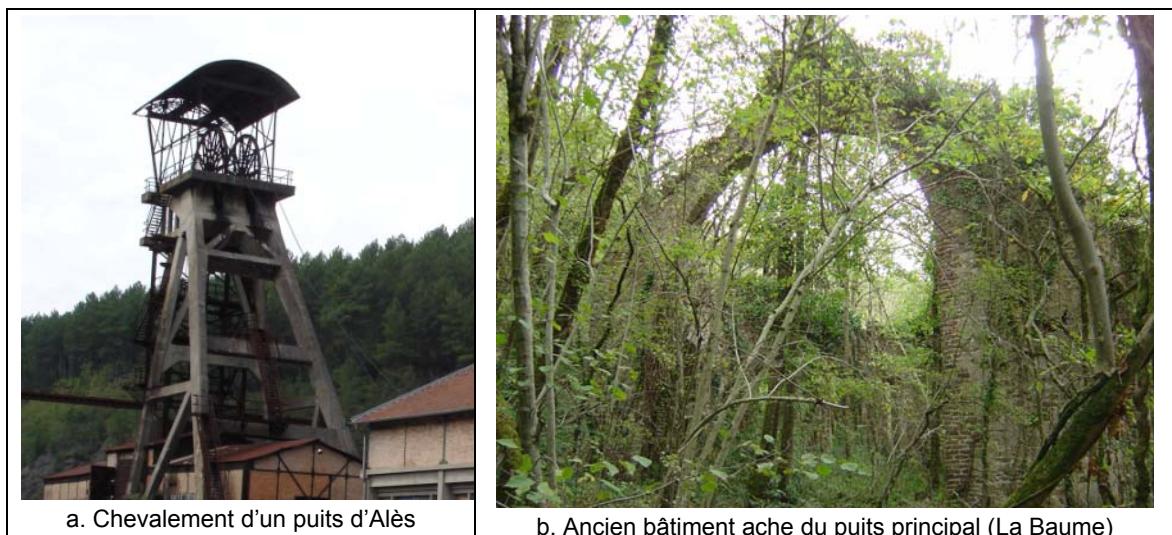


Figure 8 - Exemples de vestiges de la période d'exploitation.

La présence insolite de végétation peut aussi traduire la présence d'un ODJ (Figure 9).

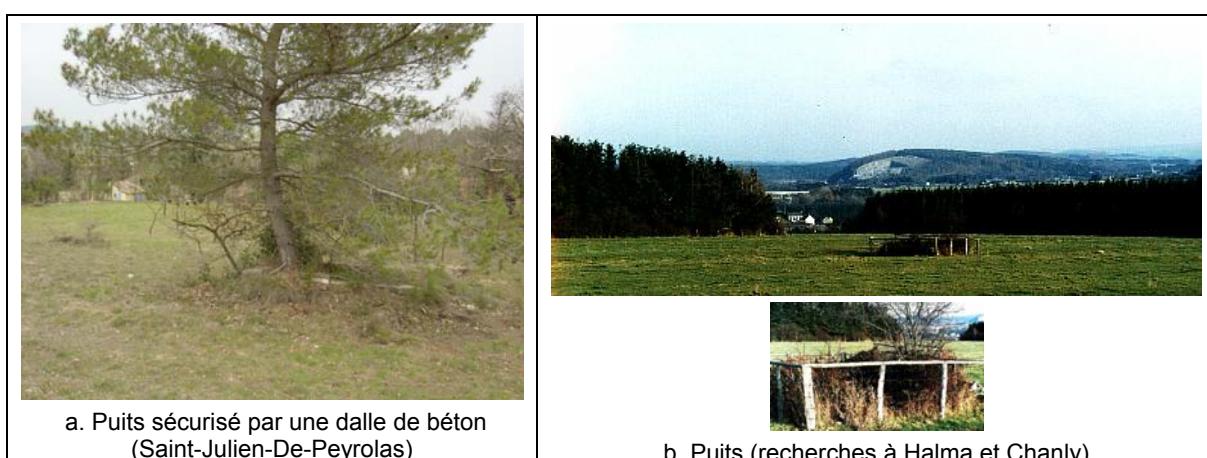


Figure 9 - Présence insolite de végétation liée à des ODJ.

Mais généralement, plus l'arrêt des travaux est ancien, plus la nature aura repris ses droits. Ainsi, fréquemment, la végétation dissimule les ODJ et rend l'accès aux environs de l'orifice difficile voire impossible.



Figure 10 - Orifices dissimulés dans la végétation.

Environnement souterrain proche de l'ODJ

Les ODJ ont le plus souvent été réalisés afin d'avoir accès au gisement et à des travaux souterrains (Figure 11).

Une bonne connaissance de cet environnement souterrain, peut être très utile pour relocaliser un ODJ. Les travaux souterrains peuvent être assimilés dans certains cas comme des cavités beaucoup plus volumineuses que celle représentée par un ODJ. Le volume nettement plus important de ces cavités pourra permettre l'utilisation de certaines méthodes qui n'auraient pas pu localiser un objet de diamètre métrique en subsurface.

Ainsi, la recherche de ces cavités peut être considérée comme une méthode indirecte de localisation d'ODJ.

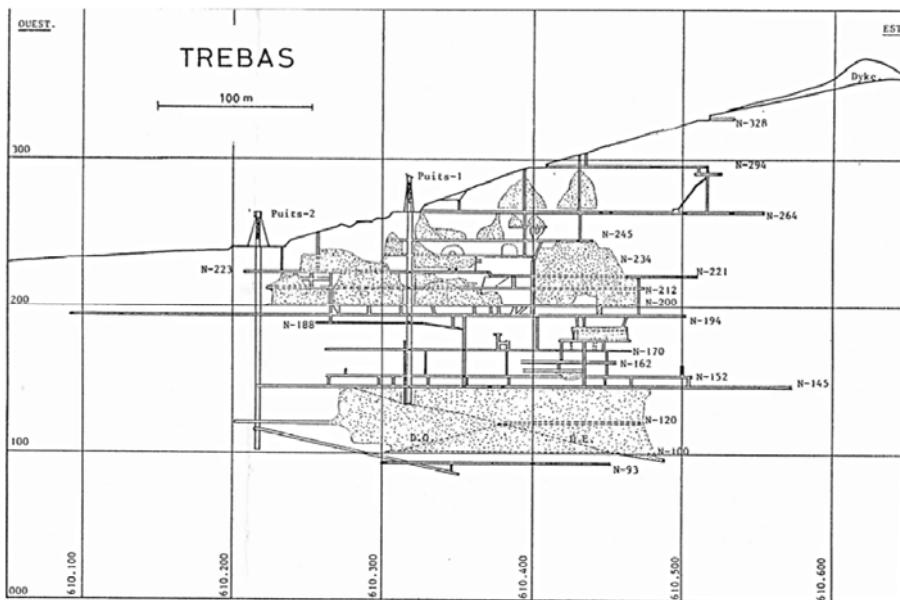


Figure 11 - Projection frontale de la mine des Combes (puits, galeries débouchant au jour).
Source RP-55451-FR.

1.3. PROBLÉMATIQUE

Les points précédents montrent clairement toute la difficulté de repérer d'anciens orifices miniers débouchant au sol, généralement couverts par la végétation, fréquemment en flanc de pente, bouchés ou non.

1.4. APPROCHES

Pour établir un inventaire cohérent, des méthodes de localisation sur le terrain des orifices débouchant au jour sous couverture et/ou oubliés, on est parti d'un cas de référence : un orifice débouchant au jour est cité dans différentes archives, sans mention précise de sa localisation. Au vu des informations précédentes, on peut assimiler l'ODJ recherché à une cavité cylindrique de diamètre métrique et d'une hauteur indéterminée, dont le toit est situé à moins de 10 m de la surface.

Différents scénarii peuvent être alors envisagés pour parvenir à une localisation de l'ouvrage :

- soit l'orifice est bien localisé et une visite de terrain suffit à confirmer l'existence et la localisation de l'ODJ ;
- soit l'orifice est plus complexe à localiser. C'est ce deuxième cas de figure qui est retenu ici.

Dans ce contexte, l'approche proposée s'effectue en trois phases :

- recueil d'informations concernant l'ODJ et son environnement pour orienter le choix des méthodes de localisation, et la réalisation d'un premier zonage de localisation de l'ODJ recherché (géoréférencement, méthodes de télédétection...) ;
- utilisation de méthodes de localisation de surface (méthodes géophysiques, par exemple) afin de préciser la localisation de l'ODJ et émettre des hypothèses sur sa localisation exacte ;
- vérification de la présence de l'ODJ recherché (sondages).

Dans le cadre des cette approche, les différentes méthodes de localisation utilisées et utilisables vont tout d'abord être présentées, puis un logigramme d'aide au choix des méthodes sous forme de formulaires va être présenté.

2. Études documentaires préliminaires

Les études préliminaires rassemblent la recherche d'archives et d'informations, l'enquête orale et l'étude géologique. Cette étape est la plus importante pour la localisation d'orifices débouchant au jour. Elle permet de valider l'existence d'un orifice débouchant au jour et de réduire considérablement la zone de recherches, voire de localiser l'orifice.

2.1. LA RECHERCHE D'ARCHIVES ET D'INFORMATIONS

La recherche d'archives et d'informations s'effectue d'abord en consultant les organismes susceptibles d'avoir des informations d'ordre minier :

- DRIRE/DREAL ;
- BRGM ;
- archives départementales, archives nationales ;
- sociétés de l'industrie extractive ;
- Internet...

Les plans cadastraux anciens et récents sont aussi consultés, la présence de travaux miniers, d'installations minières, forges... peut y être précisée (Figure 12 et Figure 13).

Les ressources photographiques déjà existantes sont aussi consultées (photos aériennes, anciennes cartes postales, orphotographies...) : elles peuvent, à défaut de localiser l'orifice recherché, fournir des informations sur sa possible localisation ou donner des indices d'une zone de localisation, par exemple la présence de bâtiments miniers, de stériles de découvertures, fontis...

Ainsi lors de la phase informative et cartographie des aléas mouvements de terrain des mines de fer de Pavillon d'Angers et de Saint-Barthélemy², certains puits ont pu être localisés grâce à des photos aériennes de 1966 (Figures 14 et 15).

La recherche d'informations s'effectue aussi via les bases de données comme la BSS, le SIG-Mines France, ou la BSTM, et les sites internet : sites communaux, sites personnels, sites associatifs qui sont des sources d'informations à ne pas négliger.

Paradoxalement, il apparaît clairement que des sources d'informations non négligeables sont accessibles, via internet, sur les sites communaux, sites personnels et sites d'associations de préservation du patrimoine miniers, luttant contre certaines mises en sécurité des mines.

² Rapport BRGM/RP-56927-FR

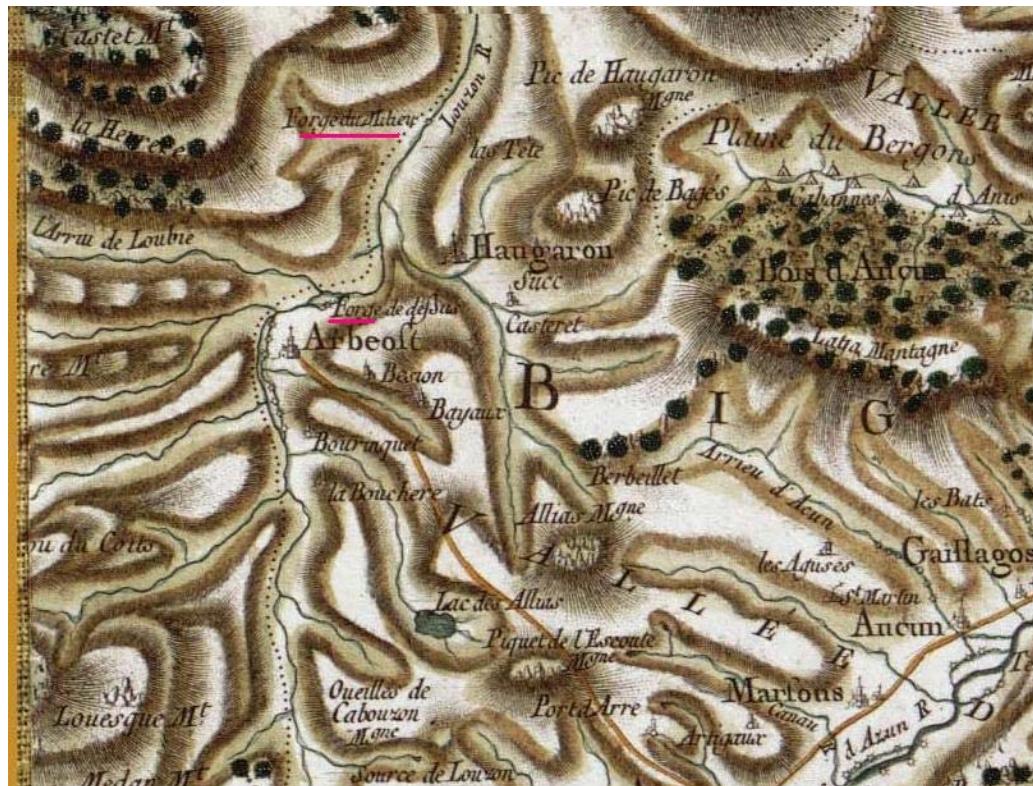


Figure 12 - Forges proches de la mine de Baburet. Vallé de l'Ouzom
(Cassini, feuille Pau, 1779).

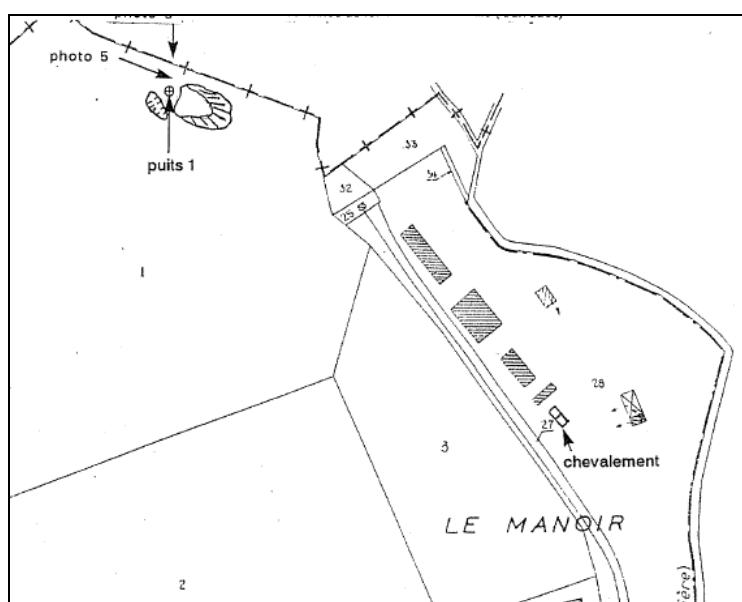


Figure 13 - Extrait du cadastre d'Urville, section E - Mine de Fer de Gouvix-Urville
(source Rapport BRGMRR-40714).

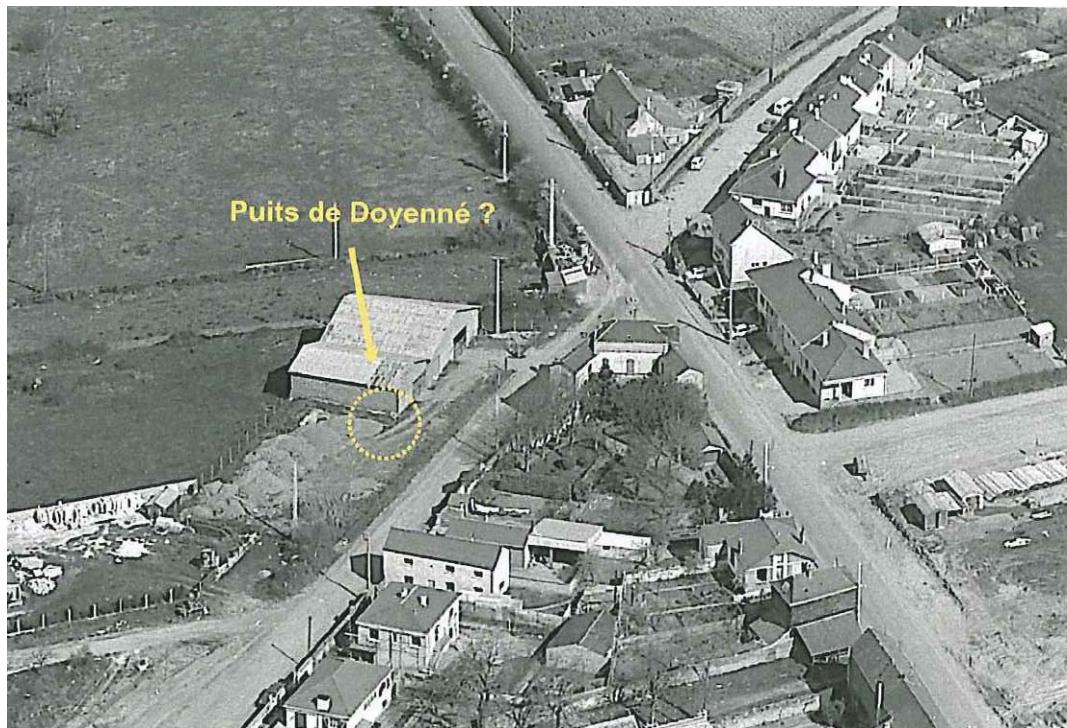


Figure 14 - Situation du puits de Doyenné – Pavillon d'Angers-Saint-Barthélemy.

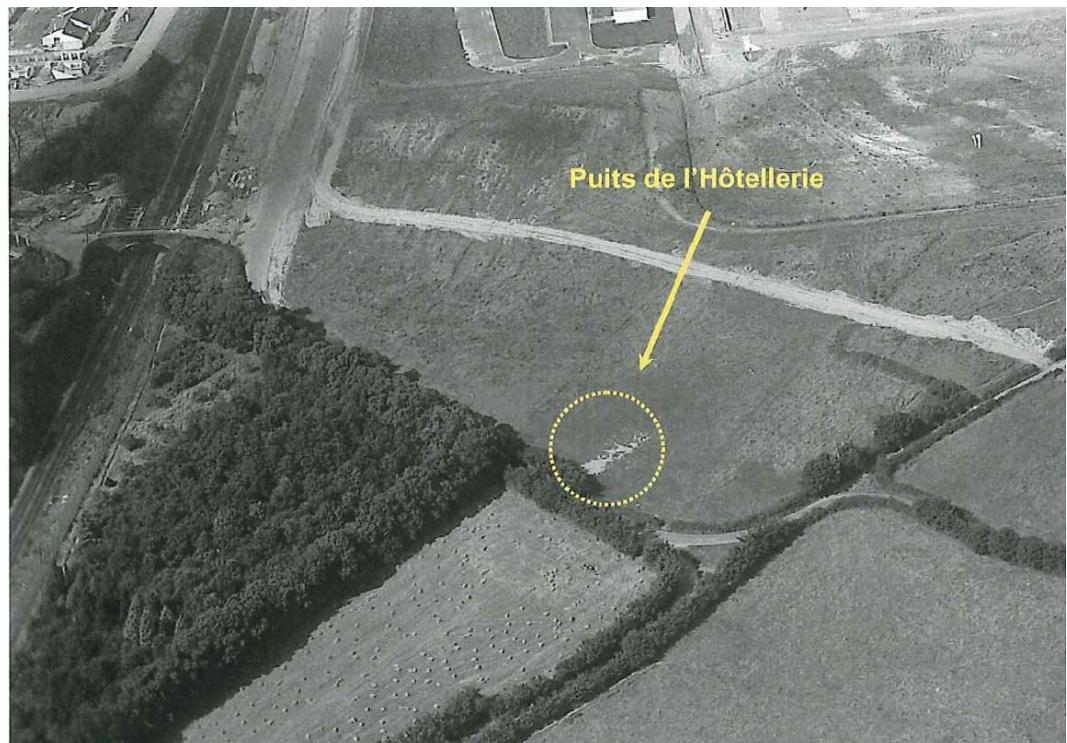


Figure 15 - Situation probable du puits de l'Hôtellerie – Pavillon d'Angers – Saint-Barthélemy.

2.2. L'ENQUÊTE ORALE

Cette étape consiste à interroger les historiens locaux, les « anciens du village », anciens mineurs, les maires de communes de la zone d'étude, les agriculteurs, etc. Tous ces témoignages fournissent des informations très utiles (présence d'effondrements, affaissements, connaissance d'une zone de travaux miniers...) et peuvent même permettre de relocaliser l'orifice recherché.

Il convient cependant d'être prudent avec ces témoignages qui font appel aux souvenirs, ils peuvent être erronés et parfois défaillants.

2.3. L'ÉTUDE GÉOLOGIQUE

Cette étude s'effectue à partir des cartes géologiques et topographiques ainsi que de tous documents susceptibles de réduire la zone de localisation de l'orifice débouchant au jour.

Les cartes vont permettre de vérifier si une zone de travaux miniers est indiquée ou, à défaut, la localisation de gisement coïncidant avec une possible exploitation. Les autres informations géologiques vont permettre de définir :

- la nature de l'encaissant ;
- la localisation et la puissance des zones exploitables ou exploitées ;
- la position de la nappe phréatique (ancien critère limitant de l'exploitation)...

Les cartes, y compris géologiques, étant réactualisées à intervalle donné, les informations présentes sur les cartes ou dans les notices peuvent varier d'une version à l'autre. Les informations présentées sont généralement en rapport avec l'activité présente au moment de la réalisation de la carte. Ainsi, il est intéressant de consulter les cartes contemporaines à l'exploitation, ou la prospection, du gisement relatif à l'orifice recherché.

2.4. CONCLUSION

Cette étape que l'on peut appeler la méthode de localisation via la recherche documentaire, est une phase cruciale de la recherche d'orifice débouchant au jour. Elle permet de réduire considérablement la zone de recherche de l'orifice, mais elle apporte surtout des informations essentielles pour le choix de prochaines méthodes de localisation à tester :

- milieu urbain ou rural ;
- nature de l'encaissant et propriétés physiques (fracturation...) ;
- présence de nappe phréatique ;
- état de l'orifice : ouvert, bouché, maçonné... ;
- présence d'autres travaux miniers dans l'environnement proche : chambres et piliers, cavités, réseaux de galeries...

3. Le géoréférencement de plans miniers

3.1. PRINCIPE

Le géoréférencement est l'étape préalable à l'utilisation d'une image dans un SIG.

Le géoréférencement consiste en l'attribution des coordonnées cartographiques à une image à l'aide de points de calage. Une fois géoréférencé, chaque pixel de l'image peut être identifié par ses coordonnées géographiques dans la projection retenue. En France, on utilise soit les projections Lambert zone (1 à 4 ou étendue), soit le Lambert 93.

Cette image géoréférencée pourra alors servir de référence pour se positionner et créer d'autres données ou la croiser avec d'autres informations.

Dans le cas étudié, cette méthode est principalement utilisée sur des plans miniers et permet de donner une localisation des orifices débouchant au jour à partir d'un ou des plans miniers géoréférencés dans un système de coordonnées actuel (ex. : Lambert II étendu, méridien de Paris, voir Figure 16).

3.2. MÉTHODOLOGIE

3.2.1. Plans miniers et incertitudes liées

Avant même la mise sous forme numérique des plans miniers, deux sources d'incertitude doivent être citées : l'incertitude de tracé et l'incertitude de déformation du plan minier. L'incertitude de tracé varie en fonction de l'époque, de l'échelle du plan et du degré de précision apporté par le dessinateur lors de la réalisation du plan minier. Cette incertitude peut être due :

- à des galeries tracées comme rectilignes alors qu'elles ne le sont pas forcément ;
- à un trait de dessin trop épais ;
- à un choix d'échelle inapproprié par rapport à la précision (on le retrouve sur les plans d'ensemble).

Cette incertitude est visible quand on compare, sur plusieurs plans, le tracé de mêmes travaux miniers. Dans l'exemple ci-dessous, deux plans (n° 20 et 38, Figure 17 a et b) représentant les mêmes travaux sont superposés (Figure 17 c), l'incertitude de tracé observée (en rouge sur la figure 17 d) est d'ordre de 5 m.

L'incertitude de déformation du plan minier est en fonction de l'état du plan minier au moment où il est numérisé. Ainsi comme l'illustre la figure 18, les plans ont pu subir les dégâts du temps (déchirure, déformation due à l'humidité...).

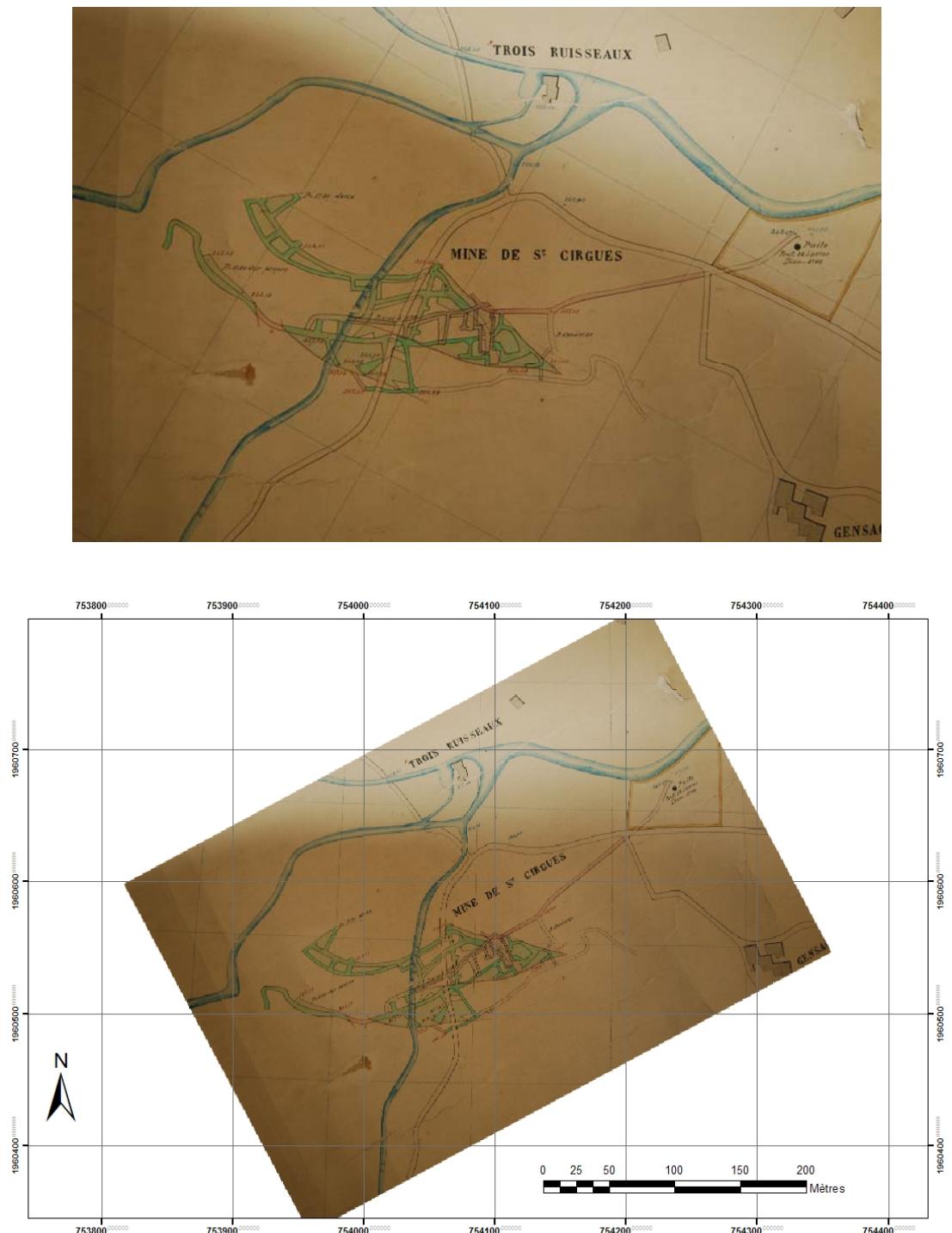


Figure 16 - Géoréférencement d'un ancien plan minier en Lambert 2 étendu.

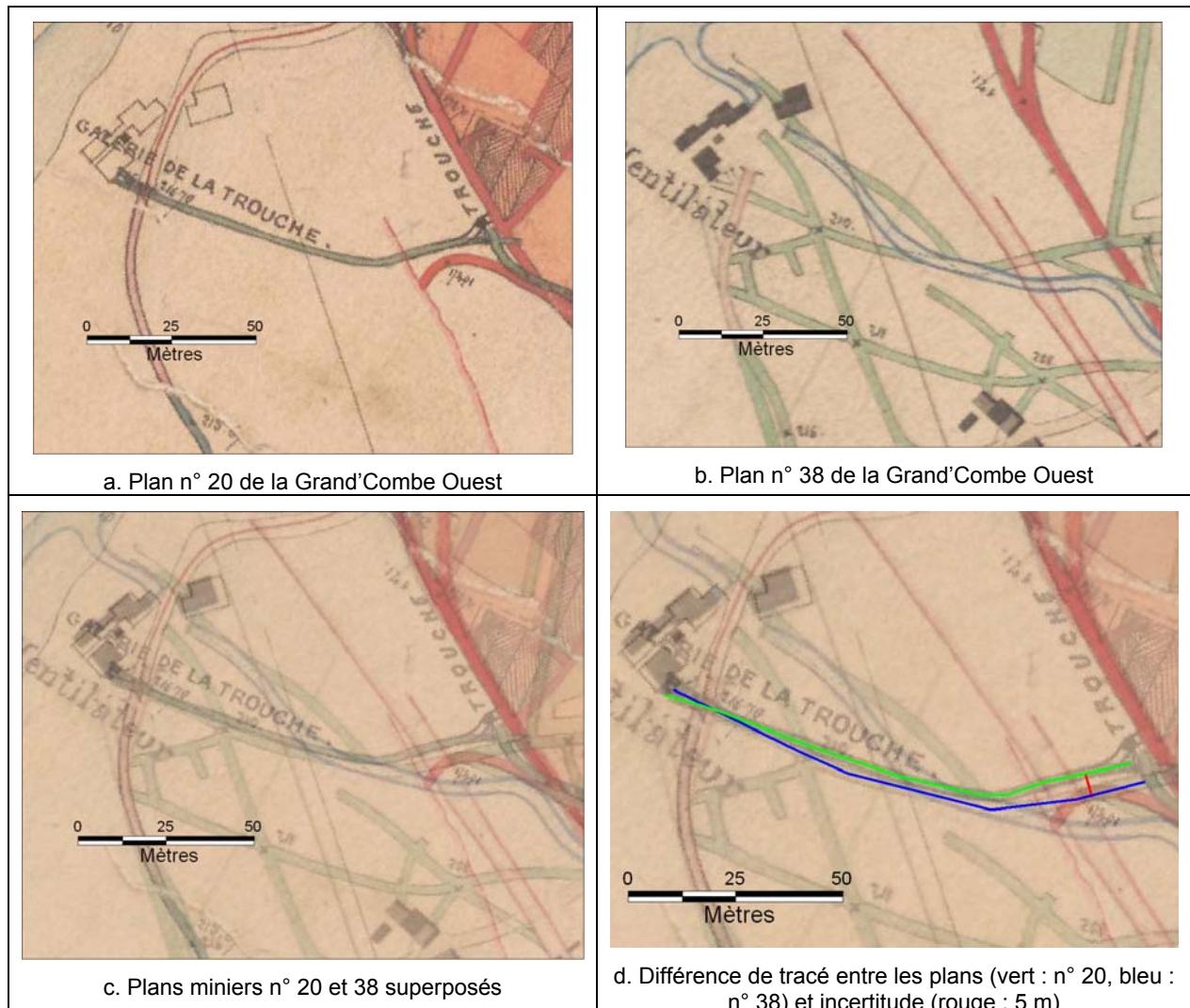


Figure 17 - Exemple de différence de tracé et de l' incertitude liée.

Ces deux sources d'incertitudes influent déjà sur la précision de localisation des orifices débouchant au jour.



Figure 18 - Exemple de plans miniers abimés - Grand'Combe.

3.2.2. Numérisation des plans miniers

Les plans miniers originaux sont reproduits sous forme numérique afin d'être géoréférencés. Le plus souvent, étant donné la taille et l'état de ces plans, ils sont photographiés par un professionnel qui prend soin de conserver les échelles des plans miniers ; si les plans sont de taille restreinte (A4 ou A3) et bien conservés, ils peuvent être scannés.

3.2.3. Points de calage et de contrôle

Pour effectuer le géoréférencement des images des plans miniers, des points de calage ou points de référence et des points de contrôle sont nécessaires. Les points de calage (parfois également appelés « points d'amer ») représentent des « objets » communs entre le plan minier et le support sur lequel il est doit être calé (orthophotoplan, le plus souvent). Les meilleurs points de calages sont ceux qui permettent de fiabiliser le recollement fond/jour³ ; c'est-à-dire les orifices débouchant au jour. Dans notre cas d'étude, cela est possible si la position des certains orifices est déjà connue. Dans le cas contraire, les bâtiments et constructions de surface anciens (églises, châteaux, cimetières) sont privilégiés comme points de calage pour géoréférencer un plan. Les points de calage doivent être aussi précis que possible et

³ La superposition en surface des travaux souterrains.

répartis de manière homogène sur l'ensemble de la surface du document. Les points de contrôle sont des points d'amer qui ne sont pas utilisés pour le géoréférencement de l'image. Ces points sont utilisés pour évaluer l'incertitude liée au géoréférencement. La position d'origine de ces points est comparée à la nouvelle position après géoréférencement.

3.2.4. Rectification et incertitude moyenne

L'image est rectifiée à l'aide d'une loi polynomiale qui utilise les coordonnées des points de calage. Cette loi déplace les points de calage imposés de manière à obtenir le meilleur compromis entre tous les points imposés. Il est préférable d'utiliser une loi polynomiale d'ordre 1 (uniquement translation et rotation) qui est celle qui déforme le moins le plan. Les lois polynomiales d'ordre 2 ou 3 permettent parfois un calage plus précis, au détriment de la géométrie initiale du plan. Le différentiel entre les coordonnées du point imposé et ses coordonnées finales calculées donne l'incertitude de calage pour un point.

Une incertitude moyenne est calculée à partir de l'incertitude liée aux points de calage, de l'incertitude de tracé, de l'incertitude de déformation donnant une information sur la précision globale.



Figure 19 - Exemple de plan minier géoreférencé superposé à un fond orthorectifié.

Le choix des points de calage est déterminant pour la qualité du géoréférencement, plus ces points sont précis et cohérents entre eux, plus faible sera l'incertitude de calage (Figure 19). C'est pourquoi, il peut être nécessaire de prendre les positions GPS de certains points d'amer sur le terrain pour affiner ou recaler un plan minier.

3.3. RÉSULTATS ATTENDUS

Le résultat attendu est la localisation, sur une carte ou une orthophotographie récente, des orifices débouchant au jour avec l'incertitude moyenne la plus réduite possible, à partir des plans des travaux miniers.

La position des orifices débouchant au jour étant, *a priori*, indiquée sur les plans miniers relatifs, le géoréférencement de ces plans miniers permettra une localisation des orifices de l'ordre de 10 à 20 m suivant l'incertitude moyenne et l'échelle initiale du plan.

Compte tenu de l'incertitude liée aux coordonnées du support (orthophotoplan), de l'incertitude de calage du plan par rapport au support, de l'incertitude liée à la qualité du plan minier, la localisation des ouvrages uniquement à partir du géoréférencement sera dans le meilleur des cas de l'ordre de 10 m, elle est plus souvent de l'ordre de 15 mètres.

3.4. LIMITES

Le géoréférencement comme méthode de localisation des ouvrages est limité par différents facteurs :

- la qualité des plans miniers : le papier se déforme au cours du temps, les plans d'époque présentent parfois des problèmes d'échelle ;
- le nombre de points de calage et leur précision : le nombre de trois points est un strict minimum ; parfois il existe peu de correspondance en surface entre le plan minier et l'état actuel et le plan n'est alors pas géoréférencable ;
- la nécessité d'une validation de terrain.

3.5. CONCLUSION

Le géoréférencement est une méthode **peu coûteuse**, largement **indépendante de l'environnement actuel** (urbanisation, couvert végétal...) et **assez rapide**. Suivant les paramètres des plans, 1 à 2 jours peuvent être nécessaires pour géoréférencer un plan.

Cette méthode demande néanmoins le concours d'un technicien SIG expérimenté pour les plans les plus complexes. Le géoréférencement fait partie des méthodes de localisation non intrusive, nécessitant une validation de terrain mais sans prospection.

Cette méthode permet, à défaut de donner une localisation absolue des ouvrages débouchant au jour, d'établir un **premier zonage**. La qualité et la précision de ce premier zonage influent sur le choix de prochaines méthodes de localisation qui devront être testées. C'est pourquoi une attention et une rigueur particulières doivent être apportées au géoréférencement des plans miniers.

4. La télédétection

4.1. GÉNÉRALITÉS

La télédétection se rapporte à toute technique permettant la capture d'informations à distance, sans contact avec l'objet observé. Elle est basée sur l'analyse des informations fournies par le rayonnement électromagnétique réfléchi (ou réémis) par la surface de la Terre.

Elle permet non seulement d'acquérir une vision de l'état du paysage, de sa morphologie et de son évolution, mais également de saisir et comprendre les relations entre la roche, le sol, la végétation, et l'activité anthropique.

L'acquisition d'information se fait à l'aide de capteurs (appareils photos ou radiomètres) capables d'enregistrer le rayonnement électromagnétique venant du sol. Ces capteurs sont embarqués à bord de vecteurs (ULM, hélicoptères, avions, satellites).

À chaque système capteur-vecteur correspond un nombre de caractéristiques telles que :

- la résolution spatiale, dite résolution au sol, qui conditionne l'échelle de travail ;
- la résolution spectrale, qui conditionne la capacité à discriminer les objets de surface grâce à leur « couleur » ou signature spectrale ;
- la fauchée, ou largeur de l'emprise au sol ;
- la possibilité de visualiser en stéréoscopie ;
- la capacité de revisite (intervalle de temps entre deux passages au-dessus de la même zone).

4.2. LES MÉTHODES D'ACQUISITION

4.2.1. La photographie aérienne

Les prises de vues à axe vertical (ou visée nadir)

- Les photographies sont prises à vitesse et altitude constantes et à intervalles égaux. Elles recouvrent des zones communes (en vert sur Figure 20) et offrent ainsi la possibilité d'une vision stéréoscopique permettant de voir le relief. Certains indices morphologiques (effondrement par exemple) peuvent alors être mis en évidence.

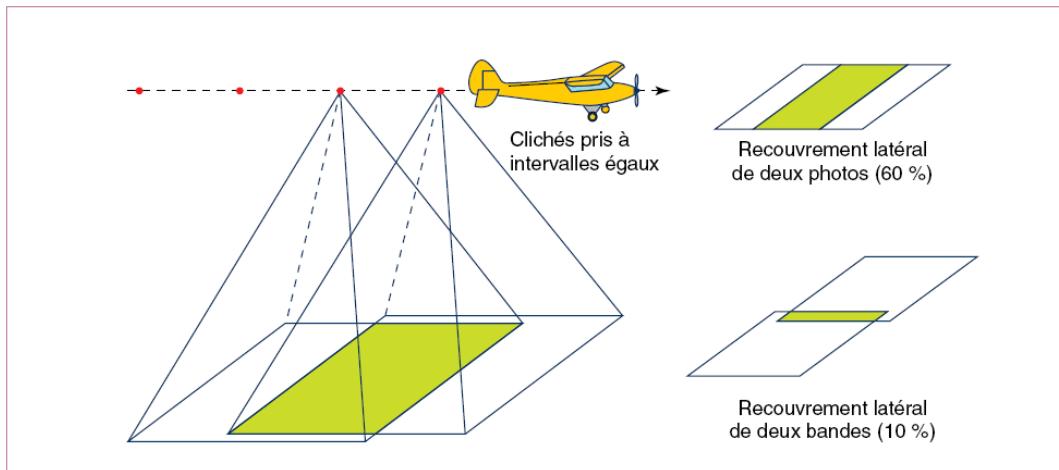


Figure 20 - Technique de prises de vues à axe vertical permettant la vision stéréoscopique (Pothérat et al., 1999).

Il existe quatre types de photographies aériennes :

- les photographies dites panchromatiques, en noir et blanc, couvrant la partie visible du spectre électromagnétique ;
- les photographies infrarouges en noir et blanc ;
- les photographies en vraies couleurs ;
- les photographies en infrarouge fausses couleurs.

On peut voir en Figure 21, la différence de perception d'une même zone en panchromatique noir et blanc et en infrarouge noir et blanc.

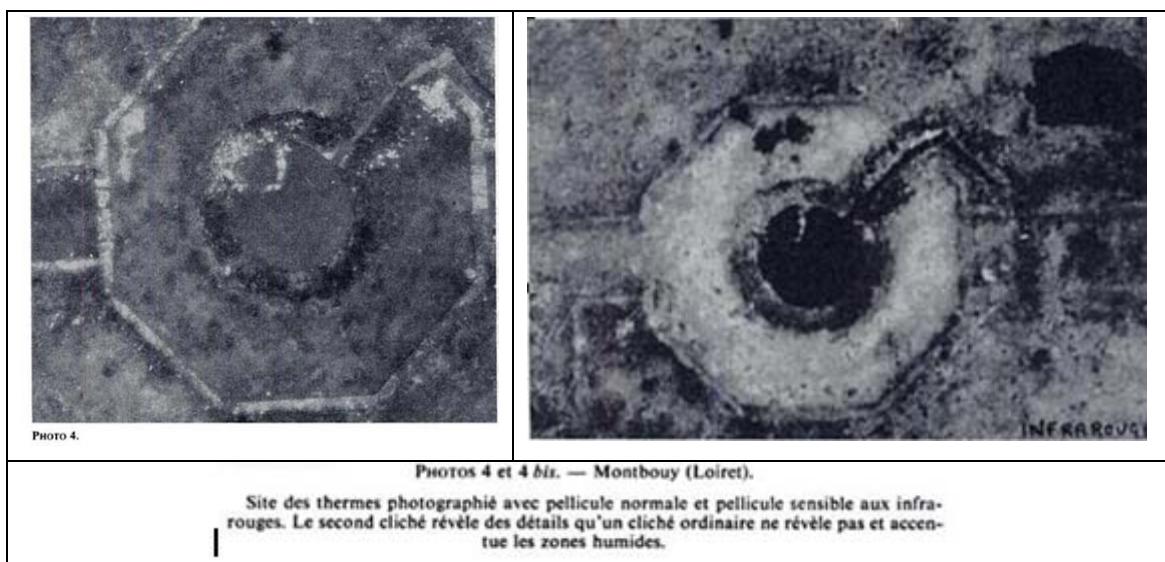


Figure 21 - Photographie panchromatique normale et infrarouge.
Source : Archéologie aérienne en Île-de-France. Daniel Jalmain, éditions Technip.

