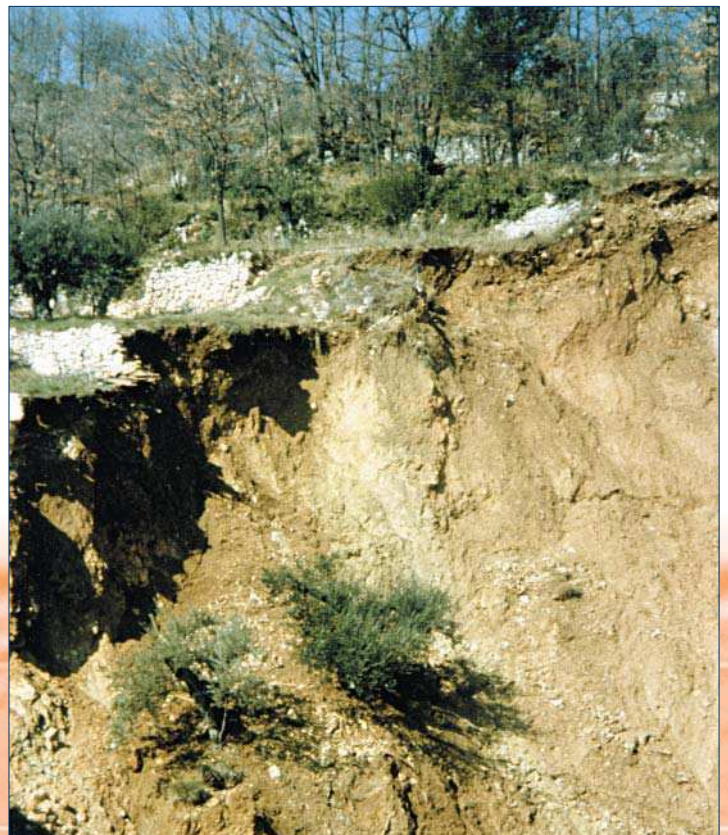


techniques et méthodes
des laboratoires des ponts et chaussées



Guide technique

**Détection
de cavités souterraines
par méthodes géophysiques**



Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,
de l'Aménagement et des Transports
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

www.ifsttar.fr



Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques

Guide technique

Octobre 2004



Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15

**Ce document a été élaboré dans le cadre du Projet National CriTerre.
Il a également bénéficié d'apports issus du thème LCPC « Carrières
Souterraines Abandonnées »**

Il a été rédigé par :

- Cyrille Fauchard, rédacteur (LRPC de Rouen),
- Pierre Pothérat, co-rédacteur (Chapitres I et III), (CETE de Lyon),

sous la direction de :

- Philippe Côte (LCPC),
- Marcel Mudet (SNCF).

Les auteurs et encadrants remercient pour leur contribution et relecture :

- | | | |
|---|--|--|
| ➤ Allombert Patrice (SAFEGE), | ➤ Borne Viviane (Calligée), | ➤ Lagabrielle Richard (LCPC Nantes), |
| ➤ Andrieu Pierre (Université Pierre
et Marie Curie, Paris VI), | ➤ Breysse Denis (Université de
Bordeaux I), | ➤ Leparoux Donatienne (IPG Paris IV), |
| ➤ Baron Jean-Pierre (SAFEGE), | ➤ Denis Alain (Université de
Bordeaux I), | ➤ Léonard Christelle (LCPC Paris), |
| ➤ Berche Véronique (LRPC de Saint-
Quentin), | ➤ Flahaut Reynald (LRPC de Saint-
Brieuc), | ➤ Le Tirant Pierre (IREX), |
| ➤ Bitri Adnand (BRGM Orléans), | ➤ Garciaz Jean-Luc (LERM), | ➤ Magnin Olivier (Terraseis), |
| ➤ Boulanger Charles (CGG Massy), | ➤ Guérin Roger (Université Pierre
et Marie Curie Paris VI), | ➤ Mattiuzzo Jean-Luc (SEGG), |
| ➤ Bourgeois Bernard (BRG Orléans), | | ➤ Piwakowski Bogdan (ECP Lille), |
| ➤ Bouvier Antoine (Calligée), | | ➤ Tabbagh Alain (Université Pierre
et Marie Curie, Paris VI). |

Pour commander cet ouvrage :

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

IST-Diffusion des éditions

58, boulevard Lefebvre
F-75732 PARIS CEDEX 15
Téléphone : 01 40 43 50 20
Télécopie : 01 40 43 54 95
Internet : <http://www.lcpc.fr>

Prix : 35 Euros HT

En couverture :

- Profil radar pour détection de cavités (Document LRPC de Saint-Brieuc).
- Effondrement de Bargemon - Cavité naturelle dans des gypses (Document LRPC de Lyon).

Ce document est propriété du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et ne peut être reproduit,
même partiellement, sans l'autorisation de son directeur général (ou de ses représentants autorisés).

© 2004 - LCPC
ISSN : 1151-1516
ISBN : 2-7208-0374-X

Sommaire

◆ AVANT-PROPOS	5
◆ CHAPITRE 1. Contexte, définition des cavités souterraines et reconnaissances préliminaires	7
1. Contexte général	7
2. Les cavités souterraines	9
3. Les reconnaissances préliminaires	18
4. Les reconnaissances géophysiques et géotechniques	20
◆ CHAPITRE 2. Synthèse générale	23
1. La méthodologie générale pour la recherche de cavités	23
2. Les méthodes géophysiques	25
3. Les méthodes géophysiques en fonction du type de cavités	28
4. Classement des méthodes	29
5. Conclusion générale	34
6. Résumés	35
◆ CHAPITRE 3. Télédétection - Interprétation de clichés aériens et thermographie infrarouge	45
1. Généralités sur la télédétection	45
2. La photo-interprétation	45
3. La radiométrie infrarouge thermique	51
◆ CHAPITRE 4. La microgravimétrie	59
1. Généralités sur la microgravimétrie	59
2. Méthodologie	61
3. Exemples de mesures	70
4. Modélisation	72
5. Conclusion	75

◆	CHAPITRE 5. Les méthodes sismiques	77
	1. Généralités sur les méthodes sismiques	77
	2. La sismique réflexion haute résolution	78
	3. La sismique réfraction	90
	4. La sismique en ondes de surface	94
	5. Conclusion générale sur les méthodes sismiques	99
◆	CHAPITRE 6. Les méthodes électriques en courant continu	101
	1. Présentation des méthodes électriques en courant continu	101
	2. Le panneau électrique	106
◆	CHAPITRE 7. Les méthodes électromagnétiques	117
	1. Généralités sur les méthodes électromagnétiques	117
	2. Méthodes basse fréquence en champ lointain : VLF et RMT	119
	3. Méthodes basse fréquence en champ proche (Slingram)	131
	4. Méthodes électromagnétiques haute fréquence : le radar géologique	137
	5. Conclusion générale sur les méthodes électromagnétiques	146
◆	CHAPITRE 8. Les techniques géophysiques en forage	149
	1. Avant-propos	149
	2. Les forages	150
	3. Les diagraphies	151
	4. Les méthodes géophysiques en forage	158
	5. Conclusion générale sur les diagraphies et les méthodes géophysiques en forage	167
◆	CONCLUSION	169

Avant-propos

La maîtrise des aléas géotechniques constitue un enjeu des plus importants. L'objectif à poursuivre consiste bien entendu à minimiser non seulement les coûts de construction mais également ceux liés à l'entretien et à la maintenance du patrimoine du domaine génie civil. Par ailleurs, la notion de sécurité revêt à présent une importance qui la place en toute première priorité pour les acteurs du domaine.

Le projet national de recherche et développement « CriTerre » labellisé par le « Réseau Génie Civil et Urbain (RGCU) », subventionné par l'État (Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques (DRAST) du ministère de l'Équipement) et géré par l'Institut pour la Recherche Appliquée et l'Expérimentation en Génie Civil (IREX) s'est donné pour ambition de susciter des travaux de recherche et développement sur la thématique « Amélioration des Techniques d'Auscultation » au sein de trois volets :

- Reconnaissance des anomalies physique des terrains.
- Détection des pollutions des sols.
- Contrôle de l'amélioration des sols.

Le présent guide s'inscrit dans le premier de ces volets. La problématique « détection des cavités souterraines » y est apparue comme un axe majeur. En particulier, la détection de cavités au long de grandes infrastructures linéaires réclame la définition de méthodologies adaptées.

La mise en place de techniques de reconnaissance efficaces repose sur la mobilisation de compétences très variées. Des études géologiques préliminaires permettent de délimiter l'aléa cavités naturelles ou anthropiques, des études historiques et l'analyse des archives précèdent les études géophysiques. Les conclusions de la phase reconnaissances non-destructives doivent être validées par sondage.

C'est à la phase géophysique qu'est consacré cet ouvrage. En effet, suite à une première exploration de l'état de l'art sur le sujet, un clair déficit d'ouvrage ou même de doctrine référente en la matière est apparu. Les donneurs d'ordre se trouvent démunis et confrontés à des techniques complexes à la fois dans leurs attendus et leur mise en œuvre. Les géophysiciens quant à eux ne sont pas toujours rompus à cet exercice particulier que constitue la détection de cavités.

Les ouvrages généraux de géophysique de sub-surface se contentent la plupart du temps d'apporter un regard purement théorique à cette problématique, sans orienter ni le géophysicien ni le donneur d'ordre dans la mise en place de la campagne de reconnaissance.

Ce guide a l'ambition d'une part d'éclairer le donneur d'ordre vis-à-vis des potentialités de détection au regard de la nature présumée des cavités concernées et d'autre part d'aider le géophysicien dans la mise en œuvre pratique des techniques géophysiques diverses qui sont potentiellement mobilisables relativement aux cibles désignées et à leur environnement. Il s'articule autour d'une synthèse générale qui décrit la démarche conduisant au choix des techniques convenables. Elle est précédée d'un chapitre décrivant les cavités, leur contexte et la démarche générale de reconnaissance. Enfin, la synthèse générale est suivie des chapitres géophysiques qui exposent les principes, capacités, limites et mises en œuvre pour chacune des méthodes.

Il a principalement été rédigé par M. Cyrille Fauchard sous l'encadrement de M. Marcel Mudet (SNCF) et M. Philippe Côte (LCPC). Le rédacteur s'est appuyé pour chacune des disciplines et méthodes exposées dans l'ouvrage sur des experts des mondes académiques et industriels qui lui ont apporté relecture et contributions. Les travaux de recherche issus de l'opération LCPC « Carrières Souterraines Abandonnées » (M. Pierre Pothérat) constituent également l'une des sources importantes de cet ouvrage.

Le Président du projet national

Guy VERRIER

Le Directeur scientifique et technique

François SCHLOSSER

Contexte, définition des cavités souterraines et reconnaissances préliminaires

Chapitre 1

1. CONTEXTE GÉNÉRAL

La construction d'infrastructures, d'ouvrages et de bâtiments en Génie Civil s'inscrit dans une politique de prévention et de gestion des risques. Elle doit concilier des intérêts humains, socio-économiques, politiques, financiers et environnementaux. Sa mise en œuvre entraîne une modification des paysages naturels ou urbains. Pour que sa pérennité soit assurée, elle doit être accompagnée avant, pendant et après sa réalisation d'études et de surveillances spécifiques. Dans ces conditions, pour l'ensemble des acteurs du Génie Civil (Risques et Génie Civil, 2000), l'apparition d'événements indésirables représente un véritable danger dont il convient d'étudier la possibilité et la probabilité d'occurrence et d'envisager les conséquences.

Ces événements indésirables peuvent être en particulier des affaissements et des effondrements liés à la présence de cavités souterraines. Elles menacent alors la sécurité des personnes et des biens situés à leur l'aplomb, et ceci aussi bien en zones fortement urbanisées et leurs périphéries que sur les axes de communication. C'est pourquoi la prise en compte de cet aléa est devenue depuis plusieurs décennies une préoccupation majeure des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvre.

1.1 Les risques associés à la présence de cavités

Deux grandes catégories de risques peuvent être distinguées : les risques naturels et les risques anthropiques.

- Les premiers sont liés à la géologie (volcanisme, séismes, tsunamis, mouvements de terrains, érosion littorale) et/ou à la météorologie (cyclones, avalanches, inondations).
- Les seconds sont liés à l'activité humaine : ce sont principalement les risques technologiques liés aux ouvrages et aux infrastructures (centrales nucléaires, barrages, ponts, tunnels, etc.), les risques générés par l'extraction des matériaux (mines et carrières) et les risques liés aux pratiques agricoles (phénomènes érosifs intenses).

Il se trouve que la nature des cavités souterraines est soit d'origine naturelle, soit d'origine anthropique. Les risques associés à leur présence relèvent donc des deux catégories :

- quand elles sont d'origine naturelle, le risque est géologique. L'effondrement à l'aplomb des surfaces sous-cavées est la conséquence de processus de dissolution de la roche ;
- quand elles sont d'origine anthropique, le risque est technologique. L'effondrement est lié au dimensionnement et à la stabilité de l'ouvrage.

Quelle que soit l'origine de la cavité, les accidents en surface peuvent être destructeurs. C'est pourquoi toute entreprise de Génie Civil doit prendre en compte cet aléa, et ce dès les premières

études. L'objectif est d'aboutir à des solutions d'identification des vides et de sécurisation des sites sous-cavés.

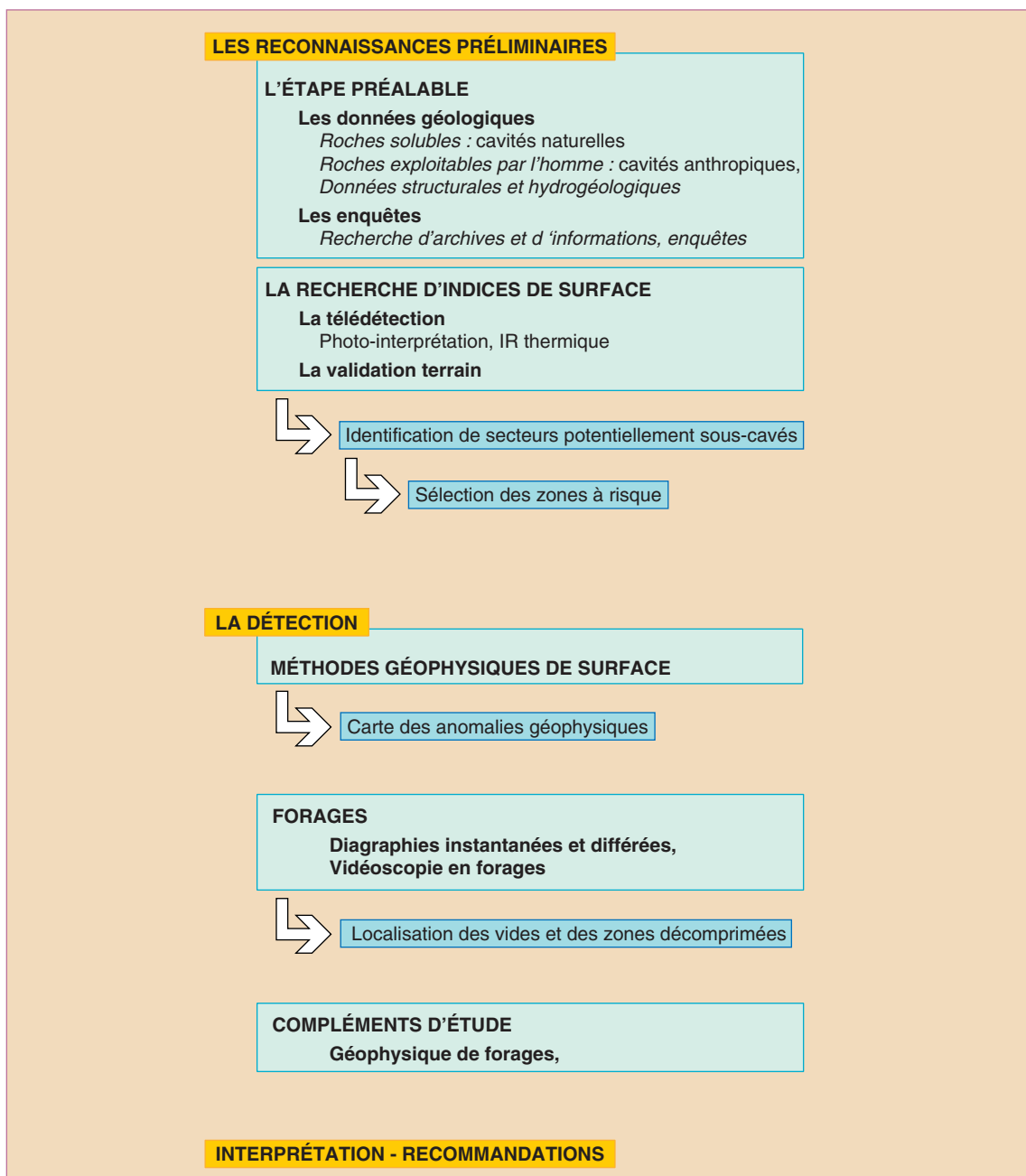
1.2 La méthodologie générale pour la recherche de cavités

La méthodologie de recherche de cavités proposée est présentée sur la figure 1. Elle comporte deux aspects principaux :

- un travail d'inventaire,
- un ensemble de méthodes de détection et de mesures.

Le respect et la réalisation de l'ensemble de ces étapes sont les garants de la qualité des travaux de recherche de cavités souterraines naturelles ou anthropiques. Si le risque existe, les décisions concernant l'aplomb des surfaces sous-cavées doivent s'orienter vers l'une des solutions suivantes :

- un traitement (comblement ou confortement des cavités),
- une surveillance de la zone à risques,
- ou un éloignement.



▶▶ FIGURE 1 - Démarche adoptée pour la gestion de l'aléa cavité (d'après Mudet, 1997).

1.3 Objectif du guide

L'objectif du guide est de présenter les techniques de mesure physique et leur méthodologie permettant de détecter les cavités.

Dans le présent chapitre, sont tout d'abord décrits les objets de la problématique : les cavités souterraines naturelles et anthropiques. Leur présence étant directement liée aux caractéristiques du système géologique qui les englobe (nature de terrains, histoire, hydrologie, etc.), les études préliminaires (études géologiques et recherches d'indices) nécessaires à leur détection sont présentées dans une seconde partie.

Le deuxième chapitre donne une synthèse générale sur les méthodes géophysiques de détection des cavités souterraines. Elle a pour but d'orienter le maître d'œuvre ou le maître d'ouvrage dans les choix visant à la définition de la méthodologie optimale adaptée à chaque cas d'étude. Cette synthèse expose les performances des méthodes en fonction du type de cavité recherchée et en fonction des dimensions de la zone d'étude. Il propose en conclusion un tableau des principales caractéristiques des méthodes géophysiques présentées dans ce guide.

Les chapitres suivants présentent le principe et la méthodologie des techniques géophysiques pour la recherche de cavités souterraines, à savoir :

- les méthodes de télédétection (interprétation de clichés aériens dans le spectre visible et infrarouge, thermographie infrarouge. Elles sont assimilées aux méthodes géophysiques, car dans leur principe, il s'agit bien de mesurer l'effet d'un champ (électromagnétique) sur la matière (le sol) pour en déduire certaines caractéristiques,
- la microgravimétrie,
- les méthodes sismiques (sismique réflexion haute résolution, sismique réfraction, sismique en ondes de surface),
- les méthodes électriques (panneau électrique),
- les méthodes électromagnétiques basse fréquence (VLF-EM, VLF-R et RMT, Slingram) et haute fréquence (radar géologique),
- les diagraphies (instantanées, RAN) et les méthodes géophysiques de forage (méthodes électromagnétiques et électriques).

2. LES CAVITÉS SOUTERRAINES

Les cavités rencontrées habituellement dans le domaine du Génie Civil sont les carrières souterraines, les mines peu profondes et les cavités naturelles de dissolution. On notera que les matériaux les plus fréquemment exploités en carrières (en dehors du sable, de l'argile ou de l'ardoise) sont des roches solubles susceptibles de donner dans certains cas des cavités naturelles. Il s'agit des roches carbonatées (calcaire et craie utilisés pour la pierre à bâtir, la chaux ou le ciment et pour l'amendement des sols siliceux) et des roches évaporitiques (essentiellement gypse, exploité pour le plâtre). La présence de tels matériaux dans le sous-sol doit donc inciter les maîtres d'œuvre à la prudence car les deux types de cavités, naturelles et anthropiques peuvent y être rencontrés.

2.1 Cavités naturelles

De manière générale, une roche carbonatée soluble est une formation dans laquelle sont susceptibles d'apparaître des cavités souterraines d'origine naturelle. Ces zones sont appelées zones karstiques. Par extension, toutes les formes de dissolution rencontrées dans les roches sédimentaires (carbonates et évaporites) sont appelées karsts (le Karst est une région du sud de la Slovénie, composée de plateaux calcaires où l'eau s'infiltré en réseaux souterrains). Elles résultent de l'action de l'eau qui dissout les carbonates et les sulfates dans les roches calcaires ou les évaporites.

◆ Cavités naturelles en milieu carbonaté

Dans les carbonates, dont la solubilité est de l'ordre de 12 mg/l à 20 °C, la circulation de l'eau élargit progressivement les conduits naturels tels que les joints de stratification, les failles, les

diaclasses et crée un réseau souterrain de galeries, de boyaux, de salles et de puits. Ces processus sont relativement lents et ne sont pas observables à l'échelle humaine : les désordres résultent de l'évolution de vides anciens.

Les galeries se développent généralement sur d'anciennes fractures horizontales ou sur des interfaces entre formations géologiques différentes. Elles forment des conduits de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres de diamètre. Les salles peuvent se créer à l'intersection de plusieurs galeries ou lorsqu'un conduit vertical croise une galerie.

En surface, le relief karstique est fait de vallées sèches, dolines, gouffres ou reliefs ruiniformes. Elles se manifestent plus particulièrement en pays calcaires tels que le Jura et les Causses.

◆ Cavités naturelles en milieu sulfaté

Dans le gypse, roche sulfatée la plus commune, qui présente une solubilité de l'ordre de 2,5 g/l à 20 °C, la formation d'un réseau karstique conséquent peut être rapide, à l'inverse de ce qui se passe dans les carbonates. Par exemple, la circulation d'eaux souterraines à 500 l/s, dont la concentration passe de 50 mg/l à 600 mg/l en 5 km, peut engendrer un lessivage de 8 500 tonnes de gypse par an, ce qui correspond à un vide de plus de 400 000m³ en un siècle (Pothérat et al., 1999). Les karsts gypseux donnent lieu à des effondrements importants par remontée de fontis, qui peuvent avoir de graves conséquences en surface (jusqu'à 200 m de diamètre et 50 m de profondeur pour le trou du *Baou à Bargemon*, département du Var).

Les conséquences des effondrements de karst gypseux peuvent s'étendre à la lithologie environnante. Ainsi, dans le bassin Parisien, le lessivage du gypse lutétien, par pompage de la nappe éocène, a provoqué, par entraînement hydraulique, l'effondrement des sables de Beauchamps qui à son tour a engendré l'effondrement des gypses bartoniens (Toulemont, 1987) ; c'est le cas de la cavité identifiée sous la gare Paris-Nord. Dans le Var, on observe un processus cyclique de karstification. Lorsque la formation d'une cavité dans le gypse entraîne un effondrement, l'éboulis constitué, s'il est soluble, peut subir un nouveau cycle de karstification (Pothérat et al., 1999).

Les dégâts occasionnés par l'effondrement de ce type de cavités peuvent être très dommageables pour le bâti et les infrastructures en raison de l'ampleur des manifestations de surface.

2.2 Cavités anthropiques

◆ Le cadre législatif

Le Livre 1er du code minier, Régime général, Titre 1er de la classification des gîtes de substances minérales (loi n° 70-1 du 2 janvier 1970) fait état dans ses articles 1 à 4 d'un *distinguo* entre les gîtes et substances minérales considérées comme mines et ceux considérés comme carrières.

Sont considérées comme mines : les exploitations de combustibles fossiles (hormis la tourbe), de sels de sodium et potassium, de substances métalliques, de métaux précieux, de terres rares, d'éléments radioactifs, de soufre, de sélénium, d'antimoine, de bismuth, de béryllium, de gallium, de thallium, de phosphates ainsi que de gîtes géothermiques. L'exploitation des minerais a donné naissance à des districts sous-minés importants, tels que les bassins houillers lorrain, du nord Pas-de-Calais et du Forez. En fonction de la géologie locale, ces exploitations peuvent présenter un réseau de puits d'accès et de galeries très étendu. Leur abandon pose aujourd'hui des problèmes conséquents relatifs à la stabilité des terrains en surface (phénomènes de subsidence pour les mines profondes et effondrements localisés pour les mines de sub-surface). À titre d'exemple, le bassin ferrifère de la Lorraine compte 11 000 ha de mines, dont 1 800 se trouvent sous sites bâtis et donnent régulièrement lieu à des accidents de surface.

Sont considérées comme carrières : les exploitations ne relevant pas de la liste précédente, en l'occurrence celles de matériaux de construction et de roches industrielles et ornementales. En raison de leur proximité de la surface, ces anciennes exploitations sont en partie la cible de ce guide. Quelques exemples caractéristiques de carrières fréquemment rencontrées sont présentés ici.

◆ La répartition géographique

Les matériaux exploités en carrières souterraines sont en général classés dans les roches industrielles : calcaires, craie, tuffeau, gypse, sable, argile, molasse, ardoises, etc. En France, de

façon schématique, il est possible de distinguer six régions (Tableau I) présentant une concentration importante de carrières souterraines (Tritsch et *al.*, 2002) :

- *la Région Parisienne* : Paris et les départements de la couronne parisienne ont vu l'extraction en souterrain de calcaire grossier, de gypse et de craie. La région Paris/Ile-de-France est sous-cavée par 4 700 ha de carrières ;
- *la Picardie et la Champagne* : au nord et à l'est de la région parisienne, les mêmes formations (à l'exception du gypse) ont donné lieu à de nombreuses carrières. Dans les départements de l'Aisne et de l'Oise, les calcaires cénozoïques, et pour le département de la Marne, la craie, ont servi de pierre de construction ;
- *la région Nord - Pas-de-Calais* : dans cette région les carrières souterraines développées essentiellement dans la craie (catiches) représentent des surfaces très importantes (plusieurs milliers d'hectares pour le seul département du nord). Les exploitations de pierre à bâtir ou de pierre à chaux sont concentrées autour des principales villes ;
- *la Normandie* : plus de cent carrières souterraines sont connues dans le seul département du Calvados, Caen ayant été un centre d'extraction de pierres à bâtir très réputées. Mais il faut surtout signaler l'importance des extractions de craie pour l'amendement des sols : on estime à environ 100 000 le nombre de marnières dans les départements de l'Eure et de la Seine-Maritime ;
- *les Pays de la Loire* : les extractions de pierre de taille calcaire et de moellon calcaro-crayeux (tuffeau de la Vallée de la Loire) ont été particulièrement abondantes dans les départements du Loir-et-Cher et de l'Indre-et-Loire ;
- *l'Aquitaine - Poitou-Charente* : en dehors de la Gironde, les départements de la Dordogne, de Charente, de Charente-Maritime et de la Vienne ont connu des extractions de pierre à bâtir, de pierre à chaux et de calcaire à ciment. On compte plus de 2 000 carrières souterraines dans l'Entre-deux-Mers.

D'autres régions ont connu par le passé une activité extractive de roches industrielles (calcaires, gypse, sables, glaise, les grèses, les marbres, etc.) plus ou moins intense. Citons les exploitations de gypse de Bourgogne ou de Provence, les carrières de calcaire du Jura ou des environs de Marseille etc., ainsi qu'un type de carrière particulier, qui se rapproche des exploitations minières en raison de la profondeur d'extraction qui peut atteindre 300 m : les ardoisières d'Anjou, de Bretagne et du bassin de Fumay (Ardennes).

▶▶▶ TABLEAU I
Principales régions de carrières

Régions	Région Parisienne	Picardie-Champagne		Nord-Pas-de-Calais	Normandie		Pays de la Loire	Aquitaine-Poitou-Charente
Localisation	Paris et départements, Ile-de-France	Marne	Aisne et Oise	Autour des principales villes (exemple : Lezenne, banlieue de Lille)	Calvados	Tous les départements	Loir-et-Cher, Indre-et-Loire	Dordogne, Charente, Charente-Maritime, Vienne
Matériaux d'extraction	Craie, calcaire grossier, gypse	Craie, calcaire grossier	Calcaires cénozoïques	Craie (pierre à bâtir et à chaux), carrières en forme de bouteille : <i>catiche</i>	Calcaire bathonien de Caen (pierre à bâtir)	Craie (amendement des sols)	Calcaire tuffeau (moellon calcaro-crayeux), carrières et habitations : <i>troglydites</i> , ardoisières	Calcaire (ciment, pierre à bâtir et pierre à chaud)
NB	4 700 ha de carrières en Ile-de-France dont 770 ha sous Paris			1 500 ha dans le département du Nord		100 000 <i>marnières</i> dans l'Eure et la Seine-Maritime		2 000 ha de carrières en Gironde

◆ Typologie des carrières souterraines

La géométrie et le volume des carrières, qui permettent de prévoir l'ampleur des accidents en surface, dépendent en grande partie de la nature du matériau extrait et de sa profondeur dans le sous-sol.

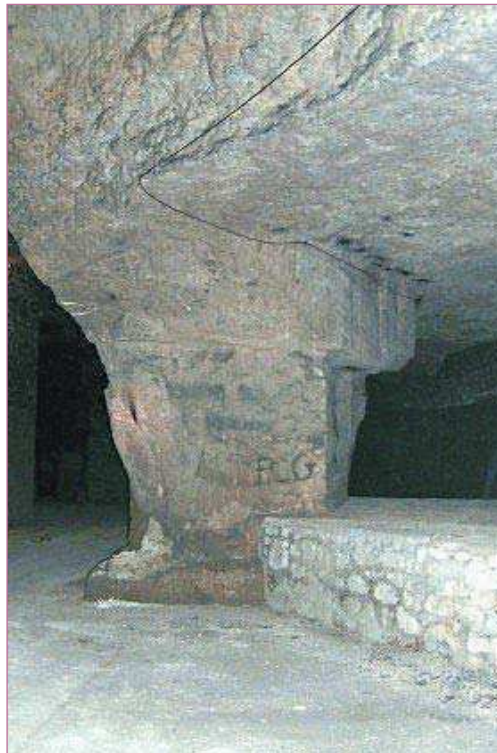
Selon la topographie locale, l'accès aux carrières peut se faire :

- soit depuis la surface par un puits ou une descenderie dans les zones de plateaux,
- soit à flanc de coteau, par une entrée en cavage.

Les principaux types d'exploitations sont les suivants :

Exploitation par chambres et piliers ou à piliers tournés

Ce type de carrière concerne principalement l'extraction de calcaire, de craie, de tuffeau et de gypse. Les piliers peuvent être alignés (Fig. 2), disposés en quinconce ou de façon aléatoire. Dans ce dernier cas il s'agit de vieilles carrières, généralement en mauvais état. Les piliers jouent le rôle de soutènement mais présentent l'inconvénient de provoquer des effondrements de surface en cas de rupture. Leur forme est variable : section carrée ou rectangulaire pour les calcaires et section trapézoïdale pour le gypse (première masse du Bassin parisien). Les carrières de craie présentent parfois des galeries voûtées et des piliers de grandes dimensions (étaux de masse). Il est fréquent de rencontrer des carrières à plusieurs niveaux, généralement deux ou trois.



▶▶▶ FIGURE 2
Exploitation de calcaires jurassiques
par piliers tournés
(carrière du Pot à Beurre, Bourges).

Quelques variantes montrent des galeries « filantes » laissant des piliers très longs et sensiblement parallèles entre eux (Val-de-Loire) ou des zones à petits piliers séparées par des piliers en rideaux ou en voile.

◆ Exploitation par hagues et bourrages

Un soutènement provisoire composé de piliers en pierres sèches (à bras), destinés à « caler » le ciel de carrière, est réalisé. Il est conforté par la mise en place de remblais autour des piliers : le bourrage. L'édification de murs en pierres sèches (hague) qui contiennent les bourrages, complète le soutènement. Cette ancienne technique permet l'exploitation de la totalité de la masse en présence, essentiellement des calcaires, et limite l'affaissement du toit qui repose sur le remblai.

Exploitation par affaissement dirigé

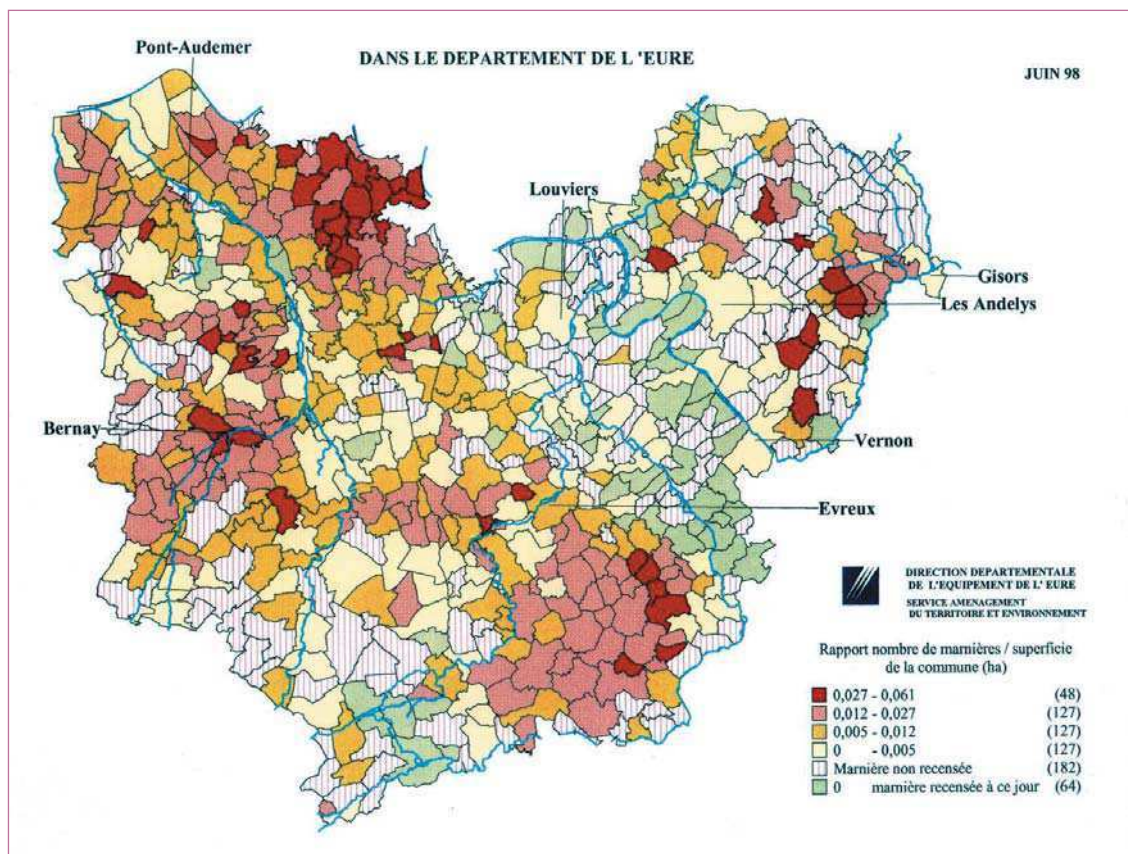
C'est une technique pratiquée dans les carrières de gypse. Ce type d'exploitation se fait à partir d'une longue galerie d'accès, en reculant depuis le fond jusqu'à l'entrée par foudroyage progressif des piliers, afin de prévenir tout effondrement ou affaissement inopiné et d'augmenter le volume exploité.