Les plus utilisées sont les photographies aériennes de types IGN, disponibles actuellement en tirage contact 23*23 cm ou au format numérique. Ces documents sont disponibles sur l'ensemble du territoire français avec une couverture aérienne renouvelée tous les 5 ans à l'échelle 1/30 000. Les plus anciens clichés peuvent remonter jusqu'à l'entre-deux guerres, permettant ainsi de localiser des anciens puits ou fontis aujourd'hui masqués.

Ces photos sont également disponibles via la base de données raster de l'IGN, la BD ORTHO® qui est devenue le support géographique de nombreuses applications dans les domaines de l'aménagement et de l'urbanisme, de l'environnement ou de l'agriculture, grâce à sa richesse en informations et à sa qualité géométrique. Elle est également présentée comme image géographique du territoire sur de nombreux sites Internet, en particulier sur le Géoportal (<http://www.geoportail.fr/index.do>). Elle est réalisée à une **résolution de 50 cm**. La BD ORTHO® est disponible sur l'ensemble du territoire national et mise à jour tous les cinq ans.

Il est également possible de programmer une mission d'acquisition de photographies aériennes dédiée, mais le coût peut être important au regard de la surface à étudier et est surtout justifié pour de grandes surfaces.

Les prises de vues à axe oblique (ou visée oblique)

Ces prises de vue relèvent d'une technique complémentaire **peu coûteuse, souple et rapide à mettre en œuvre**. Les prises de vues sont obtenues en faisant varier l'obliquité et l'orientation du capteur.

Les photos obliques permettent d'observer un objet avec une obliquité et une orientation différentes mettant en évidence des indices concernant les microreliefs. Utilisées en particulier en archéologie (Figure 22), elles peuvent ici apporter des informations sur la localisation d'anciens travaux miniers débouchant en surface.

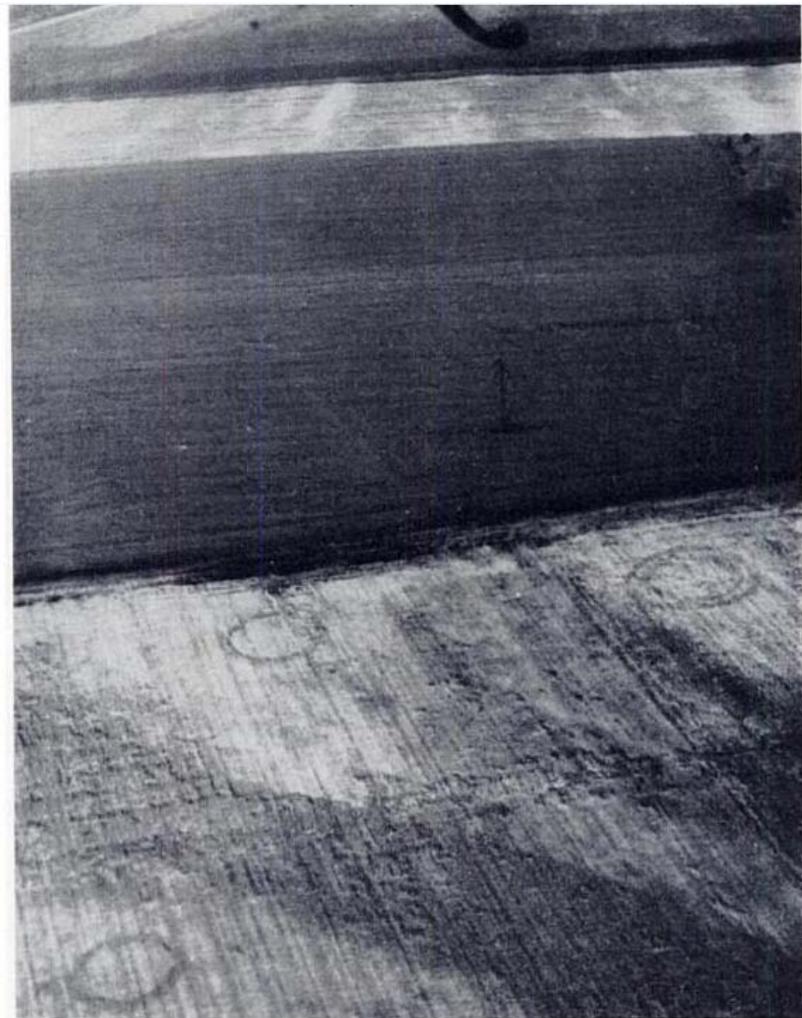


PHOTO 13. — Saint-Denis-lès-Sens (Yonne).

Fossé comblé circulaire de type classique et fossé double de dimension plus grande. En général le fossé intérieur est moins profond et marque l'emplacement d'une palissade. Ici sol d'alluvions avec trainées plus humides visibles sur le champ d'escourgeons alors que les blés sont encore uniformément verts (juin 1964).

Figure 22 - Détection de vestiges archéologiques par photographie aérienne en visée oblique.
Source : Archéologie aérienne en Île-de-France. Daniel Jalmain, éditions Technip

4.2.2. Les radiomètres (ou scanners) aéroportés ou satellitaires

Principe

La mesure est réalisée à l'aide d'un radiomètre balayant des lignes perpendiculaires à l'axe de vol (Figure 23). Le rayonnement réfléchit (visible, proche et moyen infrarouge) ou émis (infrarouge thermique) par le sol est capté séparément par des détecteurs en fonction de plages de longueurs d'ondes sélectionnées.

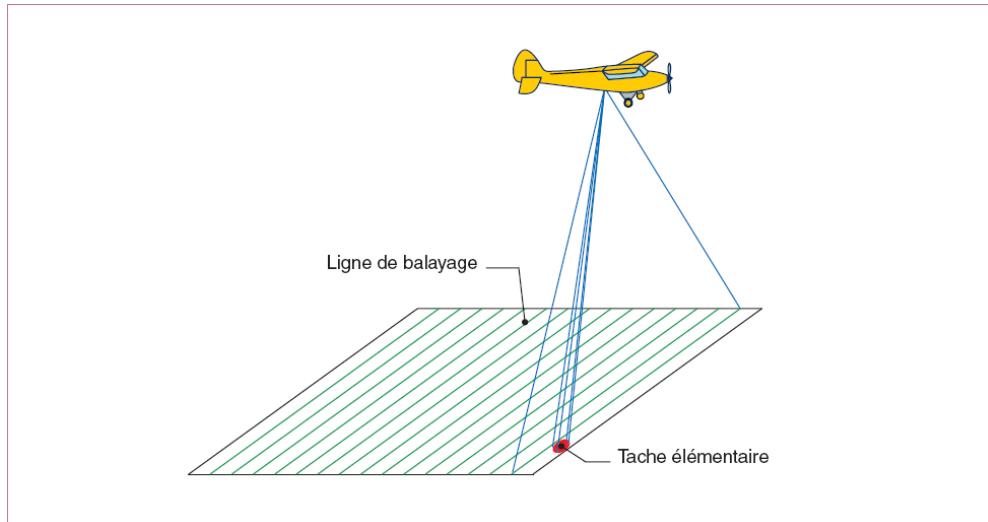


Figure 23 - Principe du radiometre aéroporté.

Résolution spatiale ou résolution au sol

Pour un instrument donné, la résolution au sol (résolution spatiale) et la fauchée dépendent uniquement de l'altitude de vol. Les images sont généralement enregistrées sous forme numérique et on parle de pixel, correspondant à la surface élémentaire imagée au sol.

Résolution spectrale

La résolution spectrale représente la largeur de sensibilité spectrale de chacune des bandes spectrales acquises par le capteur : plus la largeur spectrale des bandes est étroite et plus les capacités de discrimination spectrale des objets sont précises.

On distingue :

- *les radiomètres panchromatiques* : une seule bande spectrale, en général assez large et couvrant le visible et le proche infrarouge ;
- *les radiomètres multispectraux* : de trois à 14 bandes spectrales, plus étroites, discontinues, couvrant le visible, le proche et le moyen infrarouge et parfois l'infrarouge thermique ;
- *les radiomètres hyperspectraux* (ou spectroradiomètres imageurs) : plus de 100 bandes spectrales, étroites (de 10 à 20 nanomètres) et contigües. Ils couvrent le visible, le proche et le moyen infrarouge. Des capteurs hyperspectraux dans le domaine du thermique sont également en cours de développement.

L'exemple en Figure 24, montre un spectre de réflectance d'un mélange de trois minéraux (hématite, kaolinite, dolomite). La figure du bas montre le spectre vu par un capteur hyperspectral, où l'on identifie parfaitement les caractéristiques spectrales de chacun des minéraux, tandis que la figure du haut montre le même mélange tel que

perçu par un capteur multispectral standard (Landsat Thematic Mapper). Dans le dernier cas, il n'est plus possible de reconnaître les trois phases minérales.

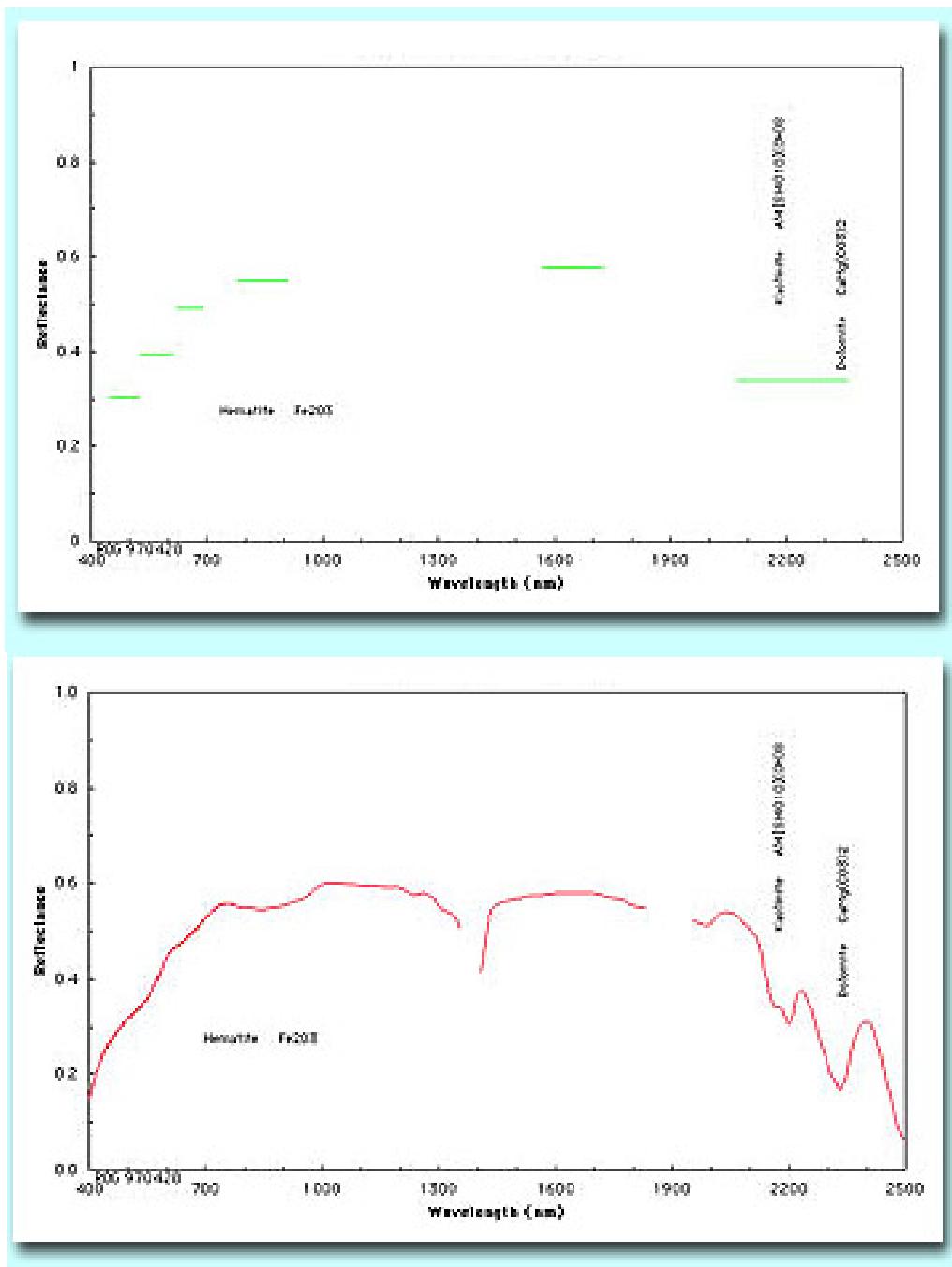


Figure 24 - Spectres de mélange minéral ternaire vu par un capteur multispectral et un capteur hyperspectral.

4.2.3. L'imagerie satellitaire à très haute résolution spatiale

Les images satellitaires à très haute résolution spatiale sont mentionnées ici car elles permettent de travailler jusqu'à des échelles du 1/5 000 à 1/2 500.

Les images IKONOS (1 m de résolution au sol) ou Quickbird (0,60 m de résolution) peuvent constituer une alternative à la photographie aérienne lorsqu'il s'agit de couvrir des surfaces importantes, bien qu'elles soient d'un **coût relativement élevé** (moins toutefois qu'une campagne de photographie aérienne dédiée).

Ces images fournissent des données dans quatre bandes spectrales dans le visible – proche infrarouge, autorisant la production d'images en vraies couleurs ou en infrarouge fausses couleurs. Des acquisitions stéréoscopiques sont également possibles.

Les images Quickbird sont fréquemment utilisées sur Google Earth.

4.2.4. La thermographie infrarouge

Principe

Le principe de la radiométrie infrarouge thermique (thermographie infrarouge) repose sur l'étude des rayonnements électromagnétiques issus de l'agitation moléculaire de la matière. L'observation du rayonnement électromagnétique des sols dans la gamme de l'infrarouge thermique (8-15 µm) est directement liée à leur température et à leur émissivité, lesquelles permettent de caractériser la nature des sols. Les mesures se font depuis un aéronef et le rayonnement est enregistré par un radiomètre (par ex. caméra infrarouge)

Grandeur mesurée

En radiométrie infrarouge thermique, l'intensité du signal mesuré est la luminance⁴ ; elle permet de déduire la température apparente de surface du sol.

Pour la recherche de cavités et d'ouvrages débouchant au jour, le domaine spectral considéré est la gamme de l'infrarouge thermique (8-15 µm).

Résultats attendus

Les résultats d'une mesure sont la représentation de la température apparente de surface du sol et ses variations temporelles en fonction des coordonnées géographiques. La radiométrie infrarouge thermique repose sur l'observation de

⁴ Existance thermique de la surface du sol par unité d'angle solide sur une bande spectrale donnée.

l'inertie thermique d'éléments par rapport à l'atmosphère environnant (comme un puits, une galerie...) dont on mesure la température apparente.

Les anomalies thermiques sont de plusieurs types, selon que les ouvrages débouchant au jour soient visibles ou cachés. Pour les ouvrages visibles, généralement repérés par un bosquet d'arbres, les anomalies thermiques sont froides l'été, en fin de journée, et chaudes l'hiver, en fin de nuit.

Pour les ouvrages invisibles, en été, en fin de journée, une anomalie en forme de cible à cœur froid et à auréole chaude, peut constituer un indice de présence. Le cœur froid paraît correspondre au transfert de chaleur issue de l'ouvrage à travers le remblai et l'auréole chaude au remblai étalé en surface autour de l'ouvrage. En hiver, le même indice a un cœur froid.

D'autres anomalies, essentiellement chaudes en été, en fin de journée, signent des zones remblayées ou les zones perturbées.

4.2.5. Les MNT LIDAR

Principe

(<http://www.lasergrammetrie.net/tag/lasergramm%C3%A9trie>)

La lasergrammétrie est une science ou une technique en plein essor qui exploite la technologie des scanners laser 3D (mesure laser haute densité, sans contact et longue portée). Un scanner 3D lève plusieurs millions de points en trois dimensions en quelques minutes, la mesure laser pouvant être couplée à une prise de vue photogrammétrique numérique.

Les technologies les plus répandues sont la triangulation (émission d'un point laser et enregistrement de son image dans un capteur CCD), la mesure du temps de vol (émission d'une impulsion laser et enregistrement du temps aller-retour) et la mesure par différence de phase (émission d'un rayon modulé en fréquence par une onde harmonique).

Selon les méthodes, les appareils offrent des portées variant de quelques mètres à plus d'un kilomètre, des précisions allant du dixième de millimètre à quelques centimètres, et des vitesses d'acquisition allant de 500 à plus de 100 000 points à la seconde.

Développées à l'origine pour des applications industrielles, ces techniques de mesures se sont étendues à presque tous les champs d'intervention du topographe. Leur dénominateur commun est la densité extrême du levé. Le principe est d'enregistrer en 3D tout ce qui est visible dans le champ de vision du capteur, généralement sur 360°. Les performances et la rapidité d'acquisition entraînent donc de profonds changements dans les méthodes d'enregistrement puis d'analyse de l'information.

Acquisitions aéroportées et MNT dérivés

(<http://www.begroup.fr/index.php/numerisation/detail-lasergrammetrie.html>)

Les données de lasergrammétrie sont également plébiscitées pour la qualité des MNT (Modèles Numériques de Terrain) susceptibles d'être générés. À la précision planimétrique typique de 0,4 m en planimétrie et de 0,15 m en altimétrie, la précision des MNT dépend de la résolution de la grille, de la composition et du type de paysage, et de l'algorithme utilisé. En zone montagneuse, en présence de végétation, la précision altimétrique est submétrique (< 1 m).

Contrairement aux techniques de photogrammétrie aérienne, la lasergrammétrie est mieux adaptée pour certains paysages comme les littoraux, ou les zones de végétation pour lesquelles le terrain masqué n'est pas visible. En effet, la technique permet aujourd'hui d'une part de fournir une altimétrie de haute précision mais également d'isoler les points du sol (MNT : modèle numérique de terrain) de ceux du terrain en présence de végétation (MNE (modèle numérique d'élévation). Un tel exemple (LIDAR ROC) est présenté en Figure 25.

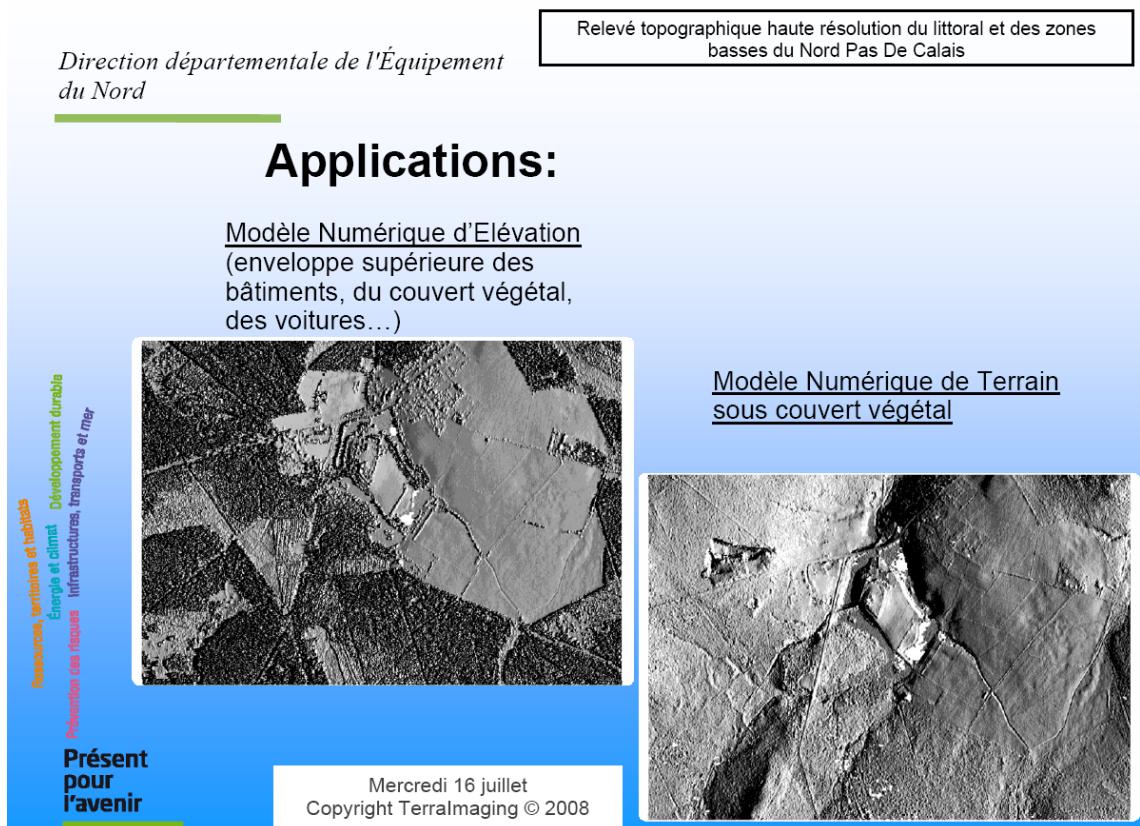


Figure 25 - MNT et MNE LIDAR.

Source http://www.nord-pas-de-calais.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/3_Presentation_DDE_mnt_lidar.pdf

En raison d'un coût d'acquisition particulièrement élevé, l'utilisation des MNT LIDAR reste réservée à des projets d'envergure (projet régionaux par exemple).

4.3. LA PHOTO-INTERPRÉTATION

Elle consiste en l'exploitation visuelle d'une portion ou de l'ensemble des photos aériennes ou d'images numériques (satellitaires ou aéroportées) suivant une approche qui s'appuie sur les critères d'identification des éléments et fondée sur les notions de texture (tailles, formes, tonalité, couleur, position géographique, etc.) et de structure (répartition spatiale).

On pourra par exemple tenir compte aussi de la position des isohyètes (aires climatiques) qui donnent des indications sur la présence de certaines espèces végétales. Il s'agit d'une démarche plus ou moins complexe d'analyse et de synthèse conduisant à une reconnaissance plus ou moins stricte des objets sur les photographies ou les images satellite.

La photo-interprétation repose sur les connaissances et le savoir-faire de l'interprétateur, mais aussi sur des contrôles de terrain *a priori* et/ou *a posteriori*.

4.3.1. Les indices à rechercher

Plusieurs catégories d'indices sont recherchées, comme les indices :

- géomorphologiques qui permettent de distinguer différents types de désordres de surface : fontis, effondrements, affaissements, signes éventuels d'une ancienne activité minière ;
- anthropiques, comme des puits et des entrées de mine, des cheminées d'aérage, ou la nature des déblais, différente de celle des terrains de surface, ou encore d'anciennes tranchées ;
- hydrogéologiques, ainsi les zones humides susceptibles de correspondre à des puits ou d'anciens fontis remblayés avec rétention d'eau sur bouchon étanche ;
- photographiques liés à la présence de différence de croissance de végétation en fonction des structures enfouies.

4.3.2. La méthodologie

Domaine d'application

La photo-interprétation est une méthode qui doit être utilisée après le stade des enquêtes et des recherches d'archives. **Elle permet de délimiter une zone d'action pour de futurs travaux de recherche sur le terrain. Elle s'applique surtout en zone rurale.**

Choix des données ou programmation d'une campagne d'acquisition

Il faut déterminer, avant chaque étude, les caractéristiques des photographies ou images considérées comme les plus adaptées à la problématique liée à la recherche d'ouvrages débouchant au jour.

Cela revient à choisir :

- le système d'acquisition :
 - appareil photo : appareils courants, reflex dans le cas d'une acquisition ULM ou héliportée,
 - chambres métriques (numériques ou argentiques) pour des campagnes d'acquisition photographiques aéroportées,
 - scanner numérique pour des acquisitions d'images aéroportées ou satellitaires ;
- la gamme spectrale :
 - panchromatique noir et blanc (plus de renseignements),
 - infrarouge noir et blanc (plus de contraste),
 - vraie couleur,
 - infrarouge fausses couleurs (sensible à l'état végétatif et à l'humidité) ;
- la résolution au sol et donc l'échelle (en fonction de la dimension des indices recherchés) ;
- la période de mesure : l'hiver est considéré comme une période favorable (absence de culture et de feuilles) et pour les photos obliques la lumière rasante de début ou fin de journée ;
- les photos multidates, dont l'analyse permet d'éliminer un certains nombre de leurres et de voir l'évolution de l'occupation du sol dans le temps.

La phase de validation de terrain permet de faire le tri entre différentes anomalies et offre aussi une clé supplémentaire pour l'interprétation d'éléments observés mais non interprétés.

Limites de la méthode pour la détection des ouvrages miniers débouchant au sol

Cette méthode n'est pas utilisable en zone urbaine, boisée, ou recouverte par des cultures en plein développement végétatif, les indices étant masqués.

Certains indices sont aussi sources d'erreur d'interprétation, comme des anciennes mares asséchées, des emplacements de bacs à eau pour les animaux, des bois défrichés. La plupart ne peuvent être certifiés que par une visite de terrain.

Exemples de localisation d'orifices débouchant au jour

Un premier exemple est précédemment évoqué en 2.2 - La recherche d'archives et d'informations. Il illustre l'utilisation de photos aériennes anciennes.

L'exemple fourni en Figure 26 est issu d'une étude sur le tracé du TGV Nord (Source LRPC de Clermont-Ferrand). Cet exemple montre l'intérêt de l'utilisation des photographies infrarouges fausses couleurs. Elles ont permis le repérage de nombreux indices de désordres et la mise en évidence de contextes topographiques et hydrographiques très sensibles.

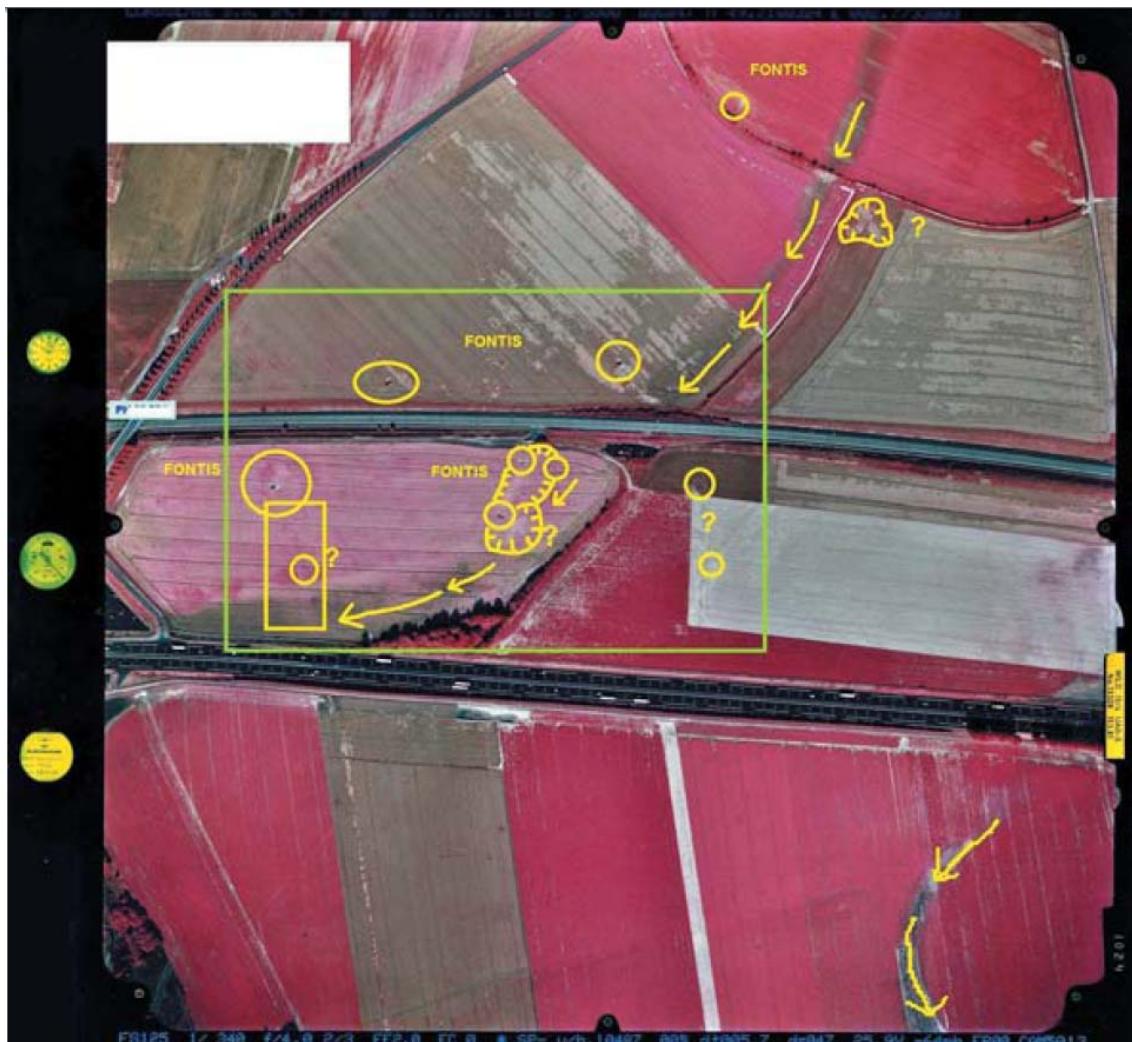


Figure 26 - Schéma interprétatif sur photo infrarouge montrant des anomalies de drainages, des fontis et des puits (source LRPC de Clermont-Ferrand).

Les indices observés appartiennent à trois catégories :

- anthropiques : puits, cheminées d'aérage ;

- topographiques : fontis, affaissements ;
- hydrogéologiques : anomalies de drainage.

La Figure 27 montre un exemple de détection de subsidence, avec cavités ouvertes, liées à d'anciens travaux miniers en Afrique du Sud (East Rand), tandis qu'en Figure 28 on observe des effondrements karstiques ouverts liés à des exploitations souterraines (Afrique du Sud, West Rand).



Figure 27 - Détection visuelle de subsidences de surface liées à d'anciennes exploitations de charbon à partir d'une image IKONOS.



Figure 28 - Exemple d'utilisation d'imagerie Google Earth à très haute résolution pour la détection d'effondrements liés à des mines souterraines en activité.

4.3.3. Conclusion

La **photo-interprétation** est une méthode **à grand rendement** qui permet de réaliser une première localisation d'ouvrages débouchant au jour ou des zones présentant des traces d'anciennes exploitations minières. Elle est à privilégier avant toute autre méthode plus intrusive.

Comme toute méthode de télédétection, la photo-interprétation **nécessite une validation de terrain**. Elle est surtout plutôt utilisable **en zone rurale et dégagée**.

La méthode est relativement **peu coûteuse** lorsque la zone d'intérêt est couverte par des photographies aériennes existantes (ou des images à très haute résolution disponibles sur Google Earth). Le coût est alors essentiellement lié au temps passé par le photo-interprète.

Une **campagne d'acquisition aéroportée** dédiée (verticale ou oblique) est **d'un coût élevé** et ne se justifie que pour des acquisitions à une échelle régionale.

4.4. LE TRAITEMENT INFORMATIQUE D'IMAGES NUMÉRIQUES

De par leur caractère numérique, les images acquises par des radiomètres aéroportés ou satellitaires peuvent faire l'objet de traitements informatiques variés. Ces traitements peuvent faciliter le travail du photo-interprète, le compléter ou s'y substituer.

Les traitements peuvent être :

- des traitements d'amélioration des couleurs et/ou des contrastes (étalement de dynamique) ;
- des traitements de rehaussement de contours (filtrages et convolutions) ;
- des traitements d'extraction de l'information spectrale (classifications) ;
- des traitements d'extraction d'information spatiale (reconnaissance de forme, segmentation d'images).

Des combinaisons de plusieurs de ces traitements sont possibles.

4.4.1. Traitements de thermographie infrarouge

Domaine d'application

La méthode s'applique en milieu rural pour la localisation des ouvrages débouchant au jour et la détection de cavités.

La méthode met en évidence les ouvrages affleurant ou sous quelques mètres de recouvrement. Des études en milieu karstique⁵ montrent qu'un vide franc peut être mis en évidence à moins de 5 m de profondeur.

Déroulement d'une campagne de mesure

En fonction de la zone à couvrir et de la résolution désirée, la hauteur de vol varie. La période de mesure la plus propice se situe en été par grande chaleur, en fin de journée (17h-18h) et en hiver en fin de nuit par temps de gel. Pour une bonne interprétation, les informations croisées été/hiver sont souhaitables.

L'état de la surface du sol joue un rôle important. Ainsi, en été, les cultures (maïs, chanvre...) et les pâturages qui apparaissent froids sur les images en fin de journée, masquent les anomalies liées à la présence d'ouvrages débouchant au jour.

La phase de validation de terrain permet de faire le tri entre les différentes anomalies. Elle donne la possibilité comme pour la photo-interprétation d'avoir un complément d'information sur des éléments observés mais non interprétés. Pour les anomalies infrarouges thermiques, les vérifications de terrain passent par des décapages à la pelle mécanique sur 50 cm après une difficile phase de repérage, en raison de la distorsion de l'image. Un redressement automatique des images et une localisation GPS sont donc indispensables. La validation de terrain est essentielle car en plus de contrôler les interprétations, elle permet d'estimer la qualité des résultats.

⁵ **Siriex C. et Bertrand L.** (2001) - Détection des cavités karstiques par thermographie infrarouge, 1998 ; Détection des cavités karstiques par thermographie infrarouge- Interprétation et modélisation, 2001.

Rendement

Il est conditionné par le temps de vol qui permet de couvrir des territoires de plusieurs km² en quelques heures et par le temps d'interprétation et la validation terrain.

Limites

Cette méthode, en cours de développement, ne fonctionne pas de manière optimale ou satisfaisante en toutes les circonstances. Ainsi, la radiométrie thermique infrarouge est limitée par :

- la présence de forêts, bosquets ou champs cultivés au maximum de leur développement végétatif qui masquent les indices thermiques ;
- les prairies qui en été livrent peu d'information du fait du faible écart thermique entre la température de l'herbe et celle des ouvrages ;
- la présence d'eau qui en se réchauffant ou gelant plus rapidement que le milieu environnant produit un leurre ;
- une épaisseur importante du bouchon pour les puits comblés qui ne donnent pas d'anomalies thermiques.

Exemple des marnières de Normandie

Dans le cadre d'un thème de recherche, de 1998 à 2002, sur les cavités souterraines abandonnées financé par le LCPC, l'idée d'utiliser la thermographie infrarouge comme méthode de détection des puits d'accès aux marnières a vu le jour et a été expérimentée.

Pour le cas étudié des marnières de Haute-Normandie, l'exploitation était terminée et les puits d'accès ont été ou laissés en l'état, ou obstrués (planches, tôles, dalles de bétons) ou remblayés.

Considérant que la température d'un puits est constante en toutes saisons (14 à 15 °C) ce qui n'est pas le cas de l'environnement ambiant, il peut être détecté :

- soit un transfert de chaleur du puits vers la surface, si le bouchon est poreux et peu épis (< 3 m). Dans ce cas, l'anomalie thermique sera froide l'été dans l'après-midi et froide l'hiver en fin de nuit ;
- soit une anomalie thermique du remblai positive l'été en fin de journée et négative l'hiver à l'aube. Cette anomalie est le fait de la plus faible inertie thermique du remblai par rapport à l'encaissant.

La Figure 29 montre des exemples de détection de puits et zones perturbées, détectés lors d'un vol d'été à 17 h.

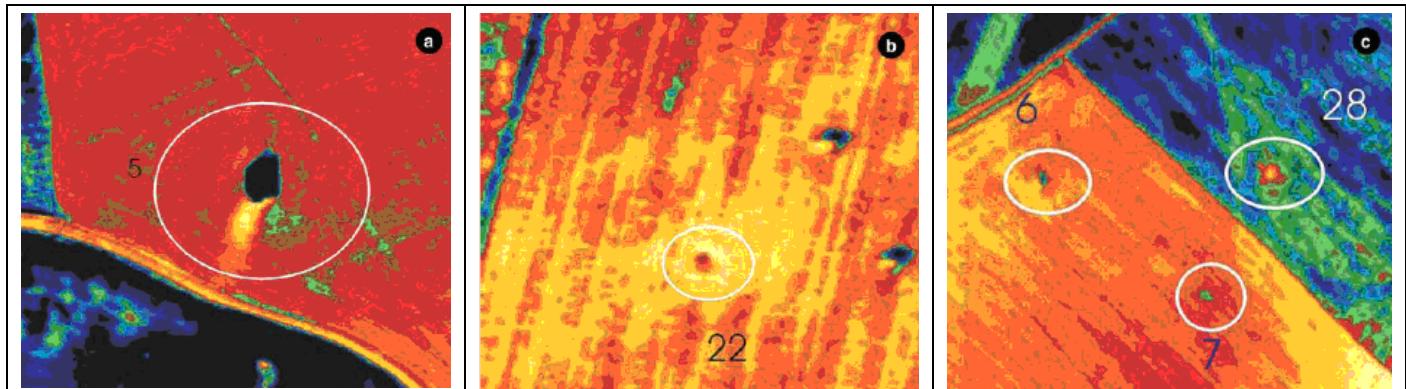


Figure 29 - Exemples d'anomalies thermiques correspondant : (a) à un puits de marnière protégé par un buisson ; (b) à un puits de marnière invisible sur le terrain ; (c) à une zone perturbée (Source : Guide technique du LCPC détection de cavités souterraines).

Modélisation

Des modélisations numériques par éléments finis ont étées conduites, dans le cadre du projet national CriTerre (Durot, 2001), pour définir la signature thermique des marnières et de leurs puits. Les transferts thermiques envisagés sont des phénomènes de conduction dans le massif, et des phénomènes de convection à l'interface surface/cavité. La modélisation montre que, quelles que soient la taille et la profondeur de l'ouvrage, l'épaisseur du bouchon est le facteur important : plus elle est faible et plus l'anomalie thermique est forte. Par ailleurs, la présence de vent occulte fortement la réponse en surface.

Conclusion

La **radiométrie infrarouge thermique** peut être utilisée sur des superficies importantes (quelques centaines de km²). C'est une méthode à **grande rendement** permettant de localiser les ouvrages débouchant au jour, et qui s'applique en **milieu rural**.

Les surfaces fraîchement labourées et ensemencées sont idéales pour le repérage des anomalies. Les mesures doivent être réalisées à altitude constante, en été en fin de journée ou en hiver en fin de nuit. Pour une bonne interprétation, les informations croisées hiver/été sont conseillées.

La méthode est **limitée par les nombreux leurre**s qui peuvent être présents sur les images, et par les surfaces froides (forêts, champs de maïs...) qui masquent les anomalies de température.

Des applications sur des zones de prospection plus petites concernant la détection de karsts sont en cours de développement ; les premiers résultats montrent des profondeurs d'investigation indirecte de **l'ordre de 2 à 5 mètres**.

4.4.2. Traitement d'images hyperspectrales

Domaine d'application

La méthode peut être envisagée en milieu rural pour la localisation des ouvrages débouchant au jour, la détection de cavités, la détection de perturbation(s) du couvert végétal liée à des phénomènes de subsidence ou le remaniement de terrains du à d'anciens travaux miniers.

Déroulement d'une campagne d'acquisition

L'acquisition d'images hyperspectrales de bonne qualité est très fortement influencée par les conditions climatiques au moment du survol de la zone. Elle doit être faite par temps clair et sec, lorsque le soleil n'est pas trop bas sur l'horizon (soit de 10 à 14 heures, heure solaire), donc de préférence l'été.

La résolution au sol dépend de l'altitude de vol et varie de 2,5 à 5 m avec les capteurs aéroportés actuels. La surface couverte est de plusieurs centaines de km² en une journée, fonction de l'altitude de vol.

Une campagne de spectroradiométrie de terrain est généralement nécessaire pour acquérir des spectres de réflectance de terrain représentatifs des différents types de végétation, sols roches et autres objets de la surface rencontrés sur la zone d'étude.

Une telle campagne permet la création d'une librairie spectrale dédiée, utilisable pour calibrer les images d'une part, et procéder à leur traitement thématique d'autre part.

Exemple de localisation d'une exploitation souterraine

L'imagerie hyperspectrale permet l'identification des différentes espèces végétales, et pour chacune d'elle, son état végétatif. C'est donc une méthode de détection indirecte des perturbations de surface au travers de leur répercussion sur le type ou l'état de santé des végétaux, en zone végétalisée.

L'image présentée en Figure 30 montre en rouge la détérioration d'une plantation de pins sur une série temporelle de trois images, détérioration liée à un phénomène de subsidence usé par une exploitation souterraine (mine de Kirscheller Heide, Ruhr, Allemagne : http://www2.brqm.fr/mineo/SiteReport/dsk_final_report_rev1_pv_09.pdf)

Le traitement des images hyperspectrales reste néanmoins **lourd et complexe** et ne peut être compatible qu'avec **la couverture de zones suffisamment importantes**.

D'autre part, la détection au moyen d'images hyperspectrales, d'anomalies dans la végétation ou son état de santé, doit être systématiquement **vérifiée sur le terrain**, des facteurs tels que la pollution, l'anthropisation, la remontée de nappe, etc. pouvant produire le même type d'anomalies.

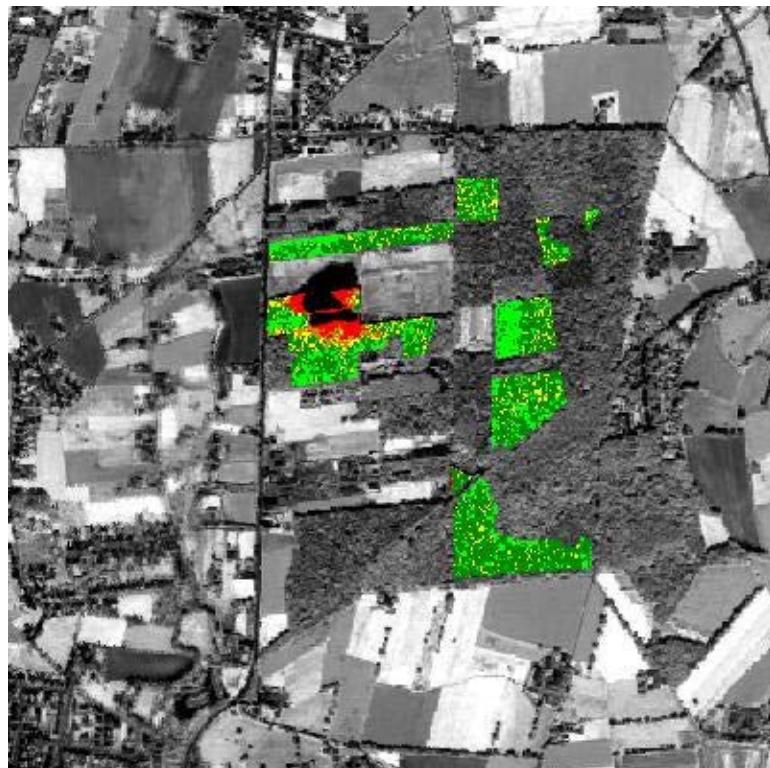


Figure 30 - Changement de l'état végétatif d'une plantataion de pins lié à un phénomène de subsidence.

4.4.3. Traitement et interprétation de MNT et MNE LIDAR

Des essais de détection et d'inventaire d'ouvrages débouchant au sol à partir de MNT et MNE LIDAR ont été tentés dans le bassin minier du Witwatersrand (Afrique du Sud) par le Service Géologique Sud Africain.

Ces essais se sont révélés peu concluants dans une zone perturbée par de trop nombreux phénomènes anthropiques qui ne permettaient pas de distinguer suffisamment clairement les objets recherchés. Un survol à plus basse altitude aurait pu permettre une meilleure détection des objets recherchés, mais d'après le fournisseur de données la technique est surtout utilisable en milieu agricole (H. Coetzee, communication personnelle).

4.5. CONCLUSION SUR LES MÉTHODES DE TÉLÉDÉTECTION

La **photo-interprétation** de photographies aériennes existantes ou d'images satellites à très haute résolution spatiale disponibles (via les catalogues de distributeurs ou mieux via Google Earth) reste une méthode **peu coûteuse** (achat des données plus coût du photo-interprète), facile à mettre en œuvre sur de petites surfaces. Elle reste toutefois limitée aux **zones rurales dépourvues de couvert végétal boisé**. En tout

état de cause, chaque indice d'un possible ouvrage débouchant au sol doit systématiquement faire l'objet d'une **vérification terrain**.

S'il convient de programmer une acquisition de photos aériennes, visée nadir ou oblique, ou d'images satellites haute résolution, la zone d'étude doit être suffisamment étendue **pour justifier le coût** de la programmation, qui peut être élevé. Là encore, elle reste limitée **aux zones rurales dépourvues de couvert végétal boisé**.

Les coûts d'acquisition de **thermographie, d'images hyperspectrales ou de MNT LIDAR** est, dans l'ordre croissant, particulièrement élevé (20 000 à 50 000 € par exemple pour une campagne d'acquisition hyperspectrale d'un à deux jours) et ne peut être envisagé que pour des zones couvertes importantes ou des enjeux les justifiant. Ces méthodes restent, dans une mesure limitée, moins restrictives quand aux zones boisées, mais restent **peu utilisables en zone urbaine ou périurbaines pour la détection d'ouvrages débouchant au sol**. De plus la complexité du prétraitement et du traitement de ces données les rend peu accessibles à des non spécialistes et peut se révéler coûteux.

5. La microgravimétrie

5.1. PRINCIPE ET GÉNÉRALITÉS SUR LA GRAVIMÉTRIE ET LA MICROGRAVIMÉTRIE

La prospection gravimétrique consiste à déterminer les anomalies de pesanteur occasionnées par l'inégale répartition des densités dans le sous-sol. Ces anomalies représentent la différence entre la valeur g , accélération de la pesanteur, mesurée et corrigée des causes de variations connues, et une valeur normale de g_0 que l'on observerait si la Terre était homogène. L'unité de mesure est le gal, 1 gal = 10^{-2} m.s.

Pour mesurer g , on utilise des appareils appelés gravimètres, dont le principe est comparable à celui du peson à ressort, soit une masse accrochée à l'extrémité inférieure d'un ressort vertical. Le poids de la masse est équilibré par la tension du ressort, elle-même proportionnelle à son élongation. Les variations de g se traduiront par des variations de longueur du ressort que l'on mesurera (Figure 31).

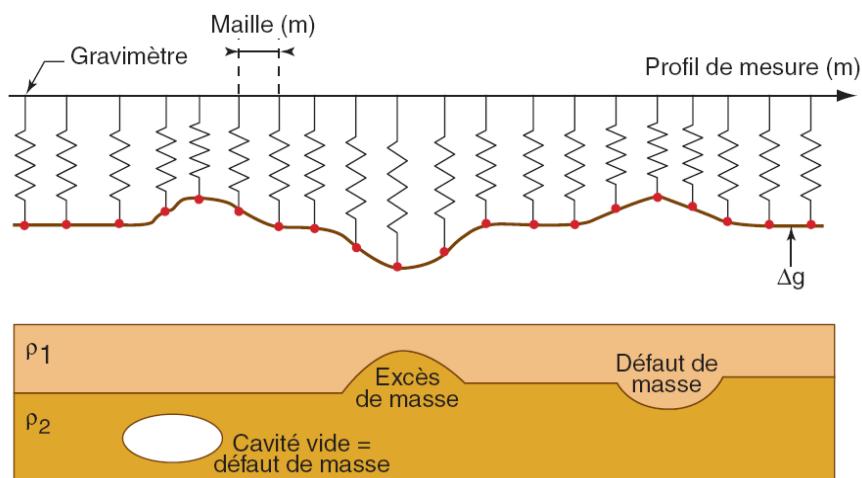


Figure 31 - Principe du gravimètre.

Dans les années 1970, l'amélioration de la précision des appareils de mesure a permis l'étude de structures de dimensions plus réduites et plus superficielles (de 0 à 50 m de profondeur), telles que les cavités souterraines dont le défaut de masse engendre des anomalies de l'ordre de quelques dizaines de μgal ⁶ ; c'est la **microgravimétrie**.

La microgravimétrie est une application de la gravimétrie au domaine de la subsurface, avec des profondeurs d'investigation qui varient généralement de quelques mètres à

⁶ $1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ m.s}^{-2}$

quelques dizaines de mètres. Les anomalies investiguées sont de l'ordre de la dizaine de microgals.

5.1.1. Grandeur mesurée

Pour être significatifs, les résultats des mesures microgravimétriques doivent être corrigés de toutes les causes de variations du champ de pesanteur connues (correction de la dérive de l'instrument, dérive de marées luni-solaires, correction à l'air libre, de relief, de latitude...).

Ainsi, on calcule pour chaque station de mesure l'anomalie de Bouguer. L'anomalie de Bouguer varie selon la structure du proche sous-sol, autour d'une tendance générale, dite anomalie régionale, résultant de la géologie profonde. Cette anomalie régionale est ôtée de celle de Bouguer pour obtenir l'anomalie résiduelle issue de variations des masses locales et peu profondes.

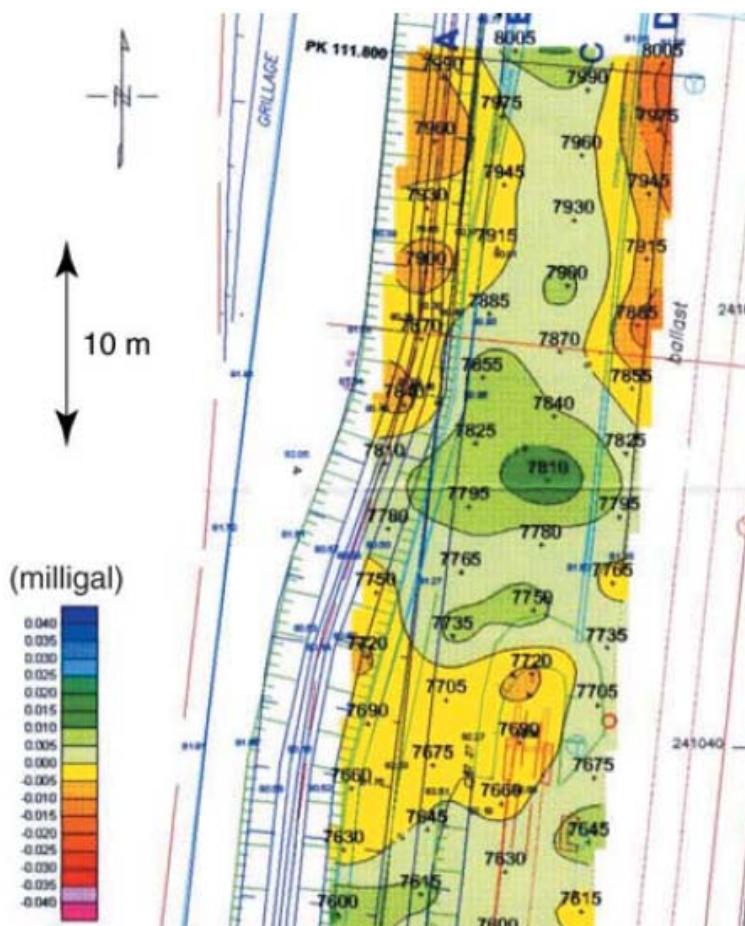


Figure 32 - Anomalie résiduelle représentée sous forme de carte de couleur.
Les points noirs numérotés, espacés de 3 m, représentent les stations de mesure sur une voie ferrée,
les zones rouges indiquent les défauts de masses les plus forts (documents SNCF).

5.1.2. Résultats attendus

Le résultat attendu d'une campagne microgravimétrique est la représentation de l'anomalie résiduelle généralement graduée en niveau de couleur ou sous forme d'isocontours en fonction de la position sur la surface du sol (Figure 32). Un orifice débouchant au jour se manifeste par une anomalie négative, due à un défaut de masse. Plus le contraste entre le milieu encaissant et l'orifice est grand, plus l'anomalie résiduelle négative sera importante.

5.2. MÉTHODOLOGIE

5.2.1. Domaine d'application

La microgravimétrie est applicable en milieu rural et en milieu urbain en prenant soin de considérer certaines spécificités méthodologiques (bâtiments, cave...). Cette méthode est particulièrement indiquée pour la recherche de vides (puits, cavités, galeries...), le contraste entre l'encaissant et le vide étant maximal.

Couramment utilisée pour la détection des cavités depuis les années 1970, la microgravimétrie reste l'un des meilleurs outils pour la localisation et la surveillance de vides souterrains ou anthropiques. Puisque la microgravimétrie mesure les variations de la pesanteur à la surface du sol, elle est en effet directement influencée par la répartition des densités du sous-sol et en particulier la présence de vides qui créent un déficit de masse par rapport à la densité des terrains encaissants.

5.2.2. Déroulement d'une campagne

Les informations obtenues (profondeur, présence de réseaux de galeries...) durant la phase d'enquête sont primordiales pour le choix des paramètres de mesure.

Il convient dans un premier temps de déterminer si l'orifice recherché ou une cavité directement liée sont détectables en microgravimétrie. L'anomalie maximale créée par une cavité peut être estimée et doit être supérieure à la valeur de l'anomalie significative. Selon les auteurs et les expérimentateurs, la plus petite anomalie significative mesurée en microgravimétrie est située entre 10 μGal pour d'excellentes conditions de mesures et 20 μGal .

Ainsi, si une anomalie significative est de l'ordre de 10 μGal , une cavité remplie d'air dans un sol de masse volumique $\rho = 2\,000\,\text{kg.m}^{-3}$ de 4 m de rayon est détectable tant que la profondeur de son toit n'excède pas 10 m.

Les différentes étapes d'une campagne de mesure ne sont pas détaillées ici, de même que l'utilisation du gravimètre, le programme de mesure, la correction et le calcul de l'anomalie de Bouguer, ainsi que la détermination de l'anomalie régionale.

5.2.3. Interprétation

La qualité de l'interprétation est liée à un choix de maille judicieux. Avec une maille bien choisie, la présence d'un orifice sera révélée par une anomalie négative de l'ordre de 10 à 20 μGa sur au moins trois points de mesures adjacents. L'interprétation des mesures va permettre d'estimer la profondeur de l'orifice, la masse de l'hétérogénéité et l'implantation des forages. Les forages seront implantés à l'aplomb des anomalies négatives les plus fortes.

5.3. LIMITES DE LA MÉTHODE

- ◆ La méthode ne pourra être utilisée que si des **contrastes de densité significatifs** sont présents. Les structures correspondantes ne seront détectables que si leur taille est suffisamment grande et leur profondeur suffisamment faible pour que des anomalies d'amplitude supérieure à l'incertitude de la méthode soient générées. Enfin, la dimension de ces anomalies devra être suffisante pour que la maille de mesure choisie puisse les détecter.
- ◆ La précision de la méthode pourra être dégradée dans les cas de sols meubles et instables et par les vibrations d'origines variées (**circulation urbaine, activité industrielle, conditions météorologiques défavorables, proximité de la mer, micro-séismicité, etc.**). La précision des corrections gravimétriques sera également limitée par la présence, à proximité des stations de mesures, d'une forte topographie, de bâtiments, caves, les voiries ou réseaux divers, les anomalies lithologiques, remblais ou infrastructures diverses.
- ◆ L'exploitation des mesures gravimétriques est enfin limitée par la **non-unicité des interprétations**, qui devront toujours être contrôlées par plusieurs sondages. Ainsi, un vide localisé profond (1) et une structure superficielle, étendue et de faible contraste de densité (3), pourront être à l'origine d'une anomalie identique (Figure 33).

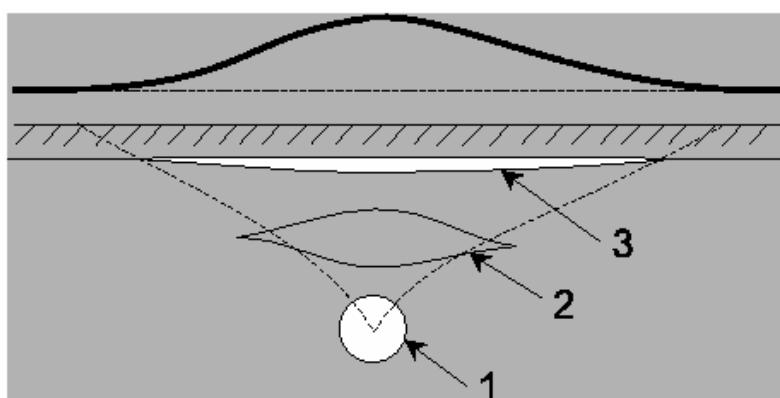


Figure 33 - Exemple de modèles équivalents en gravimétrie (d'après M. Chouteau, 2000).

5.4. EXEMPLES DE LOCALISATION DE TRAVAUX MINIERS SOUTERRAINS

En microgravimétrie, les études réalisées par le BRGM couvrent des superficies parfois importantes, plusieurs hectares, avec des maillages très variables selon l'objectif. Pour localiser l'emprise des travaux miniers, des maillages de 20*20 m ont été employés régulièrement en première reconnaissance, avec des resserrements à 10*10 m et 5*5 m sur les anomalies détectées. Pour des objectifs plus superficiels, zones décomprimées et fontis en formation ou des puits d'accès, le maillage est plutôt de 5*5 m, avec des resserrements à 2,5*2,5 m. L'incertitude sur les mesures réalisées est variable, de 8 à 23 µGal, selon les conditions de terrain.

Les précisions les plus mauvaises ont été obtenues sur des sols meubles (zone marécageuse, jardins, et remblais divers) et sur le site d'une ardoisière en activité (mesures perturbées par les vibrations de machines et le passage de camion). Dans les lotissements et cités minières, cette imprécision est accentuée par l'incertitude sur les corrections liées à la présence des murs et sous-sols des bâtiments et de divers aménagements urbains, souvent proches des stations de mesures. Les amplitudes des anomalies détectées sont très variables, de 15 à 30 µGal, pour un puits d'accès bouché ou une descenderie, jusqu'à plus de 100 µGal pour un ensemble de galeries et de salles à une dizaine de mètres de profondeur.

Du fait des dimensions relativement importantes des études gravimétriques et de leur contexte géologique souvent complexe, les effets régionaux sont généralement importants. Ainsi, de forts gradients gravimétriques peuvent apparaître au contact des formations houillères légères, faisant l'objet de l'exploitation et de leur encaissant généralement plus dense. **Une extraction correcte des anomalies locales est donc fondamentale pour l'interprétation ultérieure.** Elle peut être effectuée grâce au calcul de régionaux et résiduelles par approximation polynomiale, par transformation en gradient vertical, par séparation fréquentielle, par inversion, etc.

5.4.1. Exemple du bassin houiller de la Chapelle-sous-Dun (71)

Le bassin houiller de la Chapelle-sous-Dun (Le Jeune et Miehé, 1999), d'extension très limitée, est enclavé entre un massif granitique au sud-ouest et une intrusion rhyolitique au nord-est. Les formations houillères stéphanienne ont une densité moyenne beaucoup plus faible que celles des roches éruptives qui bordent le bassin. Les couches de houille sont subaffleurantes et ont été exploitées en galeries ou en descenderies. L'objectif de l'étude microgravimétrique était de localiser les zones exploitées, qui présentent des risques d'effondrement, en vue de leur mise en sécurité.

455 stations gravimétriques ont été implantées à la maille de 10 x 10 m, nivélées au centimètre près et mesurées avec un gravimètre Scintrex CG3-M. L'incertitude sur la mesure, estimée à partir des 90 stations réitérées (soit 20 % de points doubles), est de 7 µGal. L'incertitude finale sur l'anomalie de Bouguer (Figure 34 a), qui intègre les erreurs sur la mesure, sur le niveling et sur les corrections topographiques, est de 8 µGal. Les traitements et la compilation des données ont été réalisés avec le logiciel MICROGAL (BRGM).

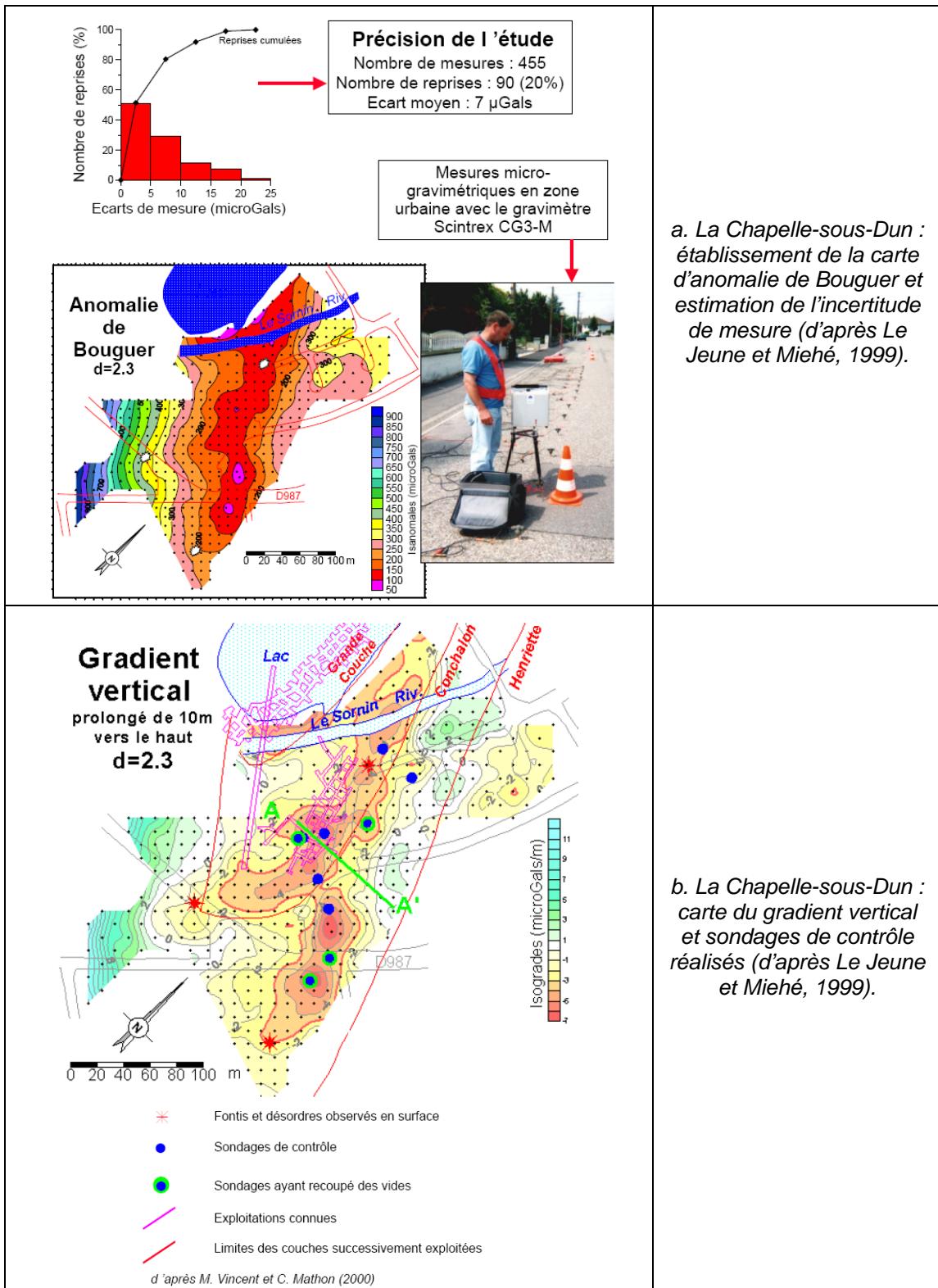
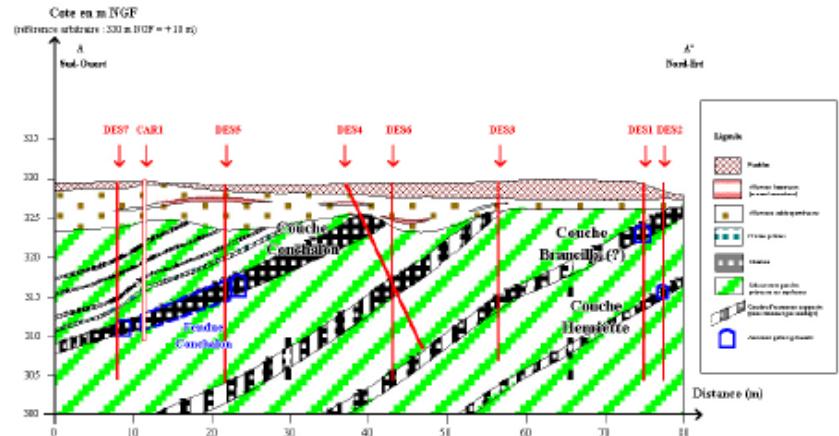


Figure 34 - Microgravimétrie : mesures et résultats.

La carte d'anomalie de Bouguer met en évidence une importante anomalie légère de 700 μ Gal d'amplitude qui est due au contraste de densité entre les formations stéphaniennes légères et le socle éruptif. Afin d'éliminer cet effet régional et d'isoler les effets des structures plus superficielles qui sont recherchés, des cartes d'anomalie résiduelle et de gradient vertical (Figure 34 b) ont été calculées.

Ces cartes permettent d'identifier deux axes légers, l'un situé au niveau d'exploitations connues, l'autre dans une zone où d'anciens travaux sont probables, mais où l'on ne dispose plus d'archives précises. L'amplitude de ces anomalies résiduelles est d'une centaine de μ Gal. Les anomalies légères du gradient vertical sont particulièrement bien corrélées, avec l'extension des zones exploitées connues. Les désordres observés en surface sont à l'intérieur des zones légères. Lors de la première campagne de contrôle, dix sondages ont été réalisés (Vincent et Mathon, 2000) et des vides où des zones décomprimées ont été rencontrés entre 5 et 15 m de profondeur.

En particulier, un vide de 2 m de haut a été traversé dans la zone des anciens travaux. Des modélisations gravimétriques quantitatives permettent de vérifier que ces vides sont bien susceptibles d'expliquer les anomalies gravimétriques observées (Figure 35). Cette étude a ainsi pu contribuer à la définition de la zone à sécuriser. Les vides reconnus et vides présumés sont des zones de faible densité.



Coupe verticale interprétée A-A', orientée selon le pendage des couches
D'après M. Vincent et C. Mathon, dec 2000

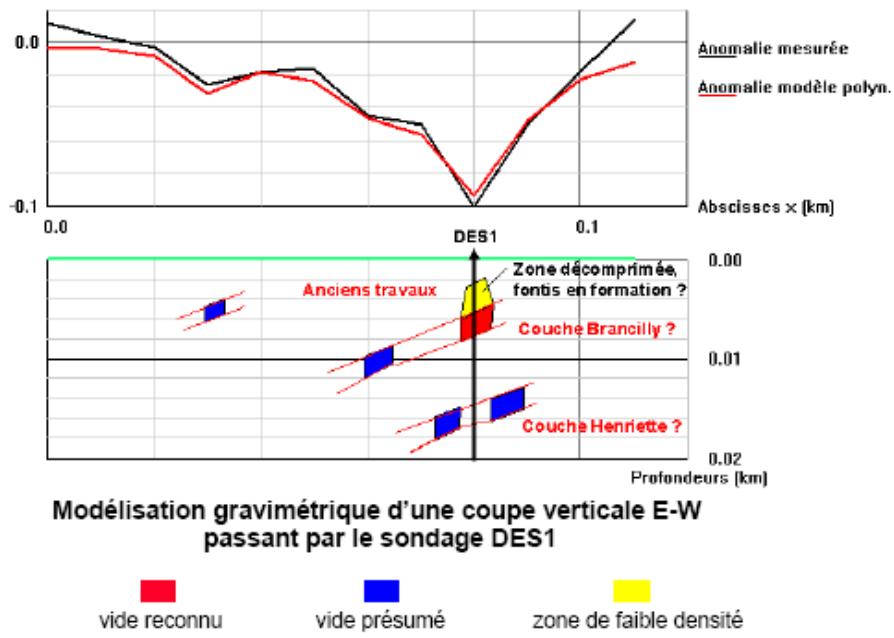


Figure 35 - Coupe géologique interprétée et modélisation gravimétrique quantitative : la Chapelle-sous-Dun.

5.4.2. Autres résultats

Dans le bassin houiller de Saint-Laurs (72), la microgravimétrie a été utilisée conjointement avec la magnétométrie et la polarisation spontanée (PS), pour rechercher des puits d'accès abandonnés (Miehé, 1991). Les anomalies légères détectées étant incomplètement cartographiées, elles n'ont pu être interprétées et des compléments de mesures ont été demandés.

La reconnaissance par microgravimétrie d'anciennes galeries minières sur le site de Montgoiry à Baraize (36) a permis de mettre en évidence plusieurs anomalies de 40 à 100 µGal d'amplitude au droit du filon de fluorine exploité (Le Jeune, 1994). L'une des anomalies est sur une zone effondrée. Les sondages de contrôles ont rencontré plusieurs vides francs de 1 à 3 m de haut, vers 6 m de profondeur.

À Montebbras (23), la reconnaissance gravimétrique avait pour objectif de localiser précisément un puits qui n'était plus visible. Une anomalie de dimension et d'amplitude susceptible de lui correspondre a été détectée (BRGM, 1997). Cependant, compte tenu de la présence d'effets régionaux qui compliquent l'interprétation, la localisation de la structure source est imprécise et trois positions de sondage de contrôle ont été proposées.

À Bouchain (59), la microgravimétrie, corrigée des effets perturbateurs de différentes infrastructures, montre une anomalie circulaire localisée dont la position, à proximité d'une tour d'extraction et d'une anomalie PS, suggère fortement la présence d'un ancien puits de mine (Dupont *et al*, 1999).

5.5. BILAN ET LIMITATIONS

En conclusion et au vu des différentes expériences, il apparaît que la microgravimétrie détecte bien **l'enveloppe des zones exploitées et les vides** ou les zones décomprimés les plus superficiels ou les plus grands. Elle peut donc contribuer efficacement à la localisation d'ODJ et à l'implantation des sondages de reconnaissance.

Il faut cependant que leur dimension soit suffisante comparée à la maille de l'étude. En particulier les réponses obtenues au-dessus de puits de mine remblayés ne sont pas toujours caractéristiques, du fait de la petite taille de ces structures, de la trop grande profondeur ou de la trop faible hauteur des vides et de la présence de nombreuses hétérogénéités à l'origine d'anomalies d'amplitude similaires.

Par ailleurs dans un contexte urbain ou fortement anthroposé, la qualité des résultats est conditionnée par la réalisation de corrections précises de tous les effets perturbateurs estimables (topographie, bâtiments, remblais, etc.).

Ces expériences montrent la nécessité de disposer d'outils de simulation performants, incluant la prise en compte des structures en trois dimensions et celle des effets topographiques, tant pour les études de faisabilité que pour la validation d'hypothèses d'interprétation. Elles ont également mis en évidence l'importance fondamentale des traitements (résiduelle, gradient vertical, prolongement, etc.) permettant l'extraction d'un signal représentatif des objets recherchés, par élimination des effets trop régionaux et par filtrage des bruits non significatifs.

La microgravimétrie est une méthode nécessitant une mise en œuvre rigoureuse vis-à-vis de l'appareillage, de l'implantation, des corrections et de l'interprétation des mesures. L'intervention des professionnels expérimentés est indispensable.

6. Les méthodes sismiques

6.1. PRINCIPE ET GÉNÉRALITÉS

Les méthodes sismiques sont basées sur l'étude de la propagation des ondes mécaniques dans le sol. Les méthodes sismiques actives utilisent la propagation des ondes générées en un point source par un choc (chute de poids, explosif), pour caractériser les propriétés mécaniques des couches géologiques. Lorsque ces ondes rencontrent un contraste d'impédance mécanique, elles se réfléchissent partiellement vers un récepteur où leurs caractéristiques sont enregistrées et analysées pour étudier les propriétés du sous-sol (Figure 36).

La présence d'un orifice débouchant au jour, d'une cavité dans le sous-sol peut, sous certaines conditions physiques, constituer un obstacle à la propagation des ondes et entraîner des modifications de certains paramètres (temps de trajets, amplitudes et formes des signaux, vitesses de propagation des ondes, etc.) qui serviront de révélateurs à leur présence.

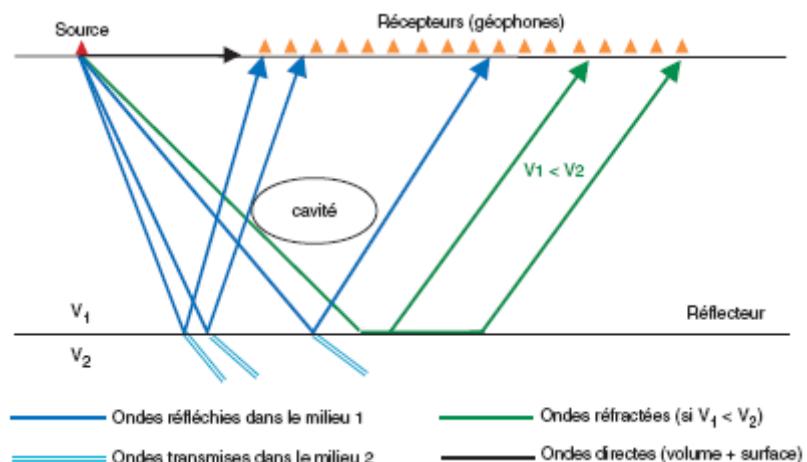


Figure 36 - Principe des méthodes sismiques.

6.1.1. Les types d'ondes

Il existe différents types d'onde sismique qui se déplace selon différents modes de déformation à des vitesses différentes. Les deux principales familles sont les ondes de volume (onde de compression : ondes P et ondes de cisaillement : ondes S) et les ondes de surface (onde de Rayleigh et onde de Love). Les premières peuvent se propager à travers les couches terrestres, alors que les secondes sont surtout actives à la surface.

Les ondes de volumes peuvent être des ondes P (ondes primaires ou de compression) ou des ondes S (ondes secondaires ou de cisaillement). Les ondes P ont la vitesse de déplacement la plus élevée, ce qui permet de les enregistrer les premières sur les sismogrammes. Elles peuvent se propager dans les solides mais aussi dans les liquides. Les ondes S ont une vitesse de déplacement plus faible que celle des ondes P, mais plus élevée que celle des ondes de surface. Elles ne peuvent pas se propager dans les liquides.

Les ondes de volume se propagent sur un demi-espace selon les lois de l'optique.

Pour un milieu comportant une seule couche où $V_2 > V_1$, on observe, sur les enregistrements de chaque récepteur, l'amplitude maximum des ondes retournées par le milieu après propagation (Figure 37), soit :

- une onde directe ;
- une onde réfléchie ;
- une onde réfractée à l'angle d'incidence critique, $i_c = \arcsin (V_1/V_2)$.

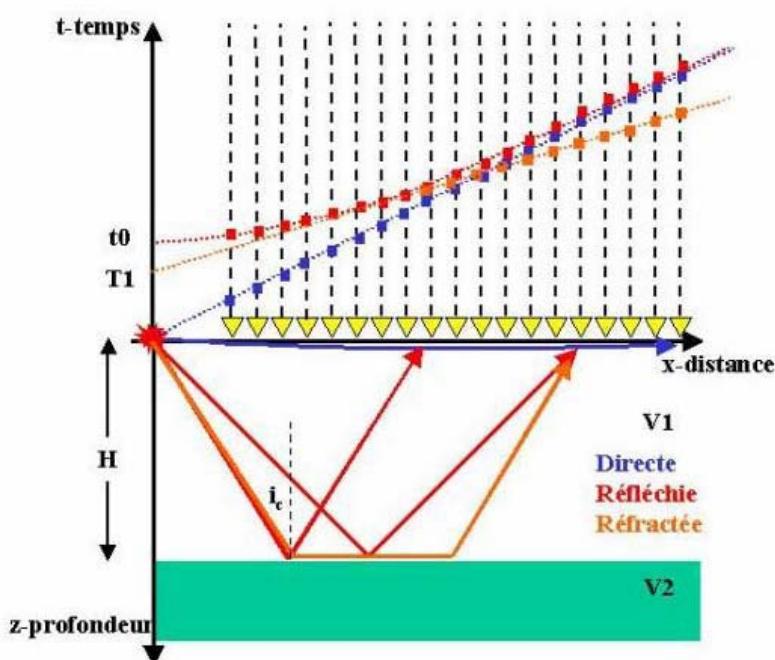


Figure 37 - Propagation des ondes sismiques dans le milieu
(source en $z = 0$, $x = 0$; récepteurs en $z = 0$, x).

6.1.2. Trains d'ondes et angle critique

Les différents trains d'onde ont des chemins différents et donc arrivent à des temps différents suivant que :

- $i < i_c$: reflexion + transmission ;

- $i = i_c$: réfraction (ondes coniques) ;
- $i > i_c$: reflexion totale (grand angle).

Cette notion d'angle critique définit le type de sismique mise en œuvre :

- la *sismique réflexion ou verticale* concerne les trajets d'onde en-deçà d' i_c . On enregistre préférentiellement des réflexions, sur un dispositif peu étendu ;
- la *sismique réfraction ou grand angle* concerne les trajets au-delà d' i_c . On enregistre alors les arrivées des ondes coniques sur un dispositif très étendu.

6.1.3. Les différents dispositifs

Les dispositifs de mise en œuvre dépendent du problème à traiter et orientent les techniques de traitement qui seront à utiliser avant la phase d'interprétation.

La mise en place des dispositifs s'effectue localement ou sur quelques hectares.

Les dispositifs en réflexion permettent d'imager les contrastes d'impédance présents dans le milieu. L'imagerie sismique n'est bien réalisée que si la vitesse de propagation est connue. L'observable utilisé est la cohérence des réflexions sismiques. La sismique haute résolution (SHR) est une variante de la sismique pétrolière appliquée aux structures superficielles.

Les dispositifs en transmission permettent d'étudier les distributions de vitesse dans le milieu. L'observable utilisé est le temps de trajet de l'onde sismique entre un point source et un récepteur :

- la *sismique réfraction* utilise un ou plusieurs tirs sismiques pour caractériser le milieu comme une succession de couches de vitesse différente grâce à l'étude des temps de trajet des ondes réfractées entre la source et les géophones (dromochronique). La présence d'une cavité se traduira par des retards d'arrivée ;
- la *tomographie* (surface et forages) est une extension de la technique précédente à des géométries plus complexes que des couches. En conséquence, le nombre de couples source-capteur devra être important pour permettre de reconstruire le modèle de vitesse avec une bonne résolution ;
- la *sismique en onde de surface* (SASW) utilise la propriété qu'ont ces ondes de se propager à la surface de la Terre, en intégrant un volume d'autant plus grand que leur fréquence est basse. Si la vitesse de cisaillement à laquelle elles sont très sensibles, augmente avec la profondeur, leur vitesse de propagation augmentera de façon inverse à la fréquence du signal : c'est ce que l'on appelle la dispersion. Le problème inverse consiste donc à inverser la courbe de dispersion afin de retrouver le gradient de vitesse vertical caractérisant le milieu.

6.2. DOMAINE D'APPLICATION

Les méthodes sismiques peuvent être utilisées pour une **détection indirecte des vides** :

- en *sismique réfraction*, des anomalies de retards peuvent perturber les réfractions sur des marqueurs géologiques lorsque des zones de faible vitesse, correspondant à des formations décompactées, sont rencontrées. La méthode peut être également sensible aux variations de profondeur d'un niveau et en particulier à son affaissement au-dessus d'une cavité en voie d'effondrement ;
- en *sismique réflexion haute résolution* (SHR), une interruption des réflecteurs géologiques surmontant la cavité peut être observée au-dessus d'une cavité, si celle-ci a généré des manifestations de surface, fracturations, circulation d'eau, affaissement, etc. ;
- en *sismique « ondes de surface »* (SASW), on pourra également observer au-dessus des vides des perturbations des champs de vitesses de cisaillement V_s (diminution de vitesses V_s dans les zones de faible résistance mécanique, inversions de vitesses liées à la karstification). Ces zones de faiblesse se manifestent également par l'apparition de plusieurs modes de dispersion traduisant probablement des variations brutales de la rigidité.

Dans certains cas, une **détection directe des vides** est également envisageable :

- en *sismique réflexion haute résolution* (SHR), une interruption des réflecteurs géologiques situés au niveau ou en dessous de la cavité peut également être observée à condition que la résolution du dispositif le permette (effet de masquage). Une détection des vides est possible jusqu'à une profondeur d'investigation de 50 à 100 m ;
- en *sismique « ondes de surface »* (SASW), des cavités maçonnées ont pu être détectées par la diffraction des ondes de surface, tandis que des galeries non maçonnées se manifestent par une diminution de l'amplitude des ondes qui sont absorbées par la cavité.

En génie civil, la sismique réfraction est utilisée pour identifier le toit du substratum ou *bedrock* et caractériser la dureté des sols grâce à leur vitesse acoustique. La sismique réfraction peut également aider à caractériser la zone altérée lors d'une acquisition de sismique réflexion.

6.3. SISMIQUE RÉFLEXION HAUTE RÉSOLUTION

6.3.1. Principe

Définition

La sismique réflexion haute résolution (SHR) est l'étude de la propagation des ondes de volume (ondes P et S) générées par une source sismique artificielle et de leurs interactions (essentiellement la réflexion) avec les hétérogénéités du sous-sol (Figure 38).

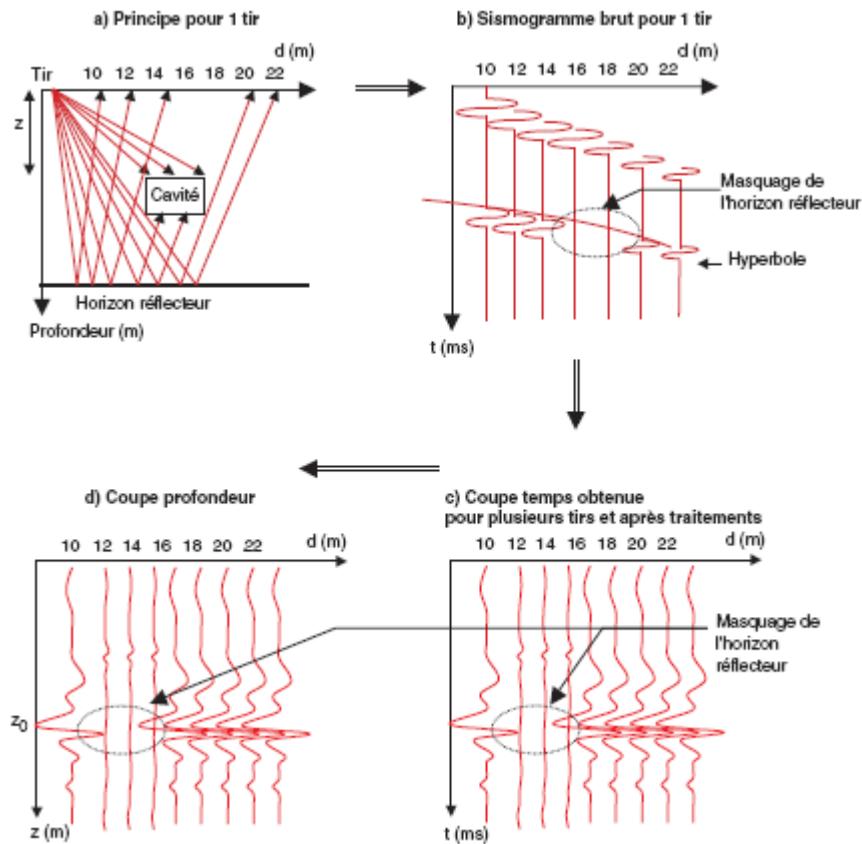


Figure 38 - Principe de la sismique réflexion haute résolution.source LCPC.

La sismique réflexion haute résolution s'applique, généralement :

- à l'imagerie de la couverture quaternaire, l'imagerie de glissement de terrain, la recherche de vides ;
- aux recherches de gisements de substances utiles, de réservoir en eau ;
- en génie civil pour l'implantation et la fondation de grands ouvrages.

Grandeur mesurée

Les grandeurs mesurées sont présentées en sismogrammes bruts. Elles représentent les amplitudes des ondes sismiques associées aux phénomènes d'interaction en fonction des temps de parcours mesurés en millisecondes et en fonction de la position entre la source sismique et les capteurs.

Résultats attendus

La *coupé temps*, un sismogramme traité, est le premier résultat attendu (Figure 38 b). Elle représente les amplitudes des ondes sismiques en fonction du temps de parcours

et de la position du dispositif de mesure dont chaque capteur est associé à une source. L'estimation de la vitesse quadratique moyenne des ondes dans le sol permet de passer à la *coupe profondeur*.

Cette coupe profondeur représente les amplitudes des ondes sismiques en fonction de la profondeur de la pénétration des ondes dans le sol et de la position de ce même dispositif. C'est à partir de ce résultat que la profondeur et dans une moindre mesure certaine des caractéristiques d'une cavité peuvent être estimées (Figure 38 d). Des résultats complémentaires comme les sections migrées (sismogrammes issus de la migration) peuvent aider à l'interprétation des signaux.

6.3.2. Méthodologie

Domaine d'application

C'est une méthode, particulièrement bien indiquée pour la détection de cavité en milieu tabulaire, s'applique en milieu rural. Elle est utilisée pour caractériser les cavités de 2 à quelques mètres de rayon (galeries, travers-bancs, niveaux exploités...), jusqu'à 50 mètres de profondeur. La présence de cavités peut être mise en évidence par un effet de masquage des horizons réflecteurs.

Déroulement d'une campagne de mesure

Le dispositif des mesures comporte un enregistreur des signaux numériques, une source et plusieurs géophones disposés en ligne. Une campagne de mesures sismique réflexion haute résolution consiste en l'acquisition de signaux en couverture multiple et le traitement des données. Pour cela une attention particulière doit être portée au choix :

- des profils sismiques rectilignes sur la zone supposée de localisation des orifices ou cavités et sur une zone sans cavité afin de déterminer les interfaces entre les couches géologiques ;
- du sismographe (enregistreur) ;
- de la source sismique qui doit être puissante et haute fréquence afin d'avoir une bonne résolution en profondeur (marteau, chute de poids, dynamite, minivib, fusil à cartouche,...) et adaptée au site ;
- des géophones (récepteurs sismiques) qui, pour la sismique réflexion haute résolution, sont souvent monoaxiaux verticaux, l'enregistrement des ondes P étant ce qui a de l'intérêt ;
- de la dimension du dispositif : distance entre la source et le premier géophone, distance entre les géophones, temps d'enregistrement, fréquence d'échantillonnage, la longueur du dispositif.