Exploitation par galeries radiales et chambres

Ces exploitations sont typiques des marnières de Normandie. La craie marneuse était extraite de chambres creusées à partir de petites galeries disposées de manière rayonnante autour d'un puits d'accès de 15 à 40 m de profondeur, sur un ou plusieurs niveaux.

En Haute-Normandie, la craie tendre ou marne a été exploitée jusque dans les années 1950 pour l'amendement des terres (appelé aussi le chaulage, apport de carbonate de calcium pour l'agriculture). Les caractéristiques des marnières dépendent de leur durée d'exploitation, de la qualité des matériaux rencontrés lors de l'exploitation et de la technique utilisée. Les marnières présentent depuis la surface un puits d'accès d'environ 1 mètre de diamètre qui traverse généralement une couche de limon et une couche d'argile à silex ou de sable. Puis à 3 ou 4 m de l'interface craie/argile, l'exploitant creusait horizontalement un passage (ou plusieurs), appelé œillard ou tombe, par lequel commençait l'exploitation du banc de craie calcaire (Manier, 2001).

En Haute-Normandie, le nombre de marnières est estimé à 10 par km² (exemple : département de l'Eure, Fig. 3) : il est donc indispensable pour tout projet de génie civil envisagé dans cette région, de recourir au recensement des cavités dans la zone concernée.



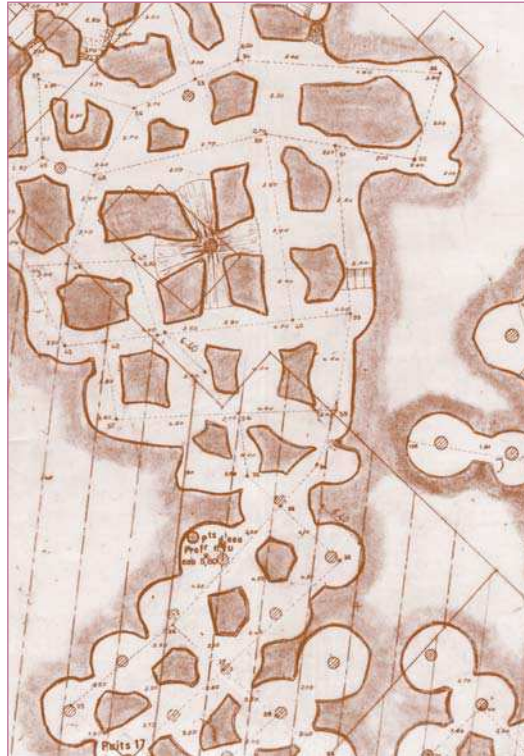
►► FIGURE 3 - Nombre de marnières par hectare recensées en 1998 dans l'Eure (source DDE de l'Eure).

Exploitation en bouteille ou catiche

Dans le département du Nord, la craie grise du Turonien supérieur et la craie blanche du Sénonien ont été exploitées pour la taille de pierre et l'amendement des sols. Ces carrières, ou catiches présentent depuis la surface un puits d'environ 1 m de diamètre traversant la couche de limon puis s'élargissant en fonction de la profondeur en forme de bouteille de 7 à 10 m de diamètre à la base

et d'une hauteur de 12 à 20 m. Elles sont généralement reliées entre elles par un réseau de galeries (Fig. 4). On dénombre plus de 1500 ha de carrières sur onze communes dans le département du Nord, et 1 114 ha ont été cartographiés (données du Service Départemental de l'Inspection des Carrières Souterraines (SDICS)).

Les puits de ces cavités, à la fin de l'exploitation, sont généralement obstrués par un bouchon, que l'on n'est pas toujours en mesure de localiser.



▶▶▶ FIGURE 4
Plan d'exploitation de type catiche (en bas)
et par piliers tournés (en haut)
(source SDICS).

Exploitation par chambres

Les ardoisières se présentent généralement sous forme de salles volumineuses de 20 à 30 m de section horizontale et d'une hauteur de 50 à 80 m. Elles sont en principe remblayées, de sorte qu'il ne reste plus que des galeries de visite ménagées en haut des remblais.

◆ **Grandeurs caractéristiques des carrières**

Volume des vides et taux de défrètement

Le volume des vides est fonction de la section des galeries et du taux de défrètement, qui est le rapport de la surface exploitée à la surface totale.

Ce taux de défrètement est lui-même fonction de la résistance à la compression du matériau et de la profondeur de la carrière. Il atteint fréquemment 80 % dans les calcaires. Il est de 60 à 70 % dans la craie et peut descendre sous les 50 % dans le gypse.

Dimensions des vides

Les dimensions des vides sont fonction de la puissance des bancs exploités, de la résistance des piliers et de la qualité du toit. Dans les calcaires, la dimension moyenne des galeries varie de 2 à 4 m de large (jusqu'à 15 m) pour 2 à 5 m de hauteur (jusqu'à 8 m dans la craie). Dans le gypse, les hauteurs moyennes de vides sont de l'ordre de 8 à 10 m (17 m dans la première masse du massif de l'Hautail, à l'ouest de Paris), les largeurs des galeries étant comparables à celles des calcaires. On observe des dimensions similaires dans le gypse du Trias provençal. Dans le gypse ludien, deuxième masse de la région parisienne, la hauteur des galeries est de l'ordre de 2 mètres.

Profondeur des vides

La profondeur des exploitations, parfois très proches de la surface, est généralement comprise entre 5 et 50 m. Elle atteint 60 à 70 m dans certaines carrières de gypse, de craie du Bassin de Paris, de Provence ou du Jura, et exceptionnellement, plus d'une centaine de mètres pour les ardoisières.

◆ **Autres cavités anthropiques**

Troglodytes

Les troglodytes sont généralement d'anciennes habitations, creusées dans les falaises ou en pied de coteau, dans des roches tendres comme le tuffeau et le falun dans la région de Saumur.

Souterrains

Les souterrains sont des galeries plus ou moins étendues, pouvant déboucher sur des salles. De tout temps l'homme a aménagé des espaces souterrains auprès de son habitat. On en trouve plus particulièrement auprès des châteaux, aux abords ou dans les villes (les souterrains de Limoges creusés dans le « tuf », les souterrains de Provins creusés dans la terre à foulon, etc.).

Sapes

Les sapes de guerre sont des galeries que l'on trouve principalement dans le Nord-Pas-de-Calais et en Picardie. Ce sont des galeries creusées pendant la première guerre mondiale, de préférence dans le limon ou à l'interface limon/craie. Leur largeur est d'environ 1 m et leur hauteur peut atteindre 2 m. Elles s'étendent en réseau souterrain, pouvant déboucher sur des salles de dimensions variables. Leur emplacement et leur présence est souvent révélée lors des travaux de terrassement.

Catacombes

Les catacombes sont d'anciennes carrières de calcaire grossier que l'on trouve en particulier à Paris et à Orléans. L'Inspection Générale des Carrières (IGC), créée en 1777 pour la surveillance de ce réseau, on estime à 770 ha la superficie, et environ 300 km de galeries. Les 14^e et 13^e arrondissements contiennent les réseaux les plus importants. Seule la moitié du réseau est inspectée par l'IGC, le reste étant réparti sous les domaines privés.

Les carrières souterraines abandonnées sont souvent réutilisées en agroalimentaire à des fins de stockage ou de fabrication de produits, en raison des conditions de température et d'hygrométrie stables qui règnent dans ces cavités. On trouve ainsi des caves vinicoles, des champignonnières, des silos à grain, etc. Les boves sont de petites cavités de 1 à 5 m de profondeur, creusées dans l'argile, servant à stocker les tissus de l'industrie. Ce type de cavité est régulièrement mis à jour lors de travaux de terrassement. Enfin, les glacières de Strasbourg, creusées dans le limon, sont des lieux de stockage de la glace pour la fabrication de la bière.

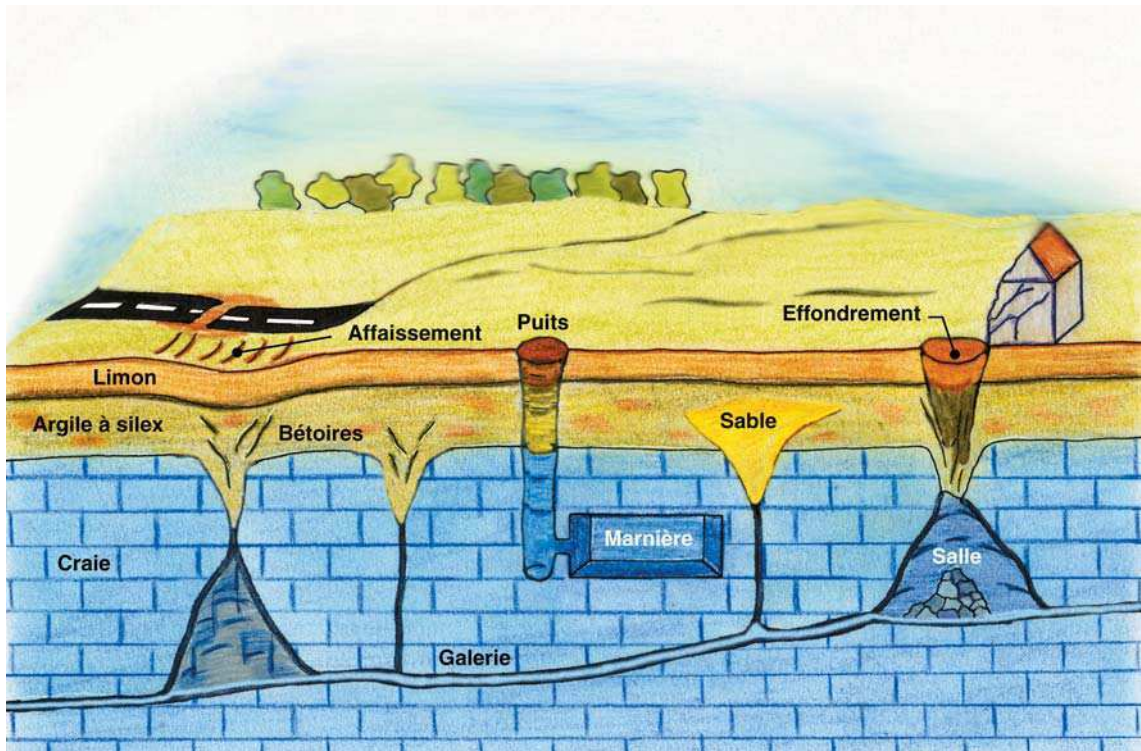
2.3 Risques liés à la présence de cavités

Les instabilités de cavités souterraines génèrent des désordres qui peuvent se propager jusqu'à la surface. Les conséquences peuvent être très graves : ruine des constructions et des ouvrages de génie civil et mort d'homme en cas de phénomène brutal.

Les risques liés à la présence de cavités souterraines ont déjà fait l'objet d'un guide (Tritsch et *al.*, 2002). Il y a une gradation dans la gravité des problèmes de surface engendrés par les effondrements, depuis l'affaissement jusqu'à l'effondrement généralisé en passant par la montée d'un fontis au jour et l'effondrement localisé (Fig. 5).

◆ **Les affaissements**

Ce sont des déformations qui résultent d'un tassement progressif des terrains de recouvrement par fermeture des vides sous-jacent. Les affaissements se manifestent par la formation d'une cuvette en surface. Ils se produisent généralement suite à l'effondrement d'une exploitation à grande profondeur (Fig. 6). Ils sont essentiellement dommageables pour les habitations et les infrastructures.



▶▶ FIGURE 5 - Profil géologique typique de Haute-Normandie. Relation entre le réseau karstique et les accidents en surface (source LRPC de Rouen).



▶▶ FIGURE 6
Affaissement sur une ancienne mine
de charbon (région de Laval).

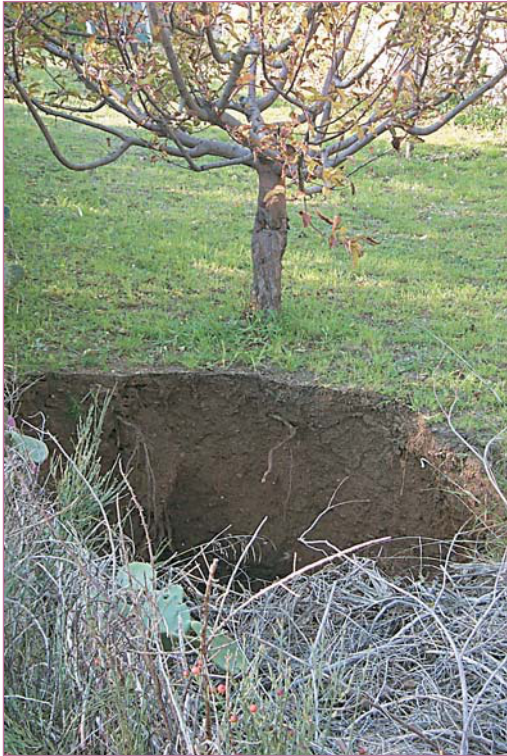
◆ Les montées de fontis au jour

Les montées de fontis au jour résultent d'une rupture du toit de la cavité qui débouche en surface en créant un entonnoir de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre. Ce phénomène peut mettre plusieurs dizaines d'années avant d'atteindre la surface, mais la rupture finale est généralement brutale (Fig. 7). Le risque de montée au jour d'un fontis dépend du diamètre et de la hauteur des cavités comme de l'épaisseur et de la nature du terrain de recouvrement ainsi que des conditions météorologiques.

Bien que les dommages en surface, compte tenu de la taille du phénomène, soient généralement limités, il arrive que des habitations disparaissent dans les entrailles de la terre (passage *Le Gourdon* à Paris, 1879).

Les fontis nés de l'effondrement de cavités naturelles se cantonnent préférentiellement aux terrains gypsifères tels que le ludien du bassin Parisien, le trias provençal (Fig. 8) ou de la bordure cévenole. La taille des fontis peut atteindre 100 m de diamètre.

En terrain calcaire, le réseau de karst est généralement stable en raison des bonnes caractéristiques mécaniques du matériau. Les effondrements peuvent cependant avoir lieu si la cavité est proche de la surface, si une surcharge pondérale est appliquée au-dessus d'elle ou en cas de vieillissement accéléré (fuite de réseau, trafic, etc.).



▶▶ FIGURE 7 - Fontis sur carrière du gypse du Trias provençal (Roquevaire).



▶▶ FIGURE 8 - Effondrement de cavité naturelle dans le gypse du Trias provençal.

◆ Effondrements localisés

Les effondrements localisés sont une variante des montées de fontis car ils naissent de la rupture de plusieurs piliers, ce qui a pour conséquence de provoquer en surface une zone d'effondrement d'un diamètre supérieur à celui d'un simple fontis.

◆ Effondrements généralisés

Ce sont des effondrements brutaux qui peuvent affecter des superficies de quelques mètres carrés à plusieurs hectares (Fig. 9).

L'amplitude de l'effondrement maximal est en général la moitié de la hauteur d'une couche fictive équivalente au volume des vides. Par exemple, une couche de 4 m exploitée avec un taux de défrèvement de 50 % représente une couche fictive de 2 m (Pothérat et *al.*, 1999). Les effondrements généralisés interviennent dans les carrières de grande dimension, à taux de défrèvement élevé et sous fort recouvrement.



▶▶▶ FIGURE 9
Effondrement généralisé sur carrière
de gypse du Trias bourguignon
(Ivry-en-Montagne, 21).

3. LES RECONNAISSANCES PRÉLIMINAIRES

Lors de la phase initiale d'un projet de Génie Civil, la reconnaissance géologique est placée très en amont et consiste à obtenir toutes les informations relatives aux caractéristiques du sol et du sous-sol. Parmi les informations recherchées figurent celles relatives à la présence éventuelle de cavités. La démarche de localisation de ces dernières (particulièrement développée dans le thème « Carrières souterraines abandonnées du LCPC ») s'organise généralement selon le schéma suivant : dans une première étape, ou étape préalable, une *expertise géologique* de la zone du projet permet de porter un avis sur la nature du (des) matériau(x) présent(s) en sous-sol et sur la structure du terrain concerné. Les informations recueillies permettent de trancher sur la présence possible de cavités, d'origine naturelle ou anthropique. En cas de résultats probants une *phase d'enquêtes* est enclenchée. Elle consiste à exploiter tous les documents d'archives disponibles dans lesquels sont consignées des informations relatives à la présence de carrières souterraines ou à des accidents survenus en liaison avec des cavités. Afin de compléter cette phase de renseignements, une enquête orale est menée auprès de la population locale.

L'expérience aidant, on peut considérer que les informations tirées des enquêtes sont toujours incomplètes et demandent à être précisées par une *phase de recherche d'indices de surface*. Ces indices peuvent être des anomalies topographiques révélatrices de déformations liées à des instabilités profondes ou signant la présence potentielle de vides de dissolution. Ils peuvent être également des vestiges d'ancienne activité extractive. À la suite de ces deux premières phases les secteurs potentiellement sous-minés seront circonscrits.

Le dernier stade de la phase initiale des recherches, basé sur des *techniques de télédétection*, vient compléter les informations tirées des stades précédents par l'analyse de photos aériennes, ou par acquisitions d'images infrarouge thermique. Ces techniques sont destinées à déceler des anomalies en relation directe ou indirecte avec une cavité en profondeur, qu'il s'agisse d'anomalies du relief ou d'anomalies de température. La *phase de validation terrain* permet de faire le tri entre les différentes anomalies et de circonscrire les zones à risque.

3.1 L'étape préalable

Cette phase de reconnaissance est une des plus importantes car elle permet d'une part, de valider la présence potentielle de cavités dans le sous-sol par une étude géologique adéquate, d'autre part, par le seul recours aux archives et aux témoignages, de cartographier avec plus ou moins de précision, les zones potentiellement sous-minées de manière naturelle ou artificielle. Une fiche de renseignements jointe en annexe du chapitre « Synthèse générale » permet de rassembler les informations collectées et de se forger un premier avis sur l'origine des indices étudiés.

◆ L'étude géologique

Il faut d'abord consulter la *carte géologique et topographique* à 1/50 000 et les autres documents existants. Cet examen permet de vérifier, en premier lieu, si d'anciennes carrières ou des indices de cavités souterraines figurent sur la carte et en second lieu, si des terrains susceptibles d'avoir été exploités ou de renfermer des cavités de dissolution sont présents en profondeur.

Le *log stratigraphique* renseigne sur la profondeur des bancs exploitables (ou solubles), donc sur la profondeur d'éventuelles cavités, de même que sur leur puissance qui contrôle la hauteur des vides, voire le nombre de niveaux exploités.

La *position de la nappe phréatique*, qui constituait autrefois une limite à la profondeur d'exploitation, est une information de premier ordre qui peut être tirée de la notice explicative accompagnant la carte géologique.

Sur la carte géologique figurent également les *accidents tectoniques*, servant de drains aux nappes phréatiques et sur lesquels sont en général alignées les anomalies topographiques (dolines, gouffres, aven) en relation avec des cavités de dissolution.

Un *contrôle visuel in situ* complétera les données de la carte. La recherche d'affleurements apporte en particulier des indications sur la formation géologique locale (stratification, failles, etc.). Il permet en outre de mieux renseigner sur :

- le type de roche ou de matériau concerné,
- son environnement lithologique,
- son état d'altération et de fracturation.

Ces informations permettent de préciser la carte géologique et, suivant les besoins, d'établir des corrélations avec les informations hydrologiques, tectoniques et pétrographiques... Ainsi, dans les formations karstiques, l'identification de ces paramètres permet d'extrapoler le risque à l'ensemble des zones présentant les mêmes caractéristiques de terrain et de déterminer les secteurs où la probabilité de trouver des cavités naturelles ou anthropiques est forte (Toulemont, 1987).

La recherche géologique est essentielle, car elle permet ensuite de choisir, d'une part, les méthodes géophysiques les plus adaptées à la détection des cavités et, d'autre part, l'implantation des profils géophysiques.

◆ La recherche d'archives et d'informations

C'est une étape très importante qui s'avère être dans certains cas la méthode la plus efficace pour localiser des cavités (Manier, 2001).

La recherche d'archives et d'informations commence généralement par l'étude de la toponymie de la zone à étudier sur une carte topographique 1/25 000. Les plans d'archives (plans cadastraux, plans d'exploitations (quand ils existent) sont alors consultés. Ces documents sont disponibles auprès des organismes publics suivants : Inspections des Carrières ou services municipaux ou départementaux des Carrières, DRIRE, BRGM ou dans les archives départementales et communales, des services de l'Équipement (Subdivision, DDE, LRPC), des Conseils généraux, des mairies, des sociétés houillères, des cabinets de géomètres, des associations spéléologiques, des GRIMP (Groupes d'intervention en milieu périlleux), des sapeurs pompiers, des gendarmeries, etc. D'autres organismes, comme le CEBTP, le CNRS, l'EDF peuvent mettre à disposition leurs bases de données. La consultation d'articles, de thèses, de mémoires, de rapports d'études en géologie, en géophysique et en génie civil contribueront selon les cas à la recherche d'indices.

Les cartes des risques naturels (ZERMOS, PER, PPR) contiennent des informations précieuses sur les zones karstiques et les carrières souterraines. Par ailleurs, une base de données (BDCavités) recensant les cavités rencontrées sur le territoire national est en voie de constitution par le BRGM, le LCPC et l'INERIS. Elle est en libre accès sur le site internet du BRGM.

Les informations intéressantes à recueillir concernent la toponymie, la morphologie, les indices de surface (effondrement, affaissement, puits, etc.), les indices de photographies aériennes déjà disponibles, la géométrie potentielle du vide recherché (taille, profondeur, extension, etc.), le type du vide recherché (carrières, souterrains, sapes, karts, etc.).

◆ L'enquête orale

Les témoignages des populations (maires, agriculteurs, etc.) sont riches d'enseignements. Il est possible d'interroger les personnes individuellement, oralement ou par courrier. Des réunions

sont fréquemment organisées en mairie en présence des administrés. Il convient cependant de rester prudent sur la valeur des témoignages humains car d'une part ces derniers font appel à la mémoire et d'autre part certains problèmes peuvent être cachés volontairement.

3.2 La recherche d'indices de surface

L'étape suivante consiste en une recherche d'indices d'affaissements, d'anciennes activités extractives ou de structures révélatrices de la présence potentielle de cavités naturelles (dolines, dépressions alignées, etc.) ou anthropiques (dépressions ponctuelles). Quand elle est possible, et ce d'autant plus pour des zones étendues, la *télé-détection* est une méthode fortement conseillée. Elle renseigne aussi bien sur la morphologie et la structure régionale que sur la température apparente du sol qui peut être étroitement liée à la présence d'une cavité. La télé-détection, regroupant ici *l'interprétation de clichés aériens et la radiométrie infrarouge thermique*, est décrite dans son principe et sa méthodologie au chapitre suivant.

Des *validations sur le terrain* doivent clore la phase préliminaire.

Les nouveaux indices relevés complètent la carte des secteurs potentiellement sous-cavés et permettent de définir les zones à risques.

4. LES RECONNAISSANCES GÉOPHYSIQUES ET GÉOTECHNIQUES

Un *premier zonage* issu des études préliminaires permet alors d'implanter les *méthodes d'exploration géophysiques de surface*. Elles consistent à mesurer l'effet d'un champ physique sur le terrain. À partir de ces mesures, certaines caractéristiques du sol vont être déduites, l'objectif étant de révéler toute cavité susceptible de provoquer des effets indésirables en surface. Le choix de l'une ou de plusieurs de ces méthodes dépend principalement des facteurs suivants (le chapitre « Synthèse générale » comporte une série de tableaux guidant ce choix) :

- la dimension de la zone d'étude et son environnement,
- la nature des terrains encaissants,
- les caractéristiques des cavités recherchées : cavités vides, partiellement ou non comblées de matériaux conducteurs, profondeur, dimension,
- les moyens disponibles, fonction de la nature du projet.

Ces études aboutissent à un *second zonage* du terrain, sur lequel sont implantés *les forages* de reconnaissance qui permettent d'affiner et de compléter le modèle géologique et le modèle géophysique. Ces forages peuvent être destructifs ou carottés. Dans ce dernier cas, les échantillons prélevés peuvent être analysés en laboratoire. L'enregistrement de paramètres physiques peut être réalisé pendant la foration (*diagraphties instantanées*) ou après la foration autour du forage (*diagraphties différées*). *Des mesures géophysiques en forage*, entre forages, ou de forage à surface, permettent le domaine d'investigation.

À ce stade, tous les moyens disponibles auront été mis en œuvre pour détecter des cavités souterraines naturelles ou anthropiques. Il appartient alors aux responsables maîtres d'œuvre de prendre les décisions adéquates quant aux traitements ou aux précautions qu'ils convient d'adopter.

Cependant, il convient de garder présent à l'esprit que le risque nul n'existe pas et qu'il sera toujours possible qu'une cavité trop petite, trop profonde, ou de caractéristiques non imaginées dans le modèle géologique, ne soit pas détectée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

MUDET M., *Les cavités souterraines sous plateformes ferroviaires. Méthodes d'étude et de détection - Application aux infrastructures nouvelles et existantes*, Mémoire ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers, 1997, 226 pages.

POTHÉRAT P., DORIDOT M., CHAHINE M., *L'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain*, Guide Technique, Collection environnement - Les risques naturels, Édition Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1999, 128 pages.

TOULEMONT M., Les risques d'instabilité liés au karst gypseux lutétien de la région parisienne - Prévision et cartographie, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **150-151**, **1987**, pp. 109-116.

TRITSCH J.-J, TOULEMONT M., DURVILLE J.-L., POTHÉRAT P., *Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines*, Guide technique, Collection Environnement, Édition Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, **2002**, 130 pages.
Risque et Génie Civil, Actes du Colloque, Paris-Unesco, **2000**.

Rapport du projet national CriTerre

MANIER E., *Problématique et méthodologie de recherche et de traitement développé au CETE Normandie Centre*, **2001**, 46 pages.

Références consultées mais non citées

HENRY G., *Géophysique des bassins sédimentaires*, Édition Technip, **1994**.

Ineris SSE, *Effondrements dans le karst triasique gypseux du secteur Malbosc (La Grand'Combe - Gard)*, Note de synthèse, **1994**.

JAILLET S., *Recul de couverture et karstification dans un karst couvert de bas plateaux : le Barrois (Lorraine/Champagne - France)*, Actes du colloques « Karst-99 », **1999**.

KAUFMANN O., *Les effondrements karstiques du Tournaisis : genèse, évolution, localisation, prévention*, Thèse de Doctorat de la Faculté Polytechnique de Mons, **2000**.

Rapport n° 1540, *Techniques de prévision et de prévention des risques naturels*, Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologique.

Synthèse générale

Chapitre 2

1. LA MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE POUR LA RECHERCHE DE CAVITÉS

La recherche de cavités s'inscrit dans une politique de prévention des risques naturels et technologiques. Elle a pour objectif de déterminer les zones sous cavées susceptibles de provoquer des préjudices en surface.

La méthodologie de recherche préconisée comporte les étapes suivantes : des études préliminaires, une campagne de mesures géophysiques, une campagne de forages. Elle doit mener à des solutions techniques de traitements.

Cette synthèse rappelle les points principaux de la méthodologie. Elle présente le domaine de l'étude et propose un classement des méthodes à déployer en fonction du type de cavités recherchées et de la taille de la zone d'étude. Enfin un tableau reporte pour chaque méthode les profondeurs d'investigation, le rendement, le type de cavité visée, la sensibilité au bruit, les sources de leurre et les conditions nécessaires d'applications.

1.1 Études préliminaires

◆ Études géologiques

La recherche des cavités souterraines naturelles ou anthropiques commence par la consultation d'une carte géologique et d'une carte topographique. Elle doit permettre de déterminer la nature du terrain et les éventuelles conditions propices à l'apparition de cavités.

Les cavités naturelles ou karsts se rencontrent dans un sol soluble comme le calcaire (milieu carbonaté) et le gypse (milieu sulfaté).

Les cavités anthropiques, essentiellement des carrières et des mines, se trouvent dans les sols exploitables par l'homme. Elles sont plus problématiques que les karsts : elles sont beaucoup plus nombreuses, et pour les plus anciennes, leurs caractéristiques (localisation et dimensions) sont perdues ou inconnues.

Il est fréquent que le sol soit soluble et exploitable (calcaire et gypse en particulier). La présence des deux types de cavités est alors possible.

L'étude géologique consiste à recueillir les informations concernant la structure interne du terrain et à analyser l'ensemble des indices pour définir les zones de faiblesse : fractures, zones de décompression et, si possible, zones sous cavées.

◆ Recherche d'indices

La recherche d'indices comporte la consultation d'archives et des enquêtes de voisinage. Selon les moyens mis en œuvre, le type de cavités recherchées et les dimensions de la zone d'étude, des techniques de télédétection compléteront cette étape. Un contrôle visuel *in situ* vient clore la recherche d'indices.

Les études préliminaires réalisées mènent à une première définition de l'aléa cavité et à un premier zonage. Elles peuvent être synthétisées, par exemple, sous la forme d'une fiche « Renseignement cavité » telle qu'indiquée en annexe du présent chapitre.

1.2 Les méthodes géophysiques

Les méthodes géophysiques sont appliquées après la réalisation des études préliminaires. Elles apportent des informations supplémentaires sur le modèle géologique et permettent de réaliser un second zonage plus précis, au droit des anomalies mesurées susceptibles d'être reliées à des cavités.

1.3 Les forages

Les forages sont ensuite implantés sur le second zonage. Ils permettent de contrôler localement les hypothèses faites sur le modèle géologique et la nature des anomalies mesurées par les méthodes géophysiques. Il est impératif d'accompagner les forages de diagraphies instantanées et le cas échéant, en fonction des études préliminaires, de diagraphies différées.

- Si les forages rencontrent une cavité, alors elle est détectée.
- Si les forages ne rencontrent pas de cavité, cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de cavité.

Des études supplémentaires peuvent être alors déployées : des mesures complémentaires en diagraphies permettent de préciser le modèle géologique et des mesures par méthodes géophysiques en forage permettent éventuellement de localiser des cavités près des forages quand elles sont indétectables depuis la surface. Ces dernières phases peuvent cependant s'avérer coûteuses et sont alors préférentiellement déployées autour des zones qu'il faut sécuriser impérativement.

Lorsque les cavités sont localisées, les solutions techniques de traitement sont envisagées pour sécuriser le site.

1.4 Synthèse des actions à entreprendre lors d'une recherche de cavités

Trois cas sont envisageables dans les phases de recherche de cavités inconnues.

a - La présence d'une cavité est mise en évidence par l'apparition d'accident de surface (fontis, effondrements, affaissements). Dans ce cas, il existe peu d'indications sur la taille et la profondeur des cavités. Une campagne de sondages destructifs (avec éventuellement enregistrement de paramètres) accompagnés d'un contrôle visuel pendant ou après la foration (sonar, caméra, etc.) permettra d'établir un premier diagnostic. Selon les moyens mis en œuvre, un puits d'accès peut aussi être creusé.

b - L'existence d'une cavité est soupçonnée à partir des études préliminaires sans pour autant en connaître la position et la profondeur. S'il n'y a pas d'indices de surface et que la position de la cavité n'est qu'approximative, alors deux étapes sont à envisager :

■ Une prospection géophysique définie sur la base du modèle géologique est à mettre en œuvre. Elle permettra de délimiter les zones à risque, et d'implanter les forages au droit des anomalies constatées.

■ La campagne de forages ne donnera satisfaction que si ceux-ci rencontrent les cavités. Les informations recueillies étant uniquement locales, si aucun forage ne rencontre de cavités, ce n'est pas pour autant qu'il n'y en a pas. Il convient alors de redéfinir leurs implantations.

Si des soupçons existent sur l'existence de cavités, en particulier si les résultats de la recherche préliminaire laissent supposer leur existence, et que la campagne de mesures géophysiques et la campagne de forages n'ont rien donné, il faut :

- soit reconsidérer le modèle géologique et les méthodes à déployer,
- soit prendre des décisions qui assumeront les risques encourus.

c - Si aucune information ne laisse supposer l'existence de cavité, il n'y a pas lieu de mener les recherches. Quelques sondages restent cependant nécessaires pour affiner le modèle géologique. Une campagne géophysique peut aussi être conduite car les informations recueillies seront autant d'informations supplémentaires pour affiner le modèle géologique, et donner la meilleure assise possible aux travaux envisagés.

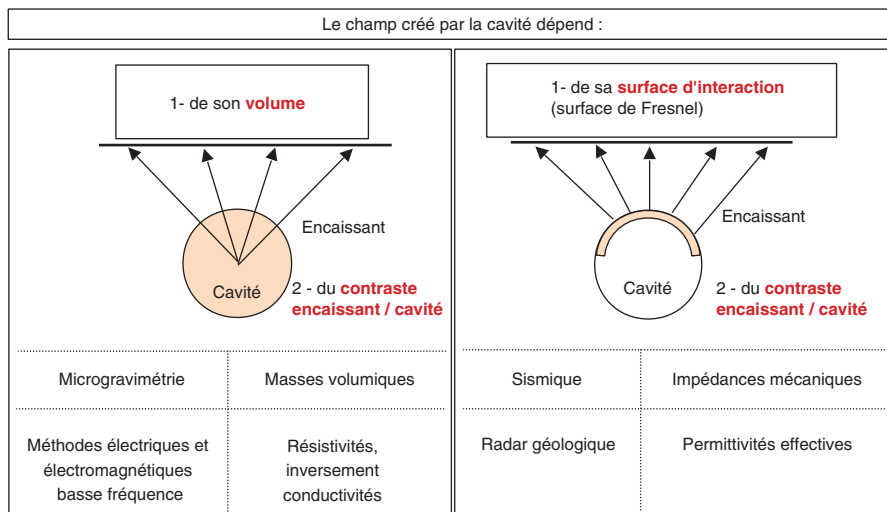
2. LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

2.1 Profondeur d'investigation et profondeur de détection

La *profondeur d'investigation* d'une méthode géophysique est la profondeur pour laquelle la mesure du champ physique est exploitable. C'est une grandeur théorique qui dépend de la nature du champ et des propriétés du sol.

La *profondeur de détection* est la profondeur pour laquelle un objet (cavité) de dimensions finies dans un sol produit un champ mesurable en surface. Ce champ dépend du *contraste entre les grandeurs physiques de la cavité et celles de l'encaissant*. En outre, selon les méthodes, ce champ dépend directement soit du *volume de la cavité*, soit de sa *surface d'interaction* (Fig. 10).

Seuls les outils de modélisation permettent de préciser les profondeurs de détection que l'on peut attendre d'une méthode pour un objet et un terrain donnés.



▶▶▶ FIGURE 10 - Dépendance géométrique du champ créé par une cavité selon différentes méthodes géophysiques.

2.2 Généralités sur la détection des cavités vides, des cavités comblées ou partiellement comblées

Une cavité de dimension finie est *directement* détectée par une méthode géophysique si le champ qu'elle produit est mesurable et significatif.