Traitement des données

Le traitement sismique permet de restituer à partir des données sismiques une vision 1D, 2D ou 3D du sous-sol. Les grandes étapes du traitement sont :

- prétraitements (géométrie, édition et récupération des amplitudes) ;
- filtrages et déconvolutions pour l'amélioration du signal ;
- les corrections statiques (effets de la topographie, de zones à faible vitesse et des hétérogénéités superficielles) ;
- les corrections dynamiques (permettant d'horizontaliser les traces sismiques par l'emploi d'une loi de vitesse adaptée) et le stack (sommation) ;
- la migration (permettant de corriger les effets de pendage).

Le traitement des données consiste à déterminer le champ de vitesse en point milieu commun (CMP), à appliquer une correction dynamique des traces et à les sommer en couverture multiple⁷.

La mise en collection CMP (Common Mid Point) rassemble les traces ayant le même milieu entre la source et le récepteur⁸, donc contenant la même information sur les réflecteurs. Plusieurs traces contribuent ainsi à l'imagerie d'un seul point. Ce regroupement permet de constituer une source et un récepteur synthétique de dimension Da (Figure 39).

Le degré de couverture⁹ correspond donc au nombre de trace contenues dans un CMP. Le traitement des données sismiques va permettre de *stacker* ces traces de façon :

- à obtenir des informations sur les vitesses du milieu par analyse de la courbure des hyperboles observable sur les CMP ;
- à augmenter considérablement la qualité du signal lors de la sommation.

Un processus itératif est souvent nécessaire pour choisir convenablement les paramètres optimums du traitement et converger vers la meilleure section stack possible. Le document final est une section stack restituée en profondeur.

L'interprétation consiste alors à attribuer une signification géologique à chaque réflecteur présent sur la coupe sismique.

⁷ Une acquisition en **couverture simple** consiste à réaliser un tir sismique en bout ou au centre du dispositif, chaque point du réflecteur étant utilisé une seule fois. En **couverture multiple**, on « éclaire » plusieurs fois des points identiques appelés Mid Points (situés à mi-distance entre la source et le géophone).

⁸ Aussi appelé Mid Point : MP

⁹ Degré de couverture : le nombre de trajet source-récepteur passant au même endroit

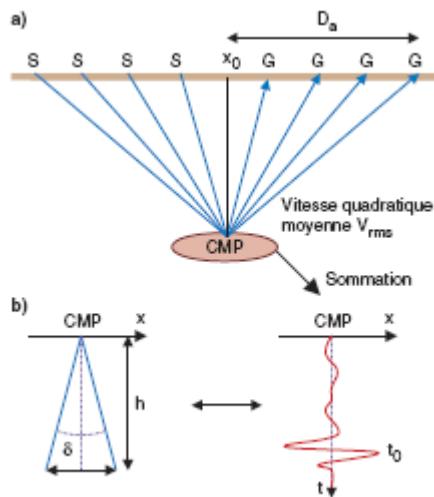


Figure 39 - a. Regroupement en collection CMP, b. Sondage vertical équivalent.

La présence d'une cavité dans le sous-sol peut, sous certaines conditions physiques, constituer un obstacle à la propagation des ondes et entraîner des modifications de certains paramètres (temps de trajet, amplitudes et formes des signaux, vitesses de propagation des ondes, etc.) qui serviront de révélateurs de sa présence.

Différents phénomènes peuvent révéler la présence d'une cavité :

- une perturbation et une atténuation de l'amplitude des ondes enregistrées sur les géophones situées au-dessus de la cavité (Figure 40 et Figure 41) ;
- une réflexion sur le toit de la cavité : elle se produit lorsque les dimensions du vide sont suffisamment grandes pour perturber la propagation de l'onde dans les terrains.

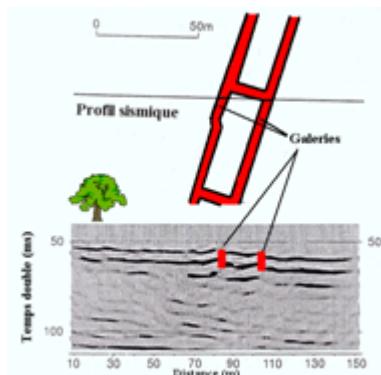


Figure 40 - Exemple réel de profil sismique réflexion réalisé au-dessus de galeries de carrières de gypse.

En haut, plan de situation du profil. En bas, l'image sismique obtenue mettant en évidence une désorganisation des réflecteurs sismiques à l'aplomb des galeries.

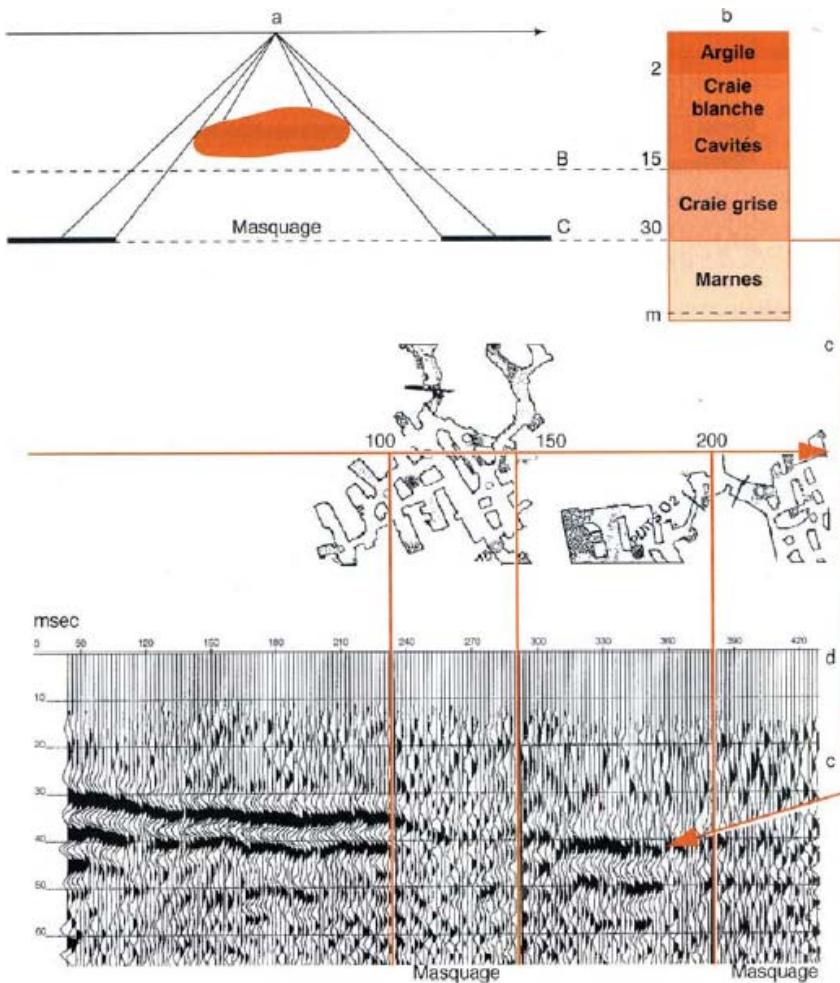


Figure 41 - a. Représentation qualitative de l'effet de masquage ; b. Coupe géologique du terrain ausculté ; c. Plan de carrières souterraines (inspection des carrières souterraines de Douai) ; d. Sismogramme réalisé au-dessous des carrières.

Modélisation

La modélisation de la propagation d'ondes sismiques est un outil utile à la compréhension et à l'interprétation des phénomènes d'interaction dans le sous-sol. Une modélisation, quand des études préalables informent sur la profondeur et la taille supposées de l'ouvrage ou des travaux recherchés, peut optimiser les paramètres de mesures et fortement affiner l'interprétation des sismogrammes.

Les principales méthodes utilisées sont :

- la modélisation par éléments finis ;
- la modélisation par éléments aux frontières ;
- la modélisation par différences finies.

6.3.3. Précaution et limites

La sismique réflexion haute résolution est une méthode à rendement faible (quelques centaines de mètres par jour), délicate à mettre en œuvre et à exploiter. Elle nécessite une source haute fréquence puissante (souvent destructive) et l'implantation de géophones plantés dans le sol. Un ensemble de mesures administratives, juridiques et matérielles doit être pris en charge pour pourvoir utiliser les sources à l'explosif. Cette méthode étant sensible aux bruits industriels et urbains, elle est déconseillée en milieu urbain. Une attention particulière doit être portée à la connaissance du bruit sismique.

6.3.4. Exemples

Deux tests de détection des exploitations minières par sismique réflexion haute résolution (SHR) ont été réalisés sur les carrières de gypse d'Annet-sur-Marne et en Lorraine par les services du BRGM.

Sur le premier site (Grandjean *et al.*, 1999), les zones exploitées situées dans les cinquante premiers mètres de profondeur, se manifestent par une perte de cohérence des réflexions (Figure 42). Cette interprétation a pu être contrôlée par la réalisation d'une section synthétique calculée à partir d'un modèle de vitesse simulant les différents niveaux marneux et les masses de gypse ainsi que des cavités de même géométrie que les exploitations connues (Figure 43).

En Lorraine (Baltassat *et al.*, 1999), des tests de sismique réflexion haute résolution ont été réalisés sur deux sites d'anciennes exploitations de mines de fer, Tiercelet et Moulaine (57). Ces exploitations sont situées entre 60 et 90 m de profondeur sous la surface du sol. Elles sont exploitées généralement sur un niveau de 5 m de puissance en moyenne, parfois sur deux. Bien qu'une très bonne résolution soit obtenue à des profondeurs de l'ordre de grandeur de celle des exploitations, les corrélations entre les sections sismiques et les emprises connues des cavités sont peu convaincantes.

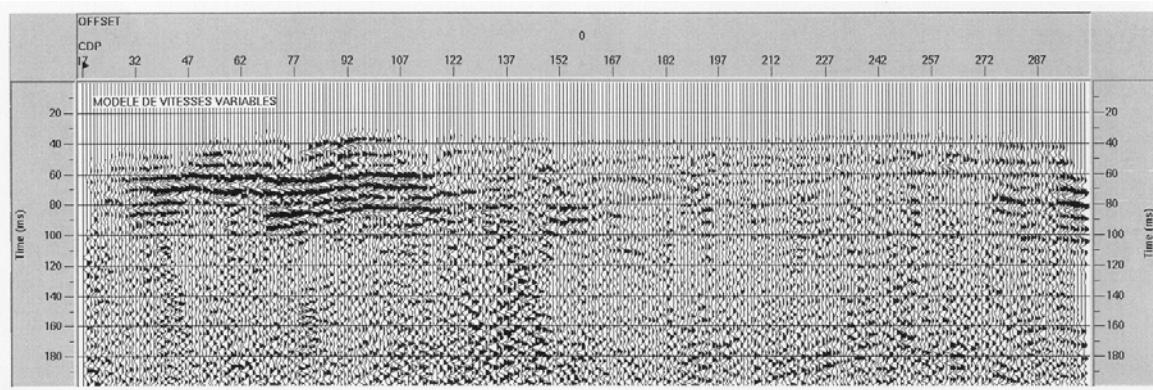


Figure 42 - Sismique SHR : stack final montrant l'interruption des réflecteurs à l'aplomb des travaux miniers (d'après Grandjean *et al.*, 1999).

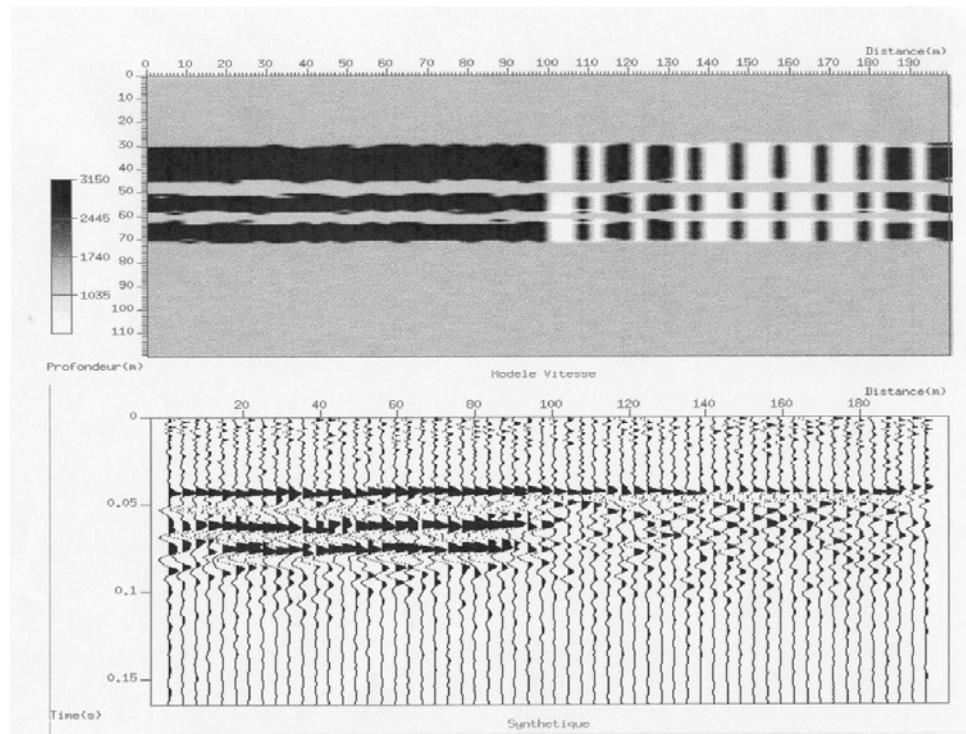


Figure 43 - Sismique SHR : modèle de vitesse et section synthétique (d'après Grandjean et al., 1999).

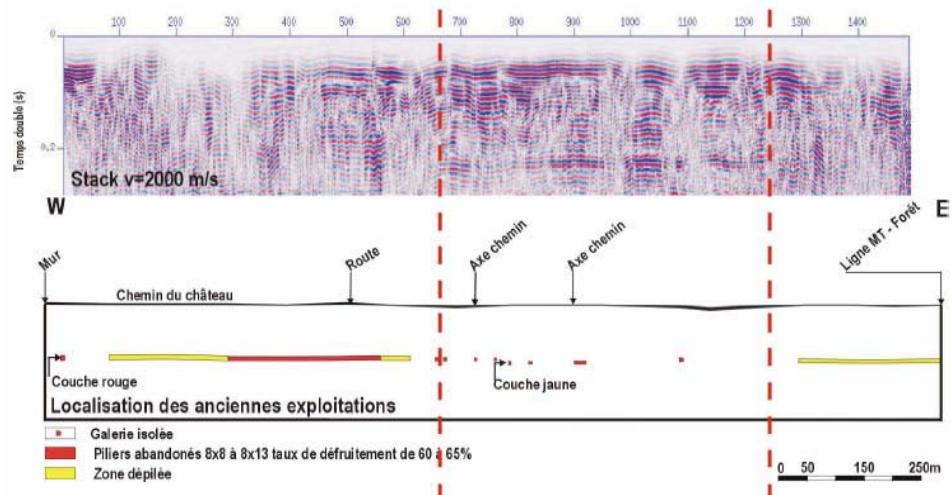


Figure 44 - Le nouveau stack met en évidence une réflexion profonde vers 0,22 s qui est masquée par la zone exploitée (d'après Baltassat et Bitri, 2002).

Des variations importantes des caractéristiques sismiques des niveaux d'altération, qui peuvent affecter notamment l'efficacité du traitement sismique, sont mises en évidence. Afin d'améliorer la qualité des sections, des traitements complémentaires ont donc été ultérieurement réalisés (Baltassat et Bitri, 2002). Un nouveau stack des données, avec une vitesse de sommation supérieure aux vitesses retenues

précédemment, montre un réflecteur profond qui n'apparaît que dans la zone non exploitée (Figure 44). Il est donc possible de localiser cette dernière par l'effet de masquage qu'elle induit sur des réflecteurs plus profonds.

6.3.5. Conclusion

La sismique réflexion haute résolution est une méthode bien indiquée lorsqu'il s'agit de localiser des cavités exploitées en banc, pour des profondeurs allant jusqu'à une cinquantaine de mètres. Cette méthode concerne principalement les ODJ reliés à des zones de travaux tabulaires suffisamment importantes pour pouvoir être détectées. Le principal indice de détection est le masquage des horizons réflecteurs dans les sismogrammes.

C'est une méthode dont la mise en œuvre est délicate dans le choix et l'utilisation de la source, dans l'implantation des géophones et dans la conduite et le traitement des données. Elle est sensible au bruit (activités humaines surtout). Elle est déconseillée en milieu urbain. Les mesures, leur traitement et interprétation doivent être conduits par un géophysicien très expérimenté.

6.4. SISMIQUE RÉFRACTION

6.4.1. Principe

Définition

La sismique réfraction est l'étude de la propagation des ondes sismiques réfractées dans le sol. Dans un milieu multicouche où le contraste des vitesses croît avec la profondeur ($V_1 > V_2$), il existe un angle critique θ_c au-delà duquel les ondes sont réfractés : leur trajet suit l'interface entre les couches et les ondes sont partiellement émises vers la surface suivant le même angle critique (Figure 45).

Cette méthode s'applique dans les milieux tabulaires, où le contraste des vitesses croît en fonction de la profondeur. Elle est particulièrement utilisée pour :

- la caractérisation de l'état physique des diverses zones du massif rocheux ;
- à la localisation d'interface (zone saturée, substratum), **à la détection indirecte des vides** (anomalies de retard) ;

Cette méthode ne sera efficace, pour la détection de cavité, qu'à partir du moment où la géologie locale permettra aux ondes sismiques d'aller se réfracter sur un horizon sous la cavité recherchée.

Grandeur mesurées

Les grandeurs mesurées sont présentées sous forme de sismogrammes bruts (Figure 45b). Pour une position de la source sur le profil, ils représentent en coordonnées

verticales les amplitudes en fonction du temps de propagation (en s ou ms) et en coordonnées horizontales, la distance entre la source et les géophones.

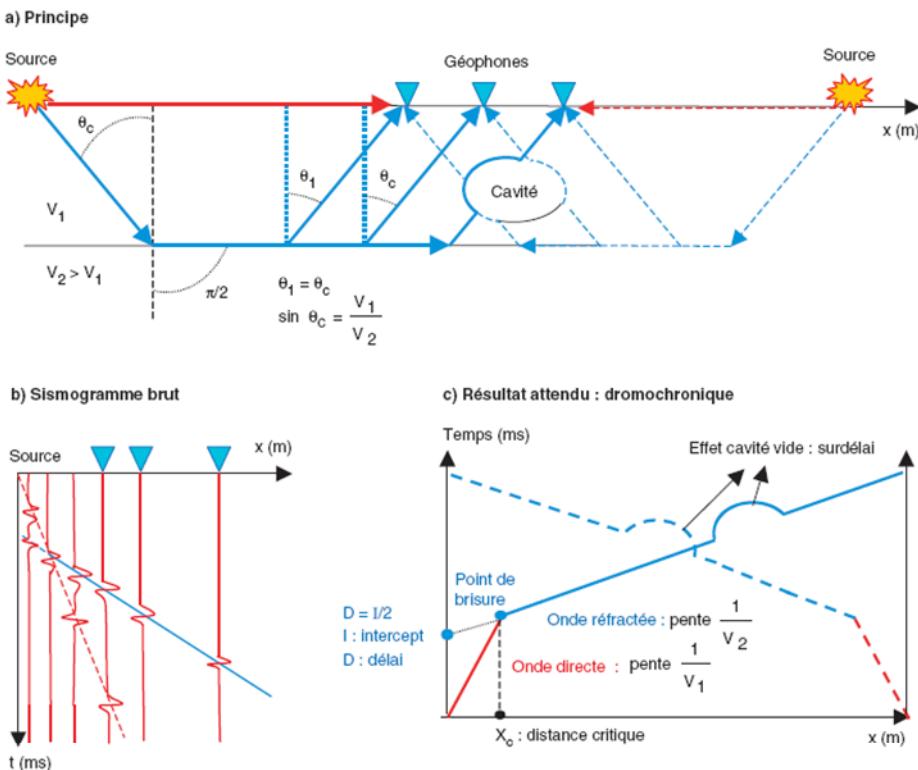


Figure 45 - a. Principe de la réfraction des ondes sismiques avec représentation des tirs en offset direct et inverse ; b. Représentation qualitative d'un sismogramme brut ; c. Dromochronique.

Résultats attendus : détection de cavités

Les résultats se présentent sous formes d'une dromochronique (Figure 45c) qui est la présentation du temps de trajets des ondes en fonction de la distance entre la source et les géophones. Les dromochroniques sont établies à partir du pointé des temps de trajets des premières arrivées sur le sismogramme brut. Les droites associées au pointé permettent de déterminer les vitesses des ondes sismiques dans le milieu tabulaire.

Le second résultat attendu est la représentation des horizons réfracteurs en fonction de la profondeur et de la position de la surface. Cette représentation est obtenue via la détermination des épaisseurs¹⁰ au droit des géophones.

¹⁰ Cette épaisseur peut être obtenue grâce à la formule du délai, issue des lois de Snell-Descartes, pour un milieu tabulaire.

La présence de cavité sera révélée par des retards dans les temps d'arrivées (surdélais) correspondants aux horizons réfracteurs.

Nota : le retard engendré par la présence de cavité doit être significatif devant l'erreur de mesure sur les temps de trajet, c'est-à-dire supérieure à 3 % du temps d'enregistrement total.

6.4.2. Méthodologie

Domaine d'application

L'hypothèse d'un profil de vitesse croissant entre couches en fonction de la profondeur doit être vérifiée sinon la méthode n'est pas applicable. Une modélisation préalable est utile pour une aide à l'interprétation des signaux mesurés.

Les profondeurs visées sont de l'ordre de 30 mètres. Cette méthode est applicable en milieu rural. De plus, seules les cavités sur le trajet des ondes réfractées et dont la taille engendre des retards significatifs sur les dromochroniques pourront être détectées.

Déroulement d'une campagne de mesure

Comme pour le déroulement d'une campagne de mesure en sismique réflexion haute résolution, une attention particulière doit être portée au choix de l'enregistreur, de la source et des géophones, le choix du dispositif.

Si des études préalables ont permis de déterminer les premiers horizons réfracteurs, la longueur L du dispositif sera choisie telle que :

$$L \approx 2X_c$$

où X_c est la distance du point de brisure¹¹ (Figure 45 c.). Si l'on n'a aucun renseignement sur le sous-sol, la longueur du dispositif est fixée selon l'expérience des utilisateurs.

Modélisation

Les outils modélisation présentés pour la sismique réflexion haute résolution peuvent être utilisés pour la sismique réfraction.

6.4.3. Exemple de détection de cavités

L'étude présentée ci-dessous a été effectuée dans l'Ouest parisien. Il s'agissait de préciser l'extension d'une carrière exploitée dans les calcaires grossiers du Lutétien.

¹¹ En sismique réfraction, point du dromochronique à partir duquel l'onde réfractée arrive la première.

Le réseau de galerie est connu dans le secteur nord du site, et les conditions d'application de la sismique réfraction sont réunies. L'objectif final était de localiser l'extension de galeries non répertoriées vers le Sud.

Le profil ci-dessous orienté nord-sud et placé au droit des galeries connues au nord, met en évidence des retards dans les temps des premières arrivées au droit du réseau de galeries au nord, mais aussi une anomalie assez marquée située au sud. Sur le temps d'enregistrement de 200 ms, le retard associé à cette anomalie est supérieure à l'erreur commise sur le pointé. De plus, l'anomalie est visible sur plusieurs traces consécutives et sur deux horizons réfracteurs.

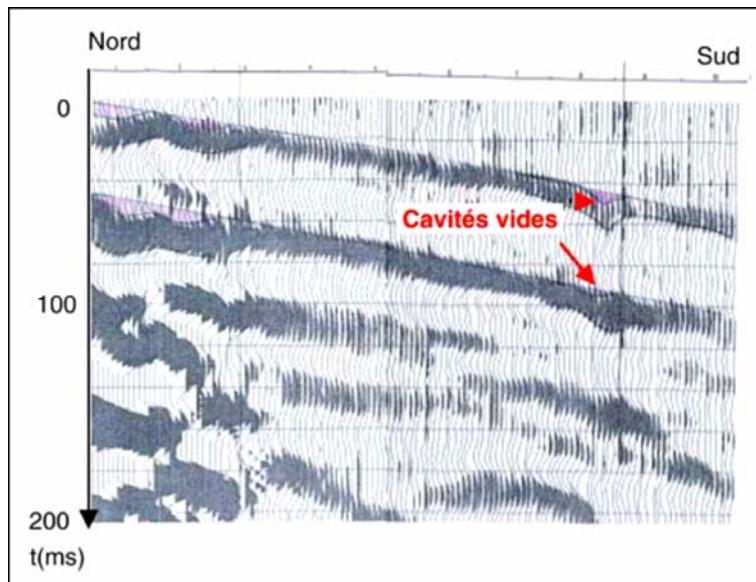


Figure 46 - Résultats du profil sismique réfraction – Source Documents Geostock.

6.4.4. Conclusion

La sismique réfraction s'applique, en milieu rural, pour les milieux tabulaires où les contrastes de vitesses entre les couches croît avec la profondeur. Le dispositif doit être grand angle pour pouvoir observer les différentes ondes réfractées. Cette méthode permet une détection indirecte d'ODJ, en permettant la détection de niveaux exploités suffisamment importants pour être détectable.

La sismique réfraction présente l'avantage d'une mise en œuvre simple et rapide (quelques tirs suffisent à couvrir des grands profils), ainsi que d'un traitement plus simple qu'en sismique réflexion haute résolution mais qui doit être effectué par un géophysicien expérimenté.

6.5. SISMIQUE EN ONDES DE SURFACES (SASW)

6.5.1. Principe

La sismique en ondes de surfaces (SASW) est l'étude de la propagation des ondes de surface. Les ondes sismiques de surface, telles que les ondes de Rayleigh, se propagent parallèlement à la surface du sol, dans sa partie superficielle. Ce sont des ondes hétérogènes qui se propagent horizontalement et s'atténuent en profondeur. Chaque composante fréquentielle de l'onde se propage dans une épaisseur de terrain différente, les plus hautes fréquences se trouvant dans les parties les plus superficielles.

Dans les milieux stratifiés où chaque couche de terrain est caractérisé par des propriétés mécaniques différentes, l'onde de surface se disperse ; la vitesse de propagation varie avec la profondeur, et donc avec la fréquence. C'est cette propriété qui est exploitée. L'analyse de cette dispersion permet de caractériser certaines propriétés du sous-sol (Figure 47).

En présence d'une cavité l'onde est principalement atténuée, si la cavité est maçonnée, l'effet diffractant est prépondérant.

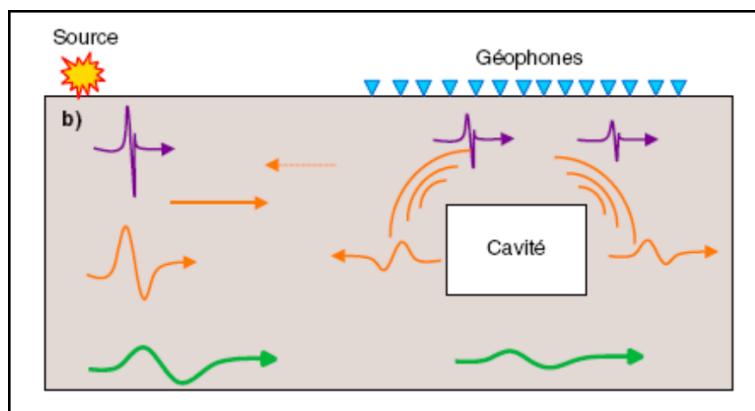


Figure 47 - Principe de l'interaction des ondes de surfaces avec une cavité.

Les petites longueurs, en violet, ne sont pas affectées par la cavité ; en orange, celles de l'ordre de la dimension de la cavité sont perturbées, et en vert les grandes longueurs d'ondes ne sont pas perturbées.

Grandeurs mesurées

Les grandeurs mesurées sont présentées sous forme de sismogrammes bruts. Pour une position de la source sur le profil, ils représentent :

- en coordonnées verticales, les amplitudes en fonction du temps de propagation des ondes ;
- et en coordonnées horizontales, la distance entre la source et les géophones.

Résultats attendus : détection de cavités

Les résultats attendus sont des sismogrammes traités, les coupes temps et des diagrammes de dispersion de la vitesse de phase des ondes de surface.

La coupe temps représente les amplitudes des ondes en fonction du temps de parcours et de la position d'un dispositif de mesure où chaque capteur est associé à une source.

Les diagrammes de dispersion représentent la variation de la vitesse de phase en fonction de la fréquence.

La présence d'une cavité interfère (atténuation ou diffraction) avec le train d'onde : elle agit comme un filtre. Cette interférence est visible sur les diagrammes de dispersion (Figure 48).

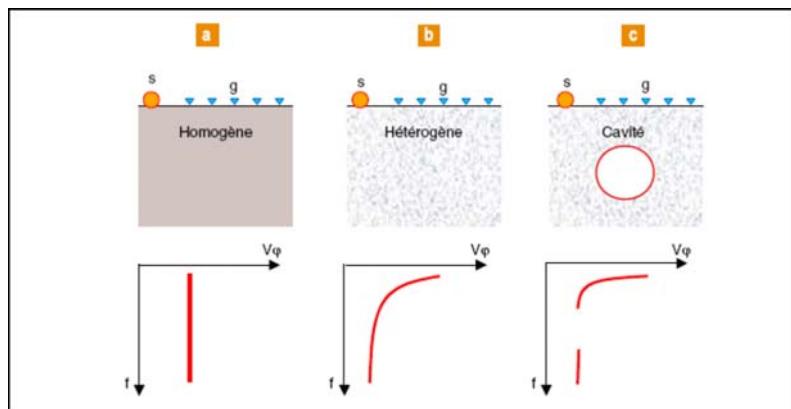


Figure 48 - Représentation qualitative du principe de détection de cavités par analyse du diagramme de dispersion des ondes de surface.

6.5.2. Méthodologie

Domaine d'application

La sismique en ondes de surfaces s'applique, généralement à **la détection des cavités** (principalement maçonnées) et à la caractérisation géomécanique du sous-sol. Cette méthode, assez récente et encore en développement, s'applique en milieu urbain comme en milieu rural et permet des profondeurs d'investigation de l'ordre de 10 à 20 mètres.

Déroulement d'une campagne de mesure

Pour cette méthode, quelques variations interviennent par rapport aux précédentes méthodes sismiques concernant le choix du matériel : les géophones n'ont pas à être

implantés de manière destructive dans le sol, l'emploi d'une source de cisaillement pure n'est pas nécessaire.

Traitement des données

Le traitement des données rassemble toutes les étapes permettant d'estimer les variations de V_s^{12} le long du profil et en profondeur. Il est constitué des étapes suivantes :

- acquisition d'un tir sismique, la source et la série de capteur étant alignées sur une partie du profil ;
- calcul des diagrammes de dispersion (sommation des traces dans le domaine (ω, p) ω étant la pulsation et p le paramètre du rai sismique) ;
- digitalisation du diagramme pour obtenir la courbe de dispersion (variation de la vitesse de phase en fonction de la fréquence) ;
- inversion de la courbe de dispersion, afin d'obtenir un modèle de vitesse de cisaillement $V_s(z)$ et le facteur de qualité des sols. Pour cette étape, un modèle initial est estimé empiriquement, puis un algorithme de type moindre carré amorti assure la convergence vers la meilleure solution constituant le modèle final.

Parallèlement à l'inversion de la vitesse de phase, il est possible de traiter les données dans le but d'obtenir un profil en ondes de surface. Un tel profil permet d'imager les zones de propriétés mécaniques « faibles » telles que les zones décompactées par des travaux de déblais/remblais ou la formation de fontis.

De la même façon qu'en sismique réflexion :

- les mesures sont réalisées en couverture multiple, afin d'optimiser le rapport signal-sur-bruit : en déplaçant la source le long de la ligne de géophones, on acquiert une succession de tirs sismiques ;
- des corrections dynamiques sont appliquées sur chaque tir.

On tient cependant compte ici des phénomènes de dispersion en évaluant les vitesses de phase à partir des diagrammes de dispersion. La vitesse de phase, calculée en fonction de la fréquence, permet de corriger le déphasage dépendant de l'offset. Une fois tous les signaux ramenés à un offset nul, les traces sont sommées par récepteur commun dans le domaine temporel. On obtient alors un profil en onde de surface.

6.5.3. Exemples de détection de cavités

La SASW, basée sur l'étude de la dispersion des ondes de surfaces, a été expérimentée sur le site d'Annet-sur-Marne, à Moyeuvre, en Lorraine, et sur les mines de fer de Falaise, en Normandie, pour la détection des vides et la caractérisation du

¹² Vitesse de cisaillement

sous-sol au-dessus des cavités. À Annet-sur-Marne, elle a permis de mettre en évidence une anomalie superficielle pouvant signaler la présence d'une zone altérée et décompactée située dans les dix premiers mètres (Figure 49). L'utilisation du même jeu de données pour une exploitation simultanée en SHR et en SASW a ainsi fourni une double image des cavités en profondeur et des possibles désordres induits en surface.

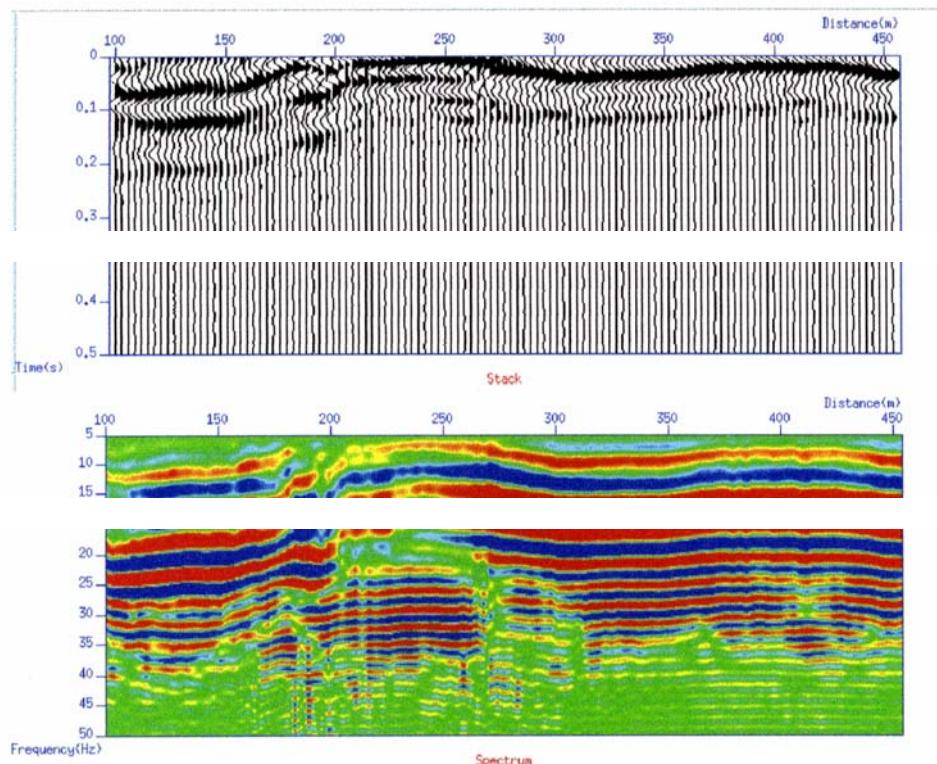


Figure 49 - Anomalie SASW détectée à Annet-sur-Marne : image du stack et de sa représentation en fréquence (d'après Grandjean et al., 1999).

Dans la commune de Moyeuvre-Grande (57), des essais géotechniques et un profil SASW ont été réalisés dans le but de caractériser le comportement géomécanique des sols à l'aplomb des travaux miniers (Bernardie, 2000 ; Bernardie et Grandjean, 2001). Les courbes de dispersion des ondes de surface observées sur trois tirs proches des trois forages géotechniques réalisés ont été inversées de façon à estimer les vitesses de cisaillement (V_s). Les résultats de cette inversion montrent notamment que la profondeur d'investigation des ondes de Rayleigh n'excède pas 5 à 7 m, bien qu'une couche de vitesse V_s plus importante à partir de 5 m de profondeur soit identifiée. Elle indique également pour tous les tirs l'existence d'une couche superficielle à faible vitesse. Les paramètres géomécaniques ont été corrélés aux profils de vitesse de cisaillement issus de l'imagerie SASW : la forte augmentation des valeurs de vitesses V_s , à partir d'environ 5 m de profondeur, est confirmée par les diagraphies de gamma ray, de gamma gamma et de conductivité et par les vitesses d'avancement. La principale conclusion de cette analyse est que la présence d'une galerie sous-jacente n'a pas affecté le terrain situé au-dessus.

À Falaise, la SASW a été expérimentée sur une galerie de mine non maçonnée de 2,5 par 2,5 m de section située à 5 m de profondeur. La SASW y montre une zone d'amplitude atténuée (Figure 50) située à l'emplacement de la cavité. Cette dernière inhibe le signal et le spectre montre que toutes les fréquences sont absorbées par la cavité. Des désordres, tels que des zones décomprimées en surface, peuvent également contribuer à cette signature.

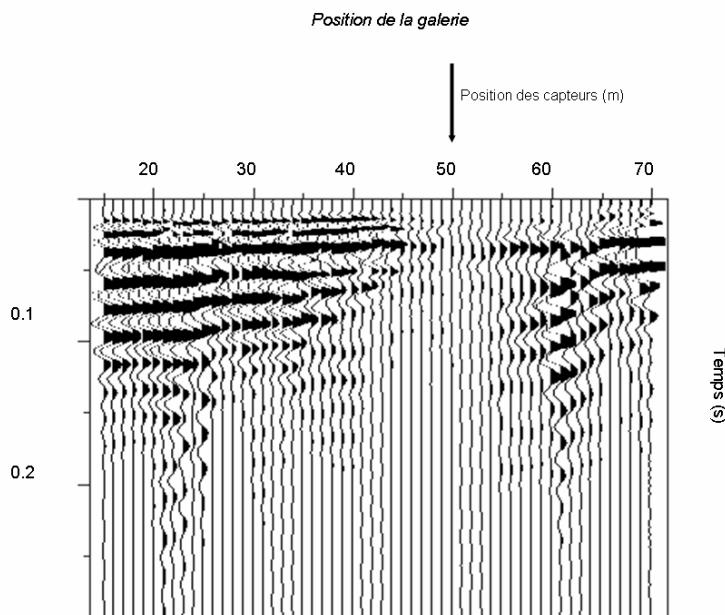


Figure 50 - Imagerie SASW à Falaise à l'aplomb d'une galerie non maçonnée.

6.5.4. Conclusion

La **sismique SASW**, plus facile à mettre en œuvre (sources non destructives et géophones posés au sol) et moins sensible au bruit, peut être utilisée en **milieu urbain**. Son **rendement est important**. Sa profondeur d'investigation ne dépasse cependant pas la **dizaine de mètres**. La résolution est fonction du dispositif.

Des résultats préliminaires encourageants ont été récemment obtenus avec cette méthode (Figure 51). S'ils s'avéraient concluants dans le futur, cette technique pourrait constituer une approche originale et de **mise en œuvre relativement aisée**.

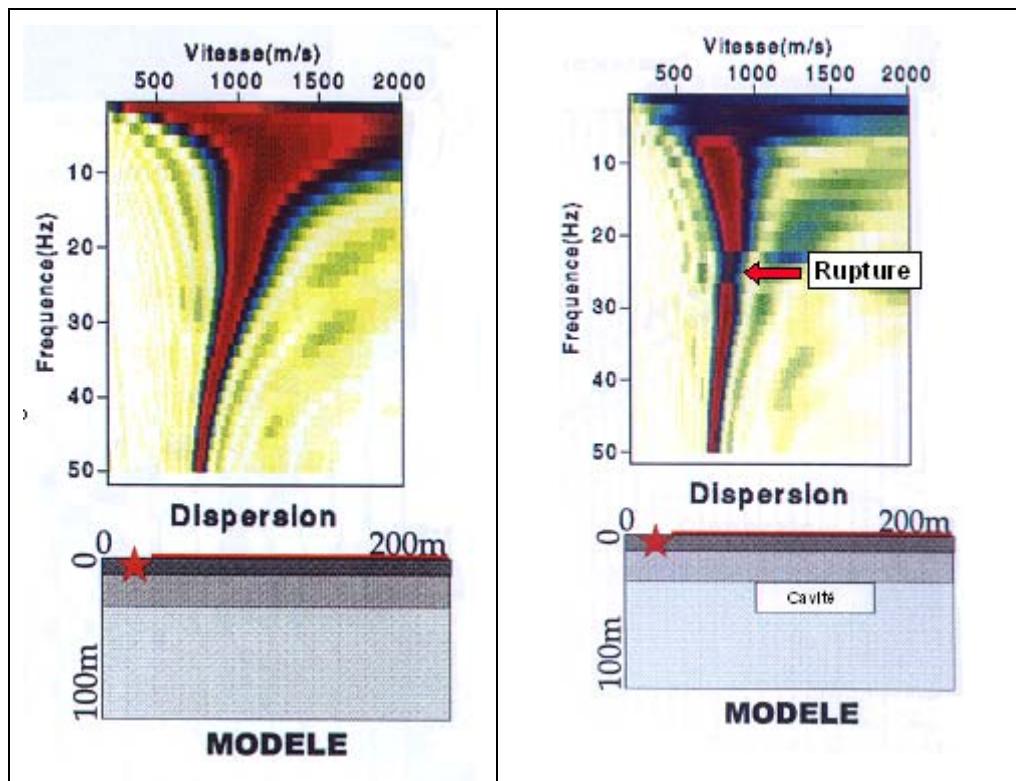


Figure 51 - Exemple de diagramme présentant : à gauche une réponse théorique en absence de cavité dans le sous-sol ; à droite, la présence d'une cavité se manifeste par une rupture dans le diagramme pour certaines fréquences.

6.6. CONCLUSION GÉNÉRALE

De manière générale, la résolution des méthodes sismiques est limitée en fonction de l'espacement des points de tir et géophones : les couches trop minces ou **les vides trop petits ne sont pas détectés**. Les interprétations ne sont pas uniques et nécessitent des forages tant pour le calage des interprétations que pour le contrôle des anomalies. Cette méthode semble plus indiquée pour déterminer la localisation d'un orifice associé à des travaux miniers importants que pour déterminer la localisation d'un orifice isolé.

L'application de ces méthodes à la détection des cavités, qu'elles soient de sismique réflexion haute résolution, ou fondées sur l'analyse des ondes de surface reste encore limitée à des études ayant un caractère de recherche. Elles nécessitent la mise en place de programmes de R&D complémentaires pour mieux déterminer leurs capacités et limites.

Leur emploi reste **très délicat en milieu urbanisé**, en particulier à cause des sources explosives. On peut noter toutefois, que depuis une dizaine d'années, l'apparition sur le marché de nouvelles sources vibrantes permet d'élargir des champs d'application de cette technique dans de tels environnements.

7. Les méthodes électriques

7.1. GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉTHODES ÉLECTRIQUES

Le dénominateur commun aux méthodes électriques présentées dans ce chapitre est qu'on mesure un potentiel électrique. Par ailleurs, les mêmes propriétés seront utiles en prospection électromagnétique (EM). C'est la façon dont les courants électriques sont générés qui fait la différence fondamentale entre les méthodes électriques.

La méthode de prospection dite 'polarisation spontanée' est basée sur la mesure de la génération de potentiels électriques dans les sols sans influence humaine, alors que les méthodes électriques en courant continu sont basées sur une injection de courant.

7.2. LA POLARISATION SPONTANÉE (PS)

7.2.1. Principe

Le terme de « polarisation spontanée » concerne deux choses. Tout d'abord on parle un phénomène physique : la génération de potentiels électriques dans le sol sans influence humaine. Puis, on désigne la méthode de prospection basée sur la mesure du phénomène.

Le phénomène de polarisation spontanée est causé par l'activité électrochimique ou mécanique dû soit à l'altération des sulfures, la variation de la composition des roches aux contacts géologiques, l'activité bioélectrique du matériel organique, la corrosion et/ou les gradients thermiques et pression dans les fluides souterrains.

La méthode de polarisation spontanée (PS) mesure la différence de potentiel (ou champ électrique) apparaissant spontanément entre deux points, lorsqu'un fluide électrolytique circule dans les pores d'une roche sous l'effet d'une différence de pression hydrostatique, aussi sous le terme de phénomènes d'électrofiltration.

Ces phénomènes d'électrofiltration peuvent être « *per descendum* » (infiltration de l'eau) et provoquer des anomalies PS négatives ou « *per ascensum* » (évaporation de l'eau) et provoquer des anomalies PS positives.

Les résultats sont présentés là sous forme de profils (Figure 52) ou d'une carte de ligne isopotentielles.

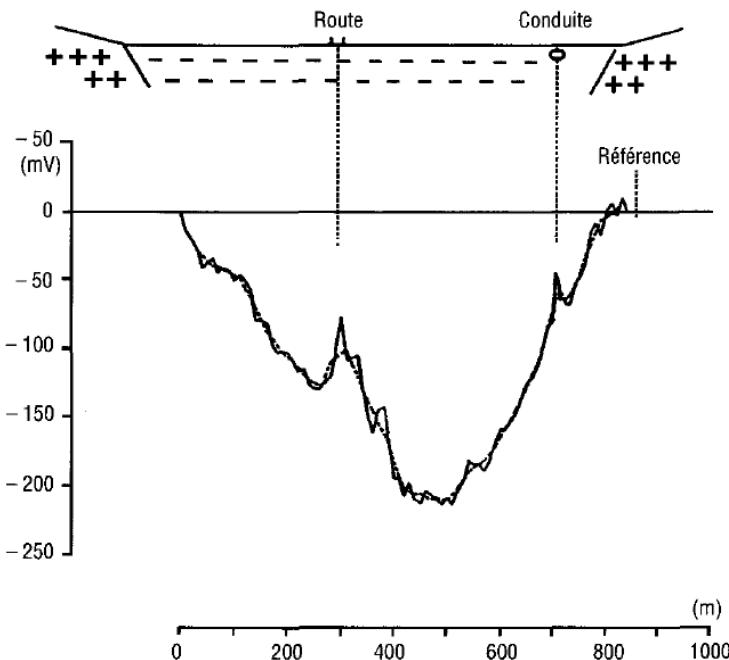


Figure 52 - Profils présentant des signaux PS d'origine anthropique superposés au signal naturel créé par le remplissage d'une paléo-vallée.

[Source : La méthode de polarisation spontanée en hydrogéologie des terrains volcaniques, M. Aubert - Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 16, n° 2, 2003, p. 219-235.]

7.2.2. Méthodologie

Domaine d'application

La polarisation spontanée peut être utilisée pour détecter des circulations d'eau dans des milieux poreux.

Ce phénomène dit d'électro-filtration pourra être exploité pour détecter des zones de drainages préférentiels vers des puits de mine ou des cavités. Ainsi, la méthode a été appliquée à des cavités karstiques au-dessus desquelles des anomalies PS importantes ont été détectées (Lange, 1999).

Déroulement d'une campagne de mesure

Théoriquement, on peut faire des mesures de P.S. avec un équipement aussi simple qu'un voltmètre et deux électrodes. Cependant, afin de s'assurer d'une bonne qualité des données, il faut compter sur un matériel approprié. Le choix des électrodes s'avère de première importance. En effet, la performance des électrodes dépend de leur polarisation et de leur dérive. La polarisation est le potentiel mesuré entre une paire d'électrode en l'absence d'une source externe, c'est un effet dû uniquement à l'équipement qui vient donc perturber la mesure. La dérive est la variation dans le

temps de la polarisation. Classiquement des électrodes de type impolarisables sont utilisées.

On distingue deux façons principales de prendre des mesures : la configuration du gradient et la configuration à base fixe. Pour la configuration du gradient, la paire d'électrodes se déplace simultanément, d'un point de mesure à l'autre. On fait en général des mesures le long d'une ligne pour ainsi obtenir un profil. Plusieurs profils parallèles les uns aux autres permettront de couvrir une surface donnée. Cette méthode présente l'avantage d'être rapide. Les désavantages sont qu'il faut additionner toutes les valeurs pour obtenir ΔV , les erreurs de zéro s'additionnent et il faut veiller à garder toujours la même polarité des électrodes.

La configuration à base fixe consiste à ne déplacer qu'une électrode tout en gardant l'autre fixe. L'électrode mobile est déplacée de façon à couvrir la surface d'investigation. Les avantages sont que la lecture est directe puisque les mesures sont faites avec une même référence, et les erreurs de zéro entre les deux électrodes ne s'accumulent pas. Le désavantage principal est qu'on doit manipuler des fils pouvant être très longs. Actuellement, les systèmes d'acquisition modernes permettent de relier un réseau d'électrodes à l'instrument et d'effectuer rapidement nos mesures.

Le pas de mesure est fonction de la largeur des anomalies à détecter et du bruit de fond local dû à l'hétérogénéité du terrain superficiel. L'allongement du pas de mesure n'augmente pas sensiblement la vitesse d'avancement qui est de l'ordre du km/h pour un pas de dix mètres avec une équipe de deux opérateurs.

Les signaux seront généralement plus nets en période sèche. En période humide, des circulations d'eaux superficielles pourront perturber les effets induits par les vides cherchés. La topographie, cause d'écoulements suivant la pente des terrains, la fracturation selon laquelle les eaux s'infiltreront également préférentiellement ou des phénomènes d'évapotranspiration pourront également perturber les anomalies.

Interprétation des mesures

L'interprétation est surtout qualitative. L'anomalie est située directement au-dessus du corps générant (Figure 53), mais peut être déplacée par un effet topographique (Figure 54). On peut avoir idée du pendage avec le gradient des courbes de contours. La forme du corps anomal est indiquée par la forme des contours.

Par ailleurs, il existe une certaine quantité de courbes types pour des corps de géométries simples (Corwin, 1990). Ces courbes représentent simplement ce qu'on mesurerait en surface, au-dessus des corps en question. Ces corps simples sont : la source ponctuelle, la ligne horizontale, la sphère, le cylindre, la « feuille » verticale. On se sert de ces courbes types pour les comparer à nos mesures et ainsi déterminer approximativement la forme et la profondeur du corps générateur de notre anomalie.

L'interprétation quantitative est difficile à réaliser, même si certains modèles mathématiques dans Corwin (1990) peuvent être utilisés.

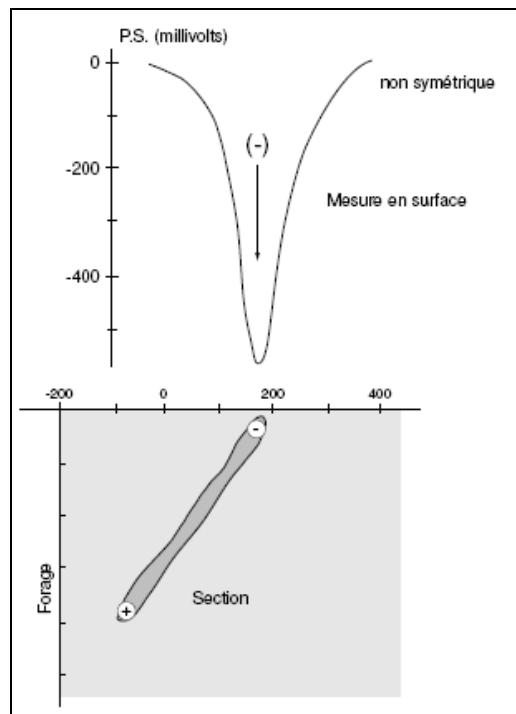


Figure 53 - Exemple type d'anomalie P.S. en surface.

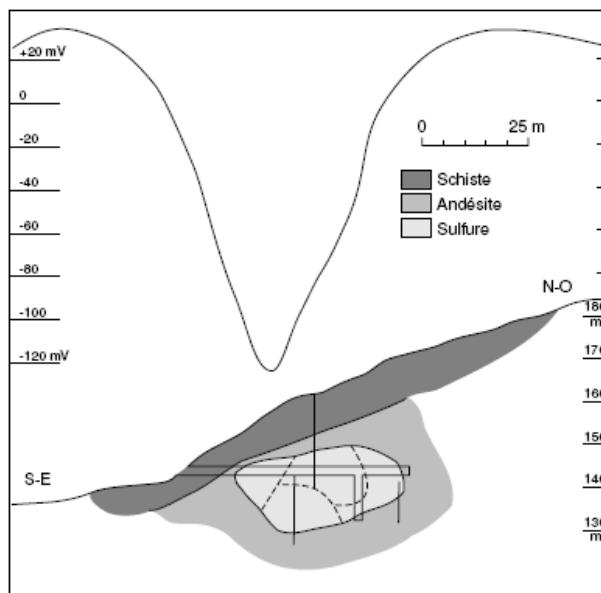


Figure 54 - Anomalie P.S. déplacée par un effet topographique.

7.2.3. Limites

La méthode de polarisation spontanée est limitée par l'existence même du phénomène de P.S. Sans réaction de P.S., on ne détecte rien.

L'investigation est limitée en profondeur à moins de 60 mètres.

La méthode PS ne signale que les variations d'épaisseur de la base du terrain non saturé. Elle est donc inopérante dans les cas suivants :

- la présence d'une nappe plane sur socle plan ou nappe perchée plane masquant une nappe plus profonde ;
- l'existence d'un terrain superficiel plus conducteur que le terrain sous-jacent.

7.2.4. Exemple d'application

La méthode PS, en association avec d'autres méthodes, a été expérimentée par le BRGM pour la détection de puits de mine.

Dans le bassin houiller de Saint-Laurs, les anomalies PS se sont avérées très perturbées, en particulier par la présence de relief, et la méthode n'a pas permis de détecter de puits d'accès (Miehé, 1991).

Dans la concession de Fiennes, la PS a été utilisée en association avec la microgravimétrie et le géoradar. La PS a été utilisée pour deux des trois sites étudiés dans cette concession. Pour le premier site, le puits Segard, une anomalie PS négative a été mise en évidence, elle est cohérente avec les anomalies microgravimétriques et géoradar observées. Pour le second site, le puits de la Hurie la PS n'a pas montré de réponses significatives susceptibles de signaler la présence de puits.

Les circulations d'eau en surface ont pu annihiler les phénomènes d'électrofiltration et il aurait été préférable de réaliser les mesures en période sèche (BRGM, 1998).

À Bouchain, le site étudié par microgravimétrie et polarisation spontanée a permis de mettre en évidence :

- une anomalie gravimétrique légère susceptible de correspondre à l'emplacement d'un ancien puits de mine ;
- une anomalie de polarisation spontanée, cernant l'anomalie gravimétrique, sans doute due à la présence de charbon dans les remblais du sol.

La présence d'un puits sous l'emplacement de l'anomalie microgravimétrique est probable (Dupont *et al.*, 1999).

7.2.5. Conclusion

La polarisation spontanée est une méthode à utiliser en association avec d'autres méthodes (microgravimétrie, panneau électrique...), elle permet de renforcer les données issues d'autres méthodes. Elle est rapide et économique mais son interprétation est difficile face au caractère erratique des anomalies comme l'a démontré les exemples d'application précédents.

7.3. LES MÉTHODES EN COURANT CONTINU

7.3.1. Principe des méthodes en courant continu

Les méthodes électriques comportent une injection de courant continu et une mesure de la différence de potentiel ainsi créée. On parle de méthodes électriques en courant continu. On les distingue des méthodes dites électromagnétiques car elles utilisent des courants alternatifs, naturels ou injectés et mesurent la combinaison des champs électriques et magnétiques.

Les méthodes électriques en courant continu ont pour objet de déterminer les propriétés des sols par la mesure de leur résistivité ρ (exprimé en ohm. Mètre). La résistivité d'un matériau est l'inverse de la conductivité σ (exprimé en siemens par mètre). Un matériau conduit d'autant mieux le courant électrique que sa résistivité est faible (ou sa conductivité élevée).

Les méthodes électriques en courant continu s'applique, généralement :

- à la caractérisation des fractures, à l'imagerie de la structure du sous-sol et de la proche surface ;
- à la détection de cavités, de corps gelés, de vertiges archéologiques ;
- à l'imagerie des intrusions ou des migrations d'eau salée dans le sol ;
- à la délimitation des décharges et la détection des migrations de polluants dans le sol.

Ces méthodes s'utilisent en milieu rural ou urbain non perturbé, les profondeurs d'investigation varient en fonction du dispositif et de la résistivité des terrains.

Principe de mesure des méthodes électriques en courant continu

Le principe de mesure est le suivant : on injecte un courant I entre deux électrodes (ou pôles) A et B et on mesure la tension V entre deux électrodes M et N (Figure 55). La résistivité apparente du sol¹³, est définie comme celle d'un sol homogène où l'on mesurerait la même tension pour un même courant.

Dans les cas de recherche de cavités, on s'appuie donc sur un fort contraste de la résistivité entre l'encaissant géologique et la cavité elle-même puisque lorsque cette dernière est vide, elle est caractérisée par une résistivité très importante (en théorie la résistivité de l'air est infinie) par rapport aux résistivités des terrains environnants.

¹³ $\rho_a = k \frac{V_M - V_N}{I}$ où k le facteur géométrique est défini par : $k = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right]^{-1}$

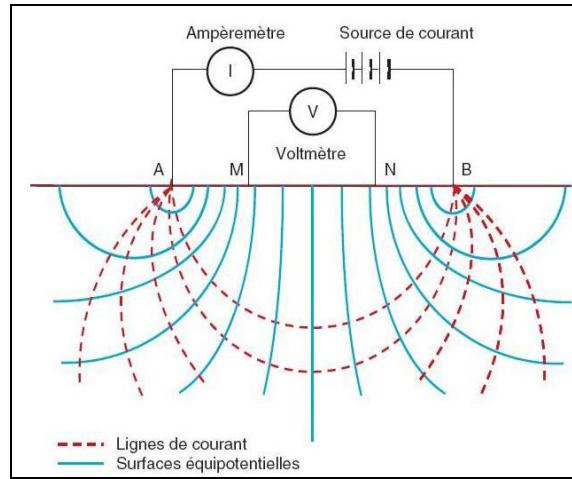


Figure 55 - Principe des méthodes électriques en courant continu.
(source Guide technique du LCPC – Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques).

Le but des méthodes électriques est d'établir une coupe (bidimensionnelle) ou un log (monodimensionnel) de répartition des résistivités apparentes du sol, en faisant varier la dimension du dispositif. Ce résultat de mesure est ensuite interprété pour approcher la répartition réelle des résistivités vraies dans le sol.

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

Des simulations préliminaires sont indispensables pour s'assurer de la détectabilité des objets recherchés et adapter les dispositifs de mesure.

Il existe de nombreux dispositifs, tous quadripôles, mais les plus utilisés sont les dispositifs suivants : Wenner (Figure 56 a), Schlumberger (Figure 56 b) et dipôle-dipôle (Figure 56 c).

a. Principe du dispositif Wenner.		où $k = 2\pi a$
b. Principe du dispositif Schlumberger		où $k = \pi n(n+1)a$
C. Principe du dispositif dipôle-dipôle		où $k = \pi n(n+1)(n+2)a$

Figure 56 - Dispositifs et facteurs géométriques associés.

On note que le dispositif Wenner est recommandé pour les recherches de structures horizontales (niveaux exploités), le dispositif Schlumberger pour les recherches de structures horizontales et verticales (niveaux exploités avec puits, cheminées d'aérage ou entrée de galerie) et le dispositif dipôle-dipôle la recherche de structures verticales (puits, cheminée).

Il existe trois types de méthodes électriques en courant continu depuis la surface :

- le sondage électrique : un point fixe en surface, les électrodes écartées ;
- la traînée électrique : le dispositif est déplacé le long d'un profil. Les distances entre les électrodes sont fixes ;
- le panneau électrique qui est la combinaison des deux méthodes précédentes.

Le sondage électrique

• **Principe**

Dans le dispositif du sondage électrique, le centre est fixe et les électrodes sont écartées pour mesurer la résistivité apparente en fonction de la longueur du dispositif. (Figure 57).

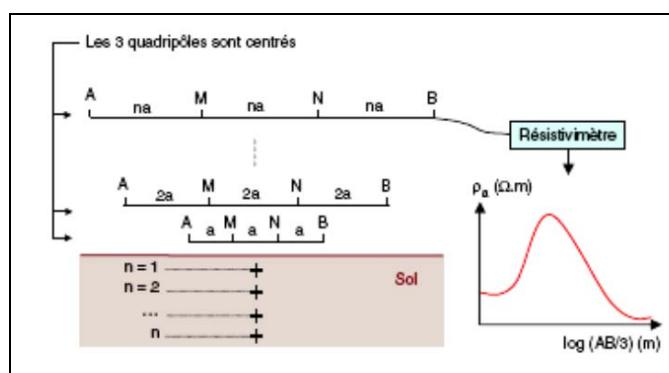


Figure 57 - Principe du sondage électrique en dispositif de Wenner.

• **Grandeur mesurée**

La grandeur mesurée est la résistivité apparente du sol, perpendiculaire à la surface de mesure au droit du centre du dispositif. Le sondage électrique renseigne sur les variations verticales de la résistivité du terrain. La profondeur d'investigation dépend de la longueur finale des mesures et de la résistivité du sous-sol.

• **Résultat attendu**

Le résultat attendu est une courbe représentant la résistivité apparente ($\Omega \cdot m$) en fonction de la distance entre les électrodes d'injection (Figure 57). Le log géoélectrique apparent est établi en faisant varier l'écartement des électrodes extrêmes, généralement A et B. Compte tenu de la diminution de la résolution avec la profondeur,

donc avec l'écartement des électrodes extrêmes, la variation de cet écartement est généralement selon une progression géométrique. Le log géoélectrique apparent, en fonction de la distance caractéristique, ainsi établi est interprété en log de résistivité « vraie » en fonction de la profondeur, positionné au point milieu de AB, d'où son nom de sondage électrique.

Les différentes couches de terrains sont supposées tabulaires et homogènes. Ces hypothèses ne sont pas toujours vérifiées, ce qui peut poser des problèmes d'interprétation plus ou moins graves en fonction du contexte et de l'échelle de la prospection. Outre ces problèmes liés à la géométrie et la régularité des couches, les modèles de coupe d'interprétation ne sont pas uniques, plusieurs modèles différents peuvent rendre compte d'un même ensemble de mesures ; ces modèles sont dits « équivalents » entre eux. Une prospection par sondage électrique doit donc impérativement être « calée » ou étalonnée sur un ou plusieurs sondages mécaniques, de manière à résoudre les équivalences. Le nombre de sondages d'étalonnage nécessaires dépend de la variabilité latérale des résistivités des terrains.

Le traîné électrique

• Principe

Le traîné électrique consiste en un déplacement du dispositif le long d'un profil tout en conservant les distances, entre les électrodes, fixes (Figure 58).

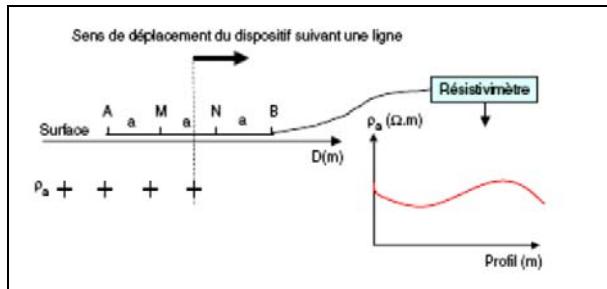


Figure 58 - Principe du traîné électrique, cas d'un dispositif Wenner.

• Grandeur mesurée

La grandeur mesurée est la résistivité apparente du sol pour une longueur de dispositif donnée. La profondeur d'investigation dépend de cette longueur mais aussi de la résistivité du sous-sol. Ce dispositif est particulièrement sensible aux variations latérales de résistivité. La réalisation de plusieurs profils permet d'obtenir des cartes de résistivité apparente.

• Résultat attendu

Le résultat attendu est une courbe représentant la résistivité apparente du terrain en fonction de la position du dispositif de mesure le long du profil.

Le panneau électrique

- **Principe**

Le panneau électrique est la combinaison des deux méthodes précédentes. Cette méthode est utilisée pour étudier les variations de résistivité le long d'un profil.

Cette méthode (figure 59) consiste à planter un grand nombre d'électrodes à intervalle constant le long d'un profil rectiligne. Toutes les électrodes sont reliées à un dispositif de mesure de potentiel et d'injection de courant. Les électrodes jouent le rôle d'électrode d'injection et de mesure du potentiel alternativement.

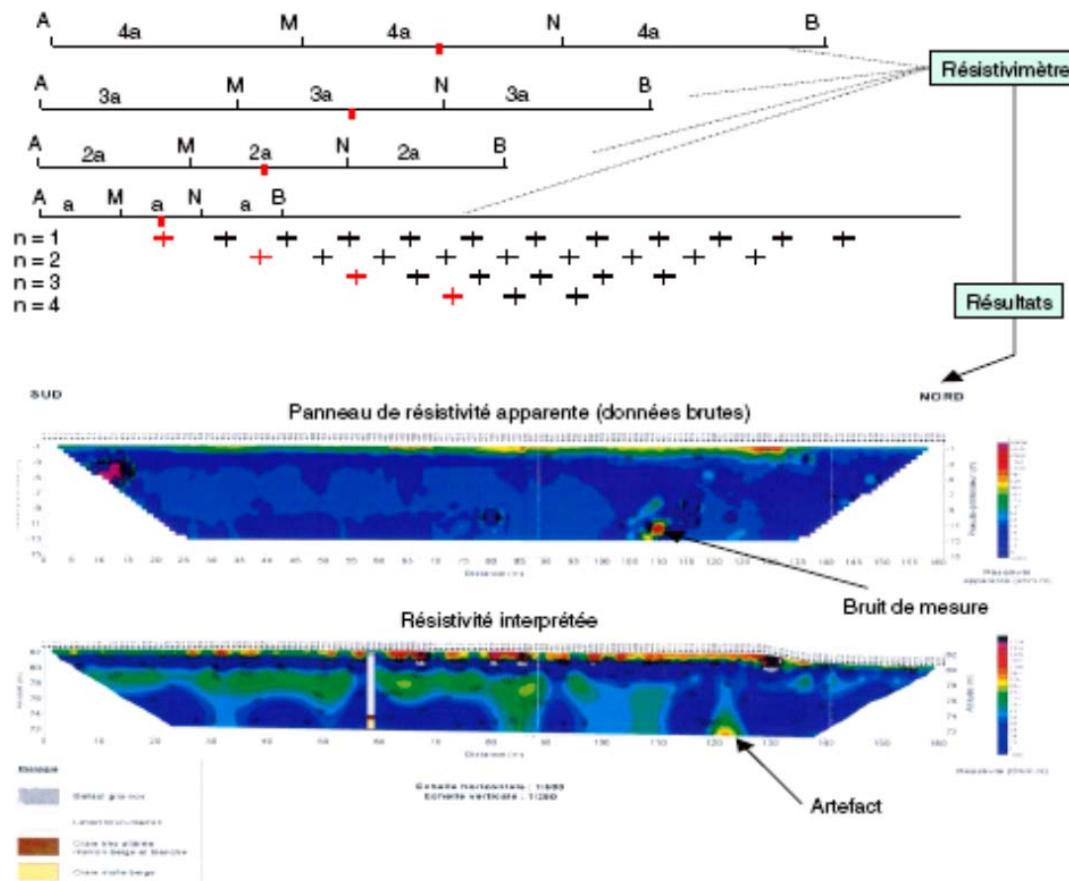


Figure 59 - Principe du panneau électrique et exemple de résultats (documents SNCF).

- **Résultats attendus**

Le premier résultat attendu est une carte de résistivité (Figure 59) représentant la résistivité apparente graduée par une gamme de couleur. Cette carte n'est pas une représentation d'une coupe de terrain.

Le second résultat attendu est une carte de résistivité inversée qui représente la variation de la résistivité interprétée en fonction de la position du dispositif et de la profondeur.

7.3.2. Méthodologie pour le panneau électrique

Domaine d'application

Cette méthode nécessite des contrastes de résistivité suffisants, un contraste de résistivité apparente de 10 % est considéré comme suffisant. Une modélisation permet d'évaluer les contrastes.

La méthode du panneau électrique est utilisée en milieu rural, et nécessite un sol permettant l'implantation des électrodes.

Déroulement d'une campagne de mesures

Une fois qu'il a été vérifié que la résistivité apparente mesurée varie bien avec la longueur de la ligne¹⁴, les longueurs du dispositif doivent être ajustées, de l'ordre de 6 à 8 fois la profondeur visée.

Une modélisation, réalisée en fonction des objectifs fixés, aide à établir les paramètres du dispositif de mesure.

La mise en place est simple et les mesures sont réalisées automatiquement par l'unité centrale qui gère l'alternance injection de courant-mesure des potentiels aux électrodes.

Interprétation des résultats

Les résultats bruts sont délicats à interpréter, la géométrie d'une anomalie est difficile à relier à la cause qui la crée. Si on est assuré que la résistivité du matériau ne souffre pas d'un effet 3D, c'est-à-dire que la résistivité ne varie pas perpendiculairement au panneau, les mesures peuvent être inversées afin d'obtenir une coupe verticale du terrain.

Dans notre contexte, le remplissage des orifices influe sur les résultats : les cavités ennoyées ou comblées par des matériaux plus conducteurs que l'encaissant induisent un contracte de résistivité plus facilement repérable sur les données brutes que dans le cas d'une cavité vide.

¹⁴ Cela est souvent réalisé via un sondage électrique.

7.3.3. Exemple d'application

- Cas de recherche de puits de la mine de charbon de Moly-Littry

????????

- Cas d'une cavité pleine de saumure

Dans cet exemple, l'imagerie électrique a été employée par le BRGM pour détecter une cavité pleine de saumure située dans la concession saline d'Art-sur-Meurthe, en Lorraine (Miehé, 2002 ; Miehé *et al.*, 2003).

Cette cavité, dont le toit est à 115 m de profondeur, est connue en profondeur et en géométrie par auscultation sonar. Une simulation préliminaire a montré que compte tenu du fort contraste de résistivité entre l'eau salée et les formations géologiques environnantes, une anomalie conductrice significative devrait pouvoir être détectée avec un dispositif dipôle-dipôle de longueur 100 m (voir la figure suivante).

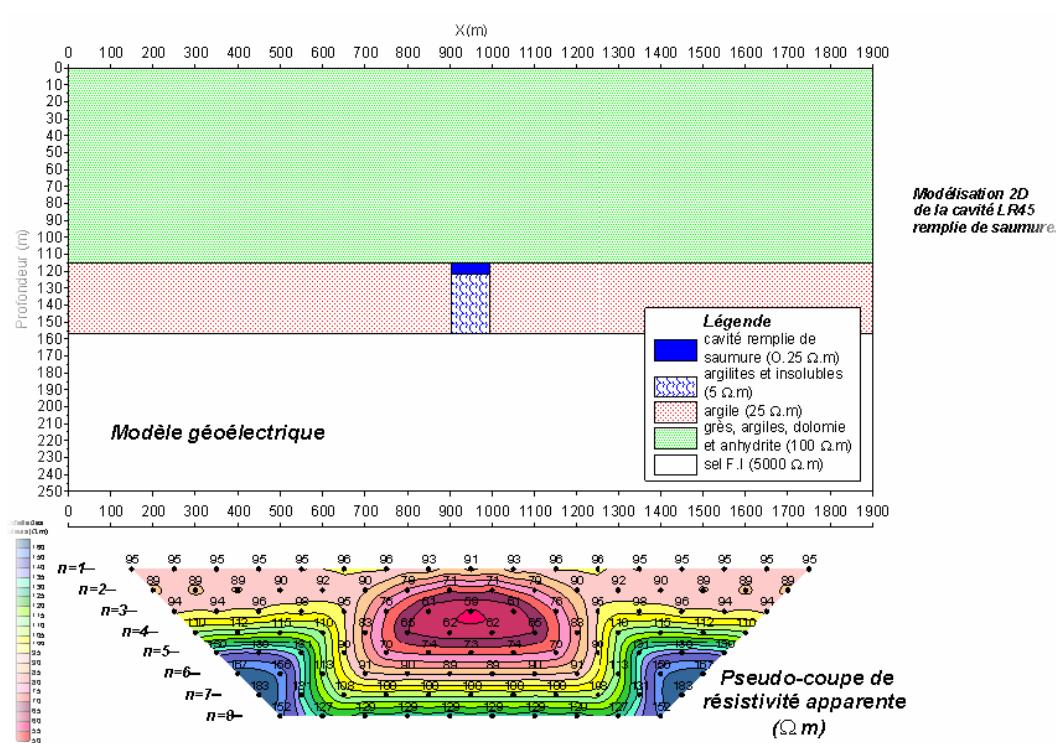


Figure 60 - Modélisation 2-D de la cavité remplie de saumure, argillites et insolubles (d'après Miehé *et al.*, 2003).

Un dispositif dipôle-dipôle centré sur la cavité et combinant deux longueurs de dipôles, 100 et 50 m a donc été mis en œuvre. L'inversion de la pseudo-coupe de résistivité ainsi obtenue met en évidence une structure conductrice dont la profondeur et la géométrie sont conformes à celles de la cavité connue (figure 61).

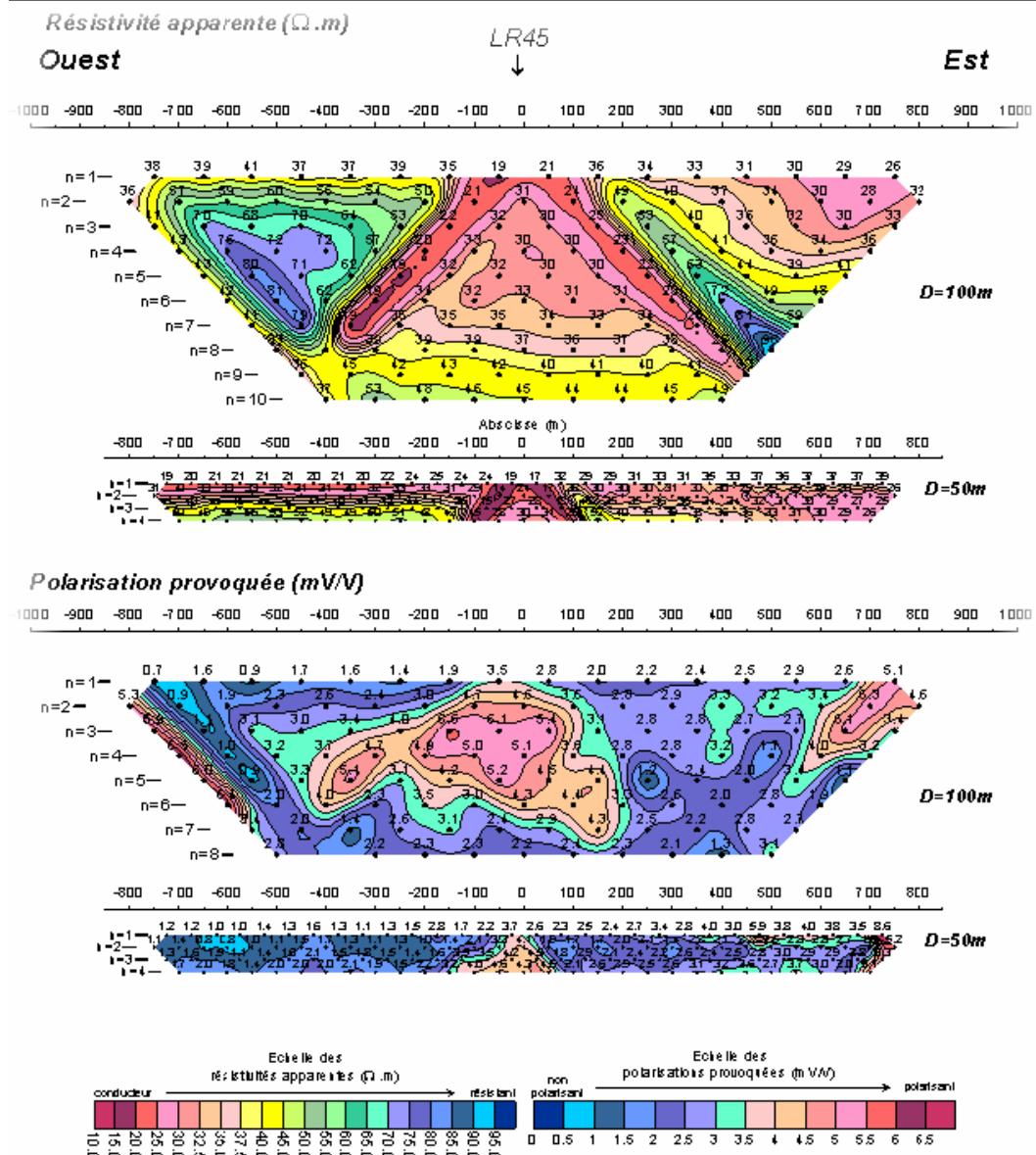


Figure 61 - Pseudo-coupe de résistivité apparente et de polarisation provoquée (d'après Miehé et al.. 2003).

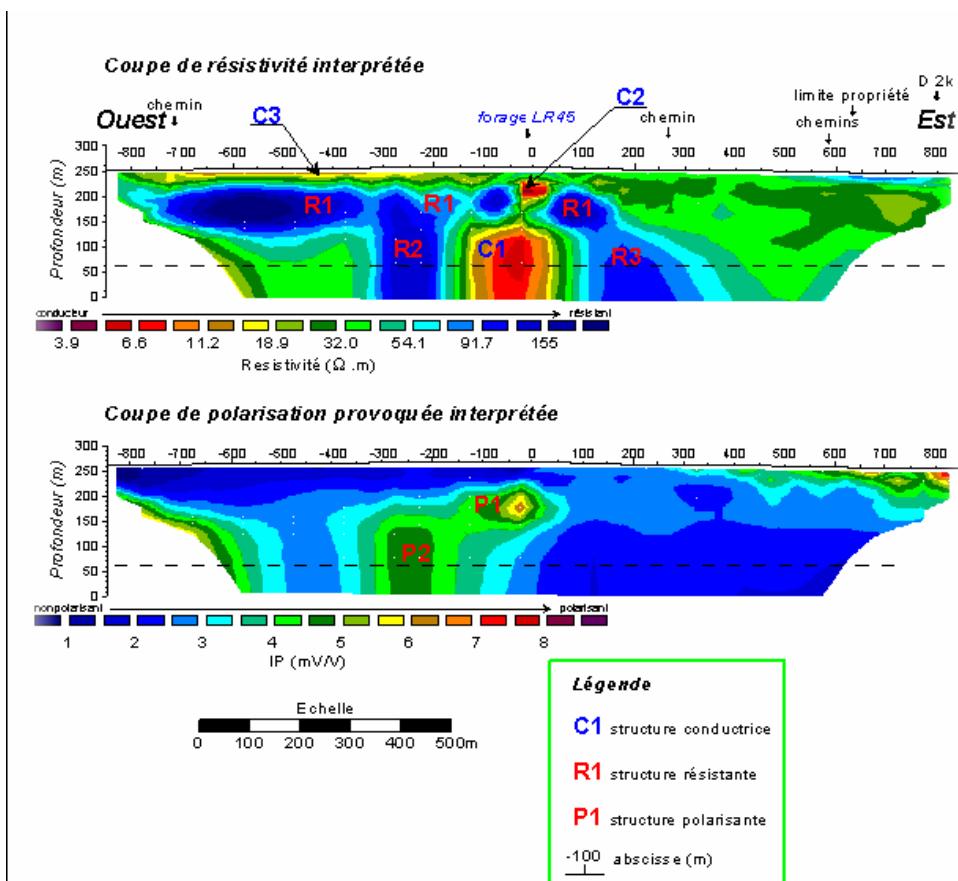


Figure 62 - Coupe de résistivité et de polarisation interprétée (d'après Miehé et al., 2003).

7.3.4. Conclusion

D'un point de vue pratique, les technologies utilisées par les méthodes électriques sont simples (injection de courant électrique, mesure de tension et de courant), et leur interprétation relativement aisée (qualitative) ; mais leur mise en œuvre est lourde (longueur de dispositifs électriques à installer) et **sensible à l'occupation des sols** (couverture forestière en particulier). Le **rendement** de ces méthodes est relativement **faible** (quelques centaines de mètres par jour). Elles sont sensibles aux perturbations d'origine humaine (conduites métalliques, trafic, etc.).

Le coût journalier de mise en place et d'utilisation de ces méthodes électriques en courant continu varie de 1 500 à 2 000 euros TTC. La **fiabilité** en matière de détection directe des cavités reste encore à démontrer. En effet, en détection directe, l'applicabilité de ces méthodes dépendra à la fois du contraste de résistivité entre la cavité et son encaissant et de la résistivité du recouvrement. Une cavité vide (infiniment résistante) sera plus difficilement détectée si elle est entièrement située dans un encaissant résistant (calcaire par exemple) que si elle a commencé à affecter le recouvrement, généralement plus conducteur (limons et argiles). Une cavité comblée de sédiments ou remplie d'eau se comportera par contre généralement

comme un conducteur. Une cavité remplie de saumure sera encore plus facilement détectable du fait du fort contraste de résistivité entre l'eau salée et les formations géologiques environnantes. En détection indirecte, elles peuvent être utilisées très efficacement pour localiser des zones humides ou des formations altérées et fracturées superficielles induites par la présence de la cavité.

8. Les méthodes électromagnétiques

8.1. GÉNÉRALITÉS ET PRINCIPE

8.1.1. Généralités

Les méthodes électromagnétiques étudient les interactions des ondes électriques et magnétiques avec le terrain en utilisant des courants alternatifs, naturels ou injectés. On les distingue des méthodes électriques en courant continu qui utilisent une injection de courant continu et mesurent la différence de potentiel ainsi créée.

Les méthodes électromagnétiques mesurent l'intensité, dans le sol, de champs magnétiques variables, avec ou sans mesures du champ électrique associé.

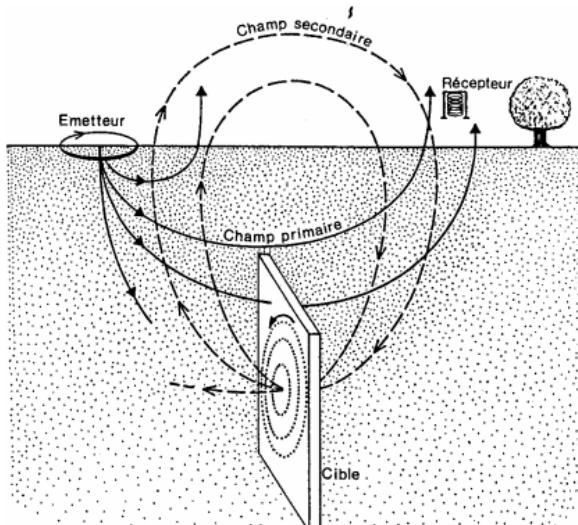


Figure 63 - Illustration du principe.

Les méthodes électromagnétiques s'appliquent à :

- la recherche et la localisation d'accidents géologiques, de gisements miniers ;
- la recherche en eau, la recherche de fuites, de polluants ;
- la localisation d'infrastructures souterraines, de vestiges archéologiques, de cavités souterraines ;
- des études d'aptitude des sols à l'infiltration des eaux pluviales...

8.1.2. Régime de propagation et régime de diffusion

Les ondes électromagnétiques se réfléchissent et se réfractent partiellement (loi de Snell-Descartes) lorsqu'elles rencontrent un contraste d'impédance électromagnétique.

La propagation de ces ondes est décrite par les équations de Maxwell. Elle présente deux régimes : le régime de diffusion lié aux phénomènes de conduction et le régime de propagation lié aux phénomènes de polarisation. Ces deux phénomènes dépendent de la fréquence à laquelle ils sont sollicités et des paramètres physiques (conductivité, permittivité) du terrain. La frontière entre ces deux régimes est définie par la fréquence caractéristique¹⁵ du matériau pour laquelle les phénomènes de conduction dominent.

Pour la plupart des matériaux géologiques, cette fréquence se situe entre 10 et 20 MHz.

8.1.3. Les différentes méthodes électromagnétiques

Parmi les différentes méthodes électromagnétiques, on va distinguer :

- les méthodes basse fréquence des méthodes haute fréquence, suivant les fréquences utilisées pour la prospection et le mode de propagation ;
- les méthodes en champ lointain et en champ proche, en fonction de la distance séparant le récepteur et la source électromagnétique ;
- les méthodes actives et les méthodes passives suivant la nature du champ électromagnétique utilisé ;
- les méthodes fréquentielles des méthodes temporelles, en fonction du mode de sure du traitement et du mode de source.

Méthodes basse fréquence/méthodes haute fréquence

Les méthodes basse fréquence sont basées sur la diffusion des champs. Elles sont uniquement sensibles au contraste de conductivité. Les méthodes haute fréquences (ou méthodes radar) sont basées sur la propagation des champs et sont principalement affectées par les contrastes de permittivité. Entre 100 kHz et 10 MHz, les deux phénomènes coexistent.

¹⁵ Fréquence caractéristique : $f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\rho\epsilon} [Hz]$ où σ (S.m-1) est la conductivité, ϵ la permittivité électrique, ρ ($\Omega.m$) la résistivité.

Méthodes en champ proche/ méthodes en champ lointain

Pour les méthodes en champs proche, on travaille à moins d'une longueur d'onde de la source contrôlée, le champ primaire variant très vite. Les résultats sont très dépendants de la géométrie de la source et de sa distance à la cible. On distingue :

- les méthodes à émetteur fixe : Large-loop EM (LLEM), Turam, méthodes électromagnétiques en forages... ;
- les méthodes à émetteur mobile : méthodes Slingram, détecteur de métaux, méthodes aéroportées.