On détecte aussi un grand nombre de cavités *indirectement* : leur présence est révélée par la détection de la géométrie qui accompagne leur formation et/ou leur évolution : zones de décompression ou de drainage, failles, fractures, indices naturels et anthropiques de surface, etc. La majorité des cas consultés (bibliographie et résultats d'études) montre que :

- *des vides métriques à décamétriques sont détectés directement dans les vingt premiers mètres, avec plus ou moins d'efficacité selon les terrains et les méthodes. Un vide sphérique dont le toit est à une profondeur de l'ordre de son rayon (on parle souvent de vides peu profonds et volumineux) est a priori détectable avec toutes les méthodes géophysiques de surface. Au-delà de 15 m de profondeur, l'efficacité des méthodes diminue notablement : dans les conditions réelles de terrain, le milieu encaissant, souvent hétérogène, génère un bruit géologique qui minore la profondeur d'investigation théorique des méthodes.*
- *les vides au-delà de 20 m sont généralement mis en évidence indirectement. À titre d'exemple, les méthodes infrarouges ont permis de localiser des marnières par la détection de leur puits, alors que la profondeur de la chambre d'exploitation peut atteindre 40 m. De même, les méthodes sismiques localisent des vides à très grande profondeur (un exemple de mine localisée à plus de 100 m de profondeur est reporté en sismique) par effet de masquage des horizons réflecteurs sous-jacents.*
- *les cavités conductrices, c'est-à-dire les cavités partiellement ou totalement comblées par un matériau électriquement conducteur comme l'argile et l'eau, représentent une part importante des cibles à rechercher. Elles sont généralement liées à la présence de vides. Les cas les plus fréquents sont les carrières et les karsts comblés de matériaux limoneux ou argileux. Ce remplissage résulte principalement de circulations d'eau qui génèrent des zones de décompression dans le milieu encaissant et entraînent des particules plus ou moins fines et conductrices (circulation de fines). Dans ce contexte, l'imagerie du sol et de ses zones conductrices (failles, fractures, poches, etc.), classiquement obtenue par les méthodes radar et les méthodes électriques et électromagnétiques basse fréquence jusqu'à 50 m, constitue un outil important pour la recherche de cavités.*

2.3 Définition du domaine d'étude

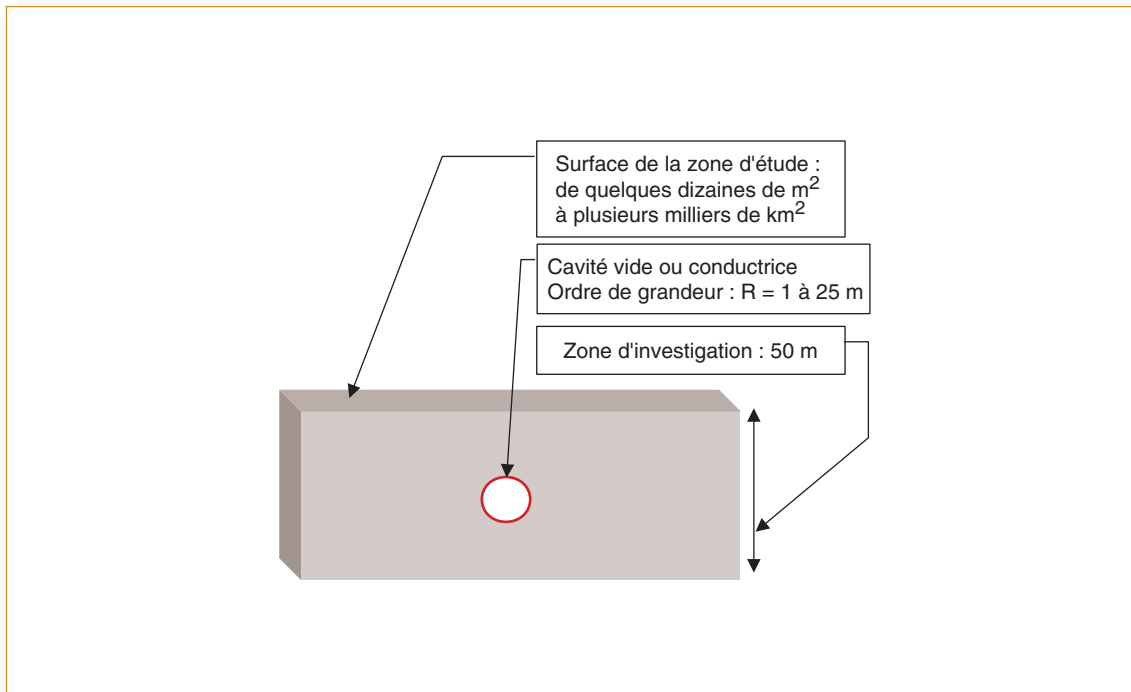
Pour les cavités anthropiques situées à des profondeurs pouvant atteindre 100 m (mines et carrières), les plans sont généralement connus. Si ce n'est pas le cas, les méthodes sismiques (sismique réflexion en particulier) sont les seules méthodes qui ont permis de relocaliser ce type de cavités dans certains cas autorisant d'excellentes conditions de mesures.

Pour les cavités naturelles profondes (> 50 m), le problème d'instabilité se présente essentiellement en milieu sulfaté, où des dissolutions peuvent apparaître très rapidement. Les dégâts en surface peuvent être très importants. Ce sont d'abord des études géologiques et hydrologiques qui permettront de déterminer le risque à ces profondeurs.

Outre ces deux exceptions, ce sont les cavités anthropiques de petites tailles (exploitations individuelles de type marnière ou catiche, de quelques dizaines de mètres cubes, sape de guerre, souterrain, etc.) et les karsts peu profonds qui posent problème. En génie civil et dans les cas les plus couramment traités, la recherche de vides concerne *essentiellement les dix à vingt premiers mètres de profondeur*. Arbitrairement, le domaine d'étude sur lequel sont comparées les méthodes géophysiques présentées dans ce guide a les caractéristiques suivantes :

- une surface de quelques m² à quelques km²,
- une profondeur d'investigation de 50 m,
- des cavités vides ou conductrices dont les dimensions varient de quelques décimètres à quelques mètres (Fig. 11).

⚡ **Remarque** : Les risques liés aux cavités situées à des profondeurs supérieures à 50 m existent. Outre les méthodes sismiques, appliquées dans des conditions très particulières, les autres méthodes de surface sont majoritairement inadaptées pour rechercher des cavités profondes.



▶▶▶ FIGURE 11 - Grandeurs caractéristiques de la zone de recherche de cavité en génie civil.

2.4 Non-unicité de la mesure en géophysique

L'interprétation d'une mesure en géophysique n'est pas unique : il existe un ensemble d'anomalies dans le sol susceptibles de produire le même effet sur le champ mesuré. Par conséquent, il est nécessaire d'augmenter les informations *a priori* sur le milieu et les cavités recherchées : une méthode géophysique doit impérativement s'accompagner d'études préliminaires et de forages. Il est aussi très fréquent que plusieurs méthodes géophysiques soient déployées.

Quelle que soit la méthode, un forage rencontrant une cavité est la seule certitude de détection. Dans la quasi-totalité des cas, ce sont les méthodes géophysiques qui permettront de définir au mieux l'implantation des forages.

2.5 Le bruit en milieu urbain et en milieu rural

Sans tenir compte du dispositif de mesure, le bruit d'une méthode géophysique a pour effet de diminuer les potentialités de la technique. Il a deux origines :

1 - Le bruit géologique

Il est lié à la nature des terrains et naît de la présence de toute autre hétérogénéité que la cavité, dans le milieu encaissant.

2 - Le bruit anthropique

Il est lié à l'activité humaine. Il est généralement faible en milieu rural et important en milieu urbain. Chaque méthode a son type de bruit. Le déploiement et l'interprétation des mesures géophysiques nécessitent de prendre en compte l'ensemble des facteurs perturbateurs.

En milieu urbain, les méthodes géophysiques de surface suivantes sont envisageables :

- les méthodes radar : seuls les émetteurs radio puissants et proches des points de mesures peuvent gêner l'interprétation des résultats. Généralement les antennes sont suffisamment blindées pour s'affranchir de cette éventualité.
- la microgravimétrie : bien que très délicate à mettre en œuvre, cette méthode a été déployée par des professionnels en site urbain, de nuit pour limiter le bruit anthropique, et avec une bonne connaissance de la répartition des masses environnantes (réseaux enterrés, bâtiments, etc.).

➤ la méthode sismique en ondes de surface : le niveau de bruit microsismique anthropique gêne moins les mesures en ondes de surface, ondes très énergétiques, que celles réalisées par exemple en sismique réflexion haute résolution. Cette méthode est en cours de développement.

En milieu rural, toutes les méthodes sont envisageables si les conditions d'application sont réunies.

3. LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES EN FONCTION DU TYPE DE CAVITÉS

3.1 Les méthodes de télédétection pour la recherche de cavités

L'interprétation de *clichés aériens* (CA) permet de mettre en évidence des indices invisibles depuis la surface (affaissements, zones de drainage, etc.).

La *thermographie infrarouge* (IR) révèle les contrastes de température apparente du sol, induits par des zones karstiques ou par les matériaux qui masquent les accès de certaines carrières (puits). Ces méthodes sont déployées généralement pour des grandes superficies (champ, commune, voire département).

3.2 Les méthodes géophysiques pour la recherche de cavités vides

Pour des vides sphériques en milieu homogène dont la profondeur du toit est de l'ordre du rayon, toutes les méthodes géophysiques de surface sont théoriquement susceptibles de les détecter directement.

La méthode théoriquement la plus fiable pour la recherche de cavités vides est la *microgravimétrie*, en milieu urbain ou en milieu rural. Des cavités à une quinzaine de mètres de profondeur peuvent être directement mises en évidence par cette méthode. Une cavité sphérique vide est détectable tant que la profondeur de son toit n'excède pas son diamètre, en milieu homogène.

Lorsque le milieu encaissant est suffisamment résistant, en milieu urbain ou rural, le *radar géologique* permet la détection de vides de quelques décimètres à quelques mètres de diamètre, jusqu'à 10 à 20 m de profondeur si les conditions de mesure sont excellentes.

Pour de plus grandes profondeurs (classiquement jusqu'à 50 m), en milieu rural, la *sismique réflexion haute résolution* (SHR) permet dans certains cas la détection de vides, par effet de masquage des horizons réflecteurs sous-jacents.

Pour ce même type de cavité mais seulement pour des milieux tabulaires présentant des vitesses croissantes avec la profondeur, jusqu'à 20 à 30 m, la *sismique réfraction* peut parfois être envisagée.

Pour des profondeurs inférieures à 10 m, en milieu urbain, la *sismique en ondes de surface* laisse entrevoir de bons résultats.

Enfin, l'utilisation des *méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain en mode résistivité* (type RMT ou VLF-R) est parfois envisagée en zone rurale pour la détection à grand rendement de cavités vides proches de la surface ou présentant des remontées verticales vers la surface (type puits de carrières, cheminées karstiques ou zones décomprimées).

3.3 Les méthodes géophysiques pour la recherche de cavités conductrices

Pour les cavités sphériques conductrices en milieu homogène, dont la profondeur du toit est de l'ordre de 1,5 fois le rayon, les méthodes électriques en panneau et les méthodes électromagnétiques basse fréquence sont susceptibles de les détecter directement.

Si le milieu encaissant est suffisamment électriquement résistant, le *radar géologique* peut détecter des poches conductrices de quelques décimètres à quelques mètres de diamètre pour des profondeurs de l'ordre de 10 à 20 m si les conditions de mesure sont excellentes.

Les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain (type VLF, RMT) et en champ proche (deux boucles ou Slingram) sont les méthodes les plus indiquées pour mettre en évidence des structures conductrices comme des remontées verticales vers la surface. Elles sont bien indiquées pour révéler des structures karstiques dans les dix à vingt premiers mètres en zone rurale. Au-delà et jusqu'à 50 m environ, l'interprétation devient plus délicate et reste essentiellement qualitative.

Les méthodes électriques en panneau permettent une investigation locale du sous-sol. Des anomalies conductrices peuvent être détectées jusqu'à 30 m de profondeur, mais nécessitent alors de grandes longueurs de dispositif. Elles apportent en revanche beaucoup d'informations sur la géologie du sous-sol (failles, pendages, stratification) et s'avèrent très utiles en milieu karstique.

3.4 Les méthodes pour la recherche de cavités non détectables depuis la surface

Lorsque les cavités ne sont pas détectables par des méthodes géophysiques de surface, on a recours aux forages. Ils sont en général accompagnés de *diagrapies*. Si les forages n'ont pas traversé de cavités, on peut avoir recours aux *méthodes géophysiques de forage*, pour augmenter leur rayon d'investigation. Elles se réalisent dans un seul forage, ou bien entre deux ou plusieurs forages, ou bien entre forages et surface.

Les conditions d'applications sont analogues à celles décrites depuis la surface. Le critère prépondérant étant cette fois le rapport entre le diamètre de la cavité et la distance au forage.

Les performances restent généralement inférieures à celles observées en surface en raison des conditions particulières de mesure. Les méthodes sismiques sont délicates à mettre en œuvre en forage. Le rayon d'investigation des méthodes électriques est limité par la profondeur du forage. Seules les méthodes électromagnétiques permettent la détection de cavités vides ou conductrices à des distances supérieures à leur diamètre, à condition que le terrain encaissant le permette.

4. CLASSEMENT DES MÉTHODES

4.1 Efficacité des méthodes géophysiques de surface et des méthodes de télédétection en fonction du type des cavités

Dans l'hypothèse où les conditions d'application des méthodes sont réunies, le tableau suivant propose un classement selon l'aptitude d'une méthode à détecter différents types de cavités. L'échelle est croissante de 1 pour la méthode la plus adaptée à 5 pour la moins adaptée.

⚡ *Remarque* : L'interprétation de clichés aériens (CA) et la thermographie infrarouge (IR) sont préconisées pour de grandes surfaces en milieu rural et avant le déploiement des méthodes géophysiques de surface.

◆ Recherche de cavités type « conduit vertical »

On considère ici les structures anthropiques ou naturelles induites par la présence d'une cavité. Il s'agit essentiellement des puits d'accès aux carrières et des fractures ou boyaux karstiques, vides ou conducteurs.

Les puits de carrières

De très nombreuses exploitations individuelles ont été abandonnées sur le territoire national. C'est le cas des marnières en Normandie. Leur localisation est souvent inconnue. Elles se répartissent sur de très grandes superficies (communes et départements). Les méthodes géophysiques de surface ne permettent pas de détecter directement les chambres d'exploitation car leurs dimensions sont généralement petites par rapport à leur profondeur. En revanche, leur puits d'accès est généralement obstrué par un bouchon qui crée avec le milieu encaissant un contraste de température détectable par télédétection infrarouge. Ces méthodes répondent alors à la fois aux exigences de rendement (mesures réalisées en avion) mais aussi d'efficacité.

Outre ce cas particulier, l'ensemble des méthodes géophysiques est envisageable lorsqu'il s'agit ici de détecter des cavités peu profondes (vides sous le bouchon).

Les fractures karstiques

La mise en évidence de ce type de structure est importante car elle implique généralement des réseaux étendus de circulation d'eau et de matériaux fins, plutôt conducteurs, pouvant déboucher sur des vides. Si le milieu encaissant est suffisamment électriquement résistant, le radar géologique est une méthode efficace pour cette problématique. Les méthodes électromagnétiques basse fréquence présentent un grand rendement et une efficacité maximale pour imager ce type de sol. Le panneau électrique est aussi bien indiqué, mais son rendement est plus faible.

◆ Recherche de cavités localisées en profondeur, vides ou conductrices (Tableau II)

On considère ici des cavités localisées en profondeur comme des carrières, des souterrains ou des sapes, etc.

▶▶▶ TABLEAU II

Classement des méthodes géophysiques au regard de la nature des cavités. Il convient de garder présent à l'esprit que certaines conditions d'application (*exemple* : site urbain) peuvent rendre inopérantes certaines méthodes (*cf.* Tableau IV)

Cavités vides	Exemples types		Téledétection	Géophysique de surface				
	Anthropique	Naturelle	IR et CA	Microgravimétrie	Radar	SHR	VLF-R/RMT	Panneau électrique
À moins de 10 m	Carrières, souterrains, sapes	Cavité karstique ou en milieu sulfaté	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non
			Si la cavité est associée à un conduit vertical	Si la taille de la cavité est suffisante	Si le milieu est électriquement résistant	Si présence de réflecteurs sous-jacents	Sauf si la cavité est importante et très proche de la surface	Sauf si la cavité est importante et très proche de la surface
Oui			Oui	Oui	Oui	Non	Non	
Si la cavité est associée à un conduit vertical			Si la taille de la cavité est suffisante	Si le milieu est électriquement résistant, et jusqu'à une quinzaine de mètres	Si présence de réflecteurs sous-jacents jusqu'à 50 m			
À plus de 10 m								
Cavités conductrices	Exemples types		Téledétection	Géophysique de surface				
	Anthropique	Naturelle	IR et CA	Microgravimétrie	Radar	SHR	VLF-EM, Slingram	Panneau électrique
À moins de 10 m	Carrières, ennoyées ou comblées d'argile	Fractures comblées, poches conductrices	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui
			Si la cavité est associée à un conduit vertical		Si le milieu est électriquement résistant	Sauf si aucune autre méthode n'est applicable		
Oui			Non	Oui	Non	Oui	Oui	
Si la cavité est associée à un conduit vertical				Si le milieu est électriquement résistant, et jusqu'à une quinzaine de mètres	Sauf si aucune autre méthode n'est applicable	Si le volume de la cavité est important	Si le volume de la cavité est important, et qu'il soit possible de déployer un dispositif très long en surface	
À plus de 10 m								

Pour des cavités vides

La microgravimétrie reste la méthode la mieux indiquée. Si la modélisation prévoit pour une cavité sphérique des profondeurs de l'ordre de deux fois le rayon, l'expérience montre qu'au-delà de 15 m, le bruit géologique (hétérogénéités de masse du sol comme dans les argiles à silex) peut créer de nombreux leurres et limiter les performances de la méthode.

Dans des milieux suffisamment électriquement résistants, le radar montre d'excellents résultats dans les dix premiers mètres, parfois jusqu'à 20 m.

Une des particularités des matériaux exploités en mines et carrières est leur répartition en couche dans les terrains. Les méthodes sismiques sont particulièrement efficaces pour imager ces strates : chaque interface est identifiée comme un réflecteur. La présence d'une cavité est alors révélée par la disparition dans le signal sismique du réflecteur sous-jacent. Dans ce contexte lithologique particulier, mais très fréquent, ce sont les méthodes les plus efficaces pour localiser les mines et les carrières y compris à grande profondeur.

Les autres méthodes ne sont pas préconisées, sauf si aucune des précédentes ne s'applique et si le vide recherché est proche de la surface (pour une sphère, la profondeur du toit est de l'ordre de son rayon).

Pour des cavités conductrices

Les méthodes radar sont utiles si l'encaissant est suffisamment électriquement résistant. Les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain et en champ proche sont bien adaptées à la détection de poches conductrices dans le sol. La méthode électrique en panneau, au rendement moindre, est aussi très performante.

De même, les méthodes sismiques peuvent révéler des poches où la vitesse des ondes sismiques décroît par rapport à celle de l'encaissant. Cependant cette information doit être corrélée avec des indices géologiques ou des résultats d'une autre méthode pour conclure à des zones conductrices. Enfin, le contraste de masse volumique est généralement insuffisant pour appliquer la microgravimétrie.

4.2 Le rendement des méthodes

La recherche de cavités peut concerner des grandes surfaces (taille d'un département) comme de petites surfaces (parcelle, champ). La méthodologie préconise de déployer si possible des méthodes à grand rendement pour réaliser un premier zonage, puis des méthodes d'investigation plus locales pour un second zonage.

Les données issues des campagnes de télédétection sont très riches d'informations pour un premier zonage sur de très grandes surfaces. L'acquisition des mesures est faite depuis un aéronef. Quand ces dernières ne sont pas envisageables, les méthodes géophysiques de surface, qui offrent alors le meilleur rendement sont le radar géologique et les méthodes électromagnétiques basse fréquences en champ proche et en champ lointain. L'acquisition des mesures se fait en véhicule, ou à pied (les méthodes électromagnétiques aéroportées n'ont pas été étudiées dans le cadre de la recherche de cavités). Les autres méthodes ont des temps de mise en œuvre et d'interprétation beaucoup plus longs.

Selon la taille de la zone à prospecter, il est possible de préconiser le déploiement de certaines méthodes pour des cavités plus ou moins profondes. Le tableau III ne tient pas compte des conditions d'applications. Ainsi, il est possible qu'une méthode à faible rendement soit la seule efficace pour détecter des vides sur de grandes surfaces (exemple de la microgravimétrie sur un grand linéaire avec encaissant conducteur).

▶▶▶ TABLEAU III

Méthodes préconisées en premier et second zonage en fonction de la taille de la zone d'étude et de la profondeur des cavités recherchées. Ce tableau ne tient pas compte des conditions d'application. EM-BF comprend les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ proche et en champ lointain

			Téledétection et méthodes géophysiques de surface		
			Premier zonage	Second zonage	
CAVITÉS	Profondeur	Dimension de la zone d'étude			
	- 10 m	Territoire (commune, département)		IR, CA	1 - Radar 2 - EM-BF 3 - Panneau électrique 4 - SHR 5 - Microgravimétrie
		Zone décamétrique à hectométrique, grand linéaire		1 - IR, CA 2 - Radar, EM-BF 3 - EM-BF	
		Zone ponctuelle		Radar, EM-BF	
	+ 10 m	Territoire (commune, département)		IR, CA	1 - EM-BF 2 - SHR
		Zone décamétrique à hectométrique, grand linéaire		1 - IR, CA 2 - EM-BF	
Zone ponctuelle			EM-BF		

4.3 Les principales caractéristiques des méthodes

Le tableau IV propose une synthèse des principales caractéristiques des méthodes :

- la profondeur de détection d'une cavité de dimensions finies (sphère). Elle est donnée pour la microgravimétrie, les méthodes électriques et les méthodes électromagnétiques basse fréquence. Dans les autres cas, la profondeur de détection indiquée est basée sur les résultats de publications scientifiques et de mesures réalisées par des bureaux d'études,
- le rendement,
- le type de cavité classiquement détectée par la méthode,
- son applicabilité en milieu urbain,
- la sensibilité au bruit,
- les sources de leurre,
- les conditions nécessaires d'application.

Pour l'ensemble des méthodes, l'interprétation des mesures, le traitement et la mise en oeuvre doivent être suivis par un géophysicien expérimenté. Les résultats doivent être corrélés avec ceux des reconnaissances préliminaires (recherche d'indices et étude géologique) et conduire à l'implantation de forages de validation.

Remarque 1 : Une méthode dont la profondeur de détection n'est que de quelques mètres pour une cavité de dimension finie, peut par ailleurs révéler la présence d'une cavité beaucoup plus profonde en mettant en évidence une caractéristique associée à l'existence de celle-ci.

Remarque 2 : Les méthodes sismiques couvrent le domaine de l'étude (< 50 m) et sont les seules méthodes à pouvoir détecter couramment des cavités profondes. Dans des conditions exceptionnelles, lorsque le milieu encaissant est très résistant, le radar géologique peut également atteindre ces profondeurs.

Remarque 3 : La profondeur d'investigation, et donc de détection, dépend des dimensions et de la profondeur de la cavité et :

- de la fréquence des ondes électromagnétiques et de la résistivité apparente pour les méthodes basse fréquence en champ lointain,
- de l'écartement entre bobines et de la résistivité apparente pour les méthodes Slingram (champ proche),
- de la permittivité effective (conduction et polarisation) et de la fréquence des ondes électromagnétiques pour le radar (haute fréquence),
- du rapport des masses volumiques terrain encaissant/cavité pour la microgravimétrie,
- du rapport d'impédance acoustique terrain encaissant/cavité et de la fréquence des ondes pour les méthodes sismiques.

▶▶ TABLEAU IV

Caractéristiques principales des méthodes géophysiques pour la recherche de cavités souterraines

	Profondeur d'investigation indicative	Rendement	Type de cavités	Milieu urbain	Sensibilité au bruit	Sources de leurre	Conditions nécessaires de détection
Microgravimétrie	2R pour une sphère vide de rayon R	50 points de mesure/jour	Vides francs, cavités partiellement envoyées	Oui, mais contraintes fortes	Activité humaine, séismes, chocs	Hétérogénéités massiques du sol	Topographie connue au cm près en z
Sismique réflexion très hautes résolutions	Jusqu'à 50 m	Quelques centaines de mètres/jour, pour des dispositifs d'une centaine de mètres et une distance de 1 m entre géophones	Vides francs, carrières exploitées en chambre et piliers	non	Activité humaine, séismes, chocs, ondes de surface	Zone décomprimée, mauvais traitement	Présence d'un horizon réflecteur sous la cavité
Sismique réfraction	Entre 20 et 30 m			non			Milieu de vitesse croissant
Sismique en ondes de surface	10 m, dépend uniquement de la longueur d'onde dominante	Idem, plus si dispositif glissant	Vides proches de la surface, 10 m ² de section	oui	Activité humaine, séismes, chocs, ondes de surface	–	–
Radar géologique	Inversement proportionnelle à la conductivité. Jusqu'à 15 m	Plusieurs centaines de mètres à quelques km/jour	Cavités vides et cavités conductrices	oui	Faible sauf si antennes non blindées	–	Milieu encaissant supérieur à 100 Ωm
Slingram		Moyen, en général les mesures sont conduites à la vitesse de marche	Karst argileux avec remontée verticale (par cheminées argileuses)	Oui, mais contraintes fortes	Lignes et clôtures électriques	Environnement métallique	Milieu plutôt conducteur
VLF-R	Quelques mètres, comparable à celle obtenue en panneau électrique pour une anomalie ponctuelle	Faible si électrodes inductives piquées dans le sol, grand si électrodes capacitatives tractées	Conducteurs ou vides avec remontée verticale (par exemple puits de catiche)	non	Émetteur radio, environnement métallique	Environnement métallique	Réception des émetteurs
VLF-EM		Moyen, en général les mesures sont conduites à la vitesse de marche	Karst argileux avec remontée verticale	non	Émetteur radio, environnement métallique	Environnement métallique	Réception des émetteurs
Infrarouge	Quelques mètres	Très grand rendement	Puits de marnière et karsts affleurants	non	Activité humaine	Surfaces boisées, eau	Vol d'été après 17 h. Vol d'hiver en fin de nuit
Panneau électrique	Pour une sphère vide de rayon R. 1,5R pour une sphère conductrice de rayon R	Quelques centaines de mètres/jour, pour des dispositifs d'une centaine de mètres et une distance de 1 mètre entre électrodes	Plutôt anomalies conductrices (failles, pendage, stratification, etc.)	non	–	À-coups de prise	–

5. CONCLUSION GÉNÉRALE

La recherche de cavités souterraines doit être conduite selon la méthodologie générale présentée. Les étapes préliminaires doivent nécessairement être réalisées. Les méthodes géophysiques peuvent alors être mises en œuvre pour effectuer un zonage précis. Seuls les forages de contrôle permettent de confirmer la présence de cavités. Si les forages ne les rencontrent pas, cela ne signifie pas qu'elles n'existent pas. Des études complémentaires (diagraphies, méthodes géophysiques de forage) peuvent alors être menées selon le degré de fiabilité des aléas définis dans les études préliminaires.

Pour la détection de cavités vides, la microgravimétrie est la méthode indiquée. Son rendement est faible. En milieu suffisamment électriquement résistant, le radar géologique s'applique à la détection de vides. Son rendement est grand. Enfin la méthode sismique réflexion haute résolution est une méthode particulièrement efficace pour la détection de vides dont la base est située sur des horizons réflecteurs détectables, jusqu'à 50 m environ.

Pour la détection de cavités conductrices, le radar est adapté si le milieu encaissant est suffisamment résistant. Les méthodes électromagnétiques basse fréquence sont également bien adaptées. Une méthode en panneau électrique, efficace mais à rendement plus faible, permet alors de compléter les informations sur la géologie du site.

Pour l'ensemble de ces méthodes et pour la qualité des études conduites, la mise en œuvre, le traitement et l'interprétation exigent l'intervention de géophysiciens expérimentés. Des recommandations générales à l'usage des donneurs d'ordre et des géophysiciens peuvent être trouvées dans les publications de l'AGAP-Qualité* : Code de bonne pratique ; Guide pour l'établissement des consultations.

* Association pour la Qualité en Géophysique Appliquée non pétrolière (www.agapqualite.com).

6. RÉSUMÉS

RADIOMÉTRIE INFRAROUGE THERMIQUE

◆ 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. Les mesures se font depuis un aéronef et le rayonnement est enregistré par un radiomètre (par exemple caméra infrarouge).

◆ Grandeur mesurée

C'est la *température apparente de surface* du sol qui est mesurée. Pour la recherche de cavités, le domaine spectral considéré est la gamme de *l'infrarouge thermique* (8-15 μm).

◆ Résultats attendus

Le résultat attendu est la *représentation de la température de surface du sol et ses variations temporelles en fonction des coordonnées géographiques*.

Pour les puits de carrières visibles, repérés par un bosquet d'arbres, les anomalies thermiques sont froides l'été en fin de journée et chaudes en fin de nuit.

Pour les puits invisibles, en été, en fin de journée, une anomalie en forme de cible, à cœur froid et auréole chaude, peut constituer un indice de présence. En hiver, le même indice a un cœur chaud.

Des zones chaudes en été, en fin de journée, signalent les zones remblayées ou les zones perturbées.

◆ Domaine d'application

La méthode s'applique en milieu rural pour la *localisation indirecte de vides* comme les marnières par la mise en évidence de leur puits d'accès. La période de mesure la plus propice se situe en été par grande chaleur, en fin de journée (17 h-18 h) et en hiver en fin de nuit par temps de gel. Pour une bonne interprétation, les informations croisées été/hiver sont souhaitables.

◆ Profondeur d'investigation

La méthode met indirectement en évidence la présence de cavités en détectant leur extension vers la surface : puits de carrières affleurants ou sous quelques mètres de recouvrement. Des études en milieu karstique montrent qu'un vide franc peut être mis en évidence à moins de 5 m de profondeur.

◆ Rendement

Il est conditionné par le temps de vol qui permet de couvrir des territoires de plusieurs km^2 en quelques heures, et par le temps d'interprétation et la validation terrain.

◆ Limites

Les forêts, bosquets ou champs de maïs, de chanvre ou de tournesol, au maximum de leur développement végétatif, masquent les indices.

Les prairies en été livrent peu d'informations exploitables.

La présence d'eau dans les affaissements mène à de nombreux leurres.

LA MICROGRAVIMÉTRIE

◆ Principe

Le principe de la microgravimétrie repose sur la mesure des variations du champ de pesanteur créées par la répartition des masses du sous-sol. L'appareil de mesure est le microgravimètre.

◆ Grandeur mesurée

La grandeur mesurée est l'*anomalie de Bouguer* Δg_B . L'unité de mesure est le milligal ou le microgal ($1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ m.s}^{-2}$). L'anomalie de Bouguer est la variation du champ de pesanteur mesurée corrigée des effets :

- 1 - de dérives temporelles : dérives instrumentale et de marées luni-solaires,
- 2 - de l'altitude,
- 3 - de la latitude,
- 4 - du plateau,
- 5 - du relief du terrain.

◆ Résultats attendus

Les caractéristiques géologiques plus massives et plus profondes créent en surface une variation du champ de pesanteur qui à l'échelle des mesures microgravimétriques, représente une variation lente : c'est l'*anomalie régionale*. Elle est ôtée de l'anomalie de Bouguer pour obtenir l'*anomalie résiduelle*.

Le résultat attendu est une *carte d'isovaleurs ou d'isocontours* représentant l'*anomalie résiduelle sur la surface auscultée*.

Une cavité vide se manifeste par une anomalie négative. Les cavités créent des défauts de masse qui engendrent une diminution de l'ordre du μgal à quelques dizaines de μgal sur le champ de pesanteur. L'anomalie significative est de l'ordre de 15 à 20 μgal .

◆ Domaine d'application

La méthode s'applique en milieu rural comme en milieu urbain (moyennant quelques spécificités méthodologiques). Elle est particulièrement bien indiquée pour la recherche de vides, puisque le contraste de masse volumique entre la cavité et le milieu encaissant est alors maximal.

◆ Profondeur d'investigation

Une cavité sphérique est détectable tant que la profondeur de son toit reste de l'ordre de son diamètre, dans un milieu homogène. Cette limite théorique est largement dépassée pour des galeries ou des souterrains, dont l'extension crée une anomalie beaucoup plus importante et plus étalée. Expérimentalement, *on constate qu'au-delà de 20 m de profondeur et, quelle que soit la cavité, l'interprétation des mesures microgravimétriques est très délicate.*

◆ Rendement

La microgravimétrie est une méthode à faible rendement : *50 points de mesures par jour* en moyenne.

◆ Limites

La topographie doit être connue au centimètre près en altitude.

La mise en œuvre de cette méthode nécessite beaucoup de précaution et de précision pour l'utilisation de l'appareillage, l'implantation, les corrections et l'interprétation des mesures. La microgravimétrie doit être conduite par des professionnels expérimentés.

LA SISMIQUE RÉFLEXION HAUTE RÉOLUTION

◆ Principe

La sismique réflexion haute résolution est l'étude de la propagation des ondes de volume (ondes de compression ou ondes P et ondes de cisaillement ou ondes S) et de leur interaction (réflexion et diffraction) sur des contrastes de caractéristiques mécaniques entre l'encaissant et les hétérogénéités du sous-sol.

L'émetteur est une source sismique de type explosif ou masse. Les récepteurs sont des géophones implantés dans le sol.

◆ Grandeurs mesurées

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 (ms) et en fonction de la position entre la source sismique et les capteurs.

◆ Résultats attendus

La coupe temps représente les amplitudes des ondes sismiques en fonction du temps de parcours et de la position d'un dispositif de mesure dont chaque capteur est associé à une source. L'estimation de la vitesse quadratique moyenne des ondes dans le sol permet le passage à la coupe profondeur.

La coupe profondeur représente les amplitudes des ondes sismiques en fonction de la profondeur de 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, les dimensions d'une cavité peuvent être estimées. Des résultats complémentaires comme les sismogrammes issus de la migration (section migrée) peuvent aider à l'interprétation des signaux.

Le phénomène le plus caractéristique qui traduit la présence de cavité est le *masquage d'horizons réflecteurs* (interface entre couches d'impédances différentes), et plus rarement, une atténuation des amplitudes et un retard dans les temps d'arrivée.

◆ Domaine d'application

C'est une méthode qui s'applique en milieu rural. Elle est particulièrement indiquée pour la détection de cavité en milieu tabulaire (cas des mines et des anciennes exploitations dans les bancs calcaires). La présence de cavité est alors bien mise en évidence par le masquage des horizons réflecteurs.

◆ Profondeur d'investigation

En règle générale, cette méthode est utilisée pour caractériser des cavités de 2 à quelques mètres de rayon, jusqu'à 50 m de profondeur (carrières de type catiches ou marnières, souterrains et galeries).

◆ Rendement

Il est conditionné par le temps de mise en œuvre et surtout de traitement qui exige une grande expérience de la méthode.

◆ Limites

Une grande attention doit être apportée à la définition et aux traitements des mesures, des professionnels expérimentés doivent intervenir à chacune de ces étapes.

La méthode nécessite l'utilisation de sources sismiques énergétiques et hautes fréquences, souvent destructives.

LA SISMIQUE RÉFRACTION

◆ Principe

La sismique réfraction est l'étude de la propagation des ondes sismiques réfractées dans le sol. Ces ondes empruntent un trajet selon un angle critique, suivent les interfaces entre couches et se réfractent partiellement vers la surface suivant le même angle critique.

◆ Grandeurs mesurées

Les grandeurs mesurées sont les *amplitudes* des ondes sismiques réfractées en fonction du *temps de propagation* (en millisecondes) et de la *distance entre la source et les géophones*. Les amplitudes associées aux réfractions sont représentées en plan (sinusoïde, wiggle en anglais), quelquefois en niveau de couleur. Généralement, seules les amplitudes des ondes P sont exploitées.