Pour les méthodes en champ lointain, la distance entre l'émetteur et le récepteur est supérieur à une longueur d'onde dans le sol, le champ primaire est localement uniforme et les résultats sont indépendants de la géométrie de la source. On peut citer les méthodes dites Velocity Low Frequency (VLF), magnéto-tellurique (MT[°], radio magnéto-tellurique (RMT), audio magnéto-tellurique à source contrôlée (CSAMT), ou radar.

Méthodes actives/ méthodes passives

Les méthodes passives comme la MT ou l'Afmag¹⁶ utilisent des signaux naturels (courants magnétiques terrestres, solaires...). Les méthodes actives utilisent des sources artificielles comme les stations de radio ou des boucles de courants.

Méthode fréquentielles/ méthode temporelles

La méthode fréquentielle consiste à observer les phénomènes électromagnétiques à une fréquence particulière et à conduire les mesures et leur interprétation en régime sinusoïdal.

La méthode temporelle consiste à observer les phénomènes d'interaction après l'émission d'une impulsion électromagnétique et d'observer l'interaction en termes de temps et d'amplitude comme pour les méthodes sismiques.

Méthodes adaptées à la détection d'orifices débouchant au jour

La combinaison entre chacun de ces types de méthodes est possible, c'est pourquoi il existe un grand nombre de matériels et de méthodes électromagnétiques dédiées à la prospection du sous-sol. On se concentrera sur les méthodes en surface les plus courantes qui ont déjà permis la détection d'orifice débouchant au jour et la détection de cavités.

¹⁶ Méthode dont la source émettrice naturelle est la partie du champ magnétique terrestre correspondant à la bande 1-8 000 Hz.

8.2. MÉTHODES BASSE FRÉQUENCE EN CHAMP LOINTAIN (VLF ET RMT)

Les méthodes VLF (Very Low Frequencies) et RMT (Radio Magnéto Tellurique) sont des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain (entre 10 et 30 kHz pour la méthode VLF et entre 10 kHz et 1 Mhz pour la méthode RMT).

8.2.1. Principe

La méthode VLF utilise les émetteurs militaires destinés à la radiocommunication sous-marine tandis que la méthode RMT utilise en plus la gamme commerciale des radios. Ces émetteurs sont considérés comme lointain, de telle sorte que les ondes électromagnétiques reçues au point de mesure sont planes.

Ces ondes se propagent à la surface du sol. Le champ primaire crée des courants dans le sol. Ces courants sont ensuite modifiés par la présence d'anomalies conductrices ou résistantes et ils créent un champ secondaire induit.

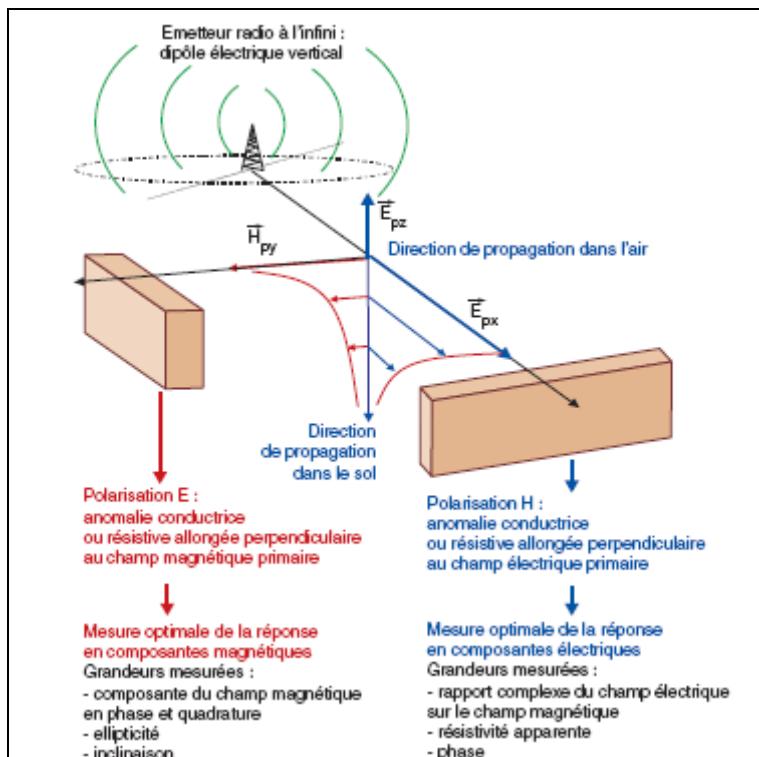


Figure 64 - Principe des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain, polarisation et modes de mesure.

Trois phénomènes interviennent (Chouteau, 2001) (Figure 64) :

- la production par une source d'un champ électromagnétique primaire, variable dans le temps ;

- ce champ induit des courants (courants de Foucault) dans le sol ;
- ces courants sont modifiés par la présence d'hétérogénéités.

La réponse d'une anomalie dans le sol dépend de son allongement par rapport à la direction du champ primaire. Ainsi, on distingue la polarisation H (champ magnétique primaire parallèle à l'allongement de l'hétérogénéité) et la polarisation E (champ magnétique primaire perpendiculaire à l'allongement de l'hétérogénéité). La réponse du corps se manifeste par la création d'un champ électromagnétique secondaire.

Grandeurs mesurées

Les grandeurs mesurées par les méthodes basse fréquence en champ lointain sont mesurables par deux modes distincts :

- le mode VLF-EM (aussi appelé mode inclinaison) où la mesure du champ magnétique vertical par rapport au champ magnétique horizontal permet de localiser des anomalies ;
- le mode VLF-R et RMT (mode résistivité) où une résistivité électrique apparente est calculée à partir des mesures des champs électrique et magnétique.

• En mode inclinaison : VLF-EM

Le mode inclinaison est le mode dans lequel on mesure la composante magnétique verticale (Hz) et la composante magnétique horizontale (Hy) perpendiculaire à la direction de l'émetteur.

Les appareils VLF fonctionnant dans ce mode utilisent deux bobines réceptrices perpendiculaires qui mesurent la composante Hz et la composante Hy du champ magnétique, on mesure en fait le rapport complexe Hz/Hy.

• En mode résistivité : VLF-R et RMT

Le mode résistivité (encore appelé électrique-magnétique) permet de mesurer le champ électrique horizontal radial (Ex) et le champ magnétique horizontal perpendiculaire (Hy).

Le champ électrique est mesuré à l'aide d'une paire d'électrodes capacitatives ou en contact conductif avec le sol. Comme précédemment, le champ magnétique horizontal sert de référence : on mesure le rapport complexe Ex/Hy, égal à l'impédance électromagnétique de surface.

Résultats attendus

• En mode inclinaison : VLF-EM

Les paramètres suivants sont calculés :

- l'amplitude du champ magnétique vertical, exprimée en pourcent du champ horizontal de référence, en fonction de la distance. La juxtaposition de plusieurs profils permet de représenter les mesures en cartes de couleurs graduées en fonction du rapport Hz/Hy (Figure 65) ;
- la phase du champ magnétique vertical par rapport au champ horizontal de référence, en fonction de la distance le long d'un profil ;
- l'inclinaison du grand axe de l'ellipse de polarisation, et l'ellipticité¹⁷.

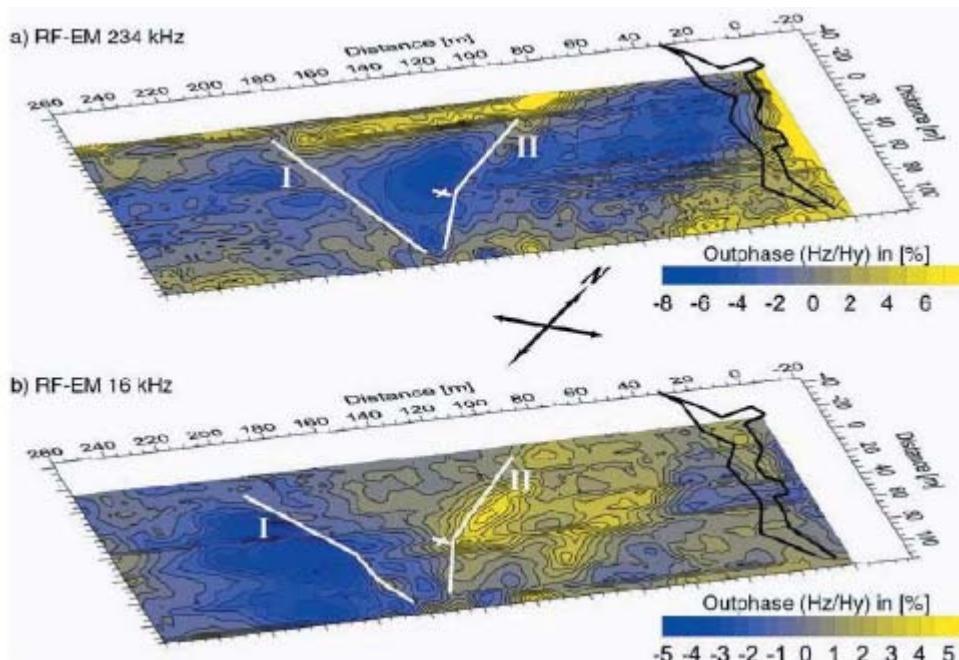


Figure 65 - Exemple de résultats de mesure avec la méthode VLF en mode inclinaison à a) 234 kHz et b) 16 kHz (Borsch et Gürk, 2000).

• En mode résistivité : VLF-R et RMT

La mesure du rapport complexe E_x/H_y donne accès aux paramètres suivants :

- la résistivité apparente (en $\Omega \cdot m$), par la formule de Cagniard¹⁸. La juxtaposition de plusieurs profils permet de représenter les mesures en cartes de couleurs graduées en fonction de la résistivité apparente;
- la phase du champ électrique par rapport au champ magnétique.

¹⁷ Le petit axe de l'ellipse sur le grand axe de l'ellipse.

¹⁸
$$\rho_a = \frac{1}{2\pi\mu_0 f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}$$
 où μ_0 la perméabilité magnétique du vide, f la fréquence radio utilisée.

Quand le sol est homogène, la résistivité apparente est égale à la résistivité vraie. La phase est égale à 45°. Toute autre valeur révèle la présence d'une hétérogénéité.

- **Détection d'orifices et de cavités minières**

De manière générale, il faut compter un contraste d'au moins 10 % entre la résistivité de la cavité et celle du matériau environnant pour avoir une anomalie significative.

Les orifices et cavités conducteurs seront plus aisément mises en évidence par le mode inclinaison, d'autant plus qu'ils seront allongés dans la direction du champ électrique (polarisation E, Figure 66).

Les orifices et cavités vides, l'effet galvanique¹⁹ est prédominant, les lignes de courant primaire dans le terrain encaissant sont déviées le long des parois. On observe alors une augmentation du champ électrique en surface, et donc une augmentation de la résistivité apparente. L'effet galvanique est d'autant plus important que le vide est allongé perpendiculairement au champ électrique primaire.

8.2.2. Méthodologie

Domaine d'application

De manière générale, ces méthodes s'appliquent plutôt à un premier zonage et plutôt en environnement non urbain.

La méthode VLF-EM est sensible à la présence de conducteurs dans le sol, tandis que le VLF-R ou la RMT s'appliquent indifféremment sur des cibles conductrices ou résistantes.

Les zones conductrices seront d'autant mieux mises en évidence en mode inclinaison qu'elles posséderont une extension verticale vers la surface et une structure allongée parallèle au champ électrique primaire (polarisation E, Figure 66). On citait, comme exemple de zone conductrice, un niveau exploité avec au moins un puits ennoyé ou comblé par un remblai plus conducteur que l'encaissant.

Les zones vides seront mieux repérées s'ils présentent une structure allongée perpendiculaire au champ électrique primaire et une extension verticale vers la surface (polarisation H, Figure 66).

¹⁹ *Effet galvanique* : un effet statique produit par la déviation, par une hétérogénéité, des courants de Foucault induits dans l'encaissant. Cet effet est identique dans son principe aux méthodes électriques. La déviation des courants est une concentration des courants vers l'intérieur du corps si celui-ci est relativement conducteur, ou au contraire un contournement du corps si celui-ci est relativement résistant.

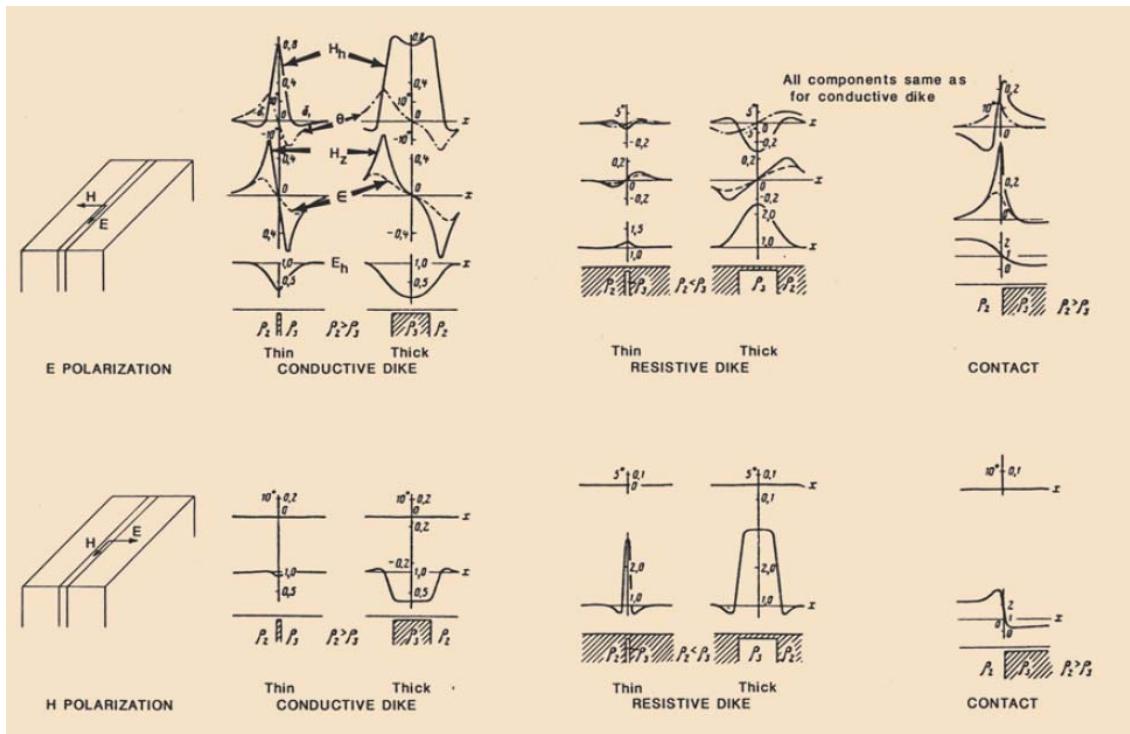


Figure 66 - Représentation qualitative des réponses en phase et en quadrature des champs électriques et magnétiques au-dessus d'anomalies (conductrices et résistantes) suivant le mode de polarisation. (McNeil et Labson, 1991).

Dans tous les cas, les informations recueillies seront essentiellement qualitatives et nécessiteront une campagne de sondage pour être interprétées.

Déroulement de la campagne de mesures

La campagne de mesures se déroulera d'autant mieux que l'on dispose de deux émetteurs dont les directions des champs sont perpendiculaires entre eux sur la surface étudiée afin de conduire les mesures selon les deux modes de polarisation H et E. En mode invariant, on peut calculer les invariants de résistivité.

En fonction des informations issues des études préliminaires, une modélisation des objets recherchés permettra de fixer l'ordre de grandeur des paramètres de mesure et les fréquences susceptibles d'atteindre ceux-ci. Les surest seront effectuées pour différentes fréquences.

En mode inclinaison, les mesures sont réalisées via des appareils à triples bobines sans avoir à se soucier de l'orientation du champ électrique primaire, ni de l'inclinaison des capteurs de champ magnétique pour la mesure de l'ellipticité. Le rendement des mesures, réalisées en continu, est de l'ordre de la vitesse de marche de l'opérateur ou du véhicule tractant l'appareil.

En mode résistivité, le champ électrique est mesuré par deux électrodes dont l'alignement doit être parallèle au champ électrique primaire. La distance entre les électrodes est choisie en fonction du niveau de détail souhaité. Le capteur du champ magnétique est orienté dans un plan horizontal, parallèle à la direction du champ magnétique primaire. Le rendement de cette méthode est de quelques kilomètres par jour à plusieurs dizaines de kilomètres par jour suivant le dispositif d'électrodes choisies.

Les mesures effectuées dans les deux modes de polarisation vont permettre des traitements spécifiques comme la verticalisation du champ électrique et permettent d'obtenir des cartes de résistivité apparente mieux corrélées avec la réelle répartition des anomalies dans le sol.

Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats est essentiellement qualitative. Les mesures basse fréquence rendent compte des variations de résistivité mais permettent difficilement de déterminer la profondeur et la dimension des structures rencontrées.

L'interprétation se réalise à l'aide de sondages mécaniques effectués sur les zones d'anomalies révélées par la mesure. La modélisation et l'inversion des mesures apportent des informations qualitatives complémentaires, elles nécessitent la connaissance a priori d'informations comme l'épaisseur de recouvrement de la première couche, la nature de la structure recherchée ou sa profondeur approximative.

8.2.3. Limites de la méthode

Les deux méthodes VLF et RMT sont sensibles à la présence de structures rayonnantes (canalisations, lignes hautes tensions, structures métalliques...) à proximité de la zone d'étude. Il est donc nécessaire de noter leur présence afin de ne pas interpréter le bruit qu'elles génèrent comme la signature d'anomalies dans le sol.

Lors de l'acquisition des mesures, le choix des profondeurs d'investigation est limité, le plus souvent le nombre de fréquence disponible ne dépasse pas trois. Plus la fréquence est élevée, plus l'investigation sera faible.

Si un seul émetteur est disponible, les résultats de mesures en mode résistivité ont tendance à allonger les anomalies perpendiculairement à la direction du champ électrique incident.

8.2.4. Exemples

Dans cet exemple, le VLF en mode résistivité est utilisé pour détecter des galeries remplies d'air dans un milieu argileux surmonté de graviers (Ogilvy *et al.*, 1991).

L'effet dominant est une forte déviation des lignes de courant qui contournent le corps résistant (Figure 67a). La galerie étant perpendiculaire au champ électrique primaire

orienté dans la direction de l'émetteur utilisé (polarisation dite H), le signal le plus caractéristique (Figure 67b) est observé en mode « résistivité » (mesure des champs électrique et magnétique horizontaux).

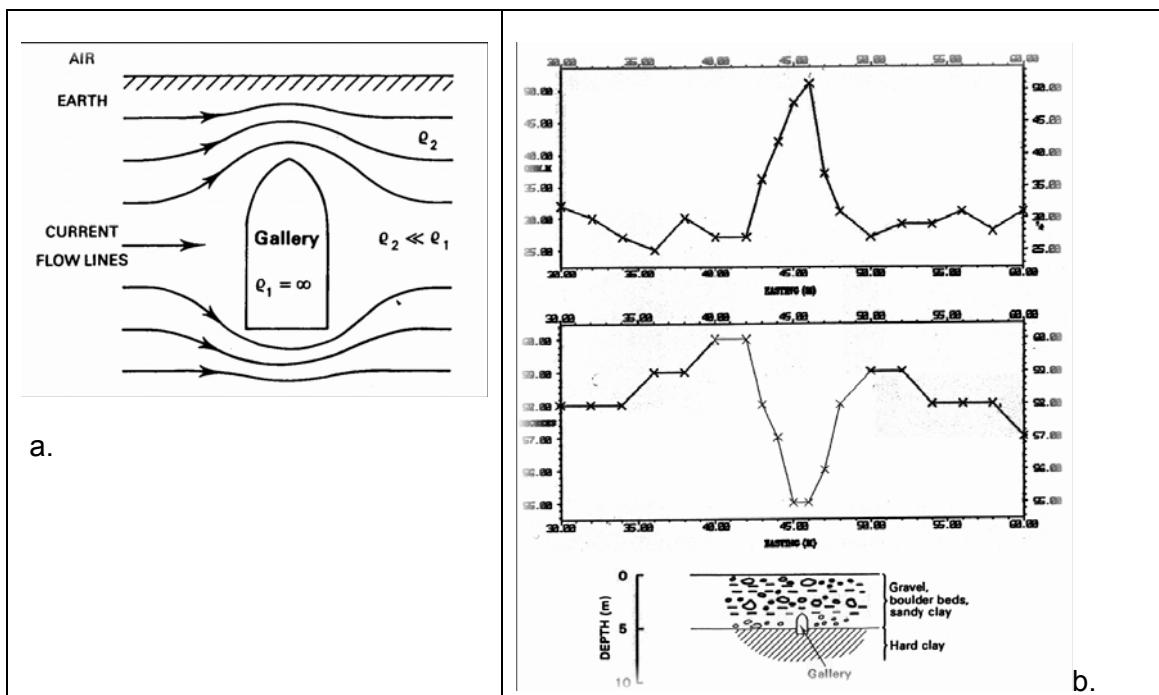


Figure 67 - Détection de galeries superficielles par VLF résistivité (d'après Ogilvy et al., 1991).

A. schéma théorique de la déviation des lignes de courant au voisinage de la galerie remplie d'air (résistant) ;
b - résistivité apparente et phase mesurées perpendiculairement à la galerie (polarisation H, mode résistivité).

8.2.5. Modélisation

La modélisation est un outil utile à l'interprétation des mesures. Divers logiciels permettent d'implémenter des modèles de terrain et des structures recherchées (puits, galeries...) pour obtenir la réponse en mode inclinaison ou résistivité. Ainsi, on peut estimer les résistivités apparentes que l'on peut s'attendre à mesurer sur le terrain.

8.2.6. Conclusion

Les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain sont des méthodes adaptées pour la réalisation d'un premier zonage.

Pour les deux méthodes, il faut noter la présence à proximité des points de structures rayonnantes (masses métalliques, lignes haute tension, etc.) afin de ne pas interpréter le bruit qu'elles génèrent comme la signature d'anomalies.

Plus le milieu est conducteur (de même, plus la fréquence est élevée), plus la profondeur d'investigation est faible. De plus, lors de l'utilisation des fréquences

proches du Mhz, les effets propagatifs non négligeables (Person, 2002) doivent être pris en compte dans l'interprétation.

Le choix des profondeurs d'investigation est bien souvent limité du fait du nombre de fréquences disponibles sur le terrain (pas plus de trois en règle générale). De plus, les mesures selon les deux modes de polarisation (H et E) ne sont pas toujours possibles sur la zone d'étude. Dans le cas où les mesures dans les deux modes de polarisation sont possibles, on obtient des cartes de résistivité apparente corrélées avec la répartition réelle des anomalies dans le sol grâce à des traitements spécifiques (Tabbagh, 1991).

En mode résistivité, si un seul émetteur est disponible, il faut savoir que les résultats des mesures ont tendance à allonger les anomalies perpendiculairement à la direction du champ électrique incident.

Enfin, l'interprétation est essentiellement qualitative et se fait en termes de variation des composantes du champ magnétique ou de contraste de résistivités apparentes. Ainsi, la recherche d'indices est essentielle mais malheureusement insuffisante pour corrélérer ces mesures avec la présence de vides comme des cavités. Seuls les sondages mécaniques permettent de mettre en évidence un vide.

8.3. MÉTHODES BASSE FRÉQUENCE EN CHAMP PROCHE (SLINGRAM)

8.3.1. Principe

Champ primaire et champ secondaire

Pour les méthodes basse fréquence en champ proche, des dipôles magnétiques (boucles de courant), verticaux ou horizontaux par rapport au sol, sont utilisés comme émetteur et récepteur. La source génère un champ magnétique primaire à une fréquence donnée et lorsque le champ primaire rencontre une anomalie conductrice, le champ secondaire, beaucoup plus faible, est modifiée (Figure 68).

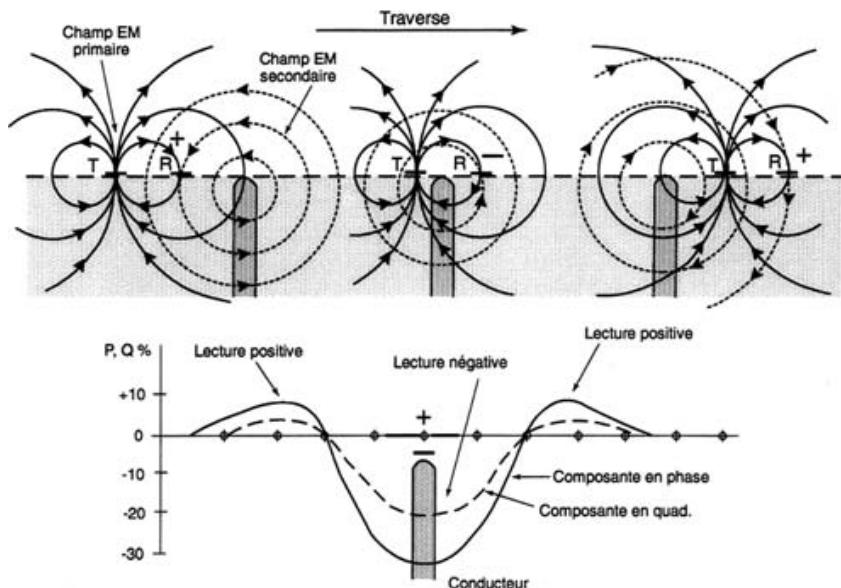


Figure 68 - Principe de la méthode Slingram à dipôle magnétique horizontal.

Chouteau M., 2001, "méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques", Géophysique appliquée II, GLQ 3202, Notes de Cours, École Polytechnique de Montréal. (Chouteau*, 2001)

Grandeurs mesurées

Les hétérogénéités conductrices du sous-sol sont décrites en terme de conductivité apparente²⁰, σ_a , par la mesure du rapport de la composante du champ secondaire en quadrature par rapport au champ primaire.

Résultats attendus

Les résultats attendus dans le cas de l'utilisation des méthodes basse fréquence en champ proche sont des profils de résistivité apparente ou, bien que moins souvent, des profils de conductivité apparente en fonction de la distance. La représentation de plusieurs profils parallèles donne une carte d'isovaleurs graduée en fonction de la résistivité apparente.

²⁰ σ_a , l'inverse de la résistivité apparente ρ_a , est exprimée en Siemens par m ($S \cdot m^{-1}$)

8.3.2. Méthodologie

Domaine d'application

Ce type de méthode est bien indiqué pour la recherche de structures conductrices, la cartographie de zones karstiques en milieu rural, mais pas pour la recherche de cavités vides (Ogivy et Lee, 1991 ; galerie vide 1 x 2 m à 2,5 m de profondeur non détectée).

Déroulement de la campagne de mesure

On définit un ou plusieurs profils sur la zone de prospection. Le choix de la distance entre les boucles permet de cibler une profondeur d'investigation particulière. Elle est indicative et dépend des propriétés du sous-sol que l'on cherche à déterminer.

La maille adoptée est généralement de l'ordre de 5 m ce qui permet un rendement important (2 ha/jour sur un terrain dégagé, en acquisition point par point, pour des dispositifs portables par un seul opérateur, à une hauteur constante au-dessus du sol (Guérin *et al.*, 2002)).

Interprétation des résultats

Tout comme pour les méthodes en champ lointain, les mesures en champ proche reste essentiellement qualitatives sauf dans le cas de milieux tabulaires à deux ou trois couches (Borne, 1990).

La présence d'une anomalie conductrice se traduit par l'augmentation de la conductivité apparente mesurée, et inversement d'une diminution de la résistivité apparente mesurée. L'anomalie conductrice décrit un phénomène se traduisant par une diminution locale du rapport d'amplitude du champ vertical sur le champ horizontal, en phase et en quadrature.

8.3.3. Limites de la méthode

Les éléments conducteurs (tuyaux, escalier métallique, lignes électriques...) proches de la zone étudiée doivent être pris en compte dans les mesures et leur interprétation.

8.3.4. Modélisation

Il existe des formules analytiques réservées principalement aux structures simples. Dans le cas de modèles complexes, il existe des logiciels permettant la modélisation de la réponse, en mode Slingram, de cavité vide ou ennoyée.

8.3.5. Conclusion

Les méthodes basse fréquence en champ proche sont préconisées essentiellement pour la cartographie de zones karstiques en milieu rural et donc pour la recherche de cavités remplies d'un matériau conducteur (donc non préconisées pour la détection des vides).

La profondeur d'investigation de ces méthodes dépend de la distance émetteur-récepteur.

La grande maniabilité, le rendement élevé et le coût d'utilisation faible de ces méthodes sont un atout non négligeable.

L'interprétation des mesures issues de ces méthodes reste essentiellement qualitative sauf dans le cas de milieux tabulaires à deux ou trois couches (Borne, 1990). Pour passer à une interprétation quantitative, les autres méthodes géophysiques comme les méthodes électriques ou les sondages mécaniques sont utilisées.

Les éléments conducteurs environnants d'origine anthropique comme les tuyaux, les lignes électriques ou les câbles métalliques, etc. sont à prendre en compte dans les mesures.

8.4. MÉTHODES HAUTE FRÉQUENCE : LE RADAR GÉOLOGIQUE

8.4.1. Principe

Les méthodes électromagnétiques haute fréquence, comme le radar géologique, sont basées sur l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques dans le sol. Le domaine de fréquences utilisé est compris entre quelques dizaines de Mhz et quelques Ghz.

Ces ondes sont émises, par une antenne, sous forme d'impulsions temporelles de très courte durée, en un point de la surface. Elles entrent en interaction avec le milieu en créant des phénomènes de conduction et de polarisation dépendant de la permittivité complexe des matériaux rencontrés.

Les ondes électromagnétiques sont fortement dépendantes du milieu dans lequel elles se propagent. Leurs caractéristiques varient suivant les propriétés diélectriques et spatiales des hétérogénéités qu'elles traversent

Lorsque les ondes rencontrent un contraste diélectrique, elles se réfléchissent partiellement vers la surface où leurs caractéristiques sont mesurées par une antenne et sont analysées pour en déduire les propriétés du sous-sol (Figure 69).

En mode monostatique, une antenne fait office de récepteur et d'émetteur. En mode bistatique, il y a une antenne émettrice et une antenne réceptrice. Il existe aussi des dispositifs avec un plus grand nombre d'antennes.

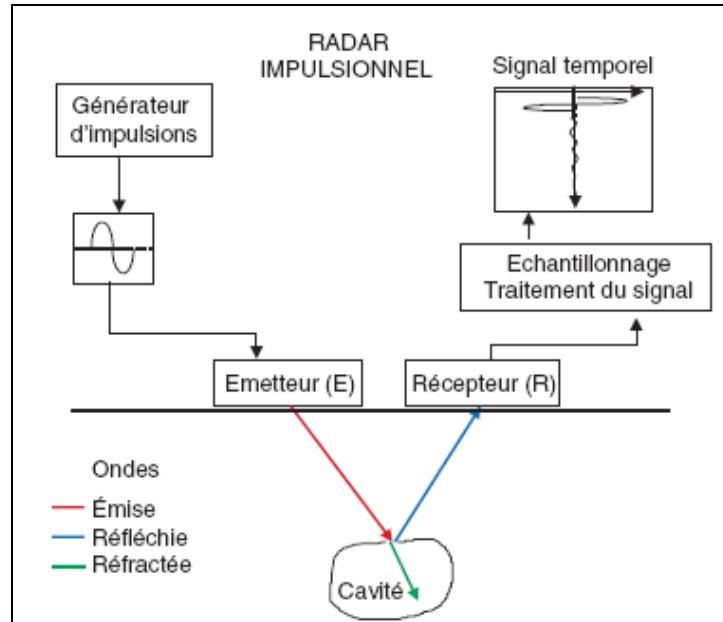


Figure 69 - Principe de la méthode radar.

L'onde est dite plane si tous les points d'un plan perpendiculaire à la direction de propagations sont soumis à des champs égaux en amplitude et en phase (Figure 70).

Le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{H} sont, dans le plan d'onde, perpendiculaires à la direction de propagation. L'orientation du champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence dans de nombreux cas. Malgré cela, les mesures peuvent se faire selon les deux polarisations suivant l'application et les traitements envisagés.

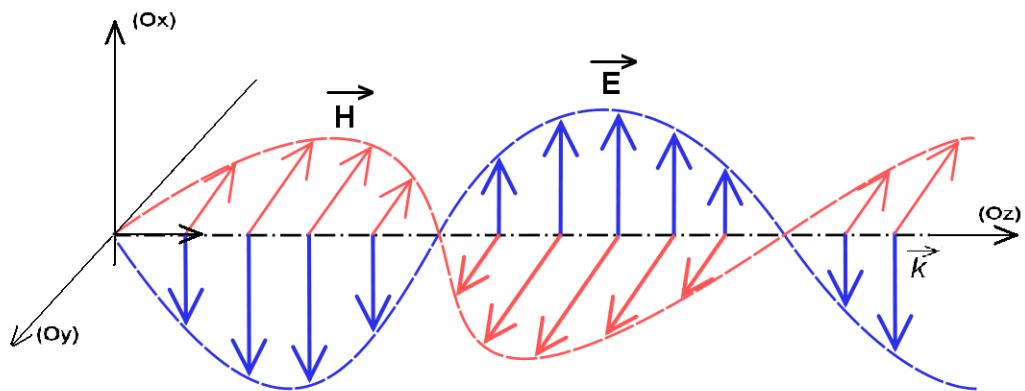


Figure 70 - Onde plane : représentation en régime harmonique des champs électriques et magnétique suivant le vecteur \vec{k} , vecteur de propagation ici dirigé suivant (Oz) .

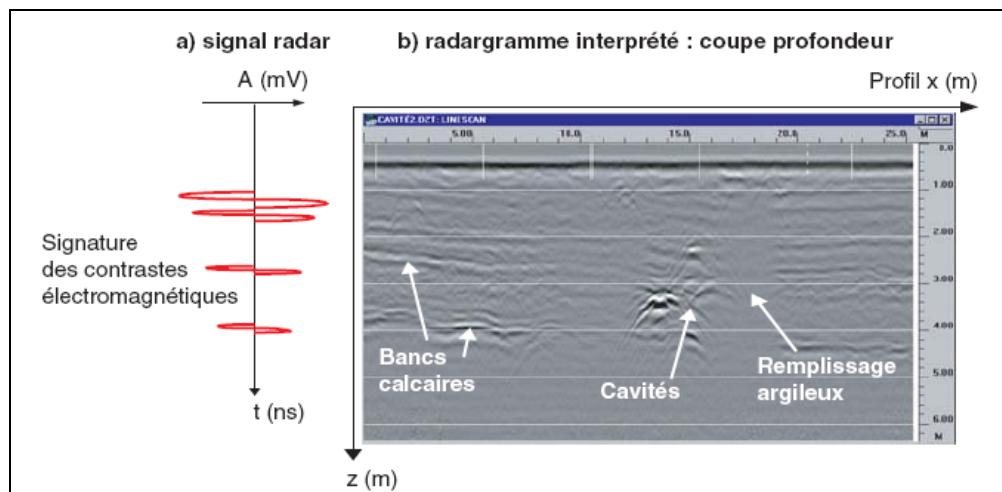
Grandeurs mesurées

Les méthodes haute fréquence permettent de mesurer les variations d'amplitude du champ électrique issues des réflexions et des diffractions sur les contrastes diélectriques du milieu en fonction du temps de propagation des ondes dans le milieu.

Résultats attendus

Ces méthodes fournissent deux types de résultats :

- le premier est un radargramme brut (ou coupe temps) similaire aux représentations obtenus en sismiques : l'amplitude de chaque signal, est donnée en fonction du temps de propagation et les signaux sont juxtaposés en fonction de la position en surface (Figure 71) ;
- le second est un radargramme interprété (coupe profondeur) : la connaissance des vitesses dans le milieu permet de représenter le signal en fonction de la profondeur.



La réalisation de plusieurs profils permet de visualiser les mesures en 3D par des coupes en plan à une profondeur donnée ou selon un profil donné.

8.4.2. Méthodologie

Domaine d'application

La méthode est préconisée pour :

- la reconnaissance des structures géologiques et hydrogéologiques (profondeur du rocher, localisation précise de failles, détection gros blocs...) ;
- la localisation de cavités naturelles ou anthropiques, de canalisations (métal, béton, PVC) et d'objets enterrés (fûts, cuves, veilles fondations, etc.) ;

- la localisation de zones polluées ;
- le contrôle des épaisseurs des bétons en galeries et tunnels ;
- la détection et localisation des ferraillages ;
- la recherche de vides et de conducteurs en milieu résistant pour des profondeurs qui dépendent fortement de la conductivité des terrains...

Plus la fréquence sera basse, plus la pénétration sera importante ; en contrepartie, l'utilisation de basses fréquences présente l'inconvénient de diminuer le pouvoir de résolution de la méthode : plus la fréquence utilisée sera élevée, plus les objets détectables par la méthode seront petits.

Les conditions de détection imposent que l'encaissant soit tel que $\rho > 100 \Omega.m$ et $\tan\delta << 1$. La méthode est donc proscrite dans les milieux conducteurs comme les limons et les argiles. Quelque soit le matériau, la teneur en eau doit être suffisamment faible pour que les phénomènes d'atténuation et de dispersion soient minimisés.

Déroulement d'une campagne

Les mesures issues des méthodes haute fréquence sont réalisées en continu suivant un ou plusieurs profils parallèles distants de un à plusieurs mètres. Selon les matériels et les conditions, le dispositif est porté par l'opérateur ou traîné par un véhicule. Une même antenne émet une onde vers le sol et en reçoit en retour l'onde réfléchie sur un objet fini ou une interface.

Il existe de nombreux paramètres que l'utilisateur se doit de régler :

- le temps d'enregistrement ;
- le pas d'enregistrement des signaux ;
- le stacking ;
- le gain ;
- les filtres.

Afin de recaler les signaux par rapport à l'origine en surface, il est nécessaire d'effectuer un relevé de la topographie une fois les mesures à la surface du sol effectuées.

Les méthodes haute fréquence permettent d'obtenir une information qualitative, permettant de localiser les anomalies dans le sol par la présence d'un contraste ou d'une atténuation dans le signal enregistré, et une interprétation quantitative en terme de profondeur (dans le cas où la vitesse dans le sol est connue), d'évaluer les dimensions des vides.

Interprétation des mesures

Les mesures brutes apportent une première information qualitative qui permet de localiser directement les anomalies dans le sol par la visualisation d'un contraste ou d'une atténuation dans le signal enregistré. Une première estimation de la profondeur peut être obtenue en utilisant les vitesses de propagation théoriques pour les matériaux du site. Lorsque les vitesses ne sont pas connues a priori, des sondages mécaniques permettent de caractériser la structure du sol en terme de profondeur.

Si les vitesses dans le sol sont connues, une interprétation quantitative des radargrammes est faite en termes de profondeur. Les dimensions des cavités peuvent être évaluées en déterminant la résolution verticale.

Quel que soit le résultat d'une interprétation qualitative, il est recommandé de faire une campagne de sondages mécaniques au droit des anomalies.

Limites de la méthode

La méthode **n'est pas adaptée** à la détection de **cavités en milieu conducteur** ou en présence d'une couverture conductrice, car les ondes ne s'y propagent pas.

Plus les fréquences des ondes sont élevées, plus la résolution sera importante et la profondeur de pénétration des ondes réduite.

Le blindage des antennes est parfois de mauvaise qualité et les perturbations de réseaux radio ou de structures métalliques environnantes sont sources de leurre.

8.4.3. Exemples d'application

Le radar géologique a déjà été utilisé par le BRGM, afin de localiser des travaux miniers superficiels, galeries, excavations ou puits.

Molay-Littry (14) - Recherche d'anciens puits de mine de charbon

Afin de préciser la localisation d'anciens puits de mine (fosses) de la concession de charbon de Littry, la méthode géoradar a été utilisée avec la méthode Ohm-mapper en novembre et décembre 2006, puis en janvier et février 2007.

La prospection géoradar a permis de définir des zones d'anomalies susceptibles de correspondre aux ouvrages recherchés pour onze des quatorze fosses prospectées.

Le dispositif utilisé a consisté à quadriller les sites de localisation possible des fosses. Par exemple pour la fosse Girard, un carré de 20 x 20 m centré sur la position présumé à été délimité. Onze profils parallèles de 20 m ont été réalisés. Après l'observation de l'anomalie sur le profil 11 (Figure 72a), un profil transverse a complété le dispositif. Une seconde anomalie est observable à proximité immédiate de la première (Figure 72b).

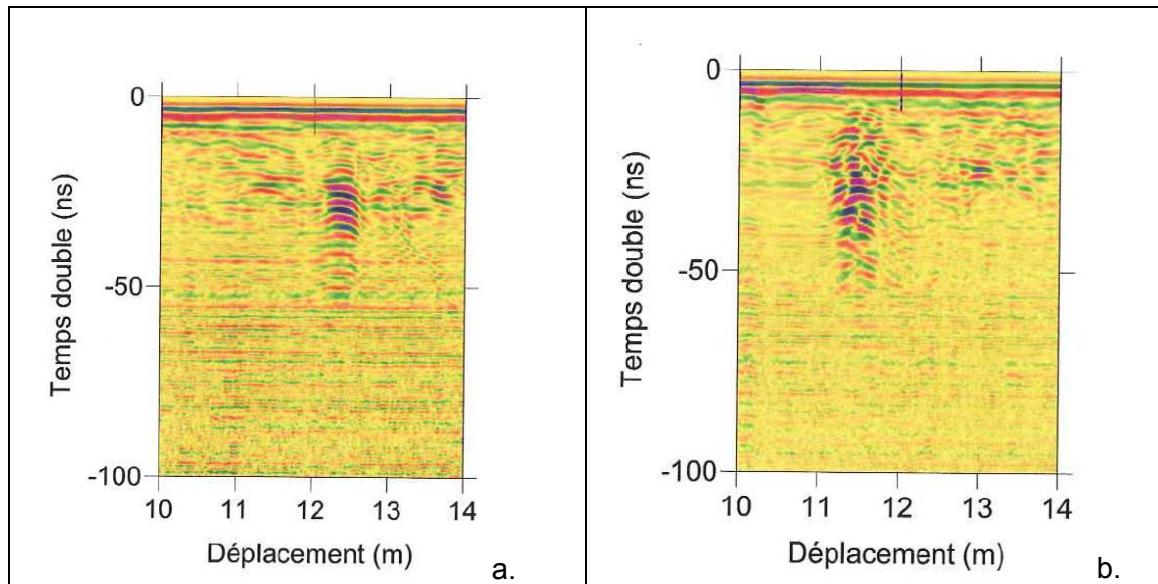


Figure 72 - Fosse Girard : a. anomalie radar du profil 11, b. anomalie radar du profil 12.

Les deux anomalies sont très proches du centre de l'anomalie de résistivité (Figure 73)

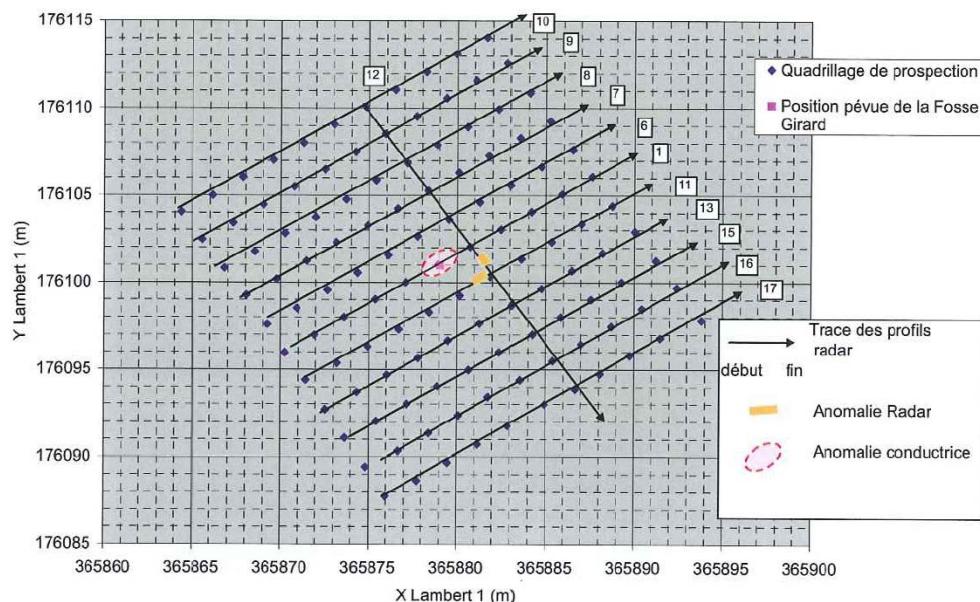


Figure 73 - Fosse Girard: plan de situation des profils géoradar, position des anomalies radar et électrique.

Hayange (57) recherche de galeries –mine de fer de Fesche

Le but des mesures géoradar est de mettre en évidence la présence de deux galeries qui débouchaient d'un talus mais furent masquées par des murs de soutènement. Ces galeries, seulement connues par d'anciens plans, sont censées avoir une longueur de 1,5 à 2 m et une hauteur de plus de 3 mètres.

L'utilisation du radar géologique a mis en évidence des anomalies significatives permettant de proposer des emplacements au débouché des galeries des anciennes mines de fer.

Autres exemples d'application

La profondeur de pénétration est généralement assez faible et de nombreuses structures superficielles, réseaux enterrés, remblais ou revêtements interfèrent dans l'interprétation. Ainsi, dans la concession de Fiennes²¹, les réponses radar sont contradictoires et peu significatives et les puits n'ont pu être détectés. La présence d'eau en surface a pu diminuer les contrastes de permittivité et l'une des conclusions de cette étude est de recommander de réaliser les mesures géophysiques en période sèche.

Les mesures de géoradar réalisées à proximité de la source Vernière à Les-Aires (34) ont permis de localiser des galeries superficielles situées entre 2 et 3 m de profondeur (Charbonneyre et Richalet, 1992). Les cavités plus profondes ne peuvent être détectées, la profondeur de pénétration du radar étant trop faible.

À Montebras (23), un essai de géoradar n'a pas permis de détecter les galeries qui sont supposées être à 10 m de profondeur, l'altération superficielle du granite rendant les terrains trop absorbants, pour permettre aux ondes radar d'atteindre la profondeur cherchée (BRGM, 1997). Le géoradar contribue cependant à l'interprétation de la microgravimétrie, en indiquant parmi les anomalies légères celles qui sont visiblement causées par des remblais superficiels et donc sans relation avec les travaux miniers.

8.4.4. Conclusion

Les méthodes haute fréquence sont préconisées pour la recherche de vides et de conducteurs en milieu résistant pour des profondeurs dépendant fortement de la conductivité des terrains. La profondeur d'investigation atteint très rarement 20 m pour des milieux géologiques favorables. Ces méthodes sont à proscrire dans les milieux conducteurs comme les limons et les argiles puisque la teneur en eau doit être suffisamment faible pour que les phénomènes d'atténuation et de dispersion soient minimisés.

²¹ BRGM/RR-39997-FR - Concession des mines de houille de Fiennes (Nord-Pas-de-Calais). Méthodologie géophysique pour la détection d'anciens puits de mines. BALTASSAT J.M., DUPONT F., MATHIEU F.

Plus les fréquences des ondes électromagnétiques sont élevées, meilleure est la résolution et moins grande est la profondeur de pénétration des ondes. Contrairement à cela, plus les fréquences utilisées sont basses, plus la profondeur de pénétration est grande mais moins la résolution est bonne.

Le rendement élevé et les dispositifs légers de ces méthodes sont un atout non négligeable.

Les structures environnantes comme les lignes à haute tension, les bâtiments à parois métalliques, les câbles enterrés ou les émetteurs radio proche, etc. provoquent des réflexions dans les signaux enregistrés ce qui peut amener des erreurs d'interprétation (mauvaise qualité ou absence du blindage des antennes).

8.5. CONCLUSION GÉNÉRALE

Les technologies utilisées par les méthodes électromagnétiques sont sophistiquées (mesure de champs magnétiques et de tensions faibles) et leur interprétation également. Mais, leur mise en œuvre est simple (dispositifs de faible dimension). De plus, elles sont très sensibles aux perturbations d'origine humaine (champs électriques générés par les réseaux électriques de basse, moyenne ou haute tension) et à la présence de roches magnétiques (basalte en particulier).

Les **méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain** sont indiquées pour la recherche de cavités conductrices par rapport à l'encaissant, d'autant mieux si ces cavités présentent des extensions verticales vers la surface. La recherche de vides n'est pas préconisé avec ces méthodes sauf si les vides sont peu profonds et volumineux. La profondeur d'investigation dépend de la fréquence de l'émetteur source et de la résistivité du terrain.

Les **méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ proche** présentent les mêmes capacités de détection qu'en champ lointain, elles mettent principalement en évidence les extensions verticales plutôt conductrices (puits vertical ennoyé). La profondeur d'investigation dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Les **méthodes électromagnétiques haute fréquence (le radar géologique)** sont à proscrire en présence d'un terrain de surface conducteur (argiles, limons...). Elles sont, par contre, indiquées pour les milieux résistants, pour la détection de vides et des cavités ennoyées ou comblés ou comblées de matériau conducteurs. La profondeur d'investigation est de l'ordre d'une vingtaine de mètres dans le meilleur des cas.

Enfin, pour toutes ces méthodes, les anomalies soupçonnées d'être des vides, comme des cavités, doivent être obligatoirement contrôlées par des sondages.

9. Méthode magnétique

9.1. PRINCIPE

La méthode magnétique mesure les variations du champ magnétique terrestre (en nanoTesla) induites par la présence de structures aimantées dans le proche sous-sol. Généralement, c'est le champ magnétique total qui est mesuré, mais il est également possible de mesurer une ou plusieurs composantes de ce champ. En magnétométrie différentielle, deux capteurs sont utilisés, ce qui donne accès à une mesure du gradient magnétique.

La prospection magnétique est basée sur l'existence de contraste de susceptibilité et d'aimantation magnétique dans le sous-sol. On distingue l'aimantation induite et l'aimantation rémanente.

Aimantation induite

Tout objet plongé dans un champ magnétique génère un nouveau champ magnétique proportionnel au premier : c'est ce qui s'appelle l'aimantation induite. Cette relation se traduit par l'égalité suivante : $B = \mu \times H$, où H est le champ magnétique initial, B est l'aimantation induite et μ est la susceptibilité magnétique du matériau.

Aimantation rémanente

En plus de cette aimantation induite, certains objets ont une aimantation dite rémanente, c'est-à-dire qu'ils produisent un champ magnétique même quand ils ne sont pas plongés dans un autre champ magnétique.

C'est le cas par exemple des objets qui ont été cuits (four, foyer, céramiques...) : en effet, lors du chauffage puis du refroidissement de l'objet, tous les atomes présents à l'intérieur s'orientent dans le sens du champ magnétique terrestre. Du coup, l'objet devient « aimanté », il peut générer un champ magnétique. C'est ce qu'on appelle l'aimantation thermorémanente.

Les anomalies mesurées intègrent donc les effets des aimantations induites et rémanentes (Figure 74).

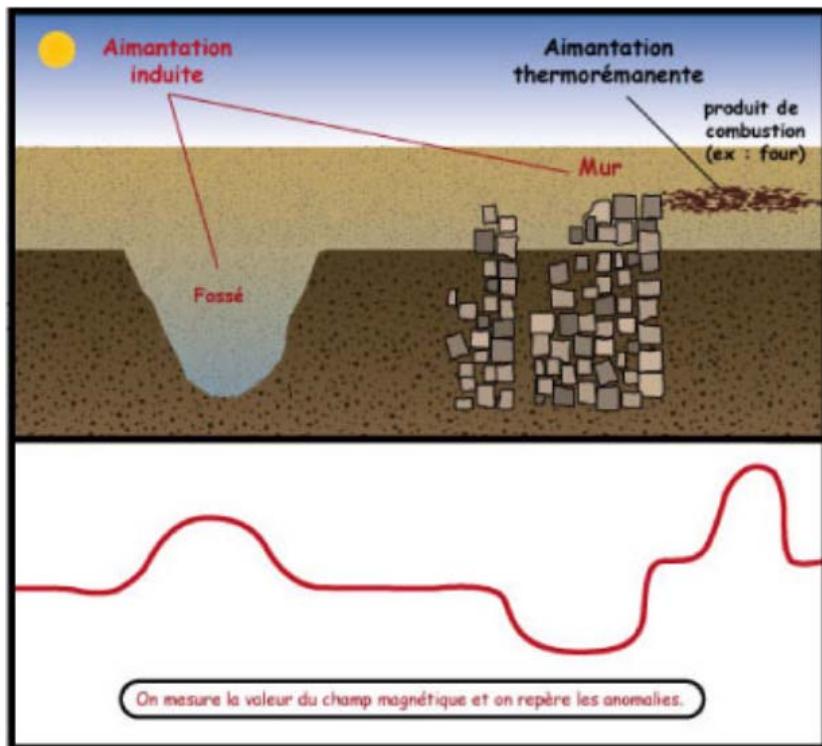


Figure 74 - Principe de la mesure magnétique.
Source : <http://www.archeo.ens.fr/spip.php?article591>.

9.2. DOMAINE D'APPLICATION

La méthode s'applique à la reconnaissance géologique structurale et lithologique (failles, roches éruptives ; la détection de toute structure présentant une armature métallique, galeries ou puits, ou présentant une aimantation thermorémanente ; à condition que le contraste de susceptibilité avec l'encaissant soit suffisant. Cette méthode est fréquemment utilisée en archéologie pour la recherche de structures enfouies.

9.3. CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

Les mesures doivent être répétées pour en contrôler la précision et la fiabilité. La variation diurne doit être enregistrée par un second magnétomètre enregistreur ou contrôlée par de fréquents retours sur une ligne de base, puis corrigée. En magnétométrie différentielle ou en gradiométrie, cette correction n'est plus nécessaire.

L'interprétation s'appuie sur la réalisation de cartes transformées (gradient vertical et réduction au pôle). La dérivée première du champ magnétique selon la verticale (gradient vertical) est une transformation dite « focalisante » qui favorise les hautes fréquences contenues dans la donnée initiale. De ce fait, elle présente les avantages suivants :

- elle augmente le pouvoir séparateur, c'est-à-dire permet de séparer des anomalies proches et coalescentes ;
- elle favorise l'effet des sources peu profondes au détriment de celui des sources profondes et des effets régionaux. La transformation en gradient vertical est généralement accompagnée d'une opération dite de « réduction au pôle » dont l'intérêt est de recentrer une partie des anomalies (celles qui sont d'origine induites) à l'aplomb des structures qui les créent. En effet, la forme et l'amplitude de l'anomalie magnétique créée par un corps aimanté donné varient selon :
 - la géométrie du corps (forme, orientation, pendage),
 - la latitude magnétique du lieu de mesure (Figure 75).

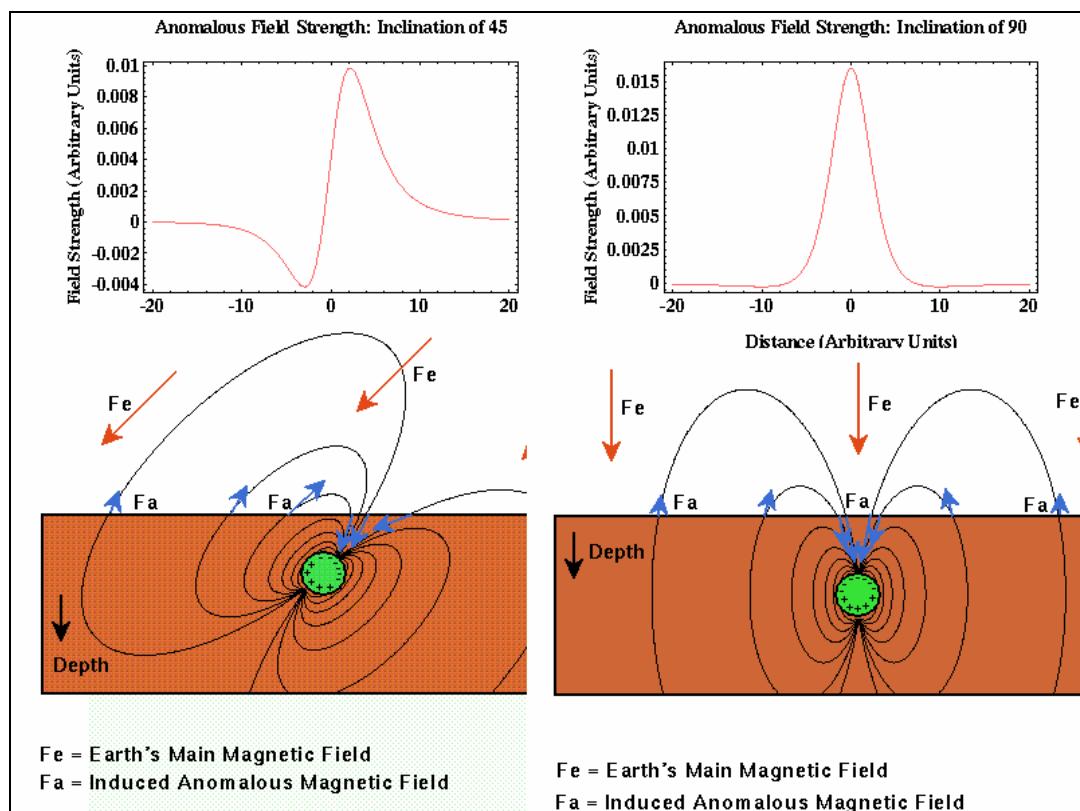


Figure 75 - Anomalie d'une sphère magnétique à 45 ° de latitude nord (à gauche) et au pôle magnétique nord (à droite).

(d'après Colorado School of Mine : http://www.mines.EDU/fs_home/tboyd/GP311).

Au pôle magnétique nord, le champ inducteur est vertical, maximal et orienté vers le bas. Les anomalies d'origine induite sont symétriques, centrées sur les structures qui les créent et ont une amplitude positive maximale. La réduction au pôle est le calcul du champ qui aurait été mesuré, au pôle magnétique nord sur les mêmes structures, aimantées verticalement (induites). Elle permet donc de localiser plus facilement les corps magnétiques responsables des anomalies et de renforcer les structures dont l'effet est atténué sur le champ d'origine du fait de leur orientation (nord-sud, en particulier).

L'emploi de la réduction au pôle présente cependant des limitations :

- l'existence de magnétisme rémanent ayant une direction et un sens différent de ceux du champ actuel n'est généralement pas prise en compte par la réduction au pôle. Il peut en résulter des anomalies réduites au pôle décentrées par rapport à la source et non symétriques. Si le champ rémanent est colinéaire, de sens opposé et plus fort que le champ actuel (aimantation inverse), l'anomalie sera bien localisée mais de signe inversé. Certains programmes permettent de prendre en compte le magnétisme rémanent lors du calcul de la réduction au pôle, mais encore faut-il connaître son orientation et son amplitude, ce qui est très rare, afin de calculer l'aimantation totale, somme vectorielle des aimantations induite et rémanente ;
- aux basses latitudes magnétiques ($< 30^\circ$), les directions nord-sud étant très amplifiées par la réduction au pôle, il y a un risque d'un renforcement exagéré par amplification d'un bruit préexistant.

9.4. LIMITATIONS

Le magnétisme ne peut être utilisé dans des zones bruitées par la présence de lignes à haute tension, de clôture et de ferraillage ou dans des contextes industriels et urbains. Les mesures ne doivent pas être réalisées durant les périodes d'orages magnétiques.

L'interprétation des cartes magnétiques est plus complexe que celle des cartes gravimétriques, les anomalies non réduites au pôle étant généralement bipolaires et n'étant pas localisées à l'aplomb de leur source.

9.5. EXEMPLES D'APPLICATION

Sur le bassin houiller de Saint-Laurs, le magnétisme n'a pas permis de détecter de puits d'accès, en particulier à cause de nombreux effets parasites liés à la présence de masses métalliques en surface (Miehé, 1991). Par ailleurs, il n'est pas sûr que ces puits comportent des structures métalliques.

Par contre, sur la concession saline d'Art-sur-Meurthe (54), le magnétisme au sol a été appliqué avec succès à la détection, sous recouvrement, d'anciens forages à tubages métalliques (Miehé, 2002). Les mesures ont été réalisées au pas de 1 m sur des profils espacés de 5 m. Les tubages métalliques se manifestent par des anomalies bipolaires, ce qui est normal compte tenu de la latitude magnétique du site. La localisation des forages, dont la position était connue de manière approximative, a été effectuée sur une carte réduite au pôle (Figure 76). Les amplitudes des anomalies varient assez fortement, en fonction de la distance du profil de mesure au forage, de la profondeur de la tête du forage et de la susceptibilité du métal.

La demi-largeur de l'anomalie magnétique, déduite de la distance entre son maximum et son minimum, donne une indication de la profondeur du tubage. Cette indication peut cependant être parfois biaisée par une possible oxydation du tubage en tête de forage. Ces phénomènes d'oxydation, à l'origine d'une forte diminution de la

susceptibilité magnétique, pourraient expliquer l'échec de détection de l'un des puits. On note localement de fortes perturbations liées à la présence d'objets métalliques et de lignes électriques.

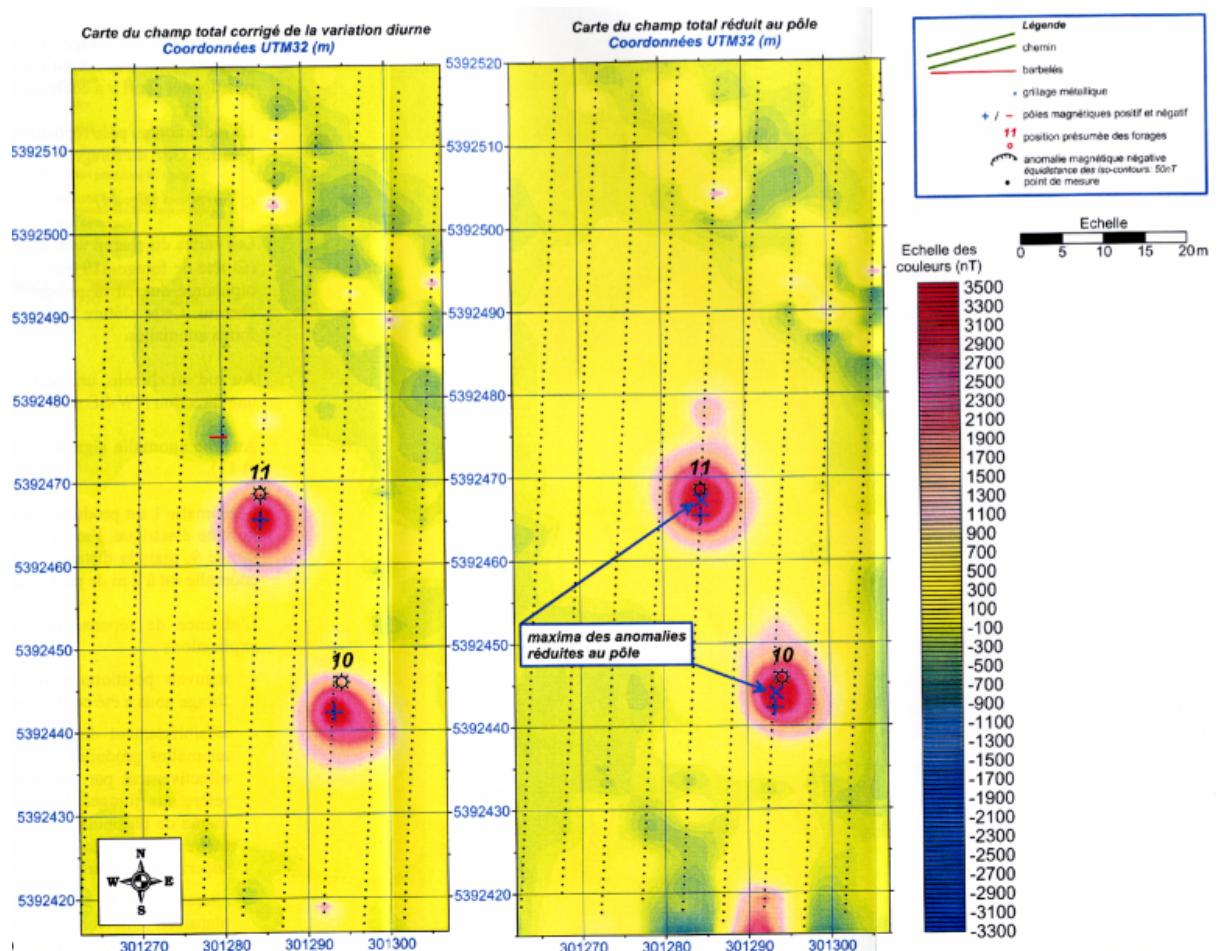


Figure 76 - Détection de tubage métallique par magnétisme (d'après Miehé, 2002).

9.6. CONCLUSION

La méthode magnétique est performante pour la détection de puits d'accès et de structures à armature métallique. Le magnétisme ne peut, cependant, être utilisé en milieu urbain, ou dans les zones bruitées par la présence d'éléments métalliques ou présentant une aimantation thermorémanente (clôtures, lignes hautes tension...).

Cette méthode est simple à mettre en œuvre, le traitement et l'interprétation des données sont peu complexes même si l'interprétation des cartes magnétiques nécessite des traitements adaptés (réduction aux pôles, filtrages).

10. Autres méthodes

10.1. LA RÉSONANCE MAGNÉTIQUE PROTONIQUE

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

Contrairement aux méthodes géophysiques, l'information déduite par un sondage de résonance magnétique protonique (RMP) est directement liée à la présence d'eau contenue dans le sous-sol.

10.1.1. Principe de la méthode

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

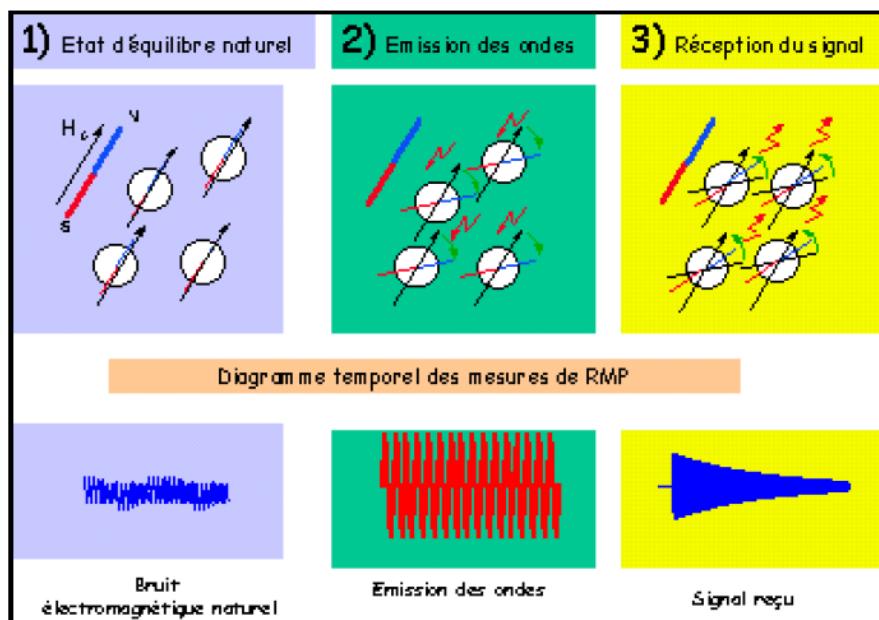


Figure 77 - Principe de mesure RMP, source RP-51426-FR.

L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre naturel et provoque une précession de ces moments autour de la direction du champ magnétique naturel. Après coupure du champ excitateur, et en retour à l'état d'équilibre initial, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons et mesuré en surface, constituant la réponse RMP. L'amplitude de ce champ est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, et donc que la teneur en eau est grande.

La fréquence spécifique à laquelle les protons sont excités est celle de l'atome d'hydrogène et assure ainsi que la méthode est sélective. La très grande majorité des noyaux d'hydrogènes présents dans le proche sous-sol provenant des molécules d'eau cela implique que la méthode RMP renseigne spécifiquement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

10.1.2. Méthodologie

Le détail de la méthodologie, de l'équipement NUMIS et de l'interprétation des données est détaillé en annexe 2.

10.1.3. Conclusion

Cette méthode a principalement été développée pour l'exploration des ressources en eau dans le sous-sol, car c'est la seule méthode géophysique qui soit directement sensible à l'eau. Mais elle peut s'avérer intéressante dans l'objectif de détecter des cavités ennoyées.

Cette méthode nécessite de réaliser des études méthodologiques afin de déterminer précisément ses réelles capacités et limites pour répondre à cette problématique. On notera néanmoins une mise en œuvre lourde et donc coûteuse.

10.2. LES MÉTHODES GÉOCHIMIQUES

Généralités

Les méthodes géochimiques envisageables pour rechercher des ouvrages débouchant au jour sont celle dites de surface et consistant à analyser certains gaz libres présents dans les sols.

L'étude de gaz tels que le radon, l'oxygène, l'azote, le dioxyde de carbone, l'hélium, permet de détecter des anomalies de fuites associées à des discontinuités structurales dans la croûte terrestre (failles, points d'émissions magmatiques et de fumerolles) et à des flux d'énergie, anciens sites d'exactions.

Parmi ces méthodes on va distinguer deux types de méthodes : celles liées à l'émission naturelle de gaz et celles liées à une injection de gaz.

Méthodes liées à l'émission naturelle de gaz (Radon, CO₂, COV)

Une étude réalisée à Pechelbronn va permettre d'illustrer ce type de méthodes pour la détection possible d'ODJ.

En 2007, à Pechelbronn, une campagne de mesures des gaz dans les sols, commandée par GEODERIS au BRGM et visant à localiser d'éventuels exutoires de gaz en surface, a permis de mettre en évidence une concordance entre les fortes anomalies de radon²² et de CO₂ et les zones de fracturation, les puits points accès aux travaux miniers, les gîtes.

Cette méthode est encore expérimentale, mais les premiers résultats laissent penser qu'un usage pour la localisation d'orifice débouchant au jour est envisageable.

Méthodes d'injection de gaz (SF₆ et Hélium)

Les méthodes d'injection de gaz sont encore théorique, elles reposent sur le principe suivant : un gaz est injecté dans une cavité via une ouverture connue, ensuite, en surface, des mesures sont effectuées afin d'observer la présence d'éventuelles anomalies relatives aux gaz injectés. Ces anomalies pouvant être dues à un orifice débouchant au jour.

Les méthodes géochimiques pouvant permettre de localiser un orifice minier débouchant au jour sont encore expérimentales ou théoriques, mais elles sont intéressantes et pourraient se révéler utiles dans le futur.

10.3. MICROTOPOGRAPHIE

La microtopographie est une méthode utilisée en archéologie pour retrouver des vestiges. Cette méthode peut être utilisée en zone boisée.

Le contexte d'utilisation est le suivant : les structures archéologiques enfouies peuvent être visibles dans le paysage actuel sous la forme de microreliefs (talus, fossés). En observant le relief du terrain, on peut donc « voir » les structures archéologiques. En pratique, ces reliefs sont souvent cachés par la végétation, et sont donc difficilement observables. Dans ce cas, on fait une microtopographie, c'est-à-dire qu'on relève à l'aide d'un tachéomètre le niveau du terrain en plusieurs points rapprochés (Figure 78). En modélisant ces points sur ordinateur, on voit apparaître le relief et les structures archéologiques (Figure 79).

²² Le radon est utilisé car c'est un gaz radioactif généré naturellement dans le sous-sol par désintégration du radium lui-même produit de la chaîne de désintégration de l'uranium, présent à l'état de traces dans la plupart des minéraux. Il se trouve donc en concentration plus ou moins importante dans la plupart des formations géologiques qui constituent le sous-sol. En fonction de la teneur en uranium des roches, des quantités plus ou moins importantes de radon sont produites, dont une partie pourra migrer vers la surface en fonction de la perméabilité du bâti rocheux. Cette migration est associée à celle d'autre gaz (CO₂...) dont l'étude conjointe est intéressante.

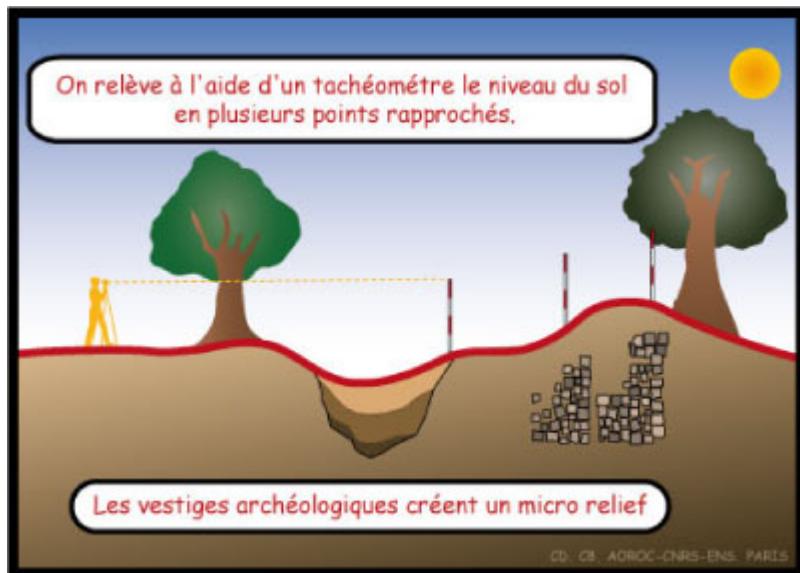


Figure 78 - Microtopographie : relevé sur le terrain.

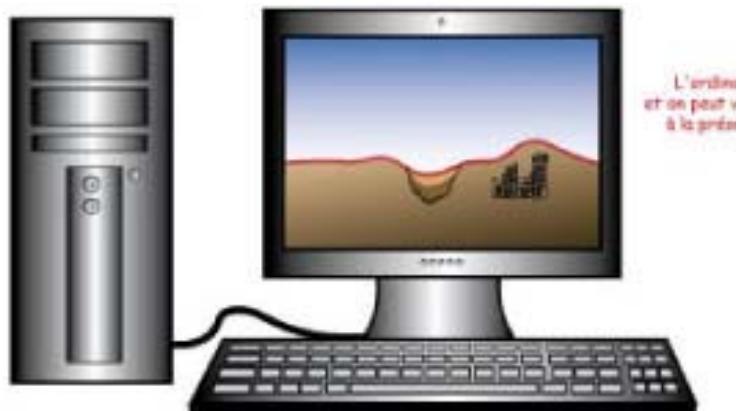


Figure 79 - Microtopographie : traitement des données.

Cette méthode pourrait être utilisée pour la détection d'orifice débouchant au jour ou pour la détection de vestiges proches de l'ODJ recherché.

10.4. CONCLUSION GÉNÉRALE

Les méthodes présentées ici sont des méthodes qui n'ont pas encore donné des résultats pour la détection d'orifices miniers débouchant au jour, mais elles sont susceptibles de donner des résultats intéressants dans le futur. C'est pourquoi ces méthodes sont citées dans ce rapport mais elles ne sont pas intégrées au logigramme d'aide au choix des méthodes de localisation.

11. Les techniques géophysiques en forage

11.1. AVANT-PROPOS

La reconnaissance géotechnique et géophysique en forage est une autre étape de la recherche d'orifice débouchant au jour. Elle va permettre, d'une part, de vérifier les indices et les résultats recueillis lors de la phase « recherche d'indices et études géologiques du terrain ». Et d'autre part, elle va permettre d'évaluer la qualité des informations apportées lors de la phase « méthodes de localisation en surface ». Les forages sont implantés sur les zones délimitées par les études précédentes.

11.2. FORAGES

Le but du forage est ici d'identifier localement la nature des structures responsables d'anomalies observées en surface. Les forages sont implantés sur les zones d'anomalies et :

- soit le forage détecte l'orifice recherché ou une cavité associée ;
- soit le forage ne permet pas de détecter l'orifice recherché, le zonage étant trop imprécis.

Généralement, les forages sont alors multipliés et effectués suivant un maillage déterminé. Ils sont poursuivis jusqu'à la localisation de l'orifice ou jusqu'à ce que l'anomalie en surface soit expliquée.

On a recours au forage destructif ou au forage carotté. Lors d'un forage destructif, les matériaux sont extraits du forage en cours d'avancement, à la boue argileuse ou à l'air comprimé. Les matériaux étant fortement remaniés, l'information déduite est dégradée. Le forage carotté consiste lui à perfore le terrain via un outil cylindrique creux qui permet d'extraire un échantillon du sol, la carotte. Les matériaux sont alors très peu remaniés, une observation directe des carottes aide à identifier la nature, les épaisseurs des matériaux. Des études plus poussées peuvent être conduites en laboratoire pour connaître certains paramètres.

Dans les deux cas, les paramètres physiques du sol sont mesurés au cours de la foration, c'est la diagraphie instantanée.

11.3. LES DIAGRAPHIES

Une diagraphie est par définition : tout enregistrement continu d'une caractéristique d'une formation géologique traversée par un sondage en fonction de la profondeur.

Elle peut être obtenue :

- pendant la réalisation d'un forage ; il s'agit d'une **diagraphie instantanée** ou **diagraphie de forage** ;
- après réalisation d'un forage ; il s'agit d'une **diagraphie différée**, généralement d'une **diagraphie géophysique** ;
- pendant la réalisation d'un essai en place comme le cpt, le mpm, le paf, le scissomètre et d'autres.

Pour les diagraphies différées, on utilise un appareil constitué d'un treuil muni d'un câble à plusieurs conducteurs, à l'extrémité duquel on fixe les différentes sondes qui effectuent les mesures, et par une valise électronique, qui traite les signaux reçus et les enregistre.

Lorsque les sondages mécaniques, carottés ou non, donnent des renseignements insuffisants, les diagraphies permettent d'identifier les roches, d'en préciser la nature, de les comparer entre elles, de préciser les profondeurs des contacts entre roches différentes et d'établir des corrélations entre les sondages effectués dans un même site. Elles permettent aussi de comparer les coupes d'anciens sondages à celles de sondages d'une nouvelle campagne.

En outre, elles permettent l'étalonnage des essais en place, grâce à des corrélations multiples et des analyses en composantes principales, et ceci à des prix bas, en permettant de localiser des accidents particuliers ou de préciser le détail des structures. Les sondages nécessaires à leur exécution ne sont pas carottés, donc d'un coût peu élevé (10 à 15 € le mètre linéaire).

Ce dernier point incite à l'utilisation des diagraphies pour des études de détail où il est nécessaire de définir une structure complexe par un grand nombre de points.

De surcroît, les diagraphies ne nécessitent qu'un matériel aisément transportable (véhicule léger) et peuvent être effectuées très rapidement (plusieurs centaines de mètres de long par jour).

11.3.1. Diagraphies de forage

Les paramètres mécaniques peuvent être enregistrés lors de l'exécution du forage. Cela donne des renseignements sur la plasticité, la compacité, la dureté, la nature du sol...

Voici certains des paramètres les plus couramment enregistrés :

- **vitesse instantanée d'avancement de l'outil** : elle est inversement proportionnelle à la dureté de la roche, ou à la compacité ou consistance des sols. Les zones fissurées, les vides, les poches sableuses, produisent un avancement plus rapide que les autres formations. La vitesse instantanée varie dans des proportions considérables. En forage de calcaires karstiques par exemple, elle peut passer de 10 à plus de 800 m/h. Dans une formation de granite, le passage de 10 à 15 m/h aura cependant une signification lithologique précise. La sensibilité de

l'enregistrement doit donc être adaptée à la formation traversée ou couvrir une gamme de 1 à 1 000 ;

Un exemple de forage avec enregistrement de paramètres est illustré en Figure 80. On voit que la vitesse d'avancement augmente lorsque le forage rencontre un vide et que le couple de rotation diminue.

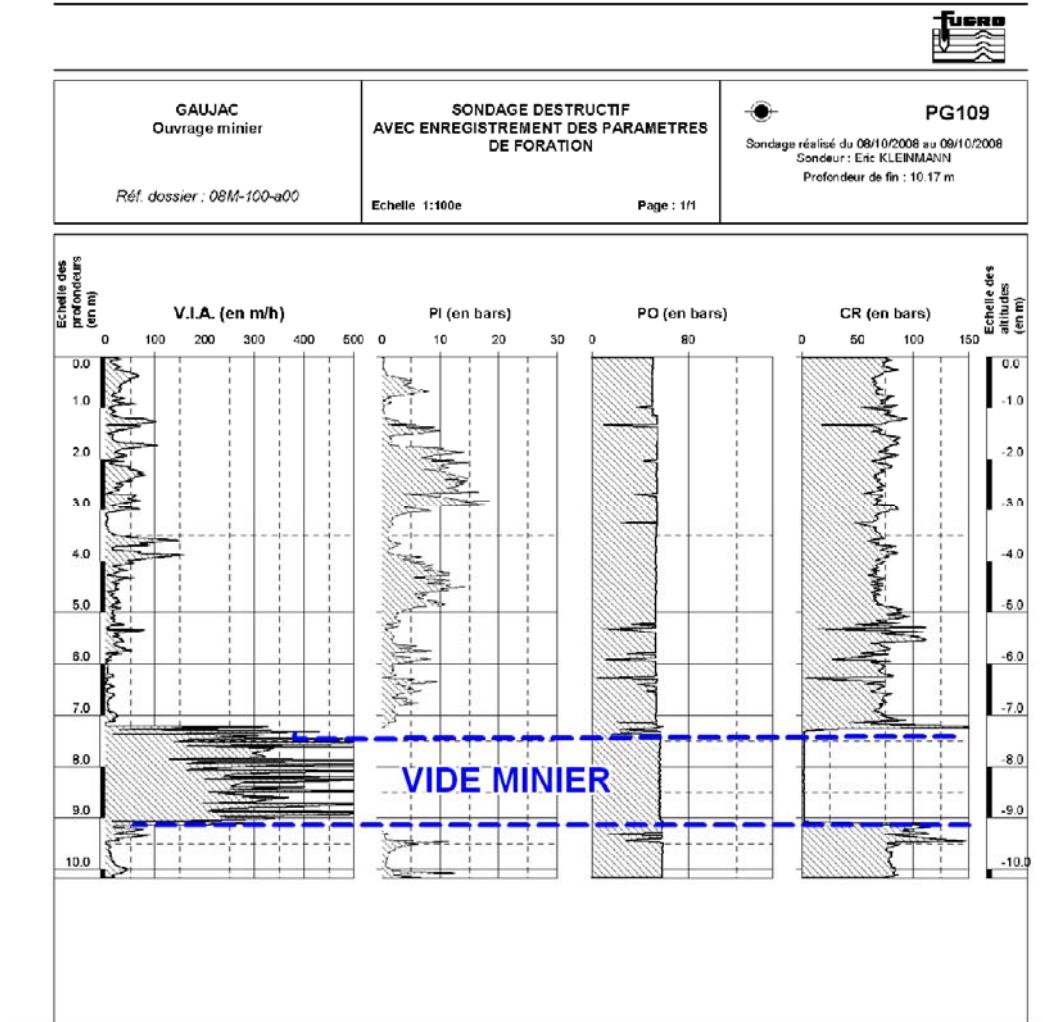


Figure 80 - Exemple de détection de vide minier sur une diagraphie instantanée (V.I.A. Vitesse instantanée d'avancement, P.I. Pression d'injection, P.O. Pression sur l'outil, C.R. couple rotation) - Campagne de reconnaissance d'une concession minière (GEODERIS- BRGM).

11.3.2. Diographies géophysiques

On utilise généralement dans le cadre des diographies géophysiques les diographies électriques, radioactives et sismiques.

Leurs principes sont exactement les mêmes que pour les méthodes géophysiques de reconnaissance standard (voir les chapitres précédents traitants des méthodes géophysiques).

Le plus gros problème que l'on peut rencontrer en diagraphie géophysique se porte sur le tubage du forage beaucoup de méthodes sont très strictes en ce qui concerne les moyens à utiliser.

D'autre part, l'utilisation des sources radioactives artificielles tend à diminuer, au vu des risques inhérents à leur manipulation et des règles très strictes visant leur emploi.

Les principales informations données en diagraphie géophysique sont :

- la nature lithologique des formations (argiles, sables, grès, calcaires...) données permettant d'identifier les terrains et de déterminer les épaisseurs et l'extension latérale des différentes couches ;
- la mesure relative de grandeurs physiques telles que la porosité, la densité, la compacité, la fracturation, etc ;
- moyennant un étalonnage précis de l'outil par échantillonnages prélevés, il est possible de traduire ces valeurs mesurées en données quantitatives.

11.4. LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES EN FORAGES

Comme pour les diagraphies, les techniques de géophysique de forage sont mises en œuvre à partir d'un forage.

L'objectif est très différent : les techniques géophysiques de forage ont pour but d'augmenter le rayon d'investigation des forages, d'obtenir des informations sur le sous-sol à des profondeurs plus grandes qu'avec les méthodes de surface et avec une meilleure résolution. Il s'agit d'une exploration de terrain en volume et non pas ponctuelle comme en diagraphies où la résolution est plus fine.

Les méthodes géophysiques en forage peuvent se réaliser en un seul forage, entre deux forages, ou bien entre un ou deux forages et la surface. Toutes les méthodes géophysiques s'appliquent. Elles permettent d'obtenir une image du sous-sol appelée tomographie.

Le principe physique des méthodes est déjà décrit pour les méthodes de surfaces. Cette section présente les plus adaptées à la détection d'orifice ou des cavités souterraines. Le choix des méthodes présentées repose sur le travail de synthèse réalisé par (Lagabrielle, 2007), résumé dans la figure 81.