◆ Résultats attendus

Le *premier résultat* attendu est une *dromochronique* qui est la représentation du temps de trajet des ondes réfractées en fonction de la distance entre la source et les géophones. Les dromochroniques sont établies à partir du *pointé des temps de trajet* des premières arrivées sur le sismogramme brut. Les droites associées au pointé permettent de déterminer les vitesses des ondes sismiques dans le milieu tabulaire. La dromochronique coupe à l'origine des abscisses l'axe des ordonnées en un point appelé *intercept*.

Le *second résultat* attendu est une représentation des horizons réfracteurs en fonction de la profondeur et de la position en surface.

D'autres résultats comme l'interprétation des dromochroniques par la méthode du « plus-minus » peuvent être présentés.

La présence d'une cavité sera révélée par des retards dans les temps d'arrivée (surdélais) correspondant aux horizons réfracteurs. Cette anomalie se retrouve dans toutes les dromochroniques associées au dispositif.

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 total d'enregistrement.

◆ Domaine d'application

En milieu rural, la méthode est utilisée pour déterminer la position de cavités vides présentes dans une couche de matériau. Il faut que le milieu ait un *profil de vitesse croissant* entre couches en fonction de la profondeur, sinon la méthode n'est pas applicable. De plus, seules les cavités localisées sur le trajet des ondes réfractées pourront être observées si leur taille engendre des « retards » significatifs sur les dromochroniques.

◆ Rendement

Le temps de mise en œuvre est comparable à celui de la sismique réflexion. Les traitements sont *a priori* moins délicats mais exigent une grande expérience de la méthode.

◆ Profondeur d'investigation

Les profondeurs visées concernent généralement les vingt à trente premiers mètres.

◆ Limites

La sismique réfraction ne s'applique que pour des milieux tabulaires, où le contraste des vitesses entre couches croît avec la profondeur.

Cette méthode présente les mêmes caractéristiques dans sa mise en œuvre que la sismique réflexion haute résolution. L'emploi de source explosive, le bruit environnant (sismique et électromagnétique) sont autant de contraintes qui restreignent l'utilisation de la méthode en milieu sécurisé, non urbain. Le traitement des mesures est moins délicat, mais il doit être fait par un géophysicien expérimenté.

LA SISMIQUE EN ONDES DE SURFACE

◆ Principe

La sismique en ondes de surface est l'étude de la propagation des ondes de Rayleigh dans le sol et de leur interaction sur des contrastes mécaniques entre l'encaissant et les hétérogénéités du sous-sol.

C'est une méthode en cours de développement, qui utilise les propriétés d'ondes particulièrement énergétiques pour la détection de cavités proches de la surface.

◆ Grandeurs mesurées

Les grandeurs mesurées sont les amplitudes des ondes sismiques associées aux phénomènes de transmission et de diffraction en fonction des temps de parcours mesurés en millisecondes et de la position entre la source et les capteurs.

◆ Résultats attendus

Les résultats attendus d'une campagne de mesure 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 sismiques en fonction du temps de parcours et de la position d'un dispositif de mesure dont 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 peut se manifester sur la coupe temps par une atténuation (ou un masquage) des horizons réflecteurs, accompagnée d'hyperboles de diffraction sur la cavité. *Une cavité agissant comme un filtre coupe bande, une atténuation est également visible sur les diagrammes de dispersion.* Elle peut aussi être mise en évidence par l'étude des *rapports spectraux* de l'onde transmise et de l'onde réfléchi (sur la cavité) sur l'onde émise.

◆ Domaine d'application

Il n'y a pas aujourd'hui de méthodologie établie pour la recherche de cavités par cette méthode. Elle laisse cependant présager de bons résultats pour la recherche de vides en milieu rural comme en milieu urbain.

◆ Profondeur d'investigation

La profondeur d'investigation de cette méthode est de l'ordre de *10 m*. Elle dépend uniquement de la longueur d'onde.

◆ Rendement

Le rendement de la méthode peut être plus grand que les autres méthodes sismiques, car l'utilisation de dispositif glissant donne des résultats satisfaisants. Le traitement et l'interprétation exigent une grande expérience de la méthode.

◆ Limites

Sa profondeur d'investigation est faible. Elle requière la mobilisation de professionnels dotés d'une grande expérience spécifique.

PANNEAU ÉLECTRIQUE EN COURANT CONTINU

◆ Principe

Les méthodes en panneau électrique à courant continu consistent à étudier les propriétés des sols par injection d'un courant continu au moyen de deux électrodes et par la mesure de la différence de potentiel aux bornes de deux autres électrodes.

◆ Grandeur mesurée

La grandeur mesurée est la *résistivité apparente* ρ_a du sol ($\Omega.m$), pour un dispositif d'électrodes donné. La résistivité apparente est le rapport de la différence de potentiel mesurée sur le terrain à celle que l'on mesurerait avec le même dispositif et la même injection de courant sur un terrain homogène de résistivité $1 \Omega.m$. La résistivité d'un matériau est l'inverse de la conductivité σ mesurée ($S.m^{-1}$). Un matériau conduit d'autant mieux le courant électrique que sa résistivité est faible (ou sa conductivité forte).

◆ Résultats attendus

Le premier résultat brut attendu d'une mesure en panneau électrique est une *carte de résistivité*, appelée aussi *pseudo-section*, représentant la résistivité apparente graduée sur une gamme de couleur. La coordonnée horizontale de chaque point est la position du centre du dispositif le long du profil, les coordonnées verticales représentent la longueur du dispositif. Cette carte n'est pas une représentation d'une coupe de terrain : pour une longueur de dispositif donnée, c'est la résistivité apparente qui est représentée le long du profil.

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.

À contraste égal avec l'encaissant, une anomalie conductrice est beaucoup plus facilement détectable qu'une anomalie vide.

◆ Domaine d'application

La méthode s'applique en milieu rural. Le terrain de surface doit permettre l'implantation des électrodes de mesure. Elle fournit des informations précieuses pour décrire les caractéristiques géologiques associées à la présence de cavités conductrices, particulièrement en milieu karstique.

◆ Profondeur d'investigation

Pour les profondeurs inférieures à 20 m, le dispositif pôle-pôle est bien indiqué. Seules les électrodes A (de courant) et M (de potentiel) sont mobiles, les électrodes B et N sont rejetées à l'infini (à une distance de plus de vingt fois AM). Le dispositif quadripôle symétrique est utilisé pour de plus grandes profondeurs, de même que le dispositif pôle-dipôle. Le dispositif dipôle-dipôle est souvent utilisé pour le panneau mais peut conduire à des résultats difficiles à interpréter. La profondeur de détection pour une sphère résistante de rayon R est de $0,8R$ pour un dispositif Wenner, $1R$ pour un bipôle, $1,1R$ pour un tripôle et $1,1R$ pour un Wenner Béta.

◆ Rendement

Il est conditionné par le temps de mise en oeuvre, d'inversion et d'interprétation des mesures.

◆ Limites

L'interprétation des résultats est délicate car elle est basée sur les cartes de résistivité inversées : les hypothèses d'inversion ne tiennent généralement compte que de la répartition 2D des matériaux alors que les mesures englobent le demi-volume sous la surface. Seuls des professionnels expérimentés sont à même de conduire ce type d'investigation.

MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES BASSE FRÉQUENCE EN CHAMP LOINTAIN

◆ Principe

Le principe des méthodes électromagnétiques en champ lointain repose sur l'émission d'un champ primaire et la réception du champ total, somme du champ primaire et du champ secondaire créé par une anomalie résistante ou conductrice dans le sol. Les méthodes décrites ici sont les méthodes VLF (very low frequency, 10-30 kHz) et la RMT (radio magnétotellurique, 10 kHz-1MHz).

◆ Grandeurs mesurées

Pour un émetteur dipôle électrique vertical, le mode tout magnétique, aussi qualifié de « *mode inclinaison* », (encore appelé VLF-EM ou VLF-Z) permet de mesurer les composantes du champ magnétique total.

Pour un émetteur dipôle électrique vertical, le mode électrique-magnétique ou « *mode résistivité* » (encore appelé VLF-R) permet de mesurer le champ électrique total et le champ magnétique total. La RMT et le VLF-R correspondent à la même méthode, mais sur des plages de fréquences différentes.

◆ Résultats attendus

Les résultats attendus en fonction de la distance en *mode inclinaison* sont :

- *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 couleur graduées en fonction du rapport des champs,
- *la phase* de ce même champ par rapport au champ horizontal de référence,
- *l'inclinaison* (le tilt) du grand axe de l'ellipse de polarisation, et *l'ellipticité*, rapport du petit axe sur le grand axe de l'ellipse.

En *mode résistivité*, les résultats attendus sont :

- *la résistivité apparente* ρ_a ($\Omega.m$), obtenue par la formule de Cagniard. 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.

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

◆ Domaine d'application

Ces méthodes s'utilisent en milieu rural, en particulier karstique, pour délimiter la répartition des matériaux conducteurs dans le sous-sol.

Ce sont des méthodes mieux adaptées à la détection de cavités conductrices que de cavités vides. Elles sont d'autant plus efficaces que ces cavités présentent des extensions verticales vers la surface, comme dans les zones karstiques, ou proches de la surface comme les puits d'accès de certaines carrières.

◆ Profondeur d'investigation

L'épaisseur de peau δ , profondeur pour laquelle l'amplitude des champs est divisée par $e^{-2.718}$, vaut approximativement $503(\rho/f)^{1/2}$ où ρ est la résistivité du sol et f la fréquence de l'émetteur. *La profondeur d'investigation est de l'ordre de la moitié de l'épaisseur de peau.*

◆ Rendement

Les rendements de ces méthodes sont d'au moins la vitesse de marche de l'opérateur jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres par jour si les dispositifs sont tractés.

◆ Limites

La réponse d'une cavité dépend de sa géométrie et de son orientation par rapport au champ primaire. Dans l'idéal, il faudrait conduire les mesures aux mêmes fréquences selon deux orientations orthogonales au champ incident : en polarisations E et H. Ces conditions sont difficiles à réunir sur le terrain.

L'interprétation est essentiellement qualitative.

MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES BASSE FRÉQUENCE EN CHAMP PROCHE (SLINGRAM)

◆ Principe

Le principe des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ proche repose sur l'émission d'un champ primaire dans le sol et la réception du champ total, somme du champ primaire et du champ secondaire créé par une anomalie conductrice ou résistante. Deux dipôles magnétiques constituent un émetteur et un récepteur, orientés perpendiculairement ou horizontalement à la surface (méthodes Slingram).

◆ Grandeur mesurée

C'est le rapport de la composante du champ secondaire en quadrature par rapport au champ primaire qui permet de décrire les hétérogénéités du sous-sol en terme de *conductivité apparente* σ_a mesurée en Siemens par m ($S.m^{-1}$) (inverse de la *résistivité apparente* ρ_a mesurée en ohm mètre ($\Omega.m$)).

◆ Résultats attendus

Les résultats attendus sont *des profils de résistivité apparente* ou moins souvent des profils de conductivité apparente en fonction de la distance en surface. La représentation de plusieurs profils parallèles est une carte de couleurs (ou d'iso-valeurs) graduée en fonction de la résistivité apparente et dont les coordonnées horizontales et verticales délimitent la surface prospectée.

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) et par une augmentation locale du rapport du champ vertical (par rapport à la surface) sur le champ horizontal, en phase et en quadrature.

◆ Domaine d'application

En milieu rural, la méthode est bien indiquée pour certains milieux karstiques, pour des structures remplies de matériaux conducteurs, plus particulièrement celles présentant des remontées verticales vers la surface, comme en milieu karstique.

◆ Profondeur d'investigation

Elle varie suivant la distance entre boucles et l'orientation des dipôles. Pour les dispositifs portables par un seul opérateur, la profondeur d'investigation est faible (< 10 m). Pour les dispositifs nécessitant deux opérateurs, la profondeur d'investigation peut être plus grande (< 50 m). Pour la détection de cavités, les profondeurs d'investigation sont généralement de l'ordre de 20 m.

◆ Rendement

Le rendement est grand et les mesures peuvent être conduites en zones difficiles d'accès (non circulables) pour les dispositifs à un opérateur : la méthode permet de réaliser rapidement un premier zonage (quelques kilomètres par jour). Il est plus faible et les mesures sont plus délicates à conduire pour les grands dispositifs nécessitant un opérateur par boucle.

◆ Limites

L'interprétation des résultats est essentiellement qualitative, sauf pour la description des milieux tabulaires (à deux voire trois couches).

LE RADAR GÉOLOGIQUE

◆ Principe

Les méthodes de reconnaissance radar sont basées sur l'émission et la réception des ondes électromagnétiques dans le sol (impulsion temporelle), dans une bande de fréquence de quelques dizaines de MHz à quelques GHz. Elles interagissent avec la matière lorsqu'elles rencontrent un contraste électromagnétique, 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.

◆ Grandeur mesurée

On mesure un signal qui représente les variations d'amplitude du champ électrique en fonction du temps (mesuré en nanosecondes) de propagation des ondes dans le terrain. Le champ électromagnétique varie en fonction de la permittivité complexe (sans dimension) des matériaux.

◆ Résultats attendus

1 - Le premier résultat attendu s'appelle *un radargramme brut* ou *coupe temps*. Il est similaire aux représentations obtenues en sismique : l'amplitude de chaque signal est graduée en niveaux de couleurs, et les signaux sont juxtaposés en fonction de leur position en surface.

2 - Le deuxième résultat attendu est le *radargramme interprété* : la connaissance des vitesses dans le milieu et la mesure du temps de propagation des ondes permet de représenter les signaux en fonction de la profondeur (m).

3 - La signature d'une cavité est un contraste plus ou moins prononcé sur le radargramme brut, proportionnel au rapport des permittivités effectives de l'encaissant et de la cavité et fonction de l'atténuation intrinsèque du sol.

Ce contraste est relativement fort pour une cavité vide. Il est très élevé pour une cavité ennoyée. En revanche le signal est fortement atténué lorsqu'il traverse un milieu encaissant conducteur.

◆ Domaine d'application

La méthode s'applique en milieu rural et en milieu urbain dans des sols relativement résistants (résistivité apparente supérieure à 100 Ω .m) pour la recherche de vides et de conducteurs. La méthode est déconseillée dans des milieux conducteurs comme les limons et les argiles. Elle est bien adaptée en milieu karstique.

◆ Profondeur d'investigation

Elle dépend essentiellement de la résistivité du milieu encaissant, s'il est considéré à pertes ou faibles pertes, et suivant les fréquences utilisées. Par expérience, les cavités souterraines au-delà de 15 m sont rarement détectables.

◆ Rendement

Son rendement est grand (plusieurs centaines de mètres à quelques kilomètres par jour). Suivant les matériels et les conditions, le dispositif peut être porté par l'opérateur pour des zones difficiles d'accès ou traîné par un véhicule.

◆ Limites

La présence d'une couche conductrice en surface (couvert végétal) limite la pénétration des ondes dans le sol.

Plus les fréquences des ondes électromagnétiques sont élevées, meilleure est la résolution et moins grande est la profondeur de pénétration des ondes. A l'opposé, plus basses sont les fréquences utilisées, plus grande est la profondeur de pénétration mais moins bonne est la résolution. Bien qu'il soit relativement aisé d'obtenir une « image radar » sur le terrain, la mise en œuvre et l'interprétation de cette technique complexe requièrent des professionnels expérimentés.

◆ Annexe

FICHE RENSEIGNEMENT CAVITÉ	
LOCALISATION	
Département :	Coordonnées Lambert 1 X = Y =
Commune :	
Repères locaux (cadastre) :	
Précision :	
Type report :	
Site urbain :	
Site rural :	
TOPOGRAPHIE ET ENVIRONNEMENT	
Contexte morphologique :	- Type d'entrée - -
Environnement (canalisations, lignes aériennes, etc.) :	
SOURCES	
Indice d'archive	
Départementale :	
Communale :	
Autre :	
Cartes :	
Études :	
Enquête orale :	
Indice photo :	
Indice terrain	Géométrie de la cavité recherchée
Effondrement :	Circulaire :
Affaissement-dépression :	Quelconque :
	Diamètre :
Zone remblayée :	Cote du toit mini :
Puits :	Cote du mur maxi :
Entrée en cavage :	Dimensions mini et (L, l, h)
Arbre isolé :	Maxi :
Autre :	
Observations :	
HYDROGÉOLOGIE - GÉOLOGIE	
Nature des terrains :	
Épaisseur :	
Coupe géologique :	Oui - Non
Directions structurales majeures :	
Profondeur nappe :	
ORIGINE PROBABLE DE L'INDICE	
Carrière à ciel ouvert :	Matière probablement extraite :
Carrière souterraine :	
- indéterminée :	Commentaires :
- karstique :	
Puisard, canalisation :	
INVESTIGATION À ENVISAGER :	
Oui - Non	

Télédétection - Interprétation de clichés aériens et thermographie infrarouge

1. GÉNÉRALITÉS SUR LA TÉLÉDÉTECTION

La télédétection se rapporte à toute technique (dont la photographie) permettant la capture d'informations à distance, sans contact avec l'objet observé. Elle est basée sur l'analyse des informations portées par les rayonnements électromagnétiques issus de 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. Il s'agit d'une technique indirecte de prospection, qui doit s'insérer entre la phase d'enquêtes et celle des investigations de terrain (géophysique, sondages, etc.).

La prise d'informations se fait à l'aide de capteurs (appareils photos ou radiomètres) capables de recevoir le rayonnement électromagnétique venant du sol embarqués par des vecteurs (avions, hélicoptères, ULM ; les images obtenues par satellites ne sont pas traitées ici).

Les grandeurs mesurées sont les caractéristiques des ondes électromagnétiques :

- pour la photo-interprétation, dans la gamme des longueurs d'ondes du visible et du proche infrarouge (0,4 à 0,9 μm),
- pour la thermographie infrarouge, dans la gamme de l'infrarouge thermique (8 à 12 μm), domaine où on peut relier la réponse spectrale à la température du sol.

À chaque vecteur correspond un certain nombre de caractéristiques telles que l'échelle, la résolution spatiale (taille élémentaire de chaque pixel), la fauchée (largeur de la zone couverte), la possibilité de revisite (délai entre deux passages successifs), la possibilité de visualiser en stéréoscopie, etc.

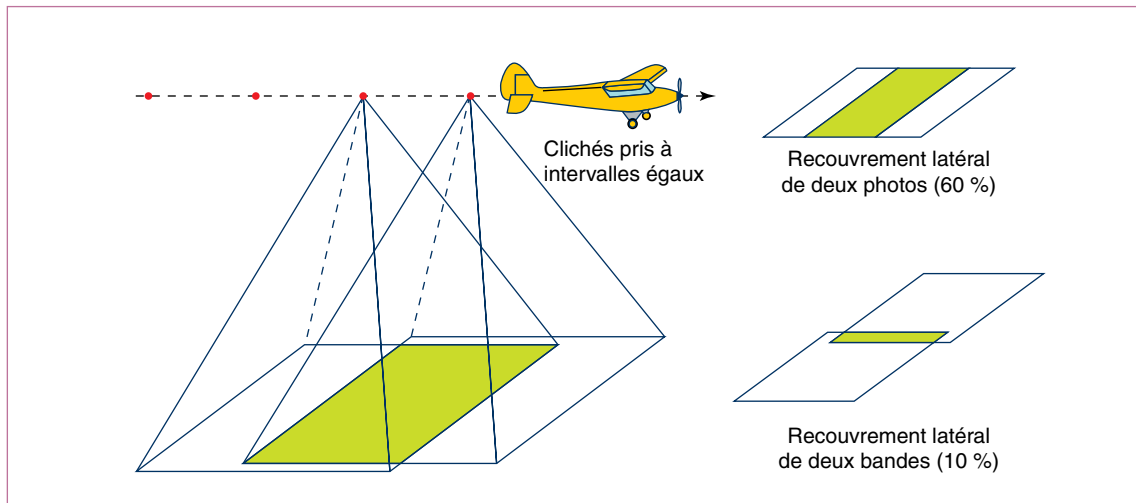
2. LA PHOTO-INTERPRÉTATION

Cette technique a déjà fait l'objet d'un guide technique complet (Pothérat et *al.*, 1999).

2.1 Les deux principaux types de prises de vue

◆ Les prises de vue à axe vertical

Les photographies sont prises à vitesse et altitude constantes et à intervalles égaux (Fig. 12). Elles recouvrent ainsi des zones communes et offrent par une vision stéréoscopique, la notion du relief de la surface de recouvrement. Certains indices morphologiques (effondrements par exemple) sont ainsi mis en évidence.



►►► FIGURE 12 - Technique de prises de vues à axe vertical permettant la vision stéréoscopique (Pothérat et al., 1999).

Les plus utilisées sont les photographies aériennes type IGN, actuellement en tirage contact 23×23 cm. Ces documents sont disponibles sur l'ensemble du territoire français dont la couverture aérienne est renouvelée tous les 5 ans à l'échelle 1/30 000.

◆ Les prises de vue à axe oblique

Elles relèvent d'une technique complémentaire, peu coûteuse (vecteur peu sophistiqué et bon marché, appareil photo du commerce, pellicules 24×36), souple et rapide à mettre en œuvre. Les prises de vue sont obtenues en faisant varier l'obliquité (angle de visée) et l'orientation.

Un même objet peut être observé sous des angles différents et dans des conditions différentes d'éclairage. Les photographies aériennes obliques peuvent révéler, sous certaines conditions, des détails qui passent inaperçus sur des photographies aériennes verticales, en particulier tous les indices concernant les micro-reliefs (indices sciographiques).

2.2 Les indices de désordres à rechercher

Les indices recherchés sont de quatre catégories : géomorphologiques, anthropiques, géologiques, et hydrogéologiques.

◆ Les indices géomorphologiques

En photo-interprétation il est possible de distinguer différents types de désordres de surface tels que les fontis (entonnoirs plus ou moins comblés), les affaissements ou les effondrements.

◆ Les indices anthropiques

Les secteurs à risque potentiel peuvent être cartographiés, en l'absence de tout signe d'instabilité, par le repérage d'indices d'anciennes activités extractives telles que :

- les entrées de mines ou de carrières repérables aux chemins d'accès et aux carreaux de mine,
- les anciens fronts de taille,
- les puits d'entrée de marnières encore ouverts et repérables par un arbre ou un buisson,
- les puits d'extraction,
- les cheminées d'aérage.

La nature des déblais de puits dont la couleur tranche avec celle des terrains de surface signe l'emplacement des anciens puits d'extraction.

La localisation d'anciennes tranchées laisse supposer la présence de sapes de guerre à leur voisinage.

◆ Les indices géologiques

Les indices structuraux (réseau de discontinuités) ont également une grande importance.

Ainsi les réseaux *karstiques* sont reconnaissables par les alignements qu'ils peuvent présenter en surface : dolines, gouffres, avens. Les *intersections de fractures*, propices au développement de chambres, sont aussi à rechercher. Enfin, la *végétation* donne parfois des indications car les dolines sont souvent colonisées par une végétation hydrophyle.

Le *gypse* du Trias présente des phénomènes d'halotectonique : pseudo-diapirs de gypse dans les charnières anticlinales. Ils s'accompagnent de l'apparition de *fractures rayonnantes*, perceptibles sur les clichés aériens, et signant la présence de masses de gypse importantes et de vides plus développés. Les effondrements se situent toujours dans ce contexte particulier et peuvent être réactivés. Les *effondrements anciens* sont identifiables aux *structures circulaires*, décamétriques à hectométriques, plus ou moins profondes, parfois remplies d'eau et à fond généralement plat. Ils sont toujours situés à proximité d'un axe anticlinal et de discontinuités rayonnantes. Les *effondrements potentiels* sont donc à rechercher en contexte tectonique fort, dans les flancs des structures anticlinales affectant des niveaux de gypse. Les zones les plus propices sont caractérisées par des structures annulaires et une fracturation rayonnantes. La présence d'une nappe aquifère importante drainée par des fractures est un facteur aggravant.

◆ Les indices hydrogéologiques

Les *chenaux d'écoulement* préférentiel et *axes de drainage* de subsurface doivent être systématiquement recherchés et analysés en détail.

Les *axes hydrographiques centripètes* (chevelus convergents vers un point bas) doivent être recherchés comme indices de dépression.

Les *zones humides*, souvent soulignées par la végétation, doivent être aussi systématiquement recherchées car elles sont susceptibles de correspondre à des points d'infiltration, à des puits ou à d'anciens fontis remblayés avec rétention d'eau sur bouchon étanche.

2.3 Méthodologie

◆ Domaine d'application

La photo-interprétation est généralement d'un grand secours dans la recherche des cavités souterraines en zone rurale. Il s'agit d'une méthode indirecte dans le sens où l'on recherche à détecter des indices en surface révélant la présence de cavités souterraines. Elle doit être utilisée immédiatement après le stade des enquêtes et de l'exploitation des archives. Elle permet alors de programmer et d'implanter efficacement les travaux de recherche ultérieurs.

◆ Déroulement d'une campagne de mesure

Les photographies aériennes ont certaines caractéristiques (émulsion, échelle, axe, date, etc.) qui vont être plus ou moins intéressantes pour la problématique liée à la recherche de carrières souterraines. Il faut en particulier déterminer avant chaque étude par photo-interprétation les caractéristiques des photographies jugées les plus adaptées.

L'appareil photographique

Parmi les appareils photos on distingue les appareils courants (réflex, etc.), de format 24 × 36 mm ou 6 × 6 cm, et les chambres métriques, de format 23 × 23 cm, permettant de réaliser des prises de vues utilisables en restitution photogrammétrique.

L'émulsion

L'émulsion panchromatique Noir et Blanc est celle qui apporte le plus de renseignements. L'émulsion infrarouge Noir et Blanc montre des contrastes entre l'eau libre (noir dense), les sols très humides (foncés) et les sols secs (plus clairs). L'émulsion infrarouge fausse couleur met en valeur toutes les anomalies de drainage et d'humidité pouvant traduire des désordres souterrains.

L'échelle

Les échelles (Tableau V) de 1/14 500 à 1/4 000, voire plus, sont les plus favorables, compte tenu des dimensions des indices recherchés. Inversement, les échelles inférieures à 1/25 000 sont à proscrire, excepté pour resituer la zone étudiée dans son contexte structural.

►► TABLEAU V

Variation des caractéristiques des photographies aériennes en fonction de l'échelle
(la surface visible en relief est la surface recouverte par deux photographies consécutives)

Échelle des photographies verticales	Altitude de vol	Longueur pour 23 cm au sol	Longueur pour 10 m au sol	Surface d'une photographie	Surface visible en relief	Précision (mm)		Nombre de couples pour 1 000 ha
	(m)	(m)	(mm)	(ha)	(ha)	Planimétrie	Altimétrie	
1/5 000	760	1 150	2	132	80	060	110	25
1/10 000	1 520	2 300	1	529	317	120	230	7
1/15 000	2 280	3 450	0,7	1 190	714	180	340	3
1/20 000	3 040	4 600	0,5	2 116	1 270	240	460	2
1/25 000	3 800	5 750	0,4	3 306	1 983	300	570	1
1/30 000	4 560	6 900	0,3	4 761	2 856	360	680	1

La période de mesure

La période hivernale est considérée comme très favorable, car l'absence de cultures et de feuilles facilite la localisation d'indices. Pour les photographies aériennes obliques la lumière rasante de début ou de fin de journée accentue l'impression de relief.

Les photos multi-dates

Les photos multi-dates permettent de suivre l'évolution de la stabilité d'une zone sous-minée et également, par l'étude statistique de la fréquence d'apparition de fontis, de déterminer des périodes de crise à mettre en relation avec d'autres phénomènes tels qu'un changement dans le mode d'extraction ou une pluviosité anormale. Il est possible de retrouver l'emplacement d'anciens fontis, comblés et effacés depuis leur apparition. L'analyse multi-dates contribue également à l'élimination d'un certain nombre d'indices qui s'avèrent être des leurres.

La validation terrain

La phase de validation terrain permet de faire le tri entre les différentes anomalies. Elle autorise également la recherche de compléments d'informations sur certains indices observés et non interprétés et offre ainsi une clé supplémentaire à l'interprétation.

Pour la photo-interprétation le contact avec le terrain permet de créer un lien entre les aspects des objets recherchés sur le terrain et sur photographie aérienne. Il est donc indispensable que la visite soit effectuée par le photo-interprète en personne.

Notion de prix

Notion de prix de prises de vue [2002] : à titre indicatif un tirage contact IGN, au format 23 × 23 cm, coûte 11,60 Euros en noir et blanc et 35 Euros en couleur (actuellement les données disponibles sous forme d'image numérique valent 71,50 Euros).

Notion de prix selon le vecteur [2002] : Sur le tableau VI figurent des indications de prix pour les vols en hélicoptère, avion et ULM.

►►► TABLEAU VI
NOTIONS DE PRIX EN FONCTION DU VECTEUR UTILISÉ

Hélicoptère	Alouette (4 places)	11,5 Euros la mn de vol
	Écureuil (5 places)	15 Euros la mn de vol
Avion	Type CESNA	1000 Euros/heure équipé
	À ailes hautes	200 Euros/heure non équipé
ULM	Vol sur site	2 Euros le km

◆ Les limites de la méthode

Certains indices sont sources d'erreur d'interprétation. La plupart d'entre eux ne peuvent être différenciés que lors de la visite de terrain.

Les anciennes mares asséchées, les anciens bois défrichés et les feux associés, de même que les bâtiments rasés, laissent des traces au sol susceptibles d'entraîner des erreurs d'interprétation. Les dépôts d'origine agricole et les emplacements des bacs à eau pour les animaux, ainsi que les travaux de terrassement (dépôts, décapage, etc.) sont également des leurres.

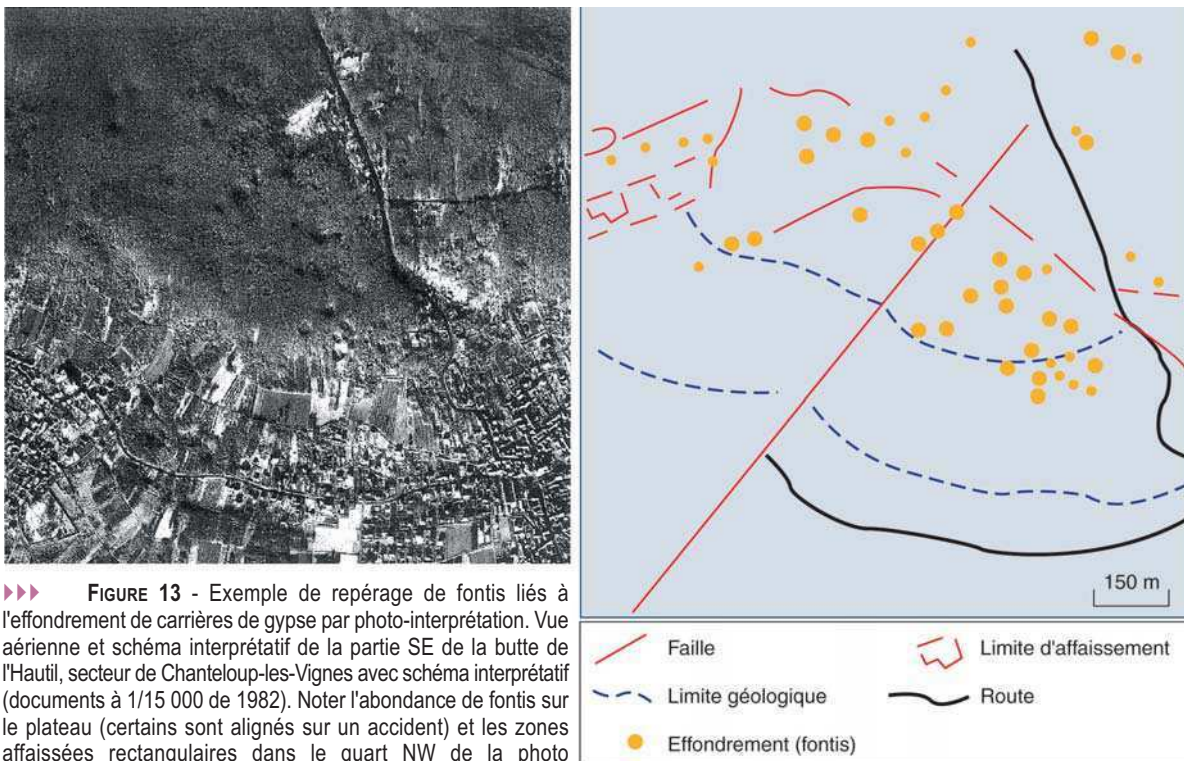
Les impacts de bombes, généralement en chapelets, donc alignés peuvent se confondre avec les indices de fontis, éventuellement alignés sur une galerie.

Les zones masquées par l'urbanisation, par des espaces boisés ou par des cultures en plein développement végétatif ne livrent pas d'indice.

Par ailleurs la photo-interprétation, bien que donnant parfois des indications sur la direction des galeries, ne permet pas de recueillir d'éléments sur la géométrie des vides. Cette méthode ne peut donc être utilisée seule et doit être confirmée sur le terrain puis complétée par d'autres méthodes d'investigation (géophysique, sondages, etc.).

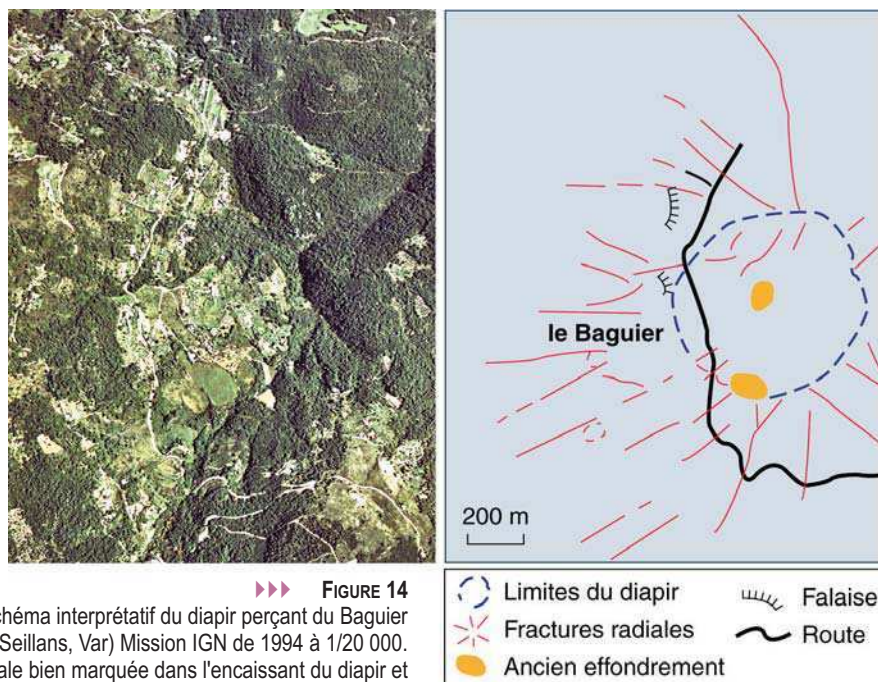
◆ Exemples de photographies aériennes

Les indices géomorphologiques repérés sur la photographie suivante sont reliés à des phénomènes de fontis et d'affaissement à l'aplomb d'une ancienne carrière. Des clichés successifs permettent d'effectuer une étude statistique et d'identifier des périodes de crise alternant avec des périodes de calme relatif (exemple de la butte de l'Hautil en région parisienne) (Fig. 13).



►►► FIGURE 13 - Exemple de repérage de fontis liés à l'effondrement de carrières de gypse par photo-interprétation. Vue aérienne et schéma interprétatif de la partie SE de la butte de l'Hautil, secteur de Chanteloup-les-Vignes avec schéma interprétatif (documents à 1/15 000 de 1982). Noter l'abondance de fontis sur le plateau (certains sont alignés sur un accident) et les zones affaissées rectangulaires dans le quart NW de la photo (affaissement dirigé).

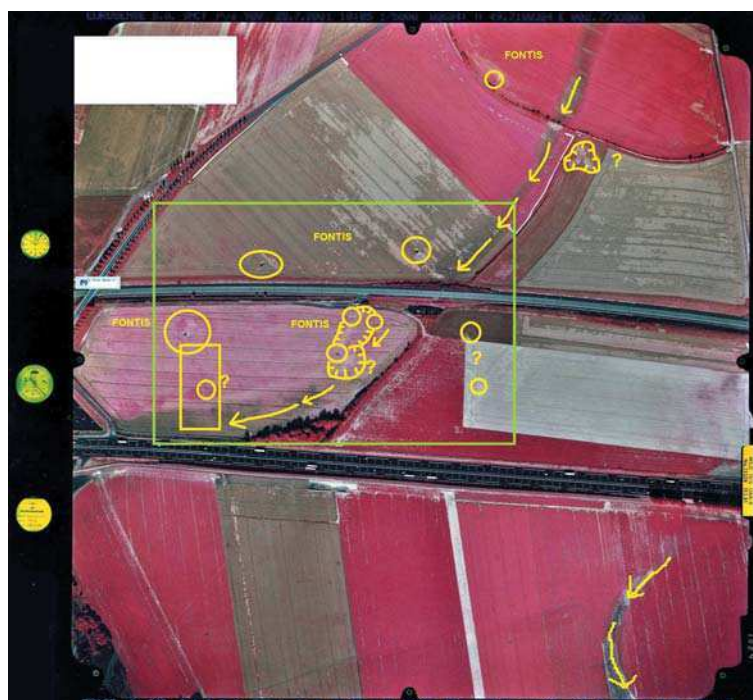
À proximité des exploitations de gypse du trias provençal à couches fortement tectonisées, il est fréquent d'observer des structures diapiriques, souvent accompagnées par une fracturation radiale et des structures annulaires en surface (Fig. 14). Dans ce contexte la forte fracturation des piliers constitue un facteur très défavorable à la bonne tenue de la carrière souterraine.



▶▶▶ FIGURE 14
Vue aérienne avec schéma interprétatif du diapir perçant du Baguier (commune de Seillans, Var) Mission IGN de 1994 à 1/20 000. Noter la fracturation radiale bien marquée dans l'encaissant du diapir et qui s'estompe dans le cœur de l'appareil.

L'exemple suivant a montré l'intérêt de l'utilisation d'émulsions infrarouge fausse couleur. Elles ont permis, d'une part, le repérage de très nombreux indices de désordres, d'autre part, la mise en évidence de contextes topographiques et hydrographiques extrêmement sensibles (depuis la réalisation de l'étude un effondrement s'est produit sous la voie ferrée sur le tracé d'un des chenaux identifiés).

Les indices observés appartiennent à trois catégories : topographiques (fontis, affaissements, effondrements, zones déprimées, etc.), hydrogéologiques (anomalies de drainage, paléo-chenaux, etc.) et anthropiques (puits, cheminées d'aéragé, etc.) (Fig. 15).



▶▶▶ FIGURE 15
Schéma interprétatif, sur photo infrarouge, montrant deux anomalies de drainage, des fontis et des indices d'affaissements potentiels (tracé du TGV Nord) (Source LRPC de Clermont-Ferrand).

2.4 Conclusion

La photo-interprétation consiste en l'étude de clichés aériens réalisés en axe vertical ou oblique. La qualité des clichés résulte de choix techniques (appareils, émulsion), de la période et de la fréquence des mesures. Les indices à rechercher, relatifs à la présence de cavités souterraines, sont de quatre natures : géomorphologiques, anthropiques, géologiques, et hydrogéologiques. Ils doivent être confirmés par un contrôle *in situ*. Ces photographies sont à réaliser avant toute mesure géophysique de surface, en zones non urbanisées et non boisées, et hors des zones de culture en développement végétatif. C'est une technique à grand rendement, qui permet de révéler des indices invisibles depuis la surface et qui mène à un premier zonage sur lequel sont déployés les méthodes géophysiques et les sondages.

3. LA RADIOMÉTRIE INFRAROUGE THERMIQUE

3.1 Principe

La radiométrie infrarouge repose sur l'étude des rayonnements électromagnétiques de la matière dans la gamme des longueurs d'onde λ de 0,75 à 300 mm (Gaussorgues, 1999). L'émission et l'absorption des rayonnements électromagnétiques se basent sur la définition du corps noir : c'est un corps parfait qui peut absorber et ré-émettre tout rayonnement quelle que soit sa longueur d'onde. La loi de Planck donne la puissance P' rayonnée par un corps noir par unité de surface pour une longueur d'onde donnée (exitance spectrale) :

$$P' = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{hc/(\lambda kT)} - 1} \text{ [W.m}^{-3}\text{]}$$

avec T : la température ; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s : la constante de Planck ; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹ : la constante de Boltzmann et $c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ : la vitesse de la lumière dans le vide.

La puissance P rayonnée par unité de surface d'un corps noir sur tout le spectre, à une température T , est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann (exitance totale) :

$$P_{\text{cn}} = \sigma T^4 \text{ [W.m}^{-2}\text{]}$$

avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W.m⁻².K⁻⁴ : la constante de Stefan. Dans le domaine spectral 8-15 μm de l'infrarouge thermique, la représentation de la loi de Planck montre que le rayonnement est maximum pour des températures voisines de celles de la surface de la terre ($\lambda = 10 \mu\text{m}$ pour $T \sim 290$ K).

La puissance rayonnée par les corps naturels est inférieure à celle prévue par la loi de Stefan-Boltzmann car ce ne sont pas des corps noirs. Elle est donnée par :

$$P_{\text{nat}} = \epsilon \sigma T^4 \text{ [W.m}^{-2}\text{]}$$

avec ϵ , l'émissivité, qui varie en fonction de la nature de l'objet, de son état de surface et de la longueur d'onde spectrale, et qui est le rapport de la puissance émise par un corps naturel sur la puissance émise par le corps noir à la même température. Ainsi, pour le corps noir, on a $\epsilon = 1$; pour le sable, $\epsilon = 0,4$; pour le sol sec, $\epsilon = 0,92$.

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.

◆ Grandeur mesurée

En radiométrie infrarouge thermique, l'intensité du signal mesuré est la luminance, soit l'exitance thermique de la surface du sol par unité d'angle solide sur une bande spectrale donnée. Elle permet de déduire la température apparente de surface de l'objet qui est liée aux échanges

thermiques à l'interface sol/air (propriétés de diffusivité et d'inertie thermique). Elle est donc aussi liée à leur nature, à leur compacité et à leur état hydrique.

Par exemple, l'eau possède une forte inertie thermique et apparaît plus froide le jour par rapport au sol. Inversement le sol s'échauffe plus vite que l'eau le jour et se refroidit plus vite la nuit.

Un sol humide (à interstices remplis d'eau) s'échauffe ou se refroidit plus lentement qu'un sol sec (aux interstices remplis d'air). Le sol drainé apparaît donc plus chaud dans la journée (*cf.* remblai) et plus froid en fin de nuit que le sol humide.

Le couvert végétal, à forte émissivité et forte évapotranspiration, possède, dans la journée, une température qui reste généralement inférieure à celle du sol. À l'inverse, la nuit, il est plus chaud.

◆ **Résultats attendus : détection de cavités souterraines par radiométrie infrarouge thermique**

Les résultats d'une mesure sont la représentation de la température apparente de surface du sol et ses variations temporelles sous forme d'une carte de couleur en fonction des coordonnées géographiques.

Dans le cadre de la détection de cavités souterraines, la radiométrie infrarouge thermique a montré son efficacité pour la localisation indirecte des marnières ou de zones effondrées, voire remblayées. Ainsi, elle repose sur l'observation de l'inertie thermique d'un conduit d'entrée de la cavité (puits, galeries, etc.) dont on mesure la température apparente.

Les anomalies thermiques sont de plusieurs types, selon que le puits est visible ou caché ou que l'on a affaire à une zone effondrée remblayée.

Pour les puits visibles, repérés par un bosquet d'arbres, les anomalies thermiques sont froides l'été en fin de journée et chaudes en fin de nuit.

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

D'autres anomalies, essentiellement chaudes en été, en fin de journée, signalent les zones remblayées ou les zones perturbées (par un affaissement ancien ou en cours).

3.2 Méthodologie

◆ **Domaine d'application**

Dans le cadre du thème du LCPC « Carrières souterraines abandonnées » et du projet national CriTerre, la radiométrie infrarouge thermique a montré son efficacité pour la localisation des marnières et de leurs puits, en zone rurale.

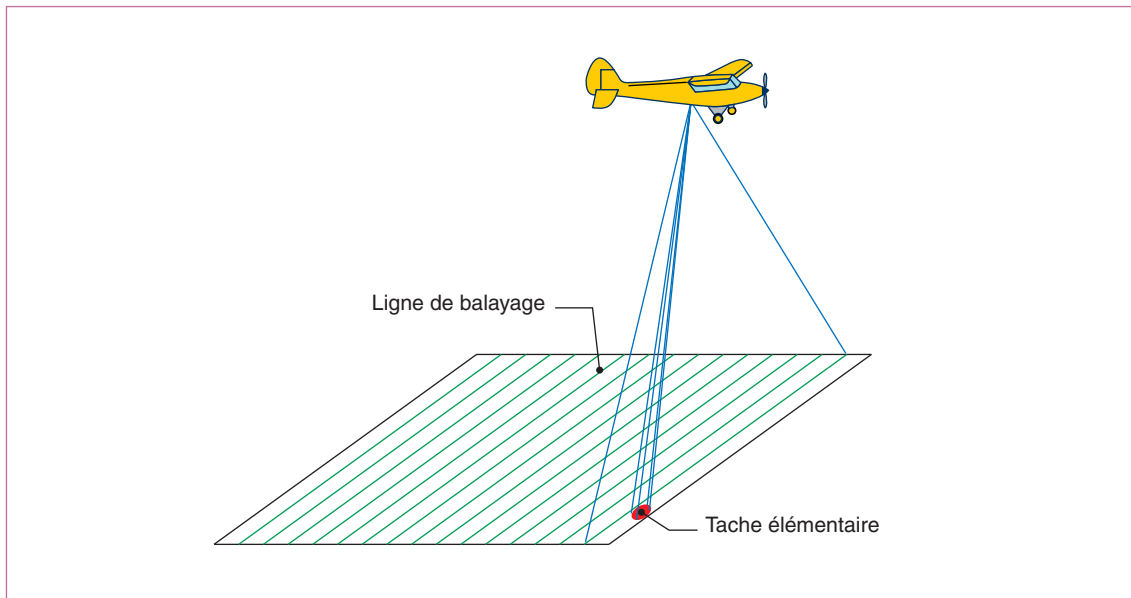
De plus, au sein du projet national CriTerre, des études expérimentales avec une caméra infrarouge ont été menées sur des zones calcaires (Siriex et Bertrand, 1998 ; 2001). Un karst vide, situé entre 2 et 5 m de profondeur, se manifeste par un accroissement de la température dont la mesure est plus favorable en fin de journée. Comme le prédit la modélisation, c'est sa profondeur qui importe plutôt que sa taille.

◆ **Déroulement d'une campagne de mesure**

L'appareil de mesure

La mesure est réalisée à l'aide d'un radiomètre (scanner) balayant des lignes perpendiculaires à l'axe de vol. Les détecteurs utilisés captent séparément le rayonnement qui vient du sol par plages de longueurs d'ondes. La résolution spectrale représente la largeur de sensibilité spectrale d'une bande de capteur : plus étroite est la bande, plus précise est la détection.

À titre d'exemple, le scanner utilisé en Normandie (Pothérat, 2001) fonctionne à la cadence de 200 lignes/seconde dans la bande spectrale 8-12 μm , selon un angle de balayage de 90°, avec un angle instantané d'analyse de 1,5 mrad et une sensibilité thermique de 0,2 °C (Fig. 16).



►► FIGURE 16 - Principe du scanner aéroporté.

La hauteur de vol

Elle dépend des objectifs visés : dans le cas des marnières, pour un bon compromis entre les impératifs techniques et économiques, les vols à une hauteur de 425 m sont recommandés. À cette hauteur et avec le scanner utilisé, la résolution au sol est de l'ordre de 30 à 40 cm, soit largement suffisante pour repérer une anomalie thermique de 2 à 3 m de diamètre. Pour des zones plus petites, la hauteur peut être plus faible et la résolution au sol meilleure. Ainsi, pour une recherche de karst sur une zone de 120 m × 25 m, des mesures à 90 m d'altitude à bord d'un hélicoptère (Alouette) couvrent des zones thermiques de 31 m × 22 m avec une résolution au sol de 16 cm (Sirieix et Bertrand, 1998).

Les périodes de vol

Les périodes les plus propices se situent en été, en fin de journée très chaude (17 h-18 h) alors qu'en hiver, les vols de fin de nuit par temps de gel sont les plus adaptés. Pour une meilleure interprétation, les informations croisées été/hiver sont souhaitables.

L'état de surface

L'état de surface du sol joue un rôle important en été car les cultures, telles que les maïs, le chanvre ou les pâturages, qui apparaissent froides sur les images en fin de jour masquent les anomalies froides liées à la présence d'un puits de marnière. Les surfaces fraîchement labourées et ensemencées sont très favorables au repérage d'anomalies.

La validation terrain

La phase de validation terrain permet de faire le tri entre les différentes anomalies. Elle autorise également la recherche de compléments d'informations sur certains indices observés et non interprétés et offre ainsi une clé supplémentaire à l'interprétation.

Pour les anomalies infrarouges thermiques les vérifications terrain passent par des décapages à la pelle mécanique sur 50 cm après une difficile phase de repérage, en raison de la distorsion des images. Un redressement automatique des images et une localisation par GPS sont donc indispensables.

La validation terrain est essentielle, car elle permet, d'une part, de contrôler les interprétations réalisées et ainsi d'estimer la qualité des résultats, d'autre part, de faire la synthèse de l'ensemble des indices recensés afin de circonscrire les zones à risque.

Dans tous les cas, une vérification par un personnel expérimenté s'impose afin d'éliminer les artéfacts et de localiser avec précision les anomalies jugées intéressantes. La photo de la figure 17 montre la section d'un puits repéré par IR thermique et révélé par décapage à la pelle mécanique.



▶▶▶ **FIGURE 17**
Validation terrain d'une anomalie thermique montrant le bouchon d'un puits de marnière.

◆ Limites de la méthode

Il convient d'émettre certaines réserves sur cette méthode, encore en cours de développement, qui ne peut fonctionner de manière satisfaisante en toutes circonstances :

- les indices situés dans un environnement thermique « froid » tel que forêts, bosquets ou champs de maïs, de chanvre ou de tournesol au maximum de leur développement végétatif ne peuvent être détectés,
- les prairies en été livrent peu d'informations exploitables en raison du faible écart thermique entre la température de l'herbe et celle du puits,
- les puits comblés sur une hauteur importante ne donnent pas d'anomalie thermique autre que celle du matériau de remblai.

Une grande attention doit être apportée à la présence d'eau dans les affaissements car une pellicule d'eau peut se réchauffer ou geler plus rapidement qu'un bassin et présenter une signature thermique différente (leurre).

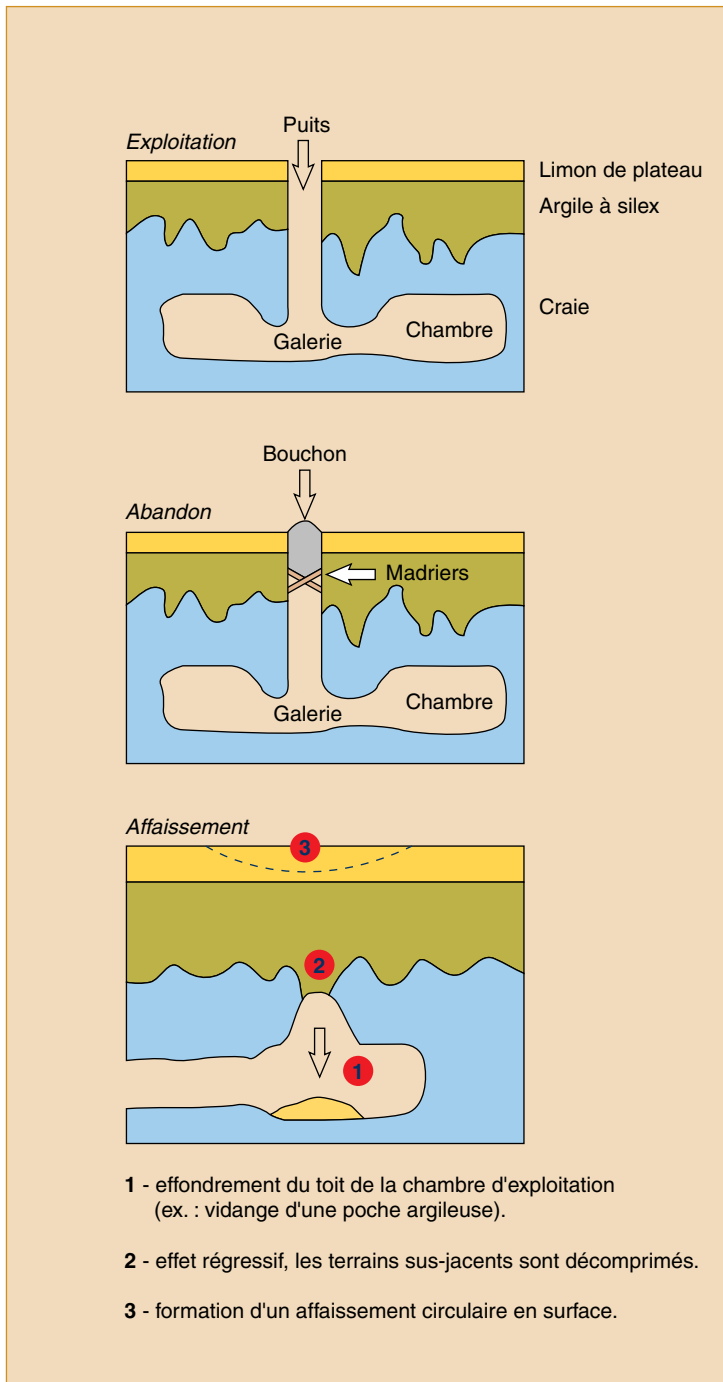
3.3 Exemple de résultats

En Haute-Normandie, l'accélération des effondrements de marnières observée début 2001 s'inscrit dans le prolongement d'une série d'accidents graves survenus dans la dernière décennie. Devant le grand nombre de ces exploitations et la difficulté de détecter des carrières à des profondeurs comprises entre 15 et 40 m, l'idée du recours à une méthode indirecte (détection des puits d'accès) à grand rendement a vu le jour et a pu être expérimentée dans le cadre d'un thème de recherche sur les Cavités souterraines abandonnées financé par le LCPC de 1998 à 2002.

Lorsque l'exploitation des marnières était terminée, le puits était, soit laissé en l'état (un buisson le signale aux agriculteurs), soit fermé en surface par des planches, des tôles, une dalle béton, des poutres, etc. ou encore obstrué à l'aide de madriers à une profondeur de quelques mètres puis remblayé jusqu'au niveau du sol (Fig. 18).

Dans le cas des marnières, la température du puits étant constante (14 à 15 °C) en toutes saisons, on espère détecter :

- soit un transfert de chaleur du puits vers la surface si le bouchon est suffisamment poreux et peu épais (< 3 m). L'anomalie est froide l'été dans l'après-midi et chaude l'hiver en fin de nuit,
- soit une anomalie thermique du remblai (à plus faible inertie thermique que l'encaissant) positive l'été en fin de journée et négative l'hiver, au lever du jour.



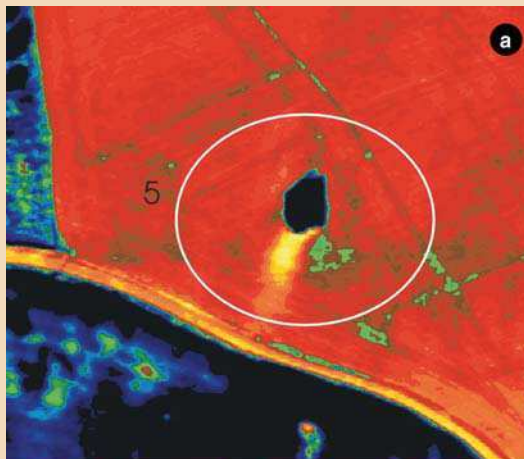
▶▶ FIGURE 18
Schéma d'évolution d'une marnière pendant et après l'extraction de la craie (Pothérat, 2001).

Sur la figure 19 sont représentés des exemples de détection de marnière en vol d'été à 17 h. La figure 19a montre un exemple d'un puits de marnière caché au cœur d'un buisson. La figure 19b illustre une anomalie au centre froid et au pourtour chaud qui correspond à un puits bouché. Enfin, la figure 19c montre trois anomalies : l'anomalie 6 correspond à un puits de marnière situé au cœur d'un buisson. L'anomalie 7, non repérée lors de vols précédents, correspond à un puits de marnière, et est révélé ici probablement grâce à un meilleur état de surface. Enfin, l'anomalie 28, plus chaude que l'encaissant en été comme en hiver en fin de nuit, est probablement la signature d'eau dans le sol signe d'une perturbation liée à un affaissement ou à un effondrement.

▶▶ FIGURE 19
Exemples d'anomalies thermiques
correspondant :

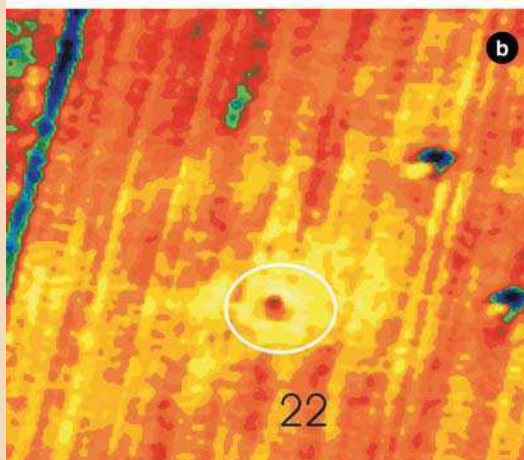
a

(5) à un puits de manière protégé par un buisson.



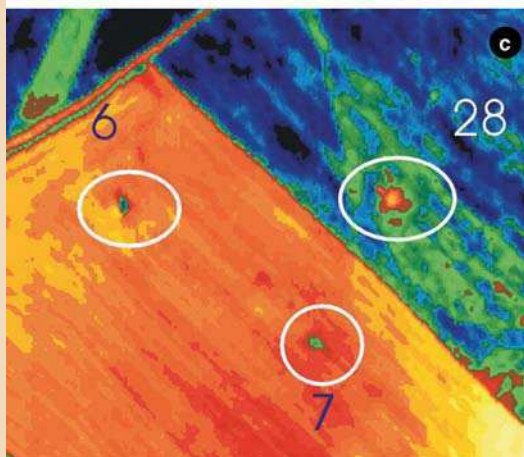
b

(22) à un puits de manière invisible sur le terrain.



c

(28) à une zone perturbée.



3.4 Modélisation

Dans le cadre du projet national CriTerre (Durot, 2001), des modélisations numériques par éléments finis ont été conduites pour définir la signature thermique des marnières et de leur 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 la cavité, 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. Enfin, l'étude montre que les hypothèses de transferts thermiques

de conduction et de convection ne rendent pas compte des écarts de température constatés sur le terrain, supérieurs à deux vingtièmes de degré. Elle souligne la nécessité de prendre en considération les transferts radiatifs (liés à l'émissivité du matériau) ainsi que les couplages hydraulique/thermique. Ce dernier phénomène est d'ailleurs à la base de la détection de nombreuses anomalies sur le terrain (voir les exemples de mesure).

3.5 Conclusion

La radiométrie infrarouge thermique peut être utilisée sur des surfaces importantes (de quelques centaines de km²). C'est une méthode à grand rendement permettant de localiser les accès (puits) à d'anciennes carrières abandonnées (marnières). 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 (17 h-18 h) ou en hiver, en fin de nuit. Pour une bonne interprétation, les informations croisées été/hiver sont préconisées. Les limites de la méthode résident dans les nombreux leurres que peuvent fournir les images (présence d'eau). Les surfaces « froides » (forêts, bosquets, champ de maïs, chanvre ou tournesol) 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.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- GAUSSORGUES G., *La thermographie infrarouge - Principes, technologies, applications*, Éditions TEC&DOC, 1999.
- POTHÉRAT P., Étude par photo-interprétation des phénomènes d'effondrement liés à la dissolution du gypse, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 209, 1997, pp. 69-91.
- POTHÉRAT P., DORIDOT M., CHAHINE M., *L'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain*, Guide Technique, Collection environnement - Les risques naturels, Édition du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1999, 128 pages.

Rapports du projet national CriTerre

- BALLAND C., *État de l'art des méthodes de reconnaissances des anomalies physiques*, 1999, 96 pages.
- DUROT D., *Modélisation 3D des transferts thermiques dans un massif stratifié : étude de la signature de surface*, 2001, 73 pages.
- MANIER E., *Problématique et méthodologie de recherche et de traitement développé au CETE Normandie Centre*, 2001, 46 pages.
- POTHÉRAT P., *Test de détection de puits de marnière en Normandie par radiométrie infrarouge thermique*, 2001, 59 pages.
- SIRIEX C. et BERTAND L., *Détection de cavités karstiques par thermographie infrarouge - Interprétation et modélisation*, 2001, 40 pages.
- SIRIEX C., BERTAND L., *Détection de cavités karstiques par thermographie infrarouge*, 1998, 40 pages.

La microgravimétrie

Chapitre 4

Notations	
g	champ de pesanteur terrestre (ou accélération de la pesanteur, $m.s^{-2}$)
G	constante de gravitation universelle : $G = 6,6726.10^{-11} N.m^2.kg^{-2}$
gal	unité de mesure de g , $1 \mu gal = 10^{-8} m.s^{-2}$
ϕ	latitude du point de mesure
Δg_{lat}	correction de latitude (μgal)
Δg_h	correction d'altitude (μgal)
Δg_p	correction de plateau (μgal)
Δg_t	correction de terrain (μgal)
Δg_B	anomalie de Bouguer (μgal)
ρ	masse volumique ($kg.m^{-3}$)

1. GÉNÉRALITÉS SUR LA MICROGRAVIMÉTRIE

1.1 Principe

La gravimétrie est l'étude des variations du champ de pesanteur \vec{g} à la surface de la Terre, provoquées par la variation de masse du sous-sol ausculté (Fig. 20).

La valeur du champ de pesanteur en un point de la surface terrestre est définie par rapport à un ellipsoïde de référence en fonction de la latitude du point de mesure. Elle est donnée par la formule suivante (formule adoptée en 1980 par le Geodetic Reference System) :

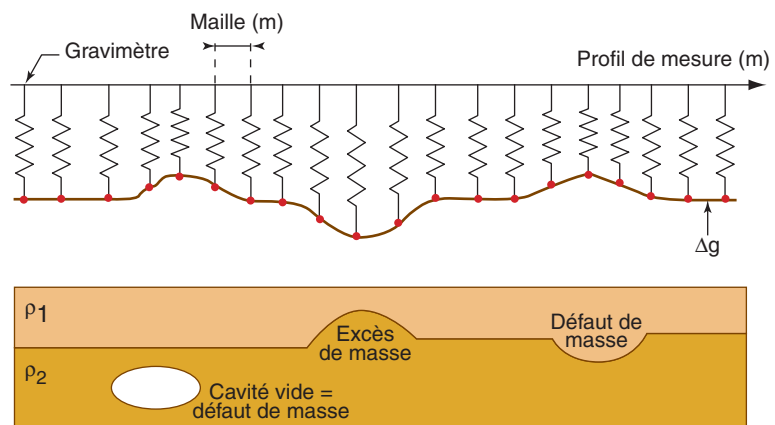
$$g_{ref} = 9,7803267715 * (1 + 0,0052790414.\sin^2 \phi + 0,00002327.\sin^4 \phi + 0,0000001262 * \sin^6 \phi + 0,0000000007.\sin^8 \phi)m.s^{-2}$$

L'unité CGS de mesure en gravimétrie est le gal, en référence à Galilée. Il est défini par :

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

La gravimétrie est toujours d'actualité et trouve de nombreuses applications pour aider à déterminer les modèles géologiques pour la recherche pétrolière et minière, pour la détermination des épaisseurs des glaciers, pour l'étude de la croûte terrestre, etc.

Dans les années 1970, l'amélioration de la précision de mesure des appareils 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 rencontrées en génie civil, et dont le défaut de masse engendre des anomalies de l'ordre de quelques dizaines de μgal ($1 \mu\text{gal} = 10^{-8} \text{ m.s}^{-2}$) : c'est la microgravimétrie. Pour les concepts et les applications initiales de la gravimétrie, les références suivantes peuvent être consultées : (Parasnis, 1986), (Reynolds, 2000) et (Chouteau, 1999). La microgravimétrie est particulièrement détaillée dans (Neumann, 1967) et (Lakshmanan, 1977 ; 1990).



▶▶▶ FIGURE 20
Principe de la gravimétrie :
la variation de masse volumique
du sous-sol engendre une variation
du champ de pesanteur g .

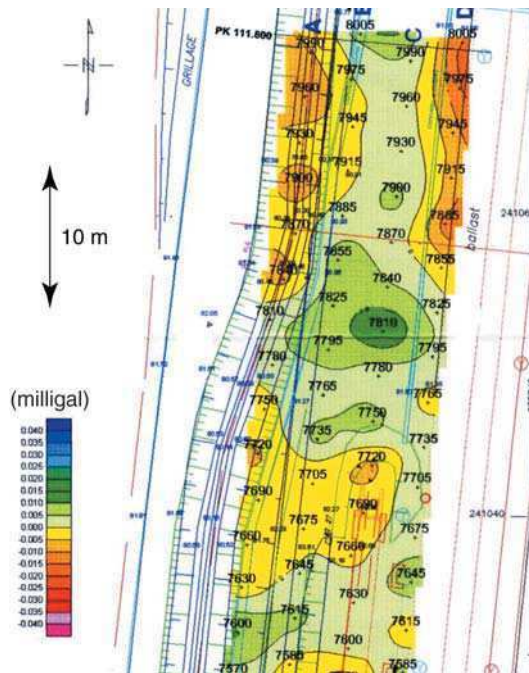
1.2 Grandeur mesurée

En microgravimétrie, on mesure la *variation du champ de pesanteur* Δg_{mes} (μgal). Des *corrections* apportées aux mesures brutes permettent d'obtenir l'*anomalie de Bouguer*, donnée en μgal . Cette anomalie 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 déterminée à partir de l'ensemble des mesures (l'extraction de l'anomalie régionale profil par profil est généralement exclue). Elle est ôtée de l'anomalie de Bouguer pour obtenir l'*anomalie résiduelle* qui résulte de la variation des masses locales et peu profondes.

1.3 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 de iso-contours, en fonction de la position sur la surface du sol. Un exemple type est représenté sur la figure 21.

Détection de cavités : Plus le contraste volumique entre la cavité et le milieu encaissant est grand, plus l'anomalie résiduelle négative est forte. Les cavités vides (ou remplies d'air) constituent donc le cas de détectabilité optimale. En effet, le contraste de masse volumique entre les roches est en moyenne de 800 kg.m^{-3} , alors qu'il atteint jusqu'à 2000 kg.m^{-3} en présence d'une cavité vide. Lorsque la cavité est totalement ou partiellement noyée ou remblayée, sa localisation est plus difficile puisque les contrastes de masse volumique sont plus faibles.



►►► FIGURE 21
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 les plus rouges indiquent les défauts de masses les plus forts (Document SNCF).

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Déroulement d'une campagne de mesure

◆ Détectabilité, choix de la maille et implantation des mesures

Les résultats de la recherche d'indices préliminaires sont déterminants dans le choix des paramètres de mesure. Si l'on dispose d'indications sur les profondeurs et les dimensions des cavités recherchées, il convient de déterminer si elles sont détectables en microgravimétrie et pour quelle méthodologie de mise en œuvre.

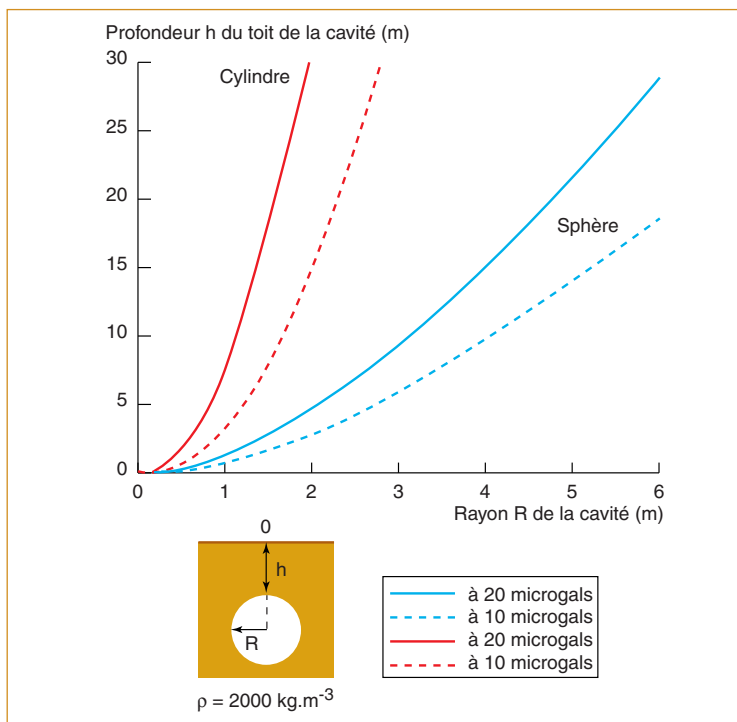
L'anomalie maximale créée par une cavité peut être estimée selon les formules de la figure 35 et doit être supérieure à la valeur de l'anomalie significative. Selon les auteurs et les expérimentateurs, *la plus petite anomalie significative mesurée en microgravimétrie est située entre 10 μgal (Yule et al., 1998) pour d'excellentes conditions de mesures et 20 μgal (Lagabrielle, 1998).*

À titre d'exemple, si on considère qu'une anomalie significative est de l'ordre de 10 μgal , alors une cavité remplie d'air dans un sol de masse volumique $\rho = 2\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ de 4 m de rayon est détectable tant que la profondeur de son toit n'excède pas 10 m environ (Fig. 22).