Les méthodes géophysiques en forage sont théoriquement un bon outil de localisation de cavités, **mais dans la pratique, elles se révèlent coûteuses pour le moment et des séries de forages en aveugle leurs sont préférées pour retrouver les objets recherchés.** C'est pourquoi ces méthodes ne sont pas intégrées dans le logigramme d'aide au choix.

Techniques	Cavité vide	Cavité pleine d'eau ou d'argile	Remarques
Tomographie sismique (vitesse des ondes)	non	non	Dans les deux cas, la cavité correspond à une hétérogénéité où la vitesse de propagation des ondes mécaniques est plus faible que dans l'encaissant. Une hétérogénéité de même taille constituée d'un matériau dans lequel la vitesse est notamment plus grande que dans l'encaissant serait détectée. De même, si l'on observe l'atténuation des ondes sismiques (mais ceci est délicat), les performances sont meilleures.
Tomographie radar (vitesse des ondes)	oui	non	Encaissant électriquement résistant. La cavité vide correspond à une hétérogénéité dans laquelle les vitesses des ondes électromagnétiques sont plus grandes que dans l'encaissant ; une cavité remplie d'argile correspond à une hétérogénéité dans laquelle la vitesse est plus faible.
Tomographie électromagnétique (propagation atténuation des ondes)	oui	oui	Encaissant électriquement résistant
Tomographie électromagnétique (basse fréquence)	non	oui	Une cavité vide est une hétérogénéité électriquement plus résistante que l'encaissant ; une cavité remplie d'eau ou d'argile est plus conductrice.
Radar de forage en réflexion	oui	oui	Encaissant électriquement résistant
Méthodes électriques de forage	non	oui	Une cavité vide est une hétérogénéité électriquement plus résistante que l'encaissant ; une cavité remplie d'eau ou d'argile est plus conductrice.

Figure 81 - Performances de quelques techniques géophysiques entre deux forages distants de 10 m, pour la détection d'une petite cavité sphérique de 2 m de diamètre, vide ou remplie d'eau ou d'argile (Lagabrielle, 2007).

12. Logigramme des méthodes de localisation d'orifices miniers débouchant au jour

Les précédents chapitres ont permis de présenter différentes méthodes qui peuvent être utilisées pour localiser un orifice minier débouchant au jour avec leurs limites. On va maintenant présenter et discuter un logigramme possible d'aide au choix des méthodes utilisables pour retrouver un ODJ, parmi celles présentées.

12.1. PRÉSENTATION DU LOGIGRAMME

Étant donné les différents critères et informations nécessaires pour choisir les méthodes utilisables pour localiser un ODJ, le logigramme est proposé sous forme de formulaire de recherche multicritère (Figure 82).

Logigramme d'aide au choix des méthodes de localisation d'un ODJ

Zonage de départ <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; display: inline-block;"> <input type="checkbox"/> > 200 mètres <input type="checkbox"/> entre 50 et 200 <input type="checkbox"/> < 50 <input type="checkbox"/> inconnu </div>	Milieu <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; display: inline-block;"> <input checked="" type="checkbox"/> urbain <input type="checkbox"/> péri-urbain <input type="checkbox"/> rural <input type="checkbox"/> rural boisé <input type="checkbox"/> rural dégagé </div>	Méthodes: <div style="border: 1px solid #ccc; height: 150px; margin-bottom: 10px;"></div> Utilisation: <div style="border: 1px solid #ccc; height: 150px;"></div>
Environnement souterrain <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; display: inline-block;"> <input type="checkbox"/> ODJ isolé <input type="checkbox"/> Travaux souterrains proches <input type="checkbox"/> Niveaux exploités à moins de 25m <input type="checkbox"/> Niveaux exploités audelà de 25m </div>		Etat supposé de l'ODJ <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; display: inline-block;"> <input type="checkbox"/> Vide <input type="checkbox"/> Noyé <input type="checkbox"/> Remblayé <input type="checkbox"/> Obstrué <input type="checkbox"/> Structure métallique </div>
Code utilisation: 4: Méthode conseillée 3: Méthode utilisable 1: Méthode utilisable sous certaines conditions 0: Manque d'information		

Figure 82 - Logigramme d'aide au choix des méthodes de localisation d'un ODJ.

Définition des critères de choix

- **Zonage de départ**

Le critère de zonage de départ est défini la première fois à partir des informations recueillies, avant l'utilisation d'une méthode de localisation. Ensuite, ce zonage peut être défini au fur et à mesure des informations obtenues par les méthodes de localisation testées.

Si ce zonage est de l'ordre de la centaine de mètres, les méthodes de télédétection et le géoréférencement seront conseillés ou contraire si le zonage est de l'ordre de la vingtaine de mètres les méthodes géophysiques de surface pourront être utilisées.

Le tableau suivant indique en fonction du zonage considéré un code d'utilisation des différentes méthodes (4 signifie méthode adaptée, 3 : méthode pouvant convenir, 2 : le critère n'intervient pas sur le choix de la méthode, 1 : méthode utilisable sous certaine conditions, 0 : manque d'information pour orienter le choix, -1 : méthode déconseillée).

Méthode	Zonage			
	Indéterminé	> 200m	de 200 m à 50 m	< 50 m
Microgravimétrie	1	1	4	4
Sismique réflexion haute résolution	3	3	3	4
Sismique réfraction	3	3	3	3
SASW	3	3	3	3
PS	1	1	3	4
Panneau électrique	1	1	3	4
VLF RMT	3	4	4	4
Slingram	3	4	4	4
Radar géologique	3	4	4	4
Magnétique	1	1	3	3
Thermique infrarouge	4	4	4	4
Géoréférencement	4	4	4	3
Photo-interprétation	4	4	4	4

Tableau 1 - Utilisation des méthodes en fonction des zonages.

- **Milieu probable de l'ODJ**

Le critère le plus discriminant au vu du choix des méthodes est le milieu où l'ODJ est susceptible de se trouver : milieu urbain, périurbain, rural, rural boisé... Les méthodes présentées n'étant pas utilisables dans tous les milieux, connaître le type de milieu est une nécessité pour conseiller des méthodes de localisation adaptée.

Le tableau suivant indique en fonction du milieu considéré un code d'utilisation des différentes méthodes (4 signifie méthode adaptée, 3 : méthode pouvant convenir, 1 :

méthode utilisable sous certaine conditions, 0 : manque d'information pour orienter le choix, -1 : méthode déconseillée).

Milieu						
Méthode	Indéterminé	Urbain	Périurbain	Rural	Rural boisé	Rural dégagé
Microgravimétrie	1	1	4	4	4	4
Sismique réflexion haute résolution	0	-1	4	4	4	4
Sismique réfraction	0	-1	4	4	4	4
SASW	0	1	4	4	4	4
PS	0	-1	4	4	0	4
Panneau électrique	0	-1	1	4	1	4
VLF RMT	0	-1	1	1	1	4
Slingram	0	1	1	1	1	4
Radar géologique	1	4	4	4	0	4
Magnétique	0	-1	1	4	1	4
Thermique infrarouge	0	-1	1	1	-1	4
Géoréférencement	4	4	4	4	4	4
Photo-interprétation	1	1	1	1	-1	4

Tableau 2 - Utilisation des méthodes en fonction des milieux.

Le type de milieu est le facteur discriminant principal de ce logigramme, les prochains critères permettront de faire un choix parmi les méthodes utilisables après que le type de milieu ait été précisé. Par exemple, pour un ODJ en milieu urbain, les méthodes conseillées seront : le radar géologique et le géoréférencement, les méthodes utilisables sous certaines conditions seront : la microgravimétrie, la SASW et le SLINGRAM.

• Autres critères de choix des méthodes

Le critère « milieu » a permis de faire un premier tri parmi de nombreuses méthodes pouvant localiser un ODJ, les critères suivants vont plutôt orienter le choix vers une méthode ou un type de méthodes :

- **état supposé de l'ODJ** (Tableau 3), c'est-à-dire vide, noyé, remblayé, bouché, et/ou possédant une structure métallique. Ainsi, la méthode magnétique sera conseillée si une structure métallique est supposée. Pour ce critère plusieurs choix sont possibles, un ODJ peut être obstrué, maçonné et vide ;
- **environnement souterrain de l'ODJ** (Tableau 4) : trois choix sont proposés : isolé, travaux souterrains proches, niveaux exploités à moins de 50 m et niveaux exploités au-delà de 50 m. Ce critère se base sur les seuils de détectabilité d'une cavité des différentes méthodes.

État ODJ							
Méthode	Indéterminé	Vide	Noyé	Remblayé	Obstrué	Maçonné	Structure métallique
Microgravimétrie	1	4	3	1	1	1	1
Sismique réflexion haute résolution	0	4	3	-1	1	1	0
Sismique réfraction	0	4	3	-1	1	4	0
SASW	0	4	3	-1	1	1	4
PS	1	3	4	1	4	3	3
Panneau électrique	1	3	4	1	1	3	3
VLF RMT	0	4	4	1	4	1	-1
Slingram	0	4	4	1	1	3	-1
Radar géologique	0	4	4	3	4	3	3
Magnétique	0	1	3	3	3	3	4
Thermique infrarouge	3	4	3	3	4	1	1
Géoréférencement	2	2	2	2	2	2	2
Photo-interprétation	2	2	2	2	2	2	2

Tableau 3 - Utilisation des méthodes en fonction de l'état de l'ODJ.

Environnement souterrain					
Méthode	Indéterminé	Isolé	Travaux proches	Niveaux exploités < 25 m	Niveaux exploités > 25 m
Microgravimétrie	3	1	4	4	4
Sismique réflexion haute résolution	0	-1	3	3	3
Sismique réfraction	0	-1	1	1	3
SASW	0	1	3	3	-1
PS	2	2	2	2	2
Panneau électrique	2	2	2	2	2
VLF RMT	2	2	2	2	2
Slingram	2	2	2	2	2
Radar géologique	2	2	2	2	2
Magnétique	2	2	2	2	2
Thermique infrarouge	4	4	2	2	2
Géoréférencement	2	2	2	2	2
Photo-interprétation	2	2	2	2	2

Tableau 4 - Utilisation des méthodes en fonction de l'environnement souterrain proche de l'ODJ.

12.2. UTILISATION ET FONCTIONNEMENT DU LOGIGRAMME

Ce logigramme est à utiliser comme un outil d'aide au choix de méthode de localisation d'un ODJ durant toutes les phases de localisation. Au fur et à mesure que de nouvelles informations sont recueillies, le logigramme peut être réutilisé pour conseiller différentes méthodes au vu des nouvelles informations.

Lors de la première utilisation, il est conseillé de suivre l'ordre de définition de critères. Les résultats sont présentés sous la forme d'une liste de méthodes auxquelles est associé un code d'utilisation (Figure 83). Les méthodes sont classées des méthodes conseillées aux méthodes citées mais pour lesquelles on ne peut se prononcer faute d'information.

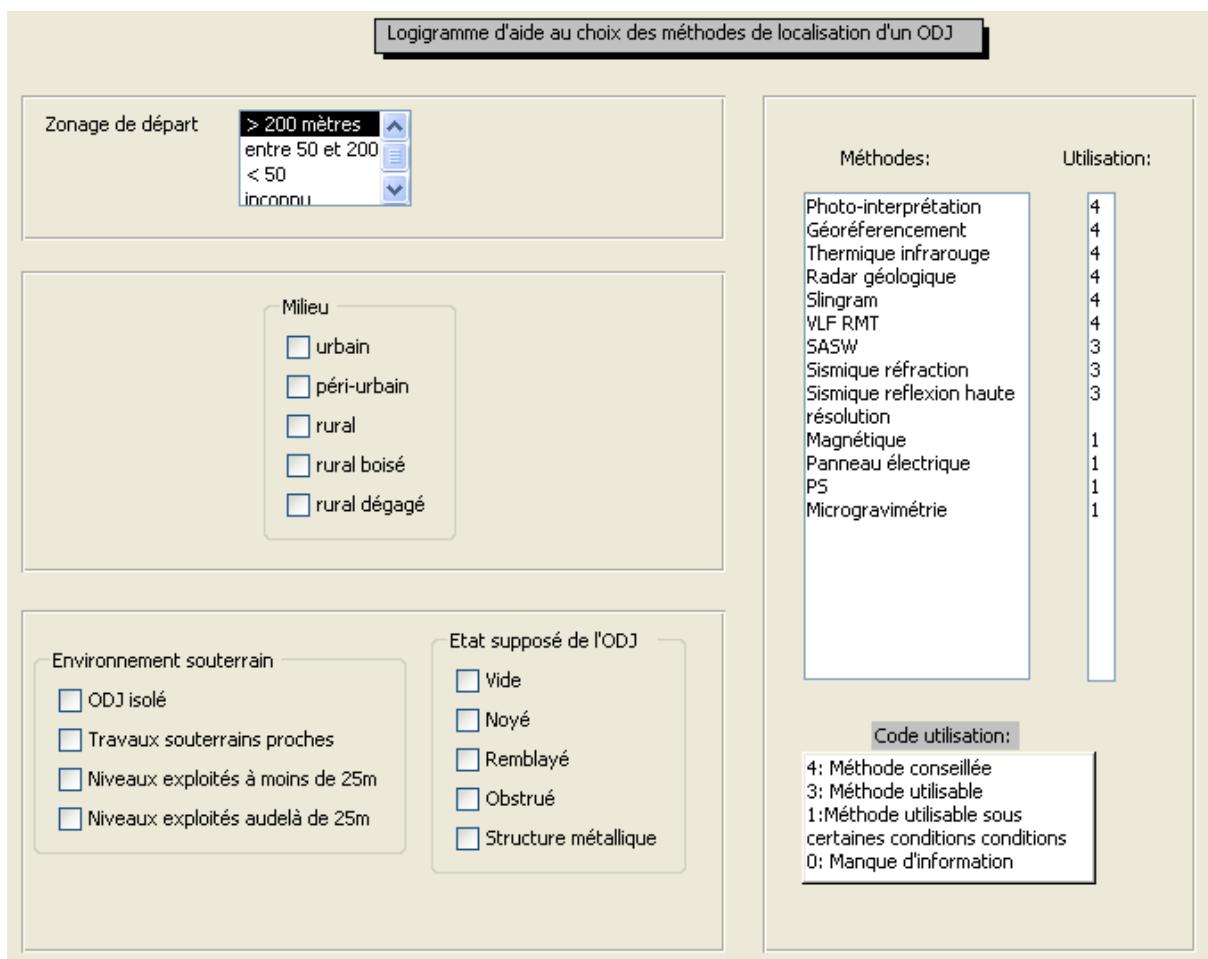


Figure 83 - Cas d'un ODJ dont la localisation est estimée à 200 mètres près.

Quand plusieurs critères interviennent (Figure 84), les codes d'utilisation sont corrélés entre eux, seuls ceux supérieurs ou égal à 0 sont conservés (Figure 85), puis ils sont classés pour donner une classification de méthodes des plus adaptés aux critères.

Méthode	de 200 m à 50m	Urbain	Structure métallique
Radar géologique	4	4	3
Géoréferencement	4	4	2
Photo-interprétation	4	1	2
Microgravimétrie	4	1	1
Slingram	4	1	-1
Thermique infrarouge	4	-1	1
VLF RMT	4	-1	-1
SASW	3	1	4
Magnétique	3	-1	4
Panneau électrique	3	-1	3
PS	3	-1	3
Sismique réfraction	3	-1	0
Sismique reflexion haute résolution	3	-1	0

Figure 84 - Codes d'utilisation des méthodes pour un ODJ urbain ayant une structure métallique avec un zonage de 200 à 50 m.

Méthode	de 200 m à 50m	Urbain	Structure métallique
Radar géologique	4	4	3
Géoréferencement	4	4	2
Photo-interprétation	4	1	2
Microgravimétrie	4	1	1
SASW	3	1	4

Figure 85 - Codes d'utilisation des méthodes > ou = à 1 pour un ODJ urbain ayant une structure métallique avec un zonage de 200 à 50 m.

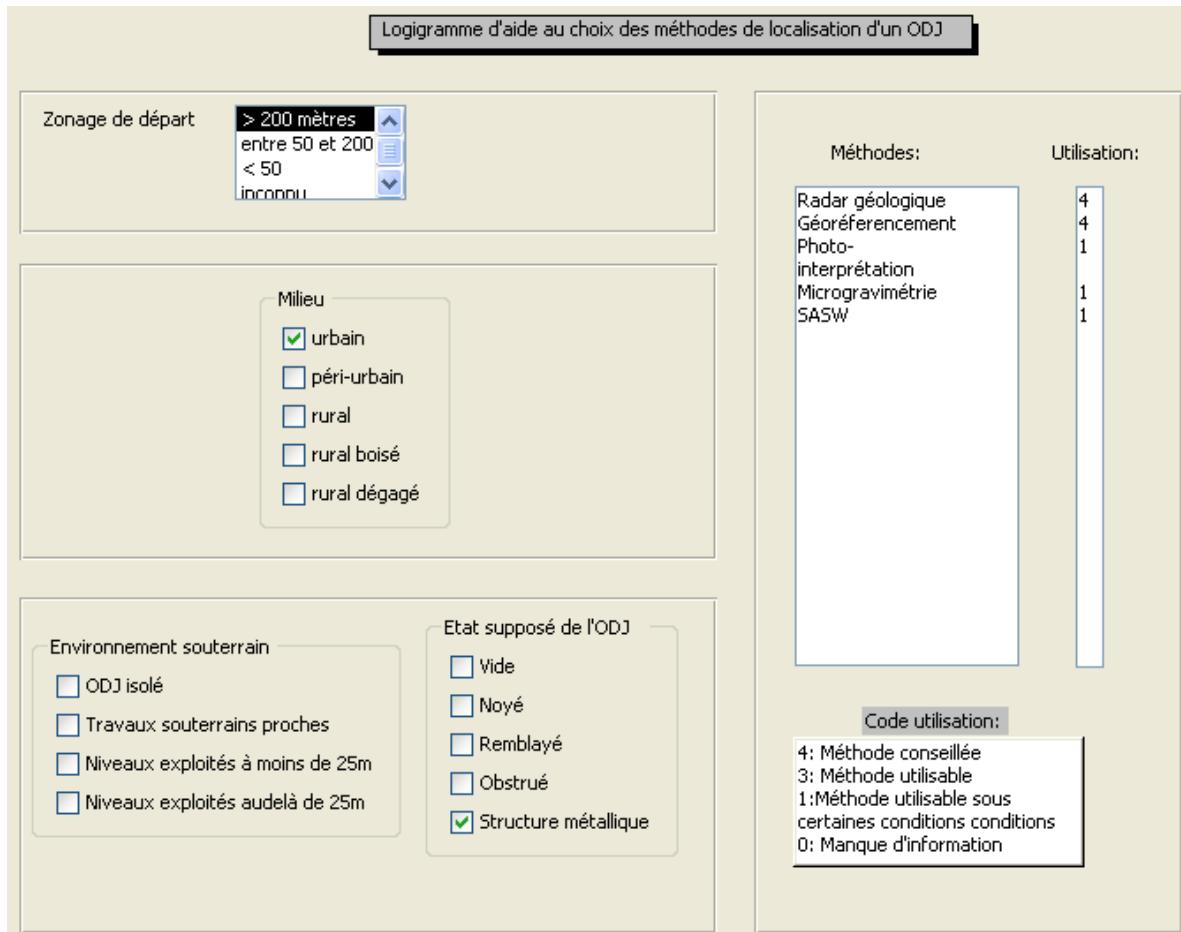


Figure 86 - Cas d'un ODJ urbain ayant une structure métallique avec un zonage de 200 à 50 m localisé à 50 m près en milieu rural.

12.3. CONCLUSION

Le logigramme ici présenté est établi pour des critères assez généraux et pour les méthodes ayant déjà été utilisées pour la détection d'ODJ ou de cavité. De nombreux autres critères peuvent être ajoutés pour compléter et affiner ce logigramme :

- méthodes de terrain privilégiées, rendement des méthodes ;
- nature de l'encaissant, configuration géologique, résistivité des sols ;
- limite de budget ;
- dimension limite de l'ODJ, présence d'autres ODJ à proximité...

La possibilité de rendre de manière ponctuelle un critère plus discriminant que les autres est aussi à envisager. Une version plus détaillée, un travail d'étude plus poussé.

13. Références

- Aubert M.**, (1997) - Application de la mesure des potentiels électriques de polarisation spontanée (PS) à la reconnaissance des formations superficielles. Géophysique des sols et des formations superficielles.
- Aubert M.** (2003) - La méthode de polarisation spontanée en hydrogéologie des terrains volcaniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol.16, n° 2, 219-235.
- Baltassat J.M., Bitri A., Grandjean G.** (1999) - Tests de sismique réflexion haute résolution appliquée à la caractérisation de l'état des anciennes exploitations de fer de Lorraine à Tiercelet et Moulaine (Moselle). BRGM/RR-40923-FR.
- Baltassat J.M., Bitri A.** (2002) - Test de sismique réflexion haute-résolution appliquée à la caractérisation de l'état des anciennes exploitations de fer de Lorraine à Tiercelet et Moulaine (Moselle). Re-éxamen et re-traitement des données. BRGM/RP-51611-FR.
- Baltassat J.M., Dupont F., Mathieu F.** (19xx) - Concession des mines de houilles de Fiennes (Nord – Pas-de-Calais). Méthodologie géophysique pour la détection d'anciens puits de mines. R 39997.
- Barchi P.** (2003) - Concession de Fiennes (Pas-de-Calais). Reconnaissance mécanique d'anomalies géophysiques pour localisation d'anciens puits de mines. Rapport d'avancement. BRGM/RP-52232-FR.
- Baubron J.C., Bourgeois B., Feuga B. et al.** (2004) - Étude de l'aléa lié à la dissolution du sel dans le bassin de Dieuze - Château-Salins et incidences sur les aquifères et sur les mouvements de la surface du sol. Rapport final. BRGM/RP-52536-FR.
- Benot R.** (2005) - Test de détection de puits de marnière en Normandie. LCPC.
- Bernardie S.** (2000) - Interprétation des images SASW en termes de comportement. Application dans le bassin ferrifère lorrain : cas de Moyeuvre-Grande. Rapport d'avancement. BRGM/RP-50219-FR.
- Bernardie S., Grandjean G.** (2001) - Résultats des reconnaissances et essais géotechniques, et de l'imagerie SASW, réalisés rue Saint-Maurice à Moyeuvre-Grande (57). Rapport de synthèse. BRGM/RP-51180-FR.
- Bichara M., Erling J.C., Lakshmanan J.** (1981) - Techniques de mesure et d'interprétation minimisant les erreurs en microgravimétrie. *Geophysical prospecting*, 29, p. 782-789.
- Bitri A., Perrin J., Beauche A.** (1996) - La sismique réflexion haute résolution : principes et applications. BRGM/RR-39220-FR.

Bourgeois B., Lebert F., Le Jeune F. (2000) - Recherche de cavité de dissolution dans le sel. RC-50143.

BRGM (1997) - Recherche par microgravimétrie d'un ancien puits de mine sur la concession de Montebras (Creuse). R 39387.

BRGM (1997) - Recherche par radar géologique de galeries à Montebras (Creuse). R39409.

Casten U., Fajkiewicz Z. (1993) - Induced gravity anomalies and rock-burst risk in coal mines: a case history. *Geophysical prospecting*, 41, p. 1-13.

Chambers J., Wilkinson P., Weller A., Meldrum P., al. - Mineshaft imaging using surface and crosshole 3D electrical resistivity tomography: A case history from the East Pennine Coalfield, UK - *Journal of applied geophysics* n° 62 (2007) p. 324–337.

Charboneyre P., Richalet G. (1992) - Recherche de cavités sur le site de la source « Vernière » à Les Aires (Hérault). Rapport BRGM R 36254.

Chouteau M. (2001) - Géophysique appliquée. Notes de Cours. École polytechnique de Montréal.

Debeglia N., Bitri A., Grandjean G. (xxxx) - Détection de cavités par couplage de l'imagerie sismique en ondes de surface et de la microgravimétrie. - Évaluation et gestion des Risques liés aux carrières souterraines abandonnées. Vol. 58, n° 1, p. 13-28.

Debeglia N., Dupont F. (2000) - Métrologie microgravimétrique pour l'aménagement. Rapport BRGM/RP-50256.

Debeglia N., Dupont F. (2002) - Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations. *Journal of Applied Geophysics*, 50, vol. 4, p. 435-454.

Debeglia N., Grandjean G. (2005) - Expériences récentes du BRGM en matière de géophysique applicables à la détection de cavités souterraines d'origine minière et à l'estimation de l'aléa associé. BRGM/RP-54184-FR.

Debeglia N. et Lebert F. (2004) - Détection de cavités par géophysique Bilan des expériences 1990-2002. Rapport BRGM/RP-52898.

Donnelly L., McCann D. (2000) - The location of abandoned mine workings using thermal techniques - *Engineering Geology* n° 57 (2000) p. 39–52.

Dupont F. (1991) - Levé microgravimétrique sur la future zone industrielle d'Autun (Saône-et-Loire). Rapport BRGM R 34 GPH SGN 91.

Dupont F., Miehé J.M. (1998) - Reconnaissance par microgravimétrie à Moyeuvre-Grande (Moselle). Rapport BRGM R 40413.

Dupont F., Lebert F., Le Jeune F., Miehé J.M. (1999) - Recherche d'anciens puits de mines par microgravimétrie et polarisation spontanée à Bouchain (Nord). Rapport BRGM R 40717.

Dupont F., Le Jeune F. (2000) - Étude par microgravimétrie sur d'anciens travaux miniers à Cordesse (71). BRGM/RP-50163-FR.

Dupont F., Le Jeune F. (2000) - Détection de galeries et zones décomprimées sous l'emprise d'une route. RP-50163, RP-51280-FR.

Dupont F., Le Jeune F., Debeglia N. (2003) - Reconnaissance microgravimétrique du parking du zoo – commune de Jurques (Calvados). BRGM/RP-52115-FR.

Dupont F., Debeglia N. (2004) - Reconnaissance microgravimétrique du parking du zoo de Jurques (Calvados) : 2^e phase. BRGM/RP-53301-FR.

Equilbey E. (2008) - Exploitations de lignite des concessions de Barjac, de Cabiac et d'Avejan. Phase informative et cartographie des aléas miniers. BRGM/RP-56740-FR.

Feraud J., Nachbaur A., Vadala P. (2007) - Concession de Pb-Zn-Ag de Pont-péan
Carte informative et carte d'aléas de mouvements de terrain. BRGM/RP-55683-FR.

Giroux B. (2007) - Notes de Cours Techniques géophysiques de haute résolution – Méthodes électromagnétiques. École polytechnique de Montréal.

Grandjean et al. (2001) - Test méthodologique de caractérisation des sols par SASW, en présence de cavités souterraines. RP-50209-FR.

Grandjean G. (1998) - Apports du radar géologique à la détection des cavités superficielles. Applications à la détection d'une bouche d'extraction comblée dans la cour de l'école René Thinat, Orléans, France. Note projet de recherche BRGM.

Grandjean G., Sénéchal G. et Bitri A. (1999) - Détection de cavités souterraines par méthodes sismiques. Commune d'Annet-sur-Marne. Note technique ARN/MSO n° 99.15.

Grandjean G., Dupont F. (2005) - Prospection par sondages radar pour la détection de galeries à Moyeuvre-Grande (54). Rapport final. BRGM/RP-53695-FR.

Grandjean G., Bitri A., Mathieu F., Richalet G. (2005) - Tomographie sismique entre forages pour la caractérisation des anciennes exploitations ferrifères de Lorraine. BRGM/RP-53696-FR.

Holub P., Dumitrescu T. (1994) - Détection des cavités à l'aide de mesures électriques et du géoradar dans une galerie d'aménée d'eau. *Journal of Applied Geophysics* Volume 31, Issues 1-4, February 1994, p. 185-195. Geophysics and Environment.

LCPC (2004) - Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques. Collection Guide technique.

LRPC de Rouen (2009) - Connaissance et prévention des risques : Slingram.

Lebert F. (2007) - Hayange, mines de fer de la cote de Fesche recherche de galeries par Géoradar pour GEODERIS. BRGM/RP-55307-FR.

Lebert F., Grandjean G., Bitri A. (2003) - Gisos 2002/2003 – Site pilote de Tressange. Expériences de SASW menées par le BRGM. Rapport final. BRGM/RP-52597-FR.

Le Jeune F. (1994) - Reconnaissance par gravimétrie d'anciennes galeries minières sur le site de Montgoiry à Baraize (Indre). Rapport BRGM 94 SGN.

Le Jeune F., Miehé J.M. (1994) - Étude par microgravimétrie sur le site de Gaujac (Gard). Rapport BRGM R 38077.

Le Jeune F., Mathieu F. (1998) - Reconnaissance par microgravimétrie sur l'emprise des futurs locaux du Conseil général de l'Orne, Alençon (61). Rapport BRGM N 2745.

Le Jeune F., Miehé J.M. (1999) - Étude par microgravimétrie sur d'anciens travaux miniers à la Chapelle-sous-Dun (71). BRGM R40570.

Leparoux D., Grandjean G., Bitri A., Debeglia N., Le Jeune F. (1999) - Détection de cavités souterraines par couplage de mesures sismiques d'ondes de Rayleigh et gravimétriques. - GEOFCAN 1999 - Géophysique des sols et des formations superficielles 2^e - BRGM-Orléans France - 21-22/09/1999.

Mari J.-L. (1998) - Géophysique de gisement et génie civil – Editions TECHNIP, 468 p.

Michel K., Brach M., Recoché G. (2005) - Mise en sécurité de l'ancienne exploitation souterraine de Pechelbronn. Campagne de mesures radon dans les sols du secteur Merkwiller - Pechelbronn. Rapport final. BRGM/RP-54046-FR.

Michel K., Brach M., Recoché G (2005) - Mise en sécurité de l'ancienne exploitation souterraine de Pechelbronn. Campagne de mesures radon dans les sols du secteur Merkwiller - Pechelbronn. Rapport de mission. BRGM/RP-54113-FR.

Miehé J.M. (1991) - Recherche d'anciens puits de mines par géophysique sur l'ancienne exploitation du bassin houiller de Saint-Laurs dans les Deux-Sèvres. Mars et juin 1991. Rapport BRGM R32908 GPH SGN 91.

Miehé J.M. (2002) - Détection d'une cavité remplie de saumure par imagerie électrique et recherche d'anciens forages par magnétisme sur la concession saline d'Art-sur-Meurthe (54). BRGM/RP-51589-FR.

Miehé J.M., Feuga B., Vachette C. (2004) - Détection d'une cavité remplie de saumure par imagerie électrique. *Revue française de géotechnique*, 106, 7, p. 23-29.

- Neumann R.** (1967) - La gravimétrie de précision, application à la recherche de cavités. *Geophysical prospecting*, 15, 1, p. 116-134.
- Ogilvy R.D., Cuadra A., Jackson P.D. et Monte J.L.** (1991) - Detection of air-filled drainage gallery by the VLF resistivity method. *Geophysical prospecting*, 39, p. 845-859.
- Pothérat P.** (2004) - L'opération de recherche « Carrières souterraines abandonnées » : Localisation, diagnostic de stabilité, gestion : Rapport de synthèse - LRPC de Lyon (2004).
- Rybakov M., Goldshmidt V., Fleischer L. and Rotstein Y.** (2001) - Cave detection and 4-D monitoring: a microgravity case history near the Dead Sea. *The Leading Edge*, 20, 8: p. 896-900.
- Tabbagh A.** (1977) - Difficultés rencontrées dans la mise en oeuvre de la prospection thermique aéroportée. Revue d'Archéométrie. Bulletin de Liaison du Groupe des Méthodes physiques et Chimiques de l'Archéologie de Rennes n° 1, p. 91-104.
- Thierry P., Debeglian N., Bitri A.** (xxxx) - Geophysical and geological characterization of karst hazards in urban environments: application to Orléans (France). - *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* Vol. 64, p. 139-150.
- Vincent M., Mathon C.** (2000) - Commune de la Chapelle-sous-Dun (71), lieu-dit « La Mine ». Contrôle d'anomalies gravimétriques par sondages. BRGM/RP-50601-FR.
- Vadala P., Equilbey E.** (2008) - Mines de lignite et de phosphate sur la concession de Saint-Julien de Peyrolas Phase informative et cartographie des aléas mouvements de terrain. BRGM/RP-56754-FR.
- Vadala P., Nachbaur A.** (2008) - Mine de fer sur les concessions du Pavillon d'Angers et de Saint-Barthélémy. Phase informative et cartographie des aléas mouvements de terrain. BRGM/RP-56927-FR.

Annexe 1

Méthodologie de la RMP

L'équipement NUMIS

L'équipement NUMIS se compose d'un générateur de courant alternatif, une unité réceptrice, un détecteur de signal RMP, une antenne et un microprocesseur, voir figure suivante.

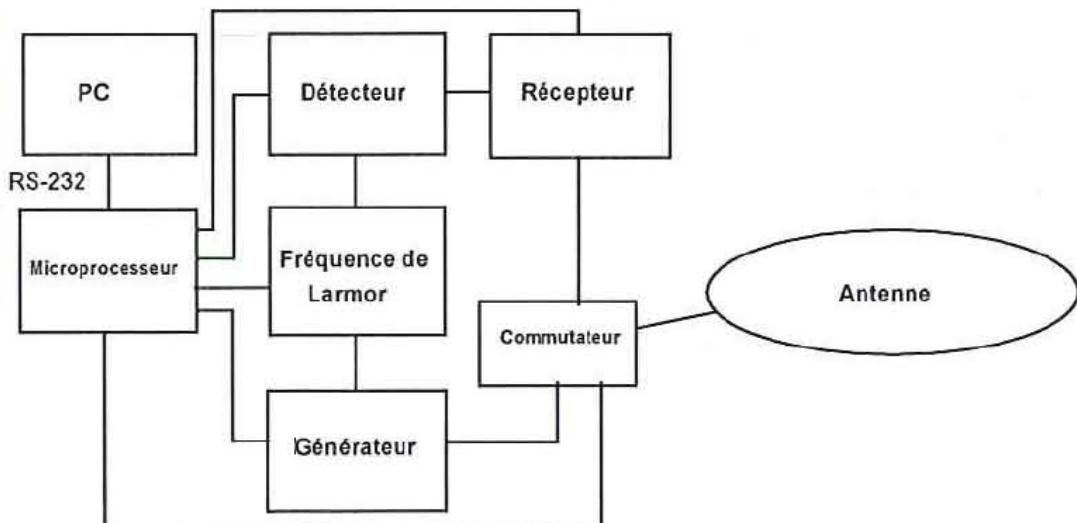


Fig. 1 : Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.

Le microprocesseur pilote la commutation de l'antenne du mode émission au mode réception. Il contrôle également la génération de la fréquence de référence égale à la fréquence de Larmor. Une enveloppe du signal provenant du détecteur synchrone est enregistrée par le microprocesseur sous forme digitale sur une durée programmable de 2 secondes au maximum.

Le sondage RMP

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

$$i(t) = I_o \cos(\omega_o t), 0 < t \leq \tau$$

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

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

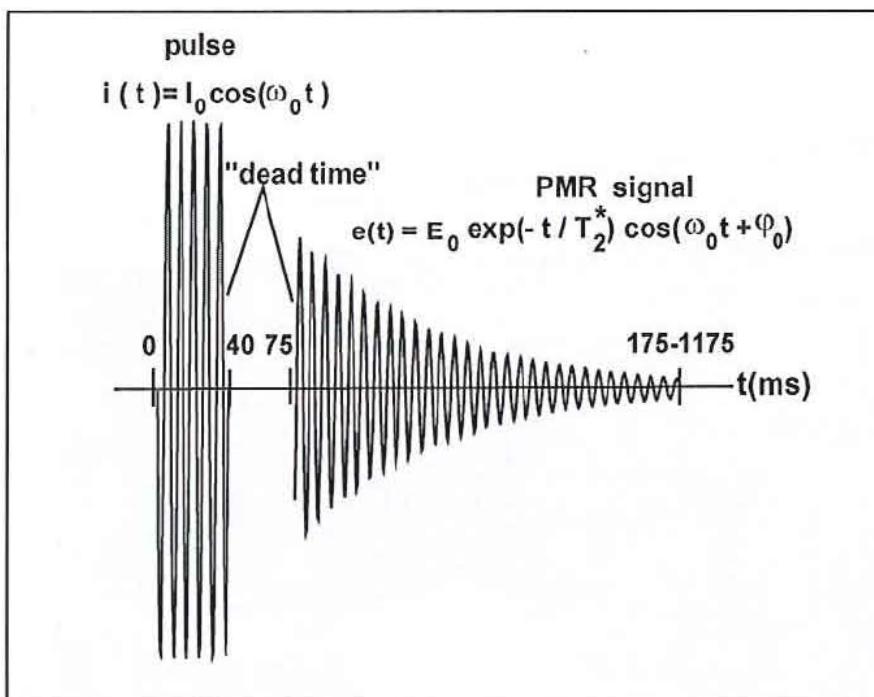


Fig. 2 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.

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

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

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

En injectant deux pulsations consécutives au lieu d'une seule et mesurant la réponse RMP après chaque pulsation, il est possible de mesurer la constante de relaxation T_1 .

$E(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1(q)$ et $\varphi_0(q)$ sont les paramètres mesurés par l'antenne de réception en faisant varier le paramètre d'excitation q ; ce dernier paramètre agissant sur la profondeur d'investigation du sondage. Ces quatre paramètres sont ceux qui sont ensuite interprétés et qui renseignent sur l'eau contenue dans le sous-sol.

Les valeurs d'amplitudes peuvent varier de quelques dizaines de nanovolts à quelques microvolts suivant la teneur en eau du milieu considéré ; le seuil de détectabilité de

« NUMIS » se situant à environ 4 nV. Différents facteurs peuvent influencer l'amplitude des signaux RMP tels que par exemple, la magnitude et l'inclinaison du champ géomagnétique, la conductivité électrique des terrains, la taille et la géométrie de l'antenne utilisée (Legchenko *et al.*, 1997).

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

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

2.1.4. Interprétation des données

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

- l'inversion des données $E_0(q)$ fournit la profondeur, l'épaisseur et la teneur en eau de chaque couche saturée en eau. La teneur en eau fournie par RMP peut être définie telle que ci-après. Pour un volume d'investigation V , soit V_W le volume rempli d'eau et V_R le volume de roche ($V = V_W + V_R$). Le volume V_W peut être divisé en deux parties : l'eau soumise à un champ magnétique homogène et appelée eau libre V_{free} et l'eau soumise à un champ magnétique inhomogène, appelée eau liée ; ainsi $V_W = V_{free} + V_{bound}$. Comme les très courts signaux correspondant à l'eau liée ne peuvent pas être mesurés par les équipements RMP disponibles aujourd'hui, la teneur en eau RMP, n est la part du volume investigué occupé par l'eau libre telle que $n = V_{free}/V$. Les deux cas limites sont $n = 0$ pour une roche sèche et $n = 100\%$ pour l'eau d'un lac ;
- les constantes de **temps de relaxation** $T_2^*(q)$ et $T_1(q)$ sont reliés à la taille moyenne des pores des formations aquifères (Shirov *et al.*, 1991 ; Chang *et al.*, 1997 ; Kenyon, 1997) ;
- la **phase** $\phi_0(q)$ renseigne sur la distribution des conductivités électriques du sous-sol. Pour une estimation précise des profondeurs des différents aquifères, cette information doit être prise en compte lors de l'étape d'inversion des données RMP, quand les résistivités sont inférieures à 10 ohm.m.

Le problème inverse des sondages RMP est mal conditionné. Il n'a pas de solution unique. La capacité de résolution de la méthode est discutée par Legchenko et Shushakov (1998). Un exemple d'inversion des données théoriques est présenté sur la figure 5.

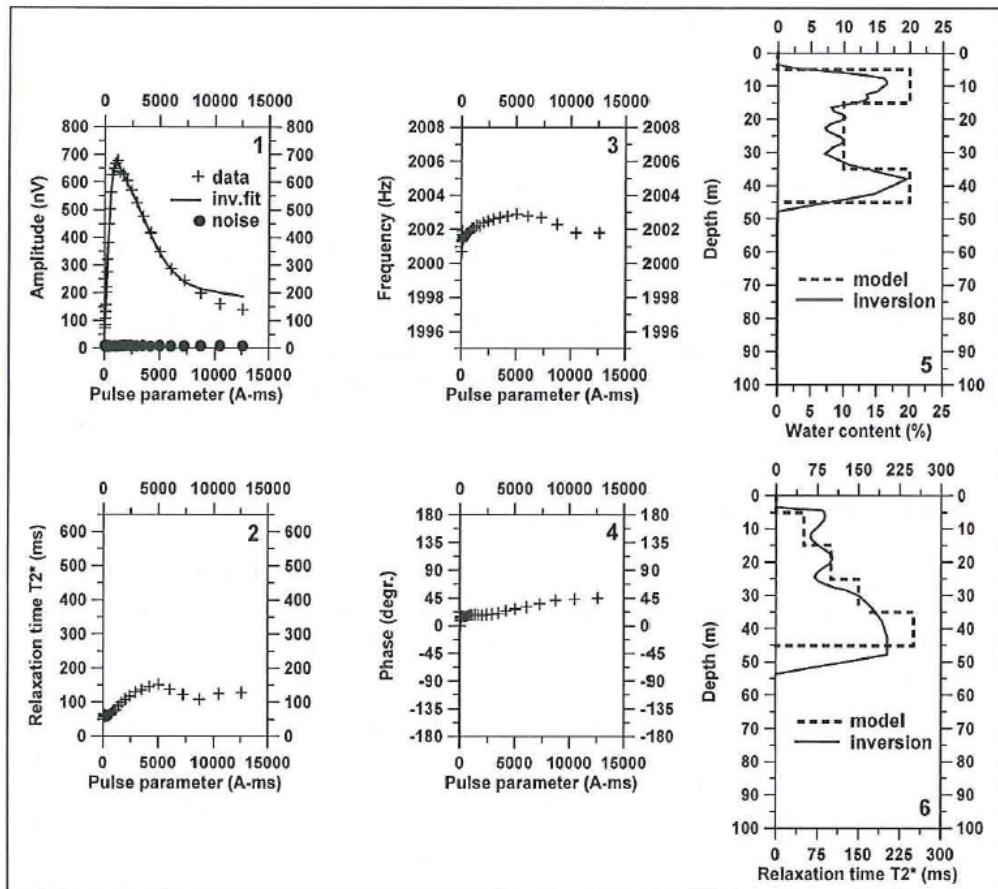


Fig. 5 - Résultats d'inversion des données théoriques.

Le signal théorique a été calculé à partir du modèle :

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

Tabl. 1 - Paramètres du modèle.

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

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

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

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

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

- distribution verticale de la teneur en eau ;
- distribution verticale du temps de décroissance T_2^* ;
- distribution verticale du temps de décroissance T_1 ;
- distribution verticale de la perméabilité ;
- distribution verticale de la transmissivité.

Un exemple de la comparaison des résultats RMP avec des données de forage et d'essais de pompage est présenté sur la figure 6.



**Centre scientifique et technique
Service ressources minérales**
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34