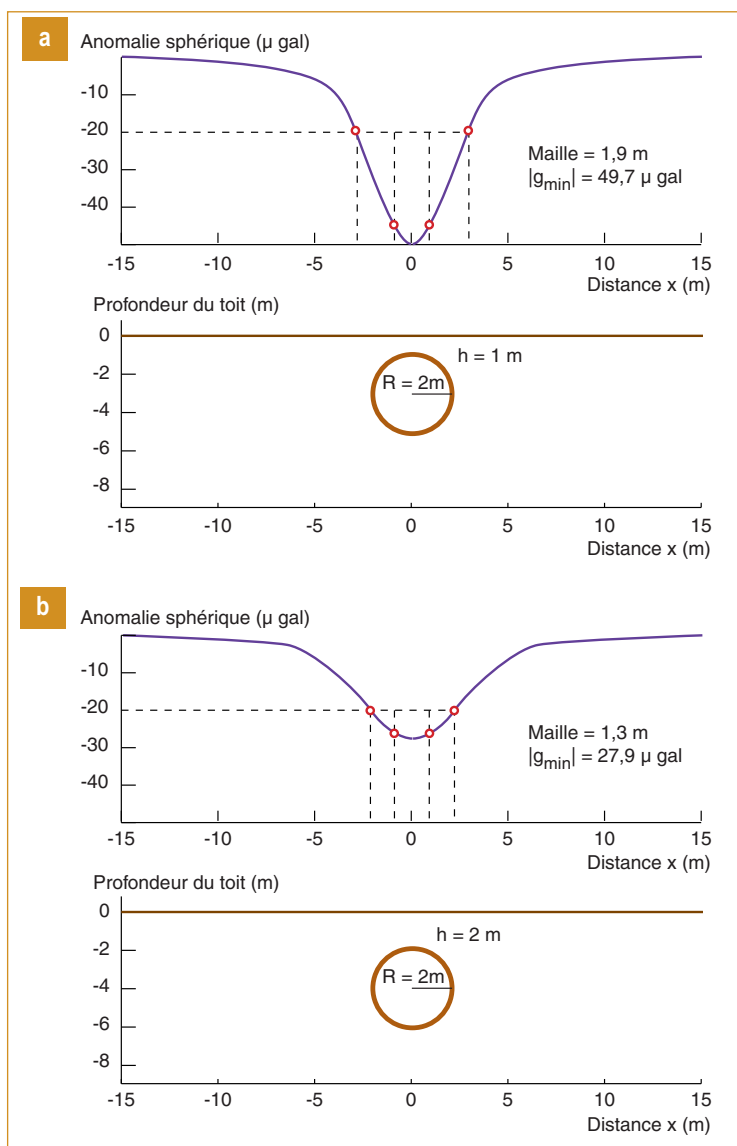
Théoriquement, si on considère qu'il faut au moins trois points de mesure pour caractériser une anomalie, il faut choisir une maille adaptée aux dimensions et à la profondeur de la cavité. Par exemple pour une sphère de 2 m de rayon (Fig. 23), à une profondeur de toit de 1 m, la maille doit être de l'ordre de 2 m. Par ailleurs, on voit qu'au-delà de 2 m de profondeur, la cavité devient difficilement détectable.

Expérimentalement, les limites de détectabilité présentées ci-après sont minorées par le bruit de fond, qui dépend des hétérogénéités de surface.

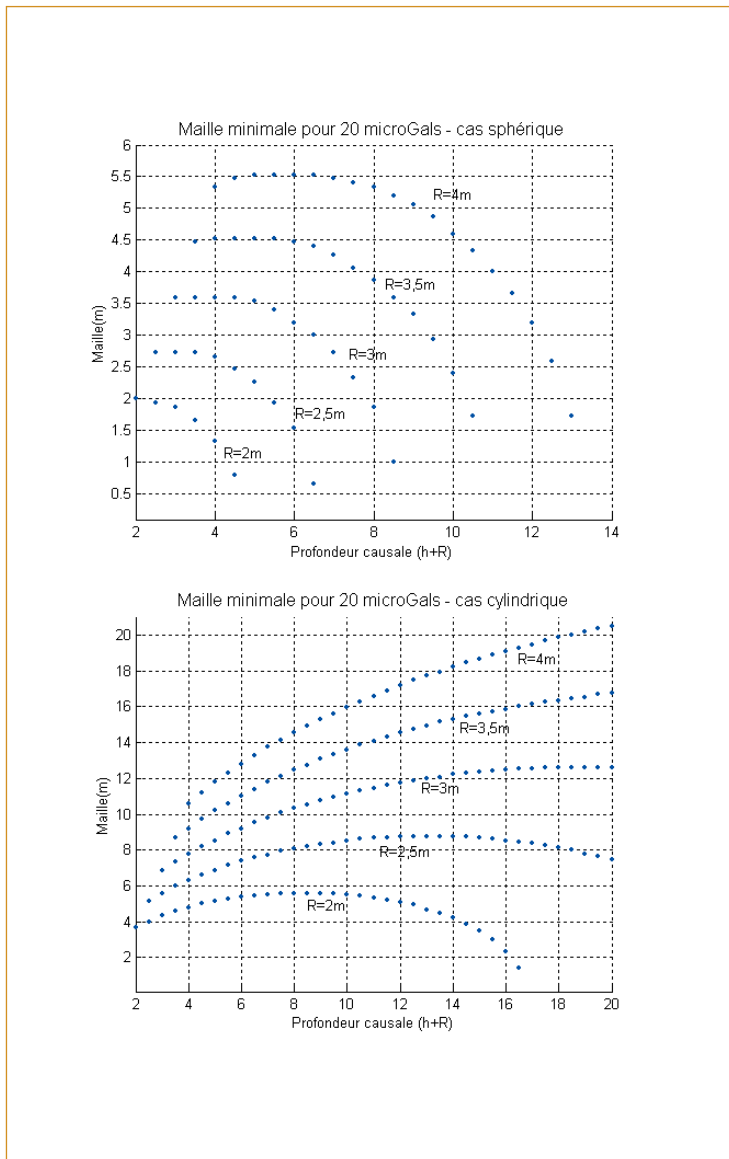
La figure 24 présente pour les cas sphériques et cylindriques, les mailles qu'il faudrait adopter pour qu'au moins l'amplitude de trois points de mesures soit supérieure à 20 μgal .



▶▶▶ FIGURE 22
 Détectabilité à 10 et 20 μgals
 (d'après Lagabrielle, 1998).



▶▶▶ FIGURE 23
 Anomalie créée par une sphère vide
 dans un encaissant de masse volumique
 2000 kg.m^{-3} pour une sphère de rayon
 $R = 2 \text{ m}$ dont le toit est à
 a) $h = 1 \text{ m}$ et b) $h = 2 \text{ m}$.
 La maille de mesure pour qu'au moins
 trois points (cercles rouges) donnent
 une anomalie supérieure à
 $20 \mu\text{gal}$ est indiquée.



▶▶▶ **FIGURE 24**
Maille pour les cas sphérique et cylindrique en fonction de la profondeur causale (rayon + hauteur du toit, cf. Fig. 22), pour différents rayons. La maille est ici déterminée pour que l'anomalie mesurée soit de plus de 20 μgal sur au moins 3 points de mesure.

◆ Quelques principes de mesures et d'utilisation des microgravimètres

En génie civil, les cavités recherchées correspondent à des contrastes de masse volumique de l'ordre de $1\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à $2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Le gravimètre utilisé doit être sensible au μgal , et une précision de $5\ \mu\text{gal}$ est souhaitée. Les microgravimètres de terrain actuels présentent des précisions de l'ordre de 3 à $6\ \mu\text{gal}$ (ICAG-94, 1995). Les trois principaux constructeurs de gravimètres de terrain sont Lacoste & Romberg (modèle D), Scintrex (modèle CG-3M) et Sodin. Il existe par ailleurs des publications comparant les performances de ces appareils (ICAG-94, 1995) et (Kaufmann et Doll, 1988).

Un microgravimètre se présente sous la forme d'un boîtier de quelques kilogrammes, pour un volume de quelques dm^3 . Les règles générales de transport et d'utilisation de ce type d'appareils sont les suivantes (SAFEGE, 2002) :

Horizontalité de l'appareil

Le microgravimètre doit être horizontal pour réaliser les mesures de variation du champ de pesanteur. Pour cela, il repose généralement sur un trépied réglable. L'horizontalité est assurée par des niveaux (vis à bulles par exemple).

Conditions de transport

Le microgravimètre est un appareil au mécanisme très sensible. Il doit être bloqué lors des transports pour ne pas être endommagé. En voiture, on peut le poser et l'attacher sur un siège passager qui permettra d'amortir les vibrations. En avion, il est impératif de le prendre avec soi.

Condition thermique et vérifications

Le mécanisme de mesures doit être à température constante. Celle-ci est assurée par l'alimentation électrique du système. Par ailleurs, selon les préconisations du constructeur, un ensemble de vérifications est à réaliser régulièrement :

- contrôle de sensibilité,
- contrôle de l'effet minimum dû à l'inclinaison,
- contrôle de la ligne de lecture donnée par le constructeur,
- calage du zéro sur la ligne de lecture.

Contrôle du coefficient k

Le principe de mesure du microgravimètre repose sur les variations de longueur d'un ressort. Il existe une relation linéaire entre l'allongement Δl du ressort de mesure et la valeur de l'anomalie Δg :

$$k = \Delta g / \Delta l$$

Ce coefficient k varie en fonction du temps. Pour le contrôler, il faut réaliser une série de mesures sur au moins deux points de référence ou bases gravimétriques du premier ordre dont le contraste de valeurs de g est égal à plusieurs μgals , dans un cycle de mesure n'excédant pas une heure.

Avant les mesures

Il faut choisir un point de station de base stable, de préférence au centre de la zone d'étude. Suivant la superficie à étudier, plusieurs points de base pourront être définis et devront alors être reliés (une base de référence et d'autres bases secondaires ou sous-bases).

Il faut ensuite mettre à niveau le microgravimètre et procéder au calage du zéro.

Puis, il faut attendre que l'appareil se stabilise, puis le régler dans la gamme centrale de mesure dans la zone étudiée, et suivre les instructions du constructeur sur la technique de mesure. Une mesure prend généralement entre trois et sept minutes suivant les conditions d'utilisation.

Enfin, la coupelle sur trépied qui supporte le gravimètre doit être calée le plus horizontalement possible afin de pouvoir, lors des retours à la base, replacer l'appareil dans la même position de mesure. Dans le cas d'un terrain meuble, on disposera par exemple des piquets de bois enfoncés dans le sol et à l'aplomb des pieds de la coupelle.

◆ Programme de mesure, points de reprises, erreur de mesure

La mesure de la variation du champ de pesanteur nécessite de nombreuses corrections : il faut tenir compte de la dérive de l'appareil de mesure, des coordonnées du point de mesure, de l'action de la lune, du soleil (marée gravimétrique ou marée luni-solaire) et des reliefs environnants.

Implantation des mesures

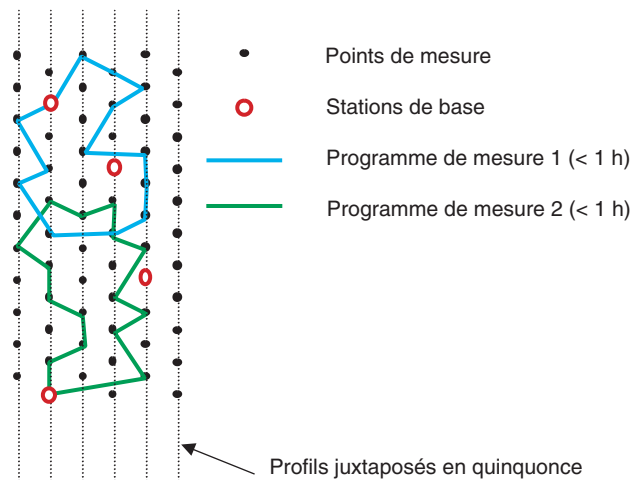
Les points (ou *stations*) de mesures sont définis selon des *profils juxtaposés en quinconce*. Ils sont matérialisés au sol (peinture, clous numérotés, etc.). Il faut procéder ensuite à un relevé des coordonnées en plan de chaque station (tolérance de 0,2 m en x , et y) ainsi qu'à un *relevé altimétrique au centimètre près* par rapport à une *station de référence* (sur ce point, $z = 0$ et $\Delta g_{\text{mes}} = g_{\text{mes}} - g_{\text{ref}} = 0$), choisie si possible loin des reliefs particuliers (remblai, fossé, mur, etc.). Les mesures microgravimétriques doivent être réalisées bien au-delà des anomalies recherchées.

Programme de mesure et erreur

Cette phase des mesures permet d'une part, de prendre en compte la dérive instrumentale et les effets des marées luni-solaires, d'autre part, d'obtenir la valeurs de l'anomalie significative.

Après avoir laissé le microgravimètre se stabiliser (environ 10 à 20 mn), *les mesures sont organisées en séquences (ou programmes) qui commencent et se terminent à une station de base*. Au moins deux lectures au départ à la base et deux lectures à l'arrivée sont nécessaires. Un écart de plus de 3 μgals sur une station de base nécessite une nouvelle mesure. Entre deux passages à la base, on transporte le

microgravimètre d'une station à l'autre dans un ordre *aussi aléatoire que possible*. La période d'un programme est de *moins d'une heure*. À chaque mesure l'heure est notée. Les programmes s'enchaînent jusqu'à ce que toutes les stations aient fait l'objet d'une mesure au moins une fois.



Une deuxième évaluation de la dérive est réalisée en réitérant les mesures sur des points pris au hasard (*points de reprise*) qui représentent au moins 20 % du nombre total de points de mesure. De même, une valeur absurde en un point en comparaison des valeurs voisines à ce point, nécessite une nouvelle mesure. Dans ce cas, une autre mesure sur un point voisin est conseillée : elle permet de vérifier s'il s'agit bien d'une mesure aberrante.

Remarque 1 : La représentation des écarts entre les mesures en un même point, pour l'ensemble des stations reprises, suit généralement une loi gaussienne, dont la demi-largeur à mi-hauteur donne la valeur de l'anomalie significative.

Remarque 2 : La réalisation de mesures simultanées avec une station gravimétrique fixe (comme il en existe à Orléans, Brest ou Strasbourg) permettrait de diminuer cette incertitude de 15 % (Debeglia et Dupont, 2002).

◆ Les corrections en microgravimétrie et calcul de l'anomalie de Bouguer

Correction de dérive

La première correction consiste à multiplier les valeurs mesurées par le coefficient instrumental k , propre à chaque gravimètre et donné par le constructeur. Cette dérive instrumentale, généralement supposée linéaire durant un programme, peut être de l'ordre d'une dizaine de μgals par heure.

Ensuite, on apporte les corrections luni-solaires (dont l'amplitude est de l'ordre de 200 à 300 μgals sur une période d'un peu moins de 12 heures), dépendantes de la date, de l'heure, de la latitude et de la longitude. Ces deux variations (dérive et marées) sont évaluées expérimentalement par des passages rapprochés à la base.

La correction de latitude

La variation de pesanteur en fonction de la latitude est obtenue en dérivant l'équation du paragraphe 1 : la correction dont il faut tenir compte pour un déplacement dl le long d'un méridien, en prenant le rayon de la terre $R_T = 6378 \text{ km}$, est :

$$\Delta g_1 = 0,81 \cdot dl \cdot \sin 2\phi \text{ } \mu\text{gal}$$

Soit par exemple, pour un angle $\phi = 45^\circ$, pour un déplacement $dl = 10 \text{ m}$:

- de la station de base vers le sud, $\Delta g_1 = 8,1 \text{ } \mu\text{gal}$,
- de la station de base vers le nord, $\Delta g_1 = -8,1 \text{ } \mu\text{gal}$,
- de la station vers l'ouest ou l'est, $\Delta g_1 = 0$.

Les corrections vers le nord et vers le sud s'inversent dans l'hémisphère sud.

La correction à l'air libre

C'est la correction qu'il faut appliquer pour tenir compte du fait que le gravimètre est à une hauteur h positive (ou négative) si le point de mesure est au-dessus (ou au-dessous) de la station de base. La valeur de référence de la pesanteur en un point à la surface du globe de masse m et de rayon R_T vaut :

$$g_{\text{ref}} = \frac{Gm}{R_T^2}$$

Les mesures en microgravimétrie ne sont pas nécessairement réalisées au niveau de référence et sur un terrain plat. La hauteur h par rapport à ce niveau peut varier, et l'accélération devient alors :

$$g_h = g_{\text{ref}}(1 - 2h / R_T)$$

Soit en moyenne :

$$\begin{aligned} \Delta g_h &= 308,0h \text{ } \mu\text{gal} \\ \Delta g_h &= 308,8h \text{ } \mu\text{gal} \text{ à l'équateur} \\ \Delta g_h &= 307,2h \text{ } \mu\text{gal} \text{ aux pôles.} \end{aligned}$$

Ce qui signifie qu'une variation de hauteur de l'ordre de 3 cm lors des mesures implique une correction de l'ordre de 10 μgal . Il faut donc impérativement connaître au centimètre près la hauteur de la station de mesure par rapport à la station de base.

La correction de plateau

La correction de plateau prend en compte la masse du matériau de masse volumique ρ_B , comprise entre le point de mesure situé à une hauteur h et le point de référence, et vaut :

$$\begin{aligned} \Delta g_p &= - 41,92 \rho_B h \text{ } \mu\text{gal} \text{ avec } \rho_B \text{ donnée en g.cm}^{-3} \\ \Delta g_p &= - 41,92 \cdot 10^{-3} \rho_B h \text{ } \mu\text{gal} \text{ avec } \rho_B \text{ donnée en kg.m}^{-3}. \end{aligned}$$

Le signe moins vient du fait que la correction de plateau compense en partie la correction à l'air libre. La correction d'altitude est la somme des deux. Lorsque le plateau se situe à une hauteur h positive par rapport au niveau de référence, il faut soustraire la correction de plateau aux variations mesurées, et inversement si h est négative.

Détermination de la masse volumique du terrain

Si la topographie devient prononcée, il convient d'améliorer les corrections par une estimation des masses volumiques du terrain selon la méthode de Nettleton. Si la masse volumique moyenne choisie pour le calcul de l'anomalie de Bouguer est trop faible, on obtient une corrélation directe avec le profil topographique. Inversement, si elle est trop forte, on obtient une corrélation inverse. Si aucune corrélation n'est possible, alors la masse volumique choisie est la bonne.

La correction de terrain (ou de relief)

C'est une correction supplémentaire qui prend en compte les tranches de terrains situées au-dessus et en-dessous du niveau de référence. Il existe aujourd'hui des logiciels qui calculent cette correction à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT).

Une autre méthode couramment utilisée lorsque le MNT n'est pas disponible, consiste à découper le terrain autour du point de mesure avec un réticule de Hammer ; cette méthode est décrite par exemple par Chouteau, 1999 et Parasnis, 1986.

Calcul de l'anomalie de Bouguer

En prenant en compte l'ensemble de ces cinq corrections et en estimant la masse volumique du terrain, on obtient l'anomalie de Bouguer qui s'écrit :

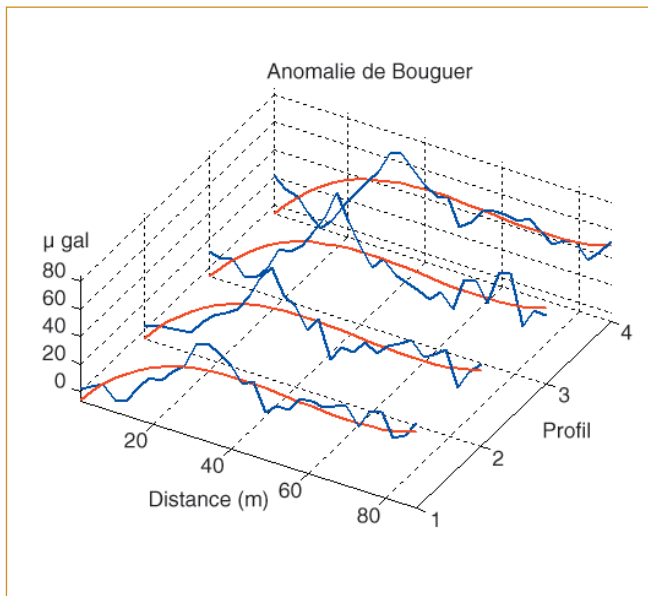
$$\Delta g_B = g_{\text{mes}} - [g_{\text{base}} - (308,6 - 41,92\rho_B)h - \Delta g_t] \text{ } \mu\text{gal}$$

Elle est directement reliée aux hétérogénéités de masse dans le sous-sol. Elle représente en chaque point les variations de la pesanteur depuis la surface jusqu'aux couches profondes, par rapport à la base gravimétrique choisie.

◆ La détermination de l'anomalie régionale

Des profils microgravimétriques doivent être réalisés au-delà de la grille de mesures pour avoir une approximation aussi fidèle que possible de l'*anomalie régionale* (Fig. 25). Elle s'extrait à partir de la carte de l'anomalie de Bouguer et non pas profil par profil. Elle est ensuite soustraite à l'anomalie de Bouguer pour obtenir l'*anomalie résiduelle*, laquelle rend compte de la répartition des masses dans le proche sous-sol.

Il existe plusieurs méthodes pour établir une approximation de l'anomalie régionale, dont le choix reste arbitraire. Il convient que l'interpréteur tienne compte des biais introduits par la manière de déterminer l'anomalie régionale.



▶▶▶ FIGURE 25
Anomalie de Bouguer sur 4 profils. L'approximation de l'anomalie régionale (en rouge) est obtenue à partir de l'ensemble des profils.

Approximation graphique à main levée

Cette technique fréquemment employée est d'autant plus efficace que l'opérateur est expérimenté. Elle s'avère bien souvent suffisante.

Techniques mathématiques

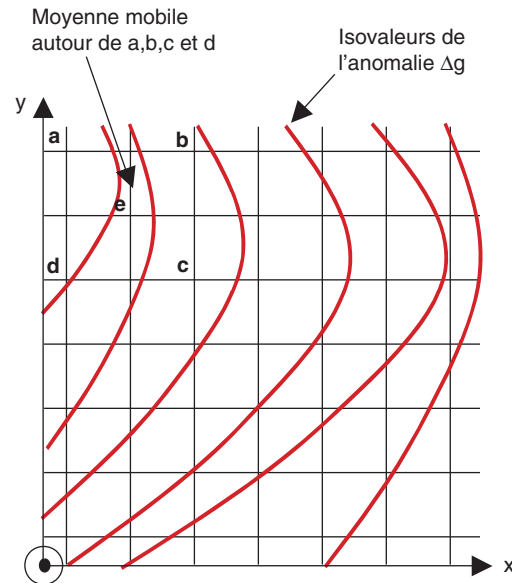
■ **Approximation polynomiale** : Les points de mesure sont approchés par un polynôme de degré 2 ou plus en fonction des coordonnées x et y de type :

$$\Delta(x, y) = ax + by + cxy + dx^2 + ey^2 + f$$

où x et y sont les coordonnées des points de mesures. Les coefficients a , b , c , d , e et f de ce polynôme sont déterminés par une méthode des moindres carrés. Ce polynôme représente l'anomalie régionale. Plus le degré est haut, plus l'anomalie régionale « colle » à l'anomalie de Bouguer et plus l'anomalie résiduelle est faible.

■ **Approximation de Fourier** : Cette approximation (Syberg, 1972) consiste à calculer la transformée de Fourier de l'anomalie mesurée en fonction des coordonnées. Un procédé de filtrage permet de séparer les anomalies basses fréquences spatiales (anomalie régionale), relatives à la géologie profonde, et les anomalies hautes fréquences spatiales (anomalie résiduelle), reliées aux hétérogénéités de la proche surface.

■ **Approximation par moyenne mobile** : cette technique consiste à approcher l'anomalie régionale par une moyenne autour d'un certain nombre de points. Par exemple sur la figure 26, la valeur de l'anomalie régionale est calculée en e en faisant la moyenne pondérée des valeurs en a , b , c et d et e (coef. = 2). D'autres coefficients modérateurs peuvent être ajoutés (Meyer De Stadelhofen, 1991) ou bien un nombre de points plus importants peut être considéré.



▶▶▶ FIGURE 26
Moyenne mobile autour de 4 points.

2.2 Interprétation des mesures

Si la maille choisie initialement est la bonne, la présence d'une cavité est révélée par une anomalie négative d'amplitude significative d'au moins 15 à 20 μgal sur un minimum de trois points de mesure adjacents (sur un ou plusieurs profils). Si un point est en anomalie confirmée, il faut compléter les mesures en resserrant la maille autour de ce point.

◆ Estimation de la profondeur

Pour caractériser au mieux les hétérogénéités rencontrées lors d'une campagne de mesure, on a recours classiquement à des forages qui permettent de vérifier la présence de cavités.

Il existe aussi un nombre important d'approximations qui permettent de déterminer les profondeurs des hétérogénéités causées par ces anomalies. On distingue les formules qui ne tiennent compte que de la largeur à mi-hauteur de l'anomalie $x_{1/2}$ de celles qui prennent en compte le rapport de la valeur maximale de l'anomalie à la valeur maximale du gradient de l'anomalie (les formules de Smith) (Tableau VII).

▶▶▶ TABLEAU VII
Formules d'estimation des profondeurs des hétérogénéités

Hétérogénéité	Formules	Commentaires
Sphère	$z = 1,305 \times x_{1/2}$	z est la profondeur du centre de masse, $h = z - R$, le toit de la sphère de rayon R , estimé par la formule correspondante de la figure 35
Cylindre horizontal	$z = x_{1/2}$	z est la profondeur de l'axe du cylindre, $h = z - R$, le toit du cylindre horizontal de rayon R , estimé par la formule correspondante de la figure 35
Cylindre vertical	$z = 1,732 \times x_{1/2}$	z est le toit du cylindre vertical (base circulaire haute)

Des formules donnent les profondeurs d'autres hétérogénéités, mais elles sont peu précises et fortement dépendantes du rapport des dimensions de ces hétérogénéités (cas du prisme (Reynolds, 2000)). Les formules de Smith donnent les estimations des profondeurs en fonction des valeurs de l'anomalie résiduelle. Elles s'appliquent quelle que soit l'hétérogénéité, pourvu que celle-ci présente un contraste entièrement positif ou entièrement négatif.

Des précisions peuvent être trouvées dans (Reynolds, 2000), (Parasnis, 1986) et (Meyer De Stadelhofen, 1991). Par ailleurs, des auteurs comme (Mauriello et Patella, 2001) proposent des

modèles mathématiques 3D plus élaborés pour estimer la profondeur d'une distribution de masse responsable de l'anomalie en surface. Quand la position et les dimensions des cavités sont approximativement connues, des méthodes d'inversion des mesures microgravimétriques, comme celles présentées par (Mirzaei et Bredewout, 1996) peuvent mener à leur détection proprement dite.

◆ Estimation de la masse totale de l'hétérogénéité

La masse totale de l'hétérogénéité est issue de la formule suivante (application du théorème de Gauss) :

$$M = \frac{1}{2\pi G} \iint \Delta g dS$$

La surface considérée, en principe la surface terrestre, est restreinte à la surface de l'extension de l'anomalie (i.e. zone où Δg non nulle). On utilise ainsi en microgravimétrie la formule suivante :

$$M = 0,0239 \sum \Delta g \Delta S \text{ (tonnes)}$$

où l'anomalie est exprimée en μgals et la surface ΔS en m^2 . La masse du matériau qui se trouve dans le volume contenu dans l'hétérogénéité est :

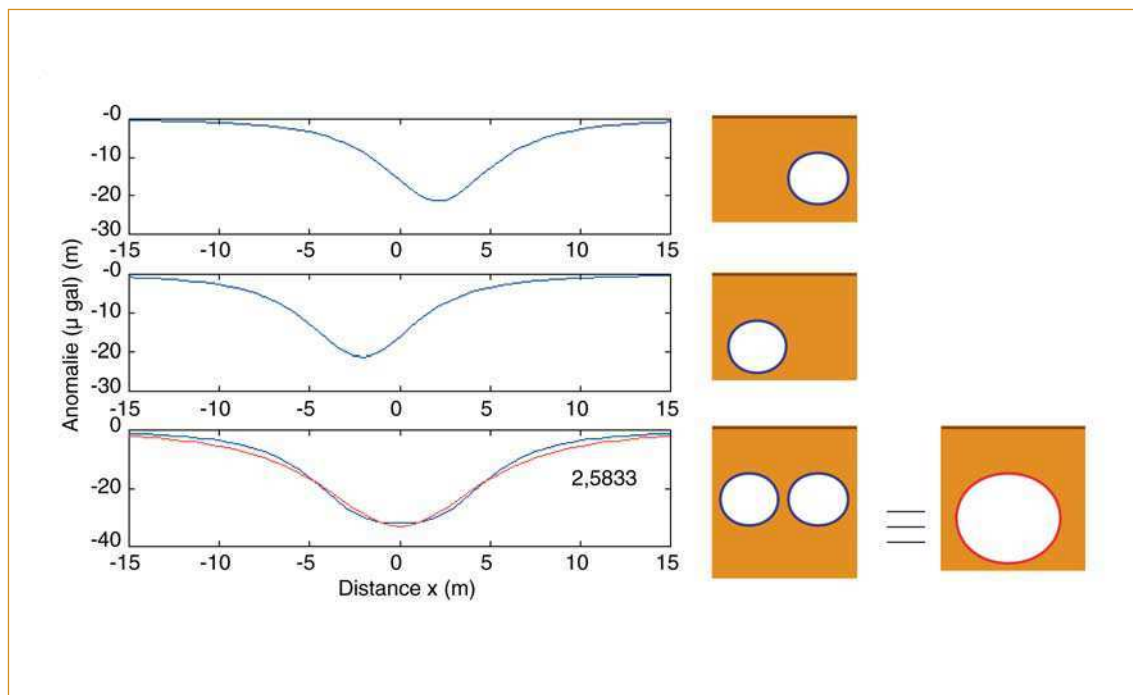
$$M_{\text{réelle}} = 0,0239 \frac{\rho_1}{\rho_1 - \rho_0} \sum \Delta g \Delta S \text{ (tonnes)}$$

où ρ_1 est la masse volumique de l'hétérogénéité, ρ_0 celle de l'encaissant et $M_{\text{réelle}}$, la masse est exprimée en tonnes.

◆ Implantation des forages

Les forages sont implantés à l'aplomb des anomalies négatives les plus fortes. Compte tenu des problèmes de coalescence (Fig. 27), il est recommandé d'implanter un second forage à peu de distance du premier si celui-ci n'a pu expliquer l'anomalie enregistrée.

D'autre part, il est aussi recommandé de faire des forages de références là où les anomalies sont positives, afin d'affiner le modèle géologique et géophysique.



►►► FIGURE 27 - Exemple de coalescence de mesure : l'anomalie créée par deux sphères vides de rayon 2 m et dont le toit est situé à 2,60 m est similaire à celle créée par une sphère d'un rayon de 4 m, d'une masse volumique de $800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et dont le toit est situé à la même profondeur.

2.3 Limites de la méthode

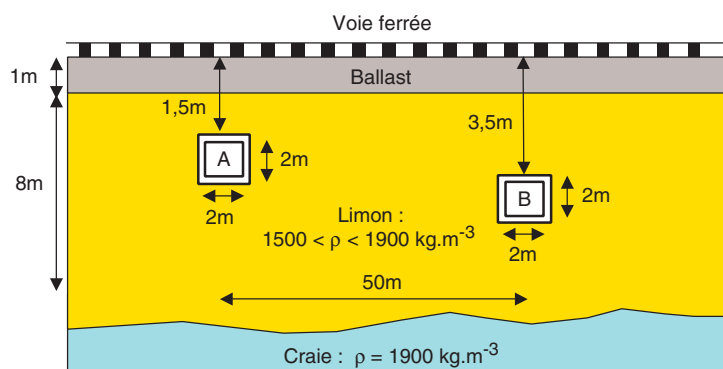
La microgravimétrie est une méthode à faible rendement : 50 points de mesure par jour. Sa mise en œuvre est très délicate et le matériel est fragile et très sensible au bruit (chocs, trafic, microséisme).

La topographie du plan de mesure doit être connue au centimètre près. Dès que celle-ci devient trop prononcée, les mesures deviennent délicates à interpréter.

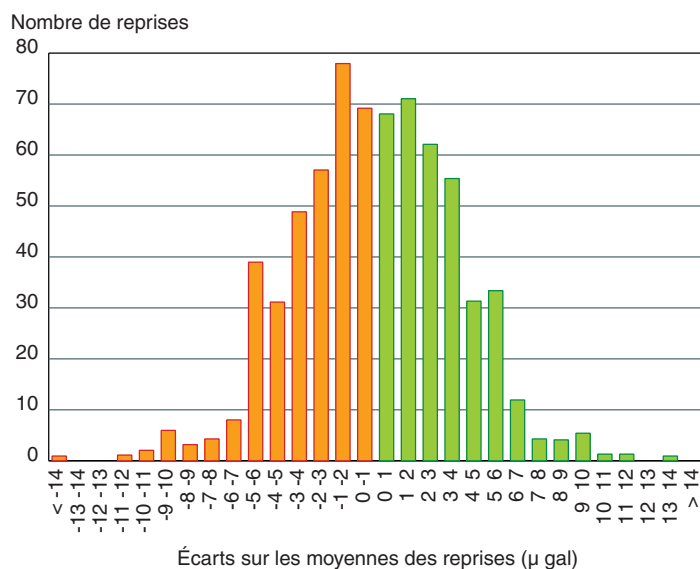
La mesure de l'anomalie de gravité ne permet pas de déduire de manière univoque la distribution de masse responsable de l'anomalie en surface : la solution n'est pas unique. La figure 27 illustre ce cas : l'anomalie de gravité mesurée, produite par deux sphères ($R = 2$ m, contraste de masse volumique sphère/milieu $r = 2000$ kg.m⁻³), distantes de 4,2 m et dont les toits se situent à 2,6 m, est très proche de l'anomalie produite par une sphère ($R = 4$ m, contraste de masse volumique sphère/milieu $\rho = 800$ kg.m⁻³) dont le toit se situe à 2,6 m.

Cet exemple montre que la mesure microgravimétrique d'une anomalie n'est pas suffisante pour la caractériser. En outre, il peut se présenter des contextes plus complexes où la position de l'anomalie mesurée ne correspond pas à l'aplomb de l'anomalie. Un forage de contrôle à l'aplomb du maximum de l'anomalie ne détecterait pas la cavité, alors qu'elle existe. Un forage ne peut prouver que l'existence d'une cavité, mais jamais son absence.

En revanche, la mesure d'une anomalie négative indique de manière certaine l'existence d'un défaut de masse.



▶▶ FIGURE 28 - Coupe du site test.



▶▶ FIGURE 29 - Exemple de statistique sur les ponts de reprise sur le site test de la figure 15 (Document SNCF).

3. EXEMPLES DE MESURES

Les mesures microgravimétriques (cf. Fig. 30, 31, 32) ont été réalisées sur une voie ferrée (site test de la figure 28) avant et après le creusement de deux galeries de sections 2×2 m creusées dans une couche de limon. La méthode microgravimétrique n'est pas perturbée par l'environnement métallique.

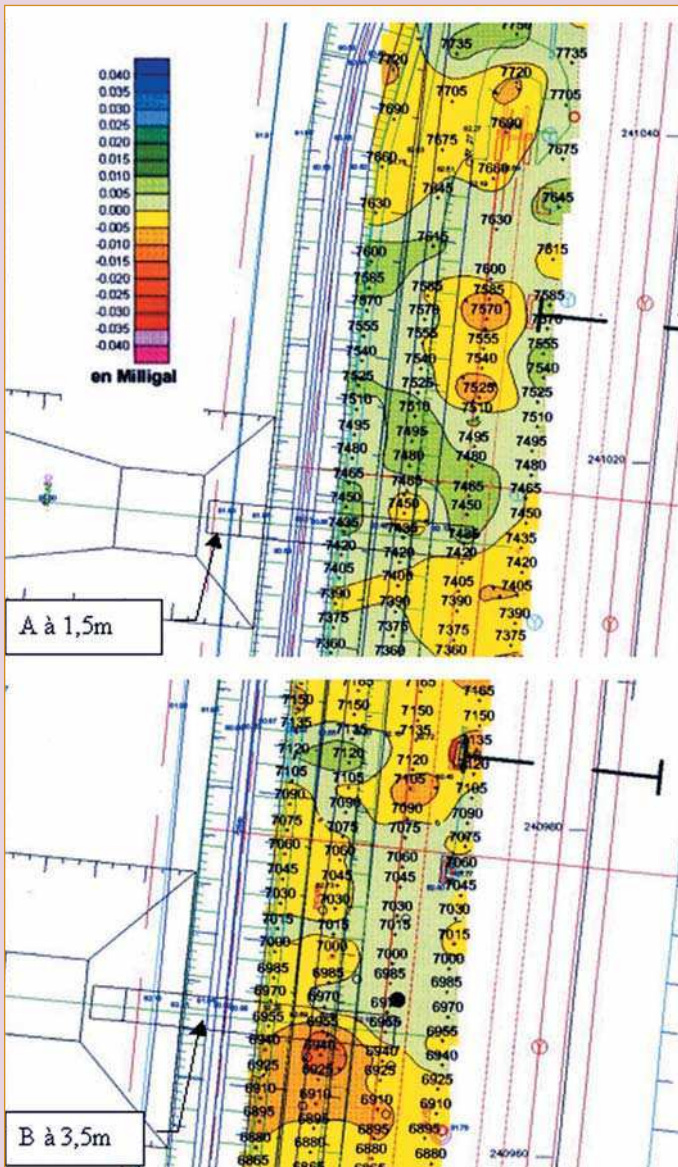
Leur toit se situe respectivement à 1,5 m (galerie A) et 3,5 m (galerie B) de profondeur. La statistique des points de reprise est illustrée sur la figure 29 et donne une valeur de l'anomalie significative de l'ordre de 15 μ gal.

La maille de mesure adoptée est de 3 m entre profils et de 1,5 m entre points de mesure sur un même profil. Les isovaleurs sont tracées tous les 5 μ gal.

L'anomalie régionale a été calculée par la méthode des moindres carrés suivant un polynôme de degré 3.

La présence des cavités est révélée par des anomalies négatives à leur aplomb : 30 μ gals et 15 μ gals pour les cavités à 1,5 m et 3,5 m de profondeur, ce qui est conforme à la modélisation. Par ailleurs, d'autres zones présentent des anomalies (bruit géologique, limon inhomogène). Elles ne correspondent à aucune cavité connue. Leur caractérisation doit être étayée par des forages.

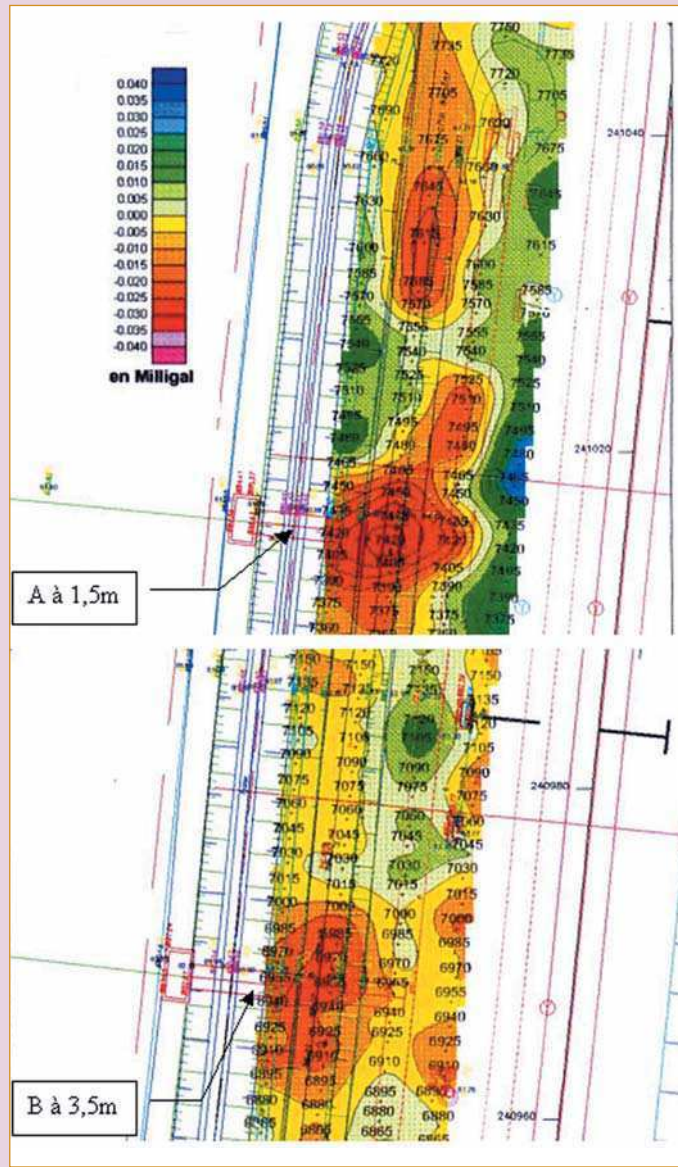
a. Avant creusement



▶▶ FIGURE 30

Exemple de mesures microgravimétriques avant creusement de cavités de section carrée de 2 m situées à 1,5 m (notée A) et 3,5 m (notée B) de profondeur dans du limon (Document SNCF).

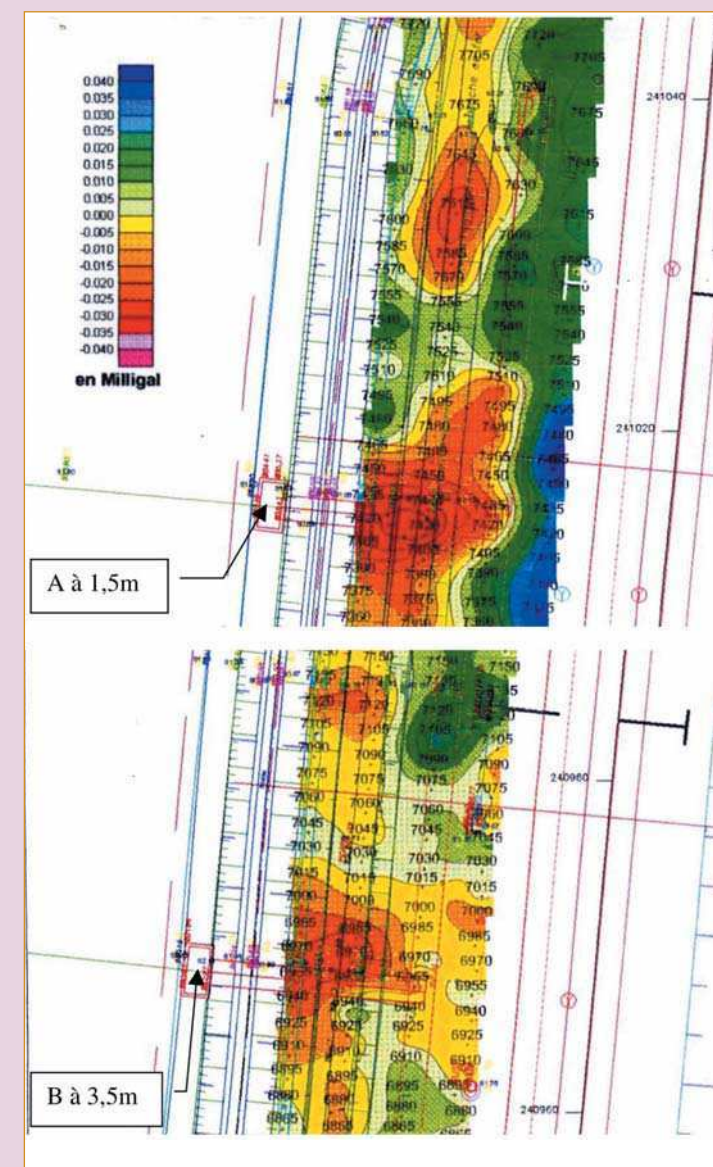
b. Après creusement



▶▶ FIGURE 31

Exemple de mesures microgravimétriques après creusement de cavités de section carrée de 2 m situées à 1,5 m (notée A) et 3,5 m (notée B) de profondeur dans du limon (Document SNCF).

c. Valeurs de b - Valeurs de a



▶▶ FIGURE 32

Exemple de mesures microgravimétriques (soustraction des valeurs après et avant creusement) au-dessus de cavités de section carrée de 2 m situées à 1,5 m (notée A) et 3,5 m (notée B) de profondeur dans du limon (Document SNCF).

4. MODÉLISATION

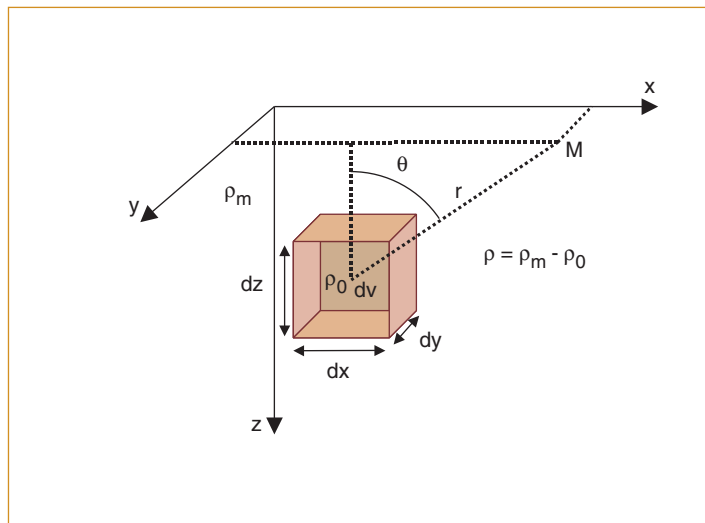
Toute structure géologique peut être décomposée en une combinaison de volumes élémentaires (Fig. 33) :

$$dv = dx \times dy \times dz \text{ en m}^{-3}$$

L'anomalie de gravité créée en surface au point M par l'élément de volume dv est donnée par :

$$d(\Delta g) = \frac{G\rho dv}{r^2} \cos \theta$$

où ρ est le contraste de masse volumique entre la structure et le milieu en kg.m^{-3} , G la constante de gravitation universelle, r la distance entre le point de mesure M et l'élément de volume dv et θ l'azimut en degrés.



▶▶▶ FIGURE 33

Définition du volume élémentaire pour le calcul de l'anomalie gravitationnelle.

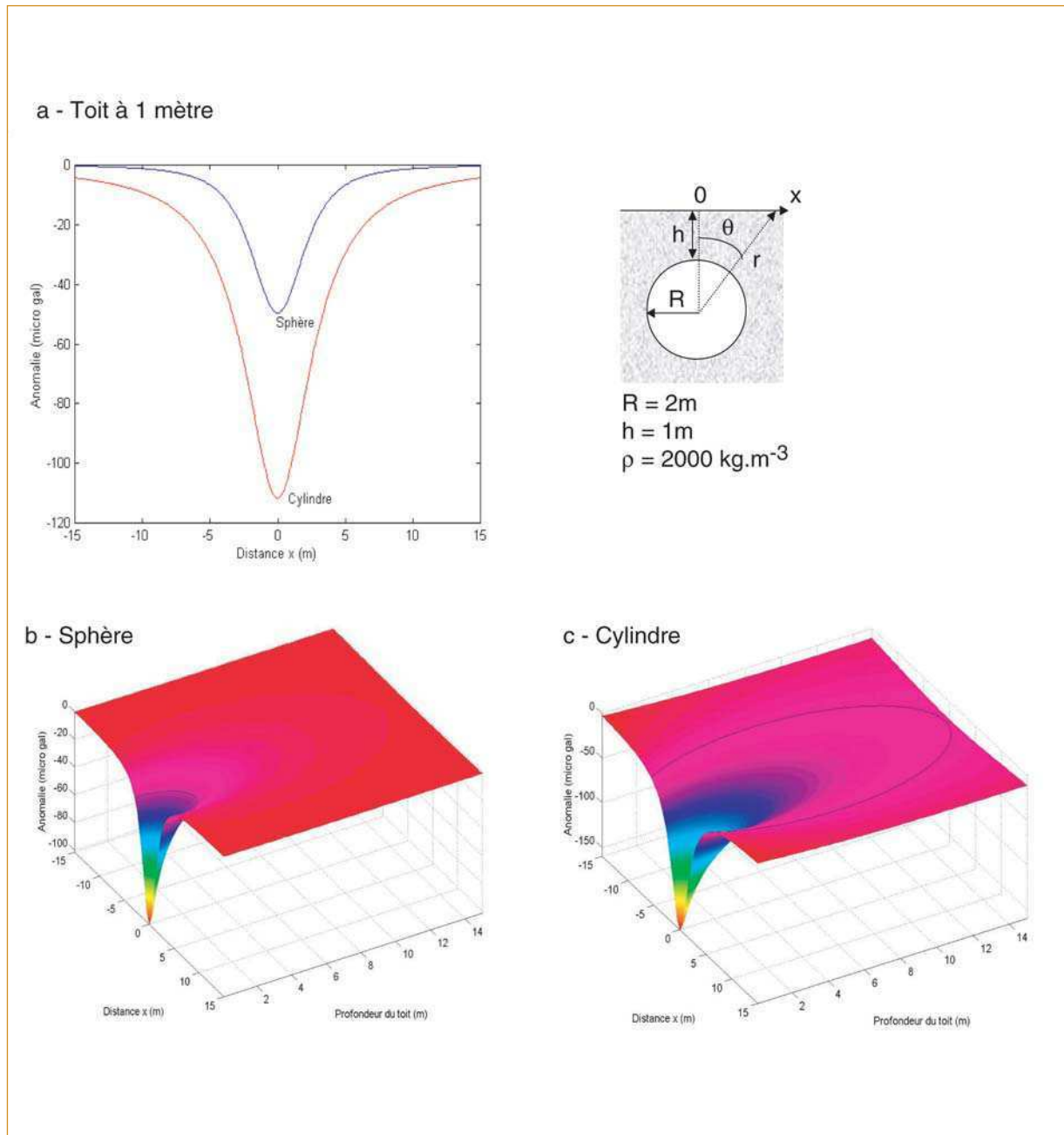
De cette formule, on peut par exemple calculer l'anomalie créée par une sphère à l'aplomb du centre de la cavité :

$$\Delta g = \frac{4}{3} \pi R^3 G \rho \frac{(R+h)}{(x^2 + (R+h)^2)^{3/2}}$$

où R est le rayon de la sphère, h est la profondeur du toit et x la position en surface le long de l'axe (Ox).

La figure 34 représente l'anomalie créée par une sphère et un cylindre infini vides, en fonction de la profondeur du toit et de la distance au sol. À profondeur égale, l'anomalie créée par un cylindre vide est plus forte que celle d'une sphère vide. Si la détectabilité est fixée à $20 \mu\text{gal}$, on voit qu'au-delà d'une profondeur de toit de 3 m, la sphère de 2 m de rayon n'est plus détectable.

Le cylindre infini est détectable à plus grande profondeur. L'anomalie est alors très étalée. Dans un cas réel, cet étalement se distingue mal des variations dues aux hétérogénéités de masse du sol. La figure 35 contient quelques formules d'anomalies typiques (Reynolds, 2000), (Parasnis, 1986), ainsi que leurs variations qualitatives et les cavités qu'elles peuvent représenter.

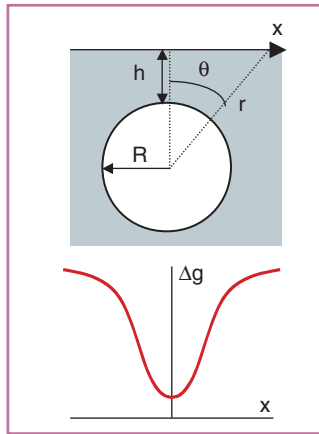


▶▶▶ FIGURE 34

a. Anomalie gravitationnelle créée par des vides sphériques en bleu et cylindriques en rouge.

b. Anomalie créée par la même sphère pour plusieurs profondeurs du toit.

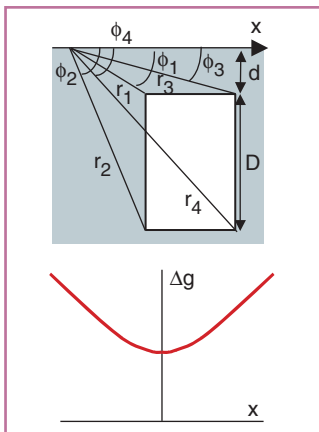
c. Anomalie créée par le même cylindre pour plusieurs profondeurs du toit. En trait noir, la limite de détectabilité est fixée à $20 \mu\text{gal}$.

Cylindre infini

$$\Delta g = 2\pi R^2 G\rho \frac{(R+h)}{(x^2 + (R+h)^2)}$$

Exemples de cavités :

Galerie, sapes, conduits karstiques

Prisme infini

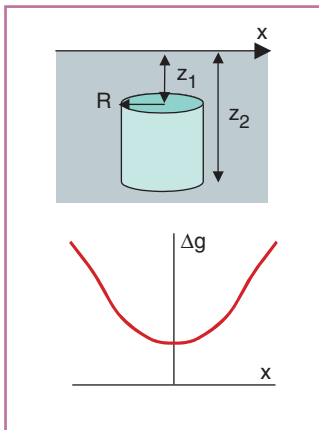
$$\Delta g = 2G\rho \left[x \ln \frac{r_1 r_4}{r_2 r_3} + b \ln \frac{r_2}{r_1} + D(\phi_2 - \phi_4) - d(\phi_1 - \phi_3) \right]$$

Plaque infinie

$$\Delta g = 2\pi G\rho [D - d]$$

Exemples de cavités :

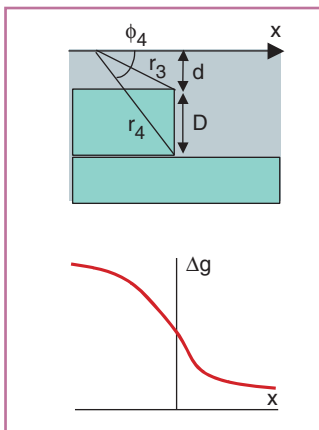
Galerie, sapes, carrières (salles)

Cylindre vertical

$$\Delta g = 2\pi G\rho \left[z_2 - z_1 + \sqrt{(z_1^2 + R^2)} - \sqrt{(z_2^2 + R^2)} \right]$$

Exemples de cavités :

Puits de carrières, catiches

Marche

$$\Delta g = 2G\rho \left[x \ln \frac{r_4}{r_3} + \pi(D - d) - D\phi_4 + d\phi_3 \right]$$

Exemples d'hétérogénéités :

Failles verticales

►►► FIGURE 35 - Quelques exemples d'anomalies gravitationnelles. Formules et représentations qualitatives.

5. CONCLUSION

La microgravimétrie est la méthode la plus adaptée à la détection des cavités vides, car elle permet de mettre en évidence directement les défauts de masse.

Comme pour l'ensemble des méthodes géophysiques, la localisation des cavités peut être difficile et les anomalies mesurées ne sont pas toujours corrélées avec les résultats des forages. Il faut prendre beaucoup de précautions sur la manière de les implanter, et un nombre assez important de forages implantés judicieusement est parfois nécessaire pour comprendre la complexité du milieu réel et affiner les modèles.

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

Par ailleurs, la méthode reste coûteuse en raison des précautions qu'elle nécessite et de son rendement faible : 50 points de mesures en moyenne par jour.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERES M., LUETSCHER M., RAYMOND O., *Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves*, Journal of Applied Geophysics, **Vol. 46**, 2001, pp. 249-262.
- BICHARA M., ERLING J.-C., LAKSHMANAN J., *Technique de mesure et d'interprétation minimisant les erreurs en microgravimétrie*, Geophysical Prospecting, **Vol. 29**, 1981, pp. 782-789.
- CHOUTEAU M., *Géophysique appliquée - Gravimétrie*, Cours de l'École polytechnique de Montréal, 1999.
- DEBGLIA N., DUPONT F., *Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations*, Journal of applied geophysics, **Vol. 50**, 2002, pp. 435-454.
- ICAG-94 (1995), *Microgravimetric measurements at the 1994 International Comparison of Absolute Gravimeters*, Metrologia, **Vol. 32**, pp.145-152.
- KAUFMANN R.D., DOLL W.E., *Gravity meter comparison and circular error*, Journal of environmental & engineering geophysics, **Vol. 2**, Issue 3, 1988, pp. 165-171.
- LAGABRIELLE R., *Géophysique appliquée au génie civil*, Technique de l'ingénieur, 1998, C224.
- LAGABRIELLE R., *Contributions à la mise au point de quelques méthodes géophysiques appliquées à la reconnaissance en Génie Civil*, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Thèse d'État soutenue le 22 janvier, 1986.
- LAKSHMANAN J., BICHARA M., ERLING J.-C., *Étude de fondement en terrain caverneux. Place de la gravimétrie*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, **92**, 1977, pp. 74-79.
- LAKSHMANAN J., *Traitement et inversion des données gravimétriques, la microgravimétrie, son application aux recherches de vides*, Mémoires Sciences de la Terre n° 51, éditions de la fondation scientifique de la géologie et de ses applications, 1990.
- MAURIELLO P., PATELLA D., *Localization of maximum-depth gravity anomaly sources by a distribution of equivalent point masse*, Geophysics, **Vol. 66**, n° 5, 2001, pp. 1431-1437.
- MEYER DE STADELHOFEN C., *Applications de la géophysique aux recherches d'eau*, Technique et Documentation, Lavoisier, 1991.
- MIRZAEI M., BREDEWOUT J.W., *3-D microgravimetry data inversion for detecting cavities*, European journal of environmental and engineering geophysics, **Vol. 1**, 1996, pp. 249-270.
- NEUMANN R., *La gravimétrie de haute précision, application à la recherche de cavités*, Geophysical Prospecting, **Vol. XV-1**, 1967, pp. 116-134.
- PARASNIS D.S., *Principles of applied geophysics*, Chapman and Hall, Fourth edition, 1986.
- REYNOLDS J.M., *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley and Sons, 2000.
- SYBERG, *Geophysical prospecting*, **Vol. 20**, 1972, pp. 47-75.
- YULE D.E., SHARP M.K., BUTLER D.K., *Microgravimetry investigations of foundation conditions*, Geophysics, **Vol. 63**, n° 1, 1998, pp. 95-103.
- SAFEGE, Manuel qualité - Microgravimétrie, Département Eau et Environnement, 20 INS 003, 2002.

Les méthodes sismiques

Chapitre 5

Notations	
V_p	vitesse des ondes de compression ($m.s^{-1}$)
V_s	vitesse des ondes de cisaillement ($m.s^{-1}$)
V_r	vitesse des ondes de Rayleigh (ondes de surface) ($m.s^{-1}$)
V_ϕ	vitesse de phase des ondes de surface ($m.s^{-1}$)
V_q	vitesse quadratique moyenne ($m.s^{-1}$)
λ	coefficient de Lamé
μ	coefficient de Poisson
ρ	masse volumique ($kg.m^{-3}$)
t	temps de parcours
SHR	sismique haute résolution

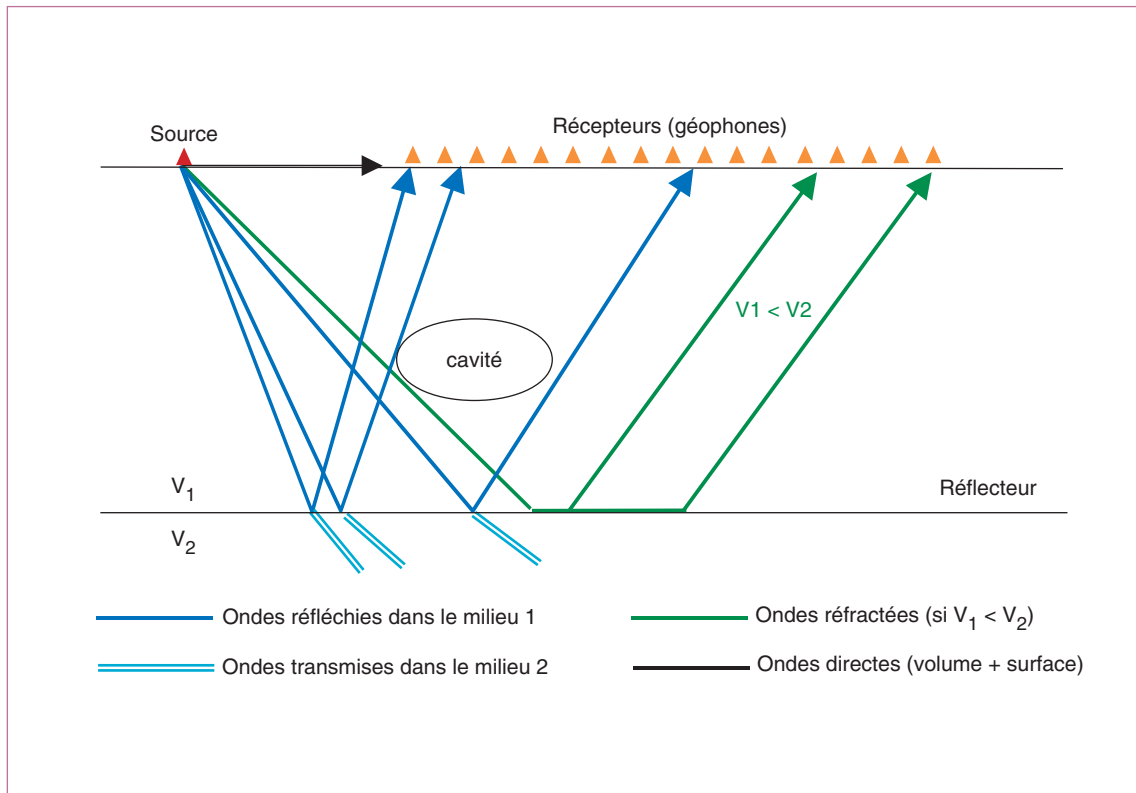
1. GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉTHODES SISMIQUES

1.1 Les méthodes sismiques

Les méthodes de reconnaissance sismique en surface sont basées sur l'étude de la propagation des ondes mécaniques dans le sol. Ces ondes sont provoquées en un point source par un choc (ou ébranlement) entretenu ou non. Lorsqu'elles rencontrent un contraste d'impédance mécanique, elles se réfléchissent partiellement vers un point récepteur où leurs caractéristiques sont mesurées et analysées pour étudier les propriétés du sous-sol (Fig. 36).

Pour la détection de cavités souterraines, trois méthodes sismiques sont présentées ici :

- la sismique réflexion haute résolution (SHR) est la méthode sismique la plus indiquée pour la détection de cavités,
- la sismique en ondes de surface est une méthode en cours de développement,
- la sismique réfraction peut parfois aider à la localisation de cavités en milieu tabulaire où le contraste des vitesses entre couches croît en fonction de la profondeur.



▶▶▶ FIGURE 36 - Principe des méthodes sismiques.

1.2 Les différents types d'ondes sismiques

Les ondes sismiques sont principalement de deux types : les ondes de volume (ondes de compression : ondes P, et ondes de cisaillement : ondes S) et les ondes de surface (ondes de Rayleigh et ondes de Love). Les caractéristiques des fronts d'onde sont représentées sur la figure 37. Les déformations provoquées par la propagation de ces ondes sont représentées sur la figure 38 et sont issues des représentations classiques que l'on trouve par exemple dans (Henry, 1994) et (Reynolds, 2000).

◆ Les ondes de volume

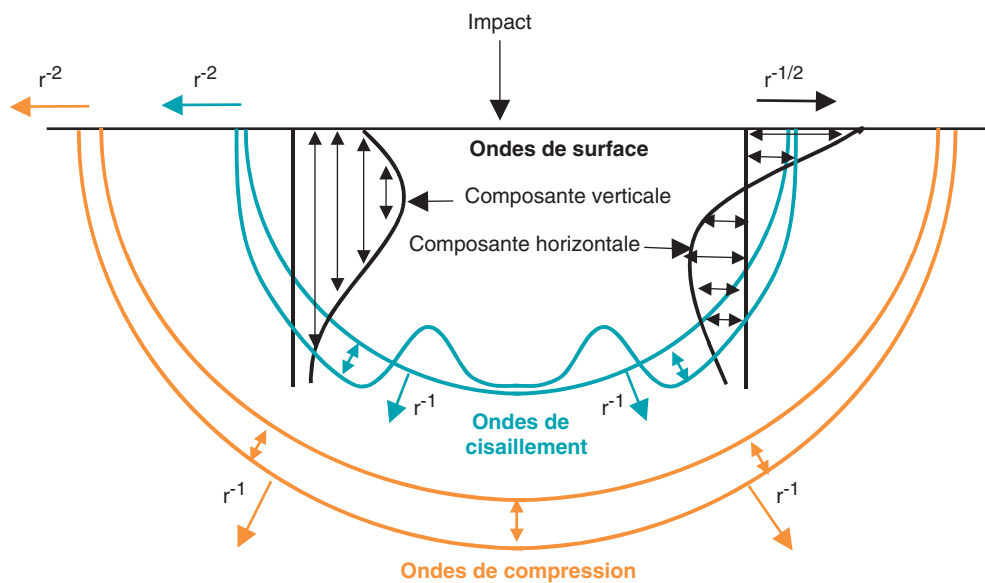
Premier type : les ondes P, ou ondes primaires, sont aussi appelées ondes de compression ou ondes longitudinales. Le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par dilatations et compressions successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde.

Ce sont les plus rapides ; leur vitesse est égale à $v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ où λ et μ sont les coefficients de Lamé et ρ la masse volumique du matériau.

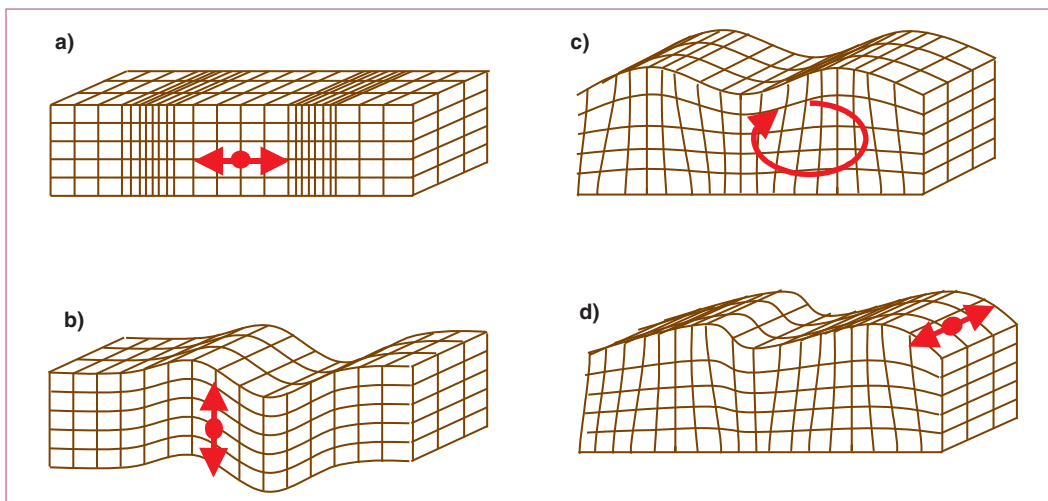
Second type : les ondes S ou ondes secondaires, sont aussi appelées ondes de cisaillement ou ondes transversales. À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides.

Leur vitesse est plus lente que celle des ondes P ; elle est égale à $v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$.

Les lois de propagation des ondes de volume sont similaires aux lois de l'optique (lois de la réflexion et de la réfraction de Snell-Descartes (Fig. 39)). Leurs trajets peuvent être très complexes. Leur temps de parcours dépend du trajet qu'elles empruntent.

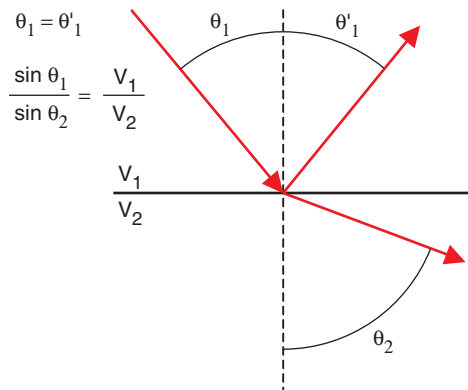


▶▶▶ FIGURE 37 - Fronts d'onde généré par une source ponctuelle dans un milieu semi-infini, homogène, élastique et isotrope.



▶▶▶ FIGURE 38

Déplacement particulière des ondes de volume : a. Ondes de compression - b. Ondes de cisaillement.
 Déplacement particulière des ondes de surface : c. Ondes Rayleigh - d. Ondes de Love.



▶▶▶ FIGURE 39
 Lois de Snell-Descartes.

◆ Les ondes de surface

Ce sont des ondes guidées par la surface du milieu. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface de l'eau. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte. Les ondes de surface s'atténuent de façon exponentielle avec la profondeur. Leur profondeur de pénétration est de l'ordre de leur longueur d'onde. Les petites longueurs d'onde voyagent à une vitesse qui dépend des premières couches de matériaux tandis que les grandes longueurs d'onde renseignent sur le matériau plus en profondeur. Leur vitesse de propagation dépend de la fréquence : elles sont dispersives.

Les ondes de Rayleigh : ces ondes de surface sont utilisées en génie civil pour la détection de cavités proches de la surface. Cette méthode est en cours de développement et les résultats partiels sont présentés. Leur déplacement est elliptique, semblable à celui d'une poussière portée par une vague. Leur vitesse est une fonction complexe de la densité et des vitesses des ondes de volume.

⚡ *Remarque* : Il existe d'autres types d'ondes comme les ondes de Love, plus rapides que les ondes de Rayleigh et qui ont un déplacement semblable à celui des ondes S dans le plan horizontal, ou comme les ondes de plaque ou ondes de Lamb qui apparaissent dans les milieux ayant une épaisseur voisine de la longueur d'onde.

2. LA SISMIQUE RÉFLEXION HAUTE RÉOLUTION

2.1 Principe

La sismique réflexion haute résolution (SHR) est l'étude de la propagation des ondes de volume (ondes P et ondes S) générées par une source sismique artificielle et de leurs interactions (essentiellement la réflexion, et dans une moindre mesure les phénomènes de diffraction) avec les hétérogénéités rencontrées dans le sous-sol (Fig. 40). Le domaine fréquentiel concerné en génie civil est de l'ordre de la dizaine de hertz à quelques centaines de Hertz.

◆ Grandeurs mesurées

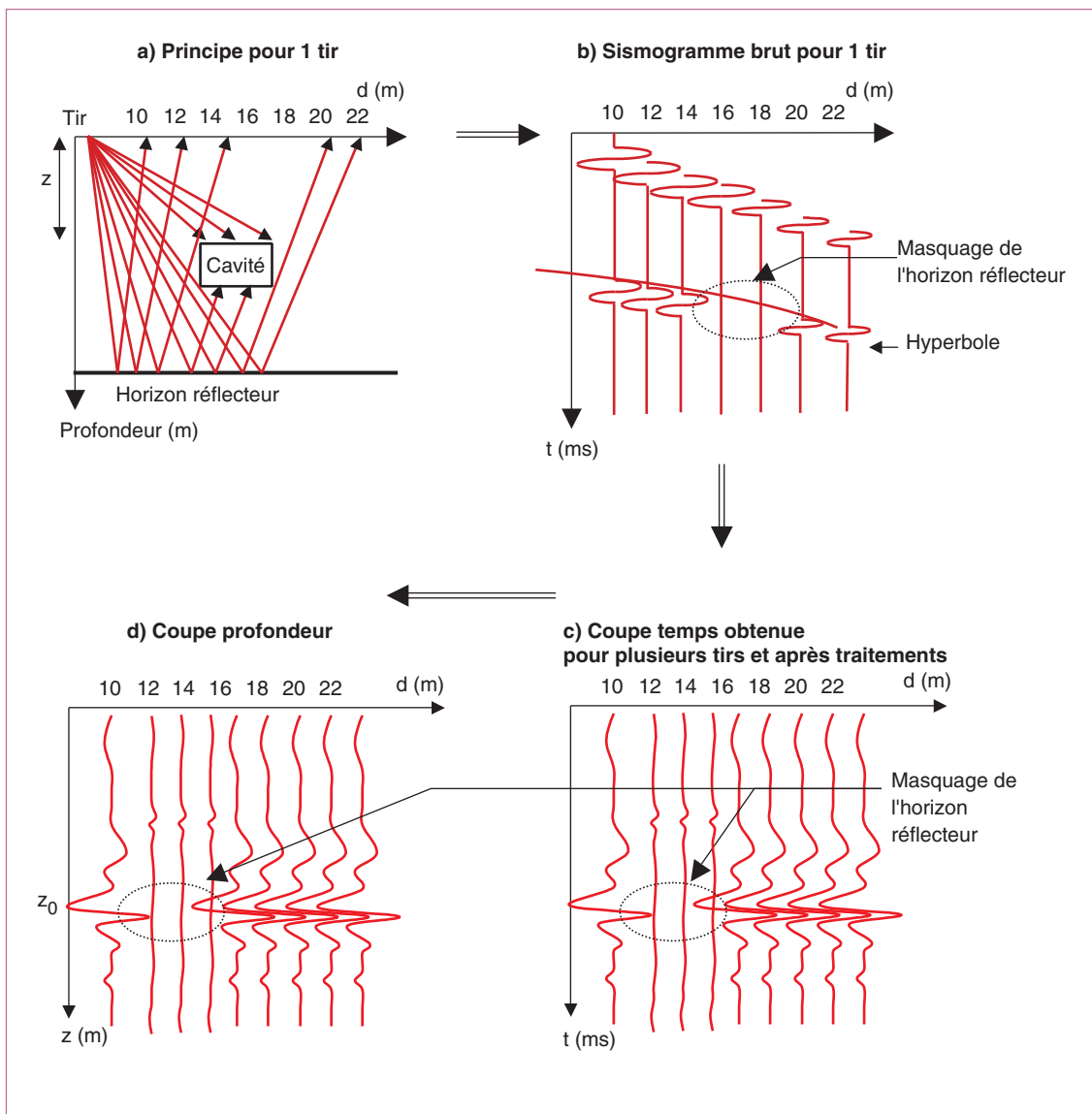
Les grandeurs mesurées sont présentées en sismogrammes bruts. Pour une position de la source sur le profil, ils représentent en coordonnées verticales la variation des amplitudes en fonction du temps de propagation (généralement mesuré en secondes ou millisecondes) des ondes dans le sol et en coordonnées horizontales, la distance entre la source et les géophones. Les amplitudes associées aux interactions des ondes avec les hétérogénéités du sous-sol sont représentées en plan (sinusoïde, wiggle en anglais), quelquefois en niveau de couleur.

◆ Résultats attendus : détection de cavités par sismique réflexion haute résolution

Le premier résultat attendu est un sismogramme traité appelé la coupe temps (Fig. 40). Elle représente les temps et les amplitudes des ondes sismiques dans le sol en fonction de la position en surface d'un dispositif où chaque source et chaque récepteur seraient confondus. Ces traitements sont complexes et doivent être réalisés avec beaucoup de précaution.

Le second résultat est également issu de traitement : c'est la coupe profondeur (Fig. 40). Elle représente la profondeur de pénétration et les amplitudes des ondes dans le sol en fonction de la position en surface d'un dispositif où chaque source et chaque récepteur seraient confondus. Cette coupe est obtenue en calculant les vitesses entre couches, lesquelles sont déduites de la vitesse quadratique moyenne des ondes dans le sol.

Des traitements complémentaires comme la migration des coupes sismiques, technique initialement utilisée pour replacer les réflexions inclinées en bonne position (Lavergne, 1986) apportent des renseignements supplémentaires sur la position et l'extension des cavités.



▶▶▶ FIGURE 40 - Principe de la sismique réflexion haute résolution.

- Représentation du trajet des ondes sismiques pour un tir.
- Représentation d'un sismogramme brut.
- Coupe temps.
- Coupe profondeur avec effet de masquage associé à la présence d'une cavité.

Détection de cavités

Le cas le plus souvent rapporté est la détection de cavités en milieu tabulaire (carrières exploitées dans des bancs calcaires ou gypseux, mines) (Piwakowski et al., 1997 ; P, 1998, 2000) et (Grandjean, 2002). En effet, dans un milieu multicouches sans cavité, le sismogramme idéal présentera un signal dont les amplitudes maximales correspondent aux interfaces entre couches géologiques. Si une carrière est présente dans une couche, elle a en général été exploitée depuis la base de ce milieu jusqu'à un peu moins de sa hauteur. Le signal correspondant à l'interface de cette couche avec le milieu inférieur (horizon réflecteur) présente alors un effet de masquage (Leonard, 2000). Ce phénomène est d'autant plus marqué que la taille de la cavité est grande par rapport à la longueur d'onde dominante dans le sol et que le réflecteur est proche de la base de la cavité. C'est là le principal critère de détection de cavités souterraines par méthodes sismiques haute résolution.

Par ailleurs, pour les carrières exploitées en chambres et en piliers dont les dimensions sont plus petites que la longueur d'onde dominante, des phénomènes de diffraction multiple (Grandjean et al., 2002) peuvent apparaître sur les données enregistrées. Enfin, si les ondes sismiques se réfléchissent sur le toit de la cavité, la pratique montre que le signal correspondant à cette interaction est souvent trop faible pour être distingué du bruit des mesures. En revanche, le signal correspondant à l'interface de ce milieu avec le milieu supérieur peut aussi présenter une perturbation (atténuation des amplitudes, retards dans les temps d'arrivée).

2.2 Méthodologie

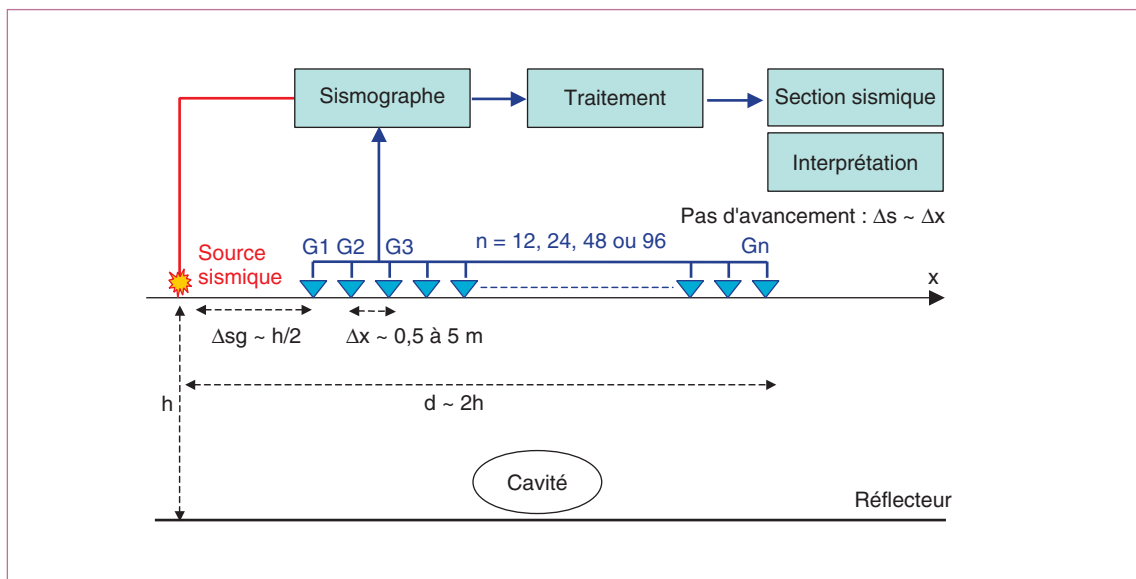
◆ Domaine d'application

La méthode est particulièrement bien indiquée pour la détection de carrières exploitées en bancs car celles-ci pourront être détectées par effet de masquage d'un horizon réflecteur sous-jacent. La détermination de la profondeur et des dimensions des cavités restent plus délicates à estimer. Il existe cependant certains paramètres présentés ici qui le permettent. Enfin, les profondeurs classiquement visées concernent les cinquante premiers mètres. Il existe des cas de localisation à plus grande profondeur (Driad, 2002), pour des conditions de mesures très favorables et avec de nombreux indices préalablement établis.

◆ Déroulement d'une campagne de mesure

Sur une carte géographique référencée, il faut définir un ou plusieurs profils rectilignes au-dessus de la zone de terrain supposée surplomber les cavités. Un levé topographique doit être effectué. La réalisation de mesures au-dessus d'une zone supposée sans cavité, si elle est possible, pourra par ailleurs permettre de déterminer les interfaces (réflecteurs) entre couches géologiques.

Le dispositif de mesure comporte un enregistreur de signaux numériques, une source et plusieurs géophones disposés en ligne (Fig. 41). Une campagne de mesures sismique réflexion haute résolution consiste en l'acquisition de signaux en couverture multiple et le traitement des données. Pour cela, les dimensions du dispositif et le mode de mesure doivent respecter un certain nombre de règles.



▶▶▶ FIGURE 41 - Système d'acquisition.

Choix de l'enregistreur

Les enregistreurs sismiques ou sismographes permettent l'enregistrement des signaux sur un nombre de voies déterminé (classiquement de 24 à 96 voies, jusqu'à plusieurs centaines pour certains dispositifs). Les caractéristiques qu'ils doivent présenter sont les suivantes :

- pas d'échantillonnage d'environ 0,1 ms,
- amplificateur à virgule flottante et convertisseur analogique/numérique (actuellement 24 bits),
- filtre 50 et 60 Hz,
- possibilité de filtrage passe-bas, passe-haut et passe-bande,
- possibilité d'additionner les tirs (stacks),
- possibilité de sauvegarde au format standard (SEG2).

Choix de la source sismique

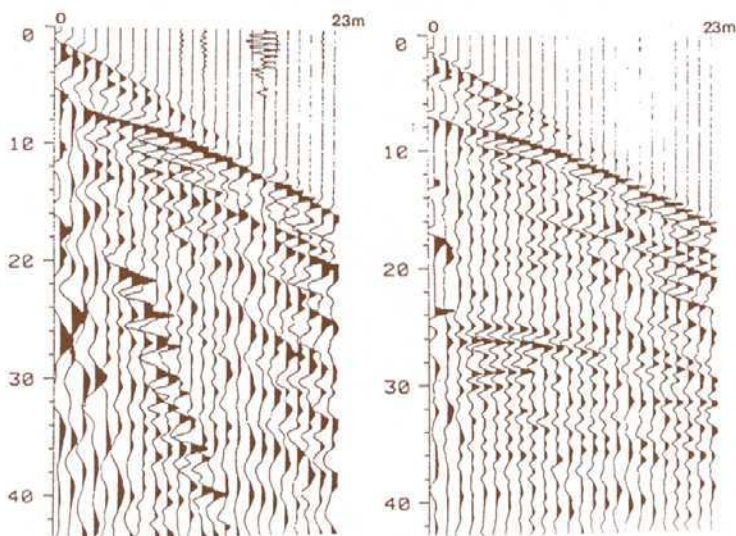
La source doit être une source puissante et haute fréquence (fréquence dominante de l'ordre d'une centaine de hertz) pour obtenir une bonne résolution en profondeur. Dans l'idéal, elle doit être légère, maniable, répétitive et conforme aux règles de sécurité. Il existe de nombreuses sources, que l'on peut classer en deux types : les sources de surface et les sources enterrées (Tableau VIII).

▶▶▶ TABLEAU VIII

Classement des sources sismiques haute résolution (Bitri, 1996)

Sources de surface	
Impact	Marteau, chute de poids
Projectile	Fusil à balle, betsy seisgun
Vibrateur	Minivib
Sources enterrées	
Explosif	Cordeau détonateur, dynamite
Non-explosif	Fusil à cartouche, Sparker

Les sources sismiques qui fournissent le plus de hautes fréquences énergétiques sont les sources enterrées, puisqu'elles sont en contact avec les matériaux plus profonds et mieux consolidés. À titre d'exemple, la figure 42 présente un tir réalisé sur le même site avec deux sources différentes. Les signaux émis par la source enterrée génèrent des plus hautes fréquences (la résolution temporelle est meilleure), sont moins bruités et sont plus énergétiques (réflexions entre 30 et 40 ms visibles avec une source enterrée alors qu'elles sont invisibles avec une source en surface) mais elles nécessitent un temps d'intervention plus long et peuvent générer un endommagement de la surface.



▶▶▶ FIGURE 42

Sources sismiques :

À gauche, exemple de tir réalisé avec une source de surface (marteau).

À droite, tir réalisé avec une source enterrée (cordeau détonateur) sur le même site (Brabham et Mc Donald, 1992).

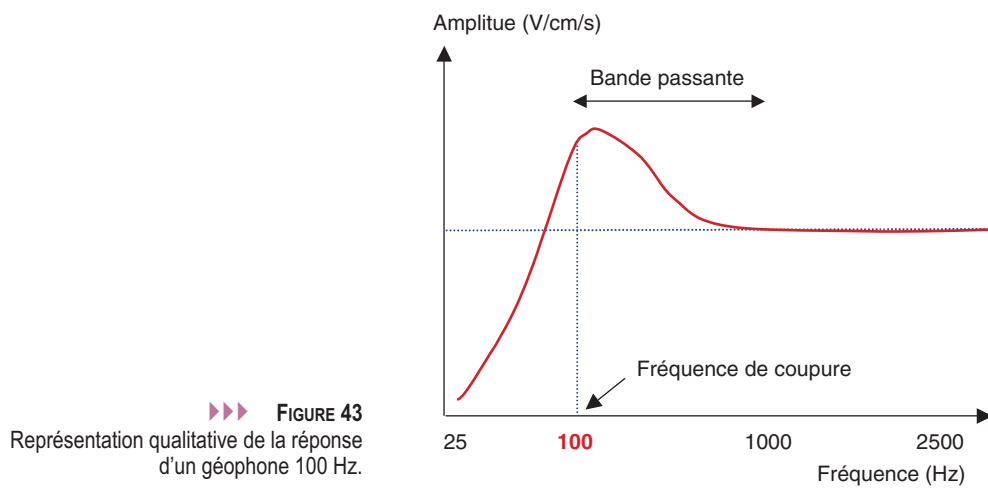
Le choix de la source haute fréquence dépend des conditions de surface, de la profondeur de la nappe phréatique et de la profondeur des objectifs visés. À titre d'exemple, pour la recherche de carrières abandonnées, exploitées dans la craie, dans les 50 premiers mètres (Piwakowski et *al.*, 1997) utilise un fusil de chasse de calibre 12 et le tir se fait au-dessus du sol. Pour la recherche de cavités dans le gypse jusqu'à 100 m (Grandjean et *al.*, 2002) utilise aussi un fusil et le tir se fait dans un trou.

Choix des récepteurs sismiques : les géophones

Les *géophones* sont des détecteurs qui transforment l'énergie des ondes sismiques en énergie électrique. Pour la sismique réflexion haute résolution, ces géophones sont souvent monoaxiaux verticaux, car c'est l'enregistrement des ondes P qui a un intérêt. Ils peuvent être triaxiaux dans le cas où l'on désire dissocier les réponses des ondes P et des ondes S : ils mesurent alors les déformations dans les trois directions à la surface.

Pour la sismique haute résolution, la réponse impulsionnelle d'un géophone présente une fréquence de coupure de l'ordre de 100 à 300 Hz. La figure 43 montre le comportement d'un géophone 100 Hz en fonction de la fréquence. Le géophone se comporte comme un filtre passe-haut. La bande passante varie de la fréquence de coupure à environ 5 à 10 fois celle-ci. Ainsi, suivant la cible recherchée et le type de mesure, la fréquence de coupure des géophones (Bitri et al., 1996) doit être au moins égale à 10 % de la fréquence maximale que l'on espère enregistrer.

$$f_{\text{dominante}} \geq 0,1 f_{\text{max}}$$



Choix de la dimension du dispositif

1 - La première étape consiste à déterminer le pas Δs de la source et le déport Δs_g qui est la distance source - premier géophone. Δs_g est variable suivant les caractéristiques des sols et les profondeurs visées. Elle doit permettre de déterminer la fenêtre d'observation optimale dans laquelle les phénomènes de réflexion recherchés sont distincts du bruit généré par les ondes de surface et l'onde aérienne, et dans laquelle la méthode de mesure en couverture multiple reste valide (Sheriff et Geldart, 1995). Dans une première approche, la distance source - premier géophone est prise comme la moitié de la profondeur du réflecteur que l'on cherche à atteindre et la distance source - dernier géophone peut être prise comme le double de cette profondeur. Lorsque plusieurs profondeurs sont visées, le distance entre tirs Δs doit être compatible avec Δs_g . Le pas Δs de la source conditionne quant à lui la qualité de la couverture multiple. Il est déterminé en calculant le nombre de fois qu'un point réflecteur est « éclairé » par un couple source-captteur. Dans le domaine du génie-civil, on considère comme satisfaisante une couverture de l'ordre de 12. Donc, par exemple, pour un dispositif de 24 capteurs, cela conduit à activer autant de points sources que de capteurs ($\Delta s = \Delta x$). Si nécessaire, pour couvrir la zone d'étude, l'ensemble du dispositif est translaté en ménageant un recouvrement de plusieurs capteurs.

Cette étape importante conditionne fortement la qualité des mesures et nécessite l'intervention d'un géophysicien expérimenté.

2 - La distance entre géophones (ou traces) Δx doit assurer un échantillonnage spatial adéquat. Δx est choisi en général inférieur à une demi-fois λ_{min} , la longueur d'onde minimale susceptible d'être mesurée :

$$\Delta x < 1/2 \lambda_{\text{min}} = 1/2 V_{\text{min}} / f_{\text{max}}$$

où V_{min} est la vitesse apparente minimale et f_{max} la fréquence maximale observable.

Les ordres de grandeur des distances Δs_g et Δx sont respectivement de quelques mètres à une vingtaine de mètres, et de 0,5 à 5 m pour des cavités situées dans les 10 à 30 premiers mètres.

3 - Le temps d'enregistrement est de l'ordre de la seconde.

4 - La fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois plus grande que la fréquence maximale que l'on espère enregistrer. La période d'échantillonnage correspondante est donc choisie comme suit :

$$\Delta t < 1/(2f_{\max}).$$

◆ Traitement des données

Cette partie présente succinctement les principales étapes de traitement des mesures en sismique réflexion qui permettent de constituer les profils sismiques. Pour une description plus complète, on peut se référer à (Henry, 1994) et (Mari *et al.*, 1997 et 1998). Pour une étude de génie civil, cette phase délicate est réalisée par un géophysicien expérimenté en laboratoire avec des logiciels spécifiques. Dans un premier temps, le traitement consiste à extraire les ondes réfléchies de l'ensemble des signaux mesurés.

Un premier filtrage fréquentiel permet de sélectionner dans la bande correspondante les ondes de compression, et d'éliminer par exemple les ondes de surface, plus basse fréquence.

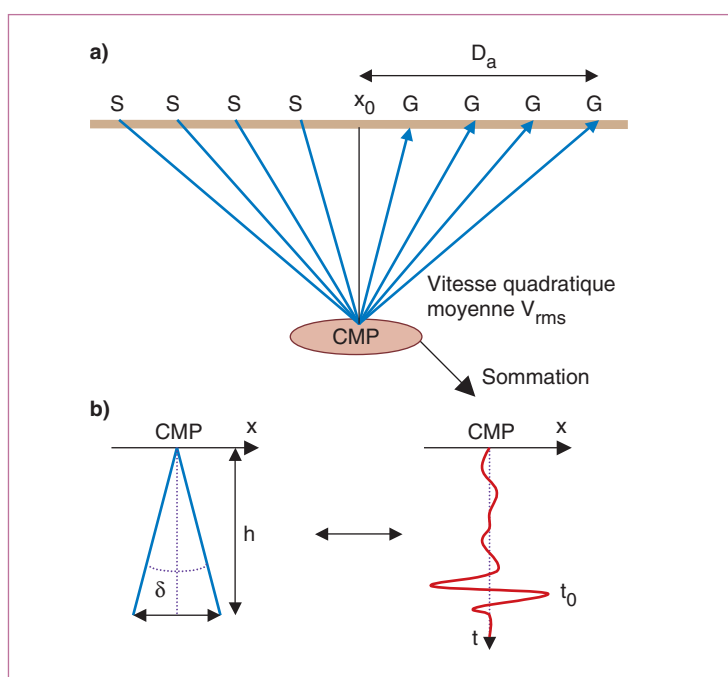
La mise à zéro supprime les voies défectueuses et le signal aérien, issu de l'onde acoustique générée par la source et se propageant le long du profil.

Le filtrage bidimensionnel (filtrage f-k) couple le filtrage fréquentiel et le filtrage spatial. Il permet aussi d'éliminer les ondes parasites. Il nécessite un bon échantillonnage spatial.

Il est conseillé de ne pas appliquer de correction automatique de gain (Grandjean *et al.*, 2002), (Driad, 2002), qui est une correction apportée aux amplitudes des signaux enregistrés, en les pondérant par un facteur dépendant des caractéristiques mécaniques du sol, et des fréquences utilisées. Les caractéristiques des galeries (atténuation, masquage) sont en effet plus lisibles sur les données brutes. En revanche, une correction d'amplitude (normalisation) sur les réflecteurs identifiés, en fonction du temps est généralement appliquée.

Dans le domaine temporel, les mesures non bruitées sont la représentation de la convolution de la source sismique par la réponse impulsionnelle du terrain. La déconvolution est un traitement qui permet de « séparer » la source des mesures pour caractériser cette réponse et pour identifier la géométrie des réflecteurs.

Les traitements suivants consistent à déterminer le champ de vitesses en point milieu commun (CMP), à appliquer une correction dynamique des traces et à les sommer en couverture multiple. La mise en collection CMP regroupe l'ensemble des traces ayant le même milieu entre la source et le récepteur. Ainsi, plusieurs traces contribuent à l'imagerie d'un seul point du marqueur sismique (le CMP). C'est la couverture multiple (Fig. 44). Ce regroupement permet de constituer une source et un récepteur synthétique, de dimension D_a . L'ordre de couverture (nombre de traces constituant le CMP) est égal à $N \times D_x / (2D_s)$, avec N , le nombre de voies d'acquisition.



▶▶▶ FIGURE 44
a. Regroupement en collection CMP.
b. Sondage vertical équivalent (Piwakowski et Sharour, 1998).

La représentation d'un CMP en fonction du temps et de l'offset x (distance source-géophone) sont des formes d'hyperboles appelées hodochrones et ont pour équation :

$$t(x)^2 = t_0^2 + x^2 / V^2$$

où t_0 est le temps de trajet aller-retour entre la surface du sol et le point de réflexion sur le marqueur (émetteur et récepteur confondus) et V est la vitesse de propagation des ondes dans le milieu.

La correction dynamique permet de compenser la courbure de chaque hyperbole en ramenant les temps d'arrivée des ondes réfléchies à ceux de traces à déport nul. Les temps sont ceux que l'on observerait si les sources et les géophones étaient confondus. Cette correction nécessite au préalable la connaissance des vitesses du sous-sol.

Si le milieu est constitué d'une succession de n couches planes horizontales, la vitesse de correction dynamique (V_{rms}) à l'interface n est égale à la vitesse quadratique moyenne V_{rms} définie par la formule de Dix :

$$V_{\text{rms}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i V_i^2}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}$$

où Δt_i est le temps de trajet pour traverser la couche i , V_i est la vitesse dans cette couche. Si le réflecteur est penté de pendage θ , la vitesse de correction devient :

$$V_{\text{rms}} = V_{\text{rms}} / \cos\theta.$$

La sommation des différentes traces des CMP aboutit au profil sismique qui est d'autant plus proche de la coupe géologique que les vitesses sont bien estimées. Une sommation de qualité est obtenue généralement par une analyse de semblance, qui permet de déterminer le meilleur profil de vitesse dans le milieu.

La profondeur z de chaque marqueur sismique est donnée par la relation :

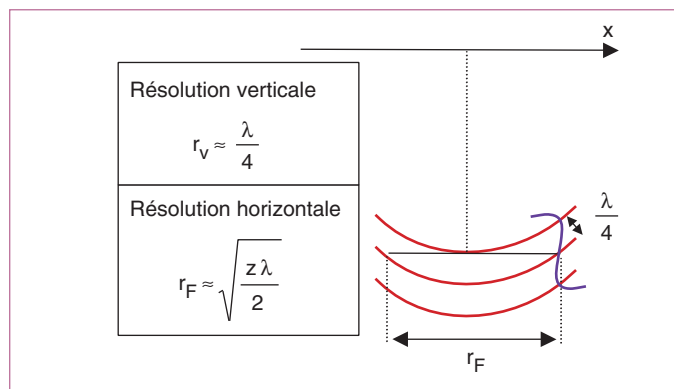
$$z = (t_0 V_{\text{rms}})/2.$$

Après ces traitements, d'autres sommations, filtrages, corrections d'amplitude et déconvolutions peuvent à nouveau être réalisés suivant les objectifs recherchés. Dans tous les cas, la partie traitement doit être réalisée rigoureusement pour éviter les erreurs d'interprétation. Une expérience de terrain ainsi qu'une connaissance experte de ces techniques sont les conditions premières pour la bonne conduite des mesures et des traitements en sismique réflexion haute résolution.

◆ Résolution associée à la longueur d'onde dominante

À la fréquence dominante correspond une longueur d'onde dominante ($\lambda = v/f$ pour un milieu de vitesse v). Pour un objet situé à une profondeur z , la longueur d'onde λ dominante détermine la résolution spatiale de la méthode suivant les formules suivantes (Fig. 45) :

▶▶▶ FIGURE 45
Zone de Fresnel, résolution horizontale
et verticale en $\lambda/4$.



Par exemple, si on dispose de géophones dont la bande passante est [10-300 Hz], dans un sol crayeux ($V = 2300-2600 \text{ m.s}^{-1}$) alors la résolution verticale (ou le pouvoir de détection) est :

$$r_v = \lambda/4 = V/f_{\text{max}}/4, \text{ soit } 1 \sim 2 \text{ m.}$$

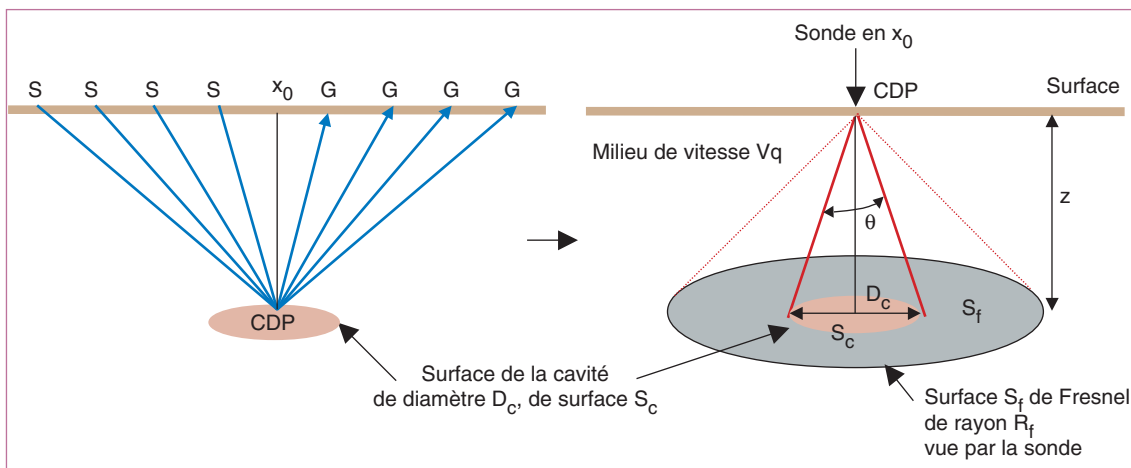
Selon les auteurs, on peut détecter qualitativement des variations de l'ordre de $\lambda/30$ à $\lambda/10$.

◆ Critère de détection : coefficient AN

Lorsque la source et le récepteur sont confondus, la surface « éclairée » à la profondeur z peut être assimilée à la zone de Fresnel de surface S_f et de rayon R_f . Cette surface est l'aire circulaire, centrée sur le point de réflexion, qui contribue à la création du signal réfléchi (Fig. 46).

La possibilité de détecter un objet de surface S_c , situé à une profondeur z , peut être évaluée par le rapport AN entre la surface de la cavité S_c (incluse dans S_f) et la surface de Fresnel S_f (Piwakowski et Shahrour, 1998). Ce coefficient de détection AN est défini par :

$$AN = S_c / S_f.$$



▶▶ FIGURE 46 - Description des paramètres introduits pour la définition du coefficient AN (d'après Piwakowski et Shahrour, 1998).

AN est compris entre 0 et 1. Plus la taille de l'objet augmente, plus le rapport AN est grand. Il est égal à 1 lorsque la surface de l'objet S_c est supérieure ou égale à la surface de Fresnel, S_f .

Pour une galerie cylindrique de largeur L et θ petit, le rapport AN est :

$$AN = \frac{2L}{\pi R_f}$$

Pour une cavité sphérique de diamètre D_c et θ petit, avec $\theta \cong \frac{D_c}{z}$:

$$AN = \frac{\theta D_c}{2\lambda}$$

Cette approximation souligne le principe de base suivant : la détection d'un objet de dimension D dépend du rapport D/λ et de l'angle de vision θ .

Si le dispositif ne voit que la zone de Fresnel, l'objet se comporte comme une couche infinie si sa surface est égale à la surface de Fresnel, soit $AN = 1$. Si l'objet a une surface supérieure à la surface de Fresnel, il est détecté sur plusieurs CMP. Des études récentes (cf. Léonard, 2000) montrent que le seuil ($AN = 0,5$) peut être considéré comme un critère nécessaire mais non suffisant de détectabilité d'une cavité par méthode SHR. L'extension verticale de la cavité joue également un rôle non négligeable, le fond de la cavité ne doit pas se confondre avec le réflecteur (distance nécessaire de l'ordre de la taille de la cavité).

◆ Précautions et limites d'utilisation

Les sources à l'explosif exigent de respecter certaines règles de sécurité. Elles sont interdites près des lignes moyenne ou haute tension. Il faut préférer faire appel à une société spécialisée la réalisation des tirs à l'explosif, qui prendra en charge l'ensemble des mesures administratives, juridiques et matérielles.

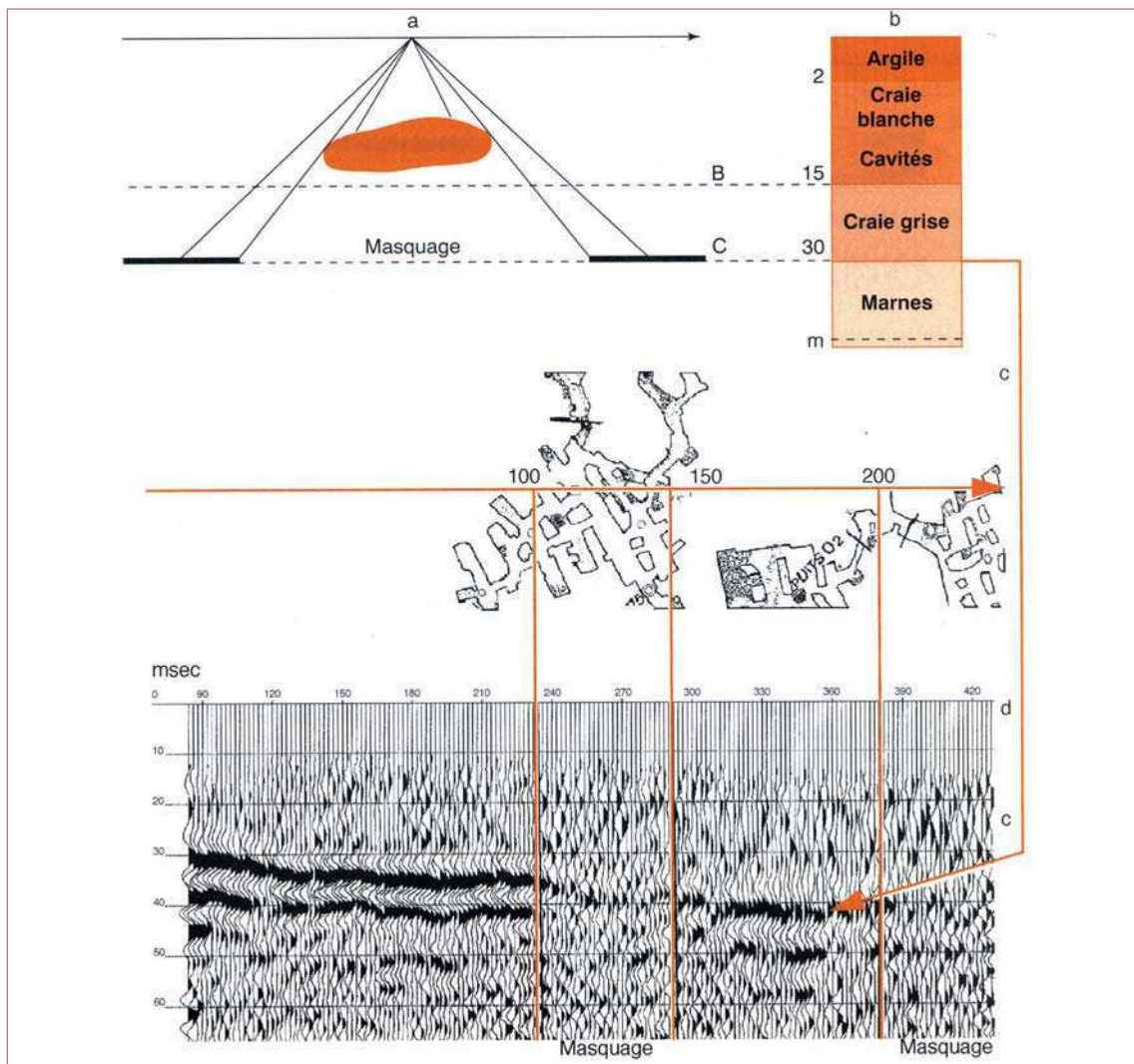
D'autres facteurs de désagrément peuvent survenir lors d'enregistrements sismiques. Une attention particulière doit être apportée à la connaissance du bruit sismique. Ainsi, en milieu urbain, l'utilisation de la SHR n'est pas indiquée, d'autant plus si l'implantation des géophones est

destructive pour les structures. Par ailleurs, le bruit électromagnétique (émetteur radio, orages, etc.) est parfois à l'origine de déclenchements intempestifs de l'enregistreur.

Si les moyens techniques le permettent, il est préférable d'avoir une flûte sismique avec suffisamment de géophones qui couvrent la zone à étudier : le déplacement du dispositif est minimisé, les conditions de mesures sont aussi constantes que possible, et seule la source est déplacée. Le rendement et la qualité des mesures sont alors optimum.

2.3 Exemple de mesure

Cette technique a montré son efficacité sur de nombreux sites. À titre d'exemple (Piwakowski et Shahrour, 1998) dans le nord de la France, l'exploitation de la craie blanche a laissé de nombreuses carrières abandonnées (Fig. 47). La coupe géologique présente une couche d'argile en surface, une couche de craie blanche, une couche de craie grise puis une couche de marne. De fortes réflexions sur l'interface craie/marne disparaissent lorsque les mesures sont faites au-dessus des zones exploitées dans la craie, révélant la présence de cavités. La distance entre géophones Δx (24 géophones type 100 Hz) est de 2 m, la distance source (betsy gun) et le premier géophone (Δs_g) est à 20 m. Les carrières sont supposées être à une profondeur de l'ordre de 20 m. La position des cavités n'est pas connue *a priori*. D'autres exemples montrent la possibilité de détecter des cavités ainsi que des zones fracturées ou décomprimées (Driad, 2002), (Grandjean et *al.*, 2002), (Piwakowski et Léonard, 2000).



▶▶▶ FIGURE 47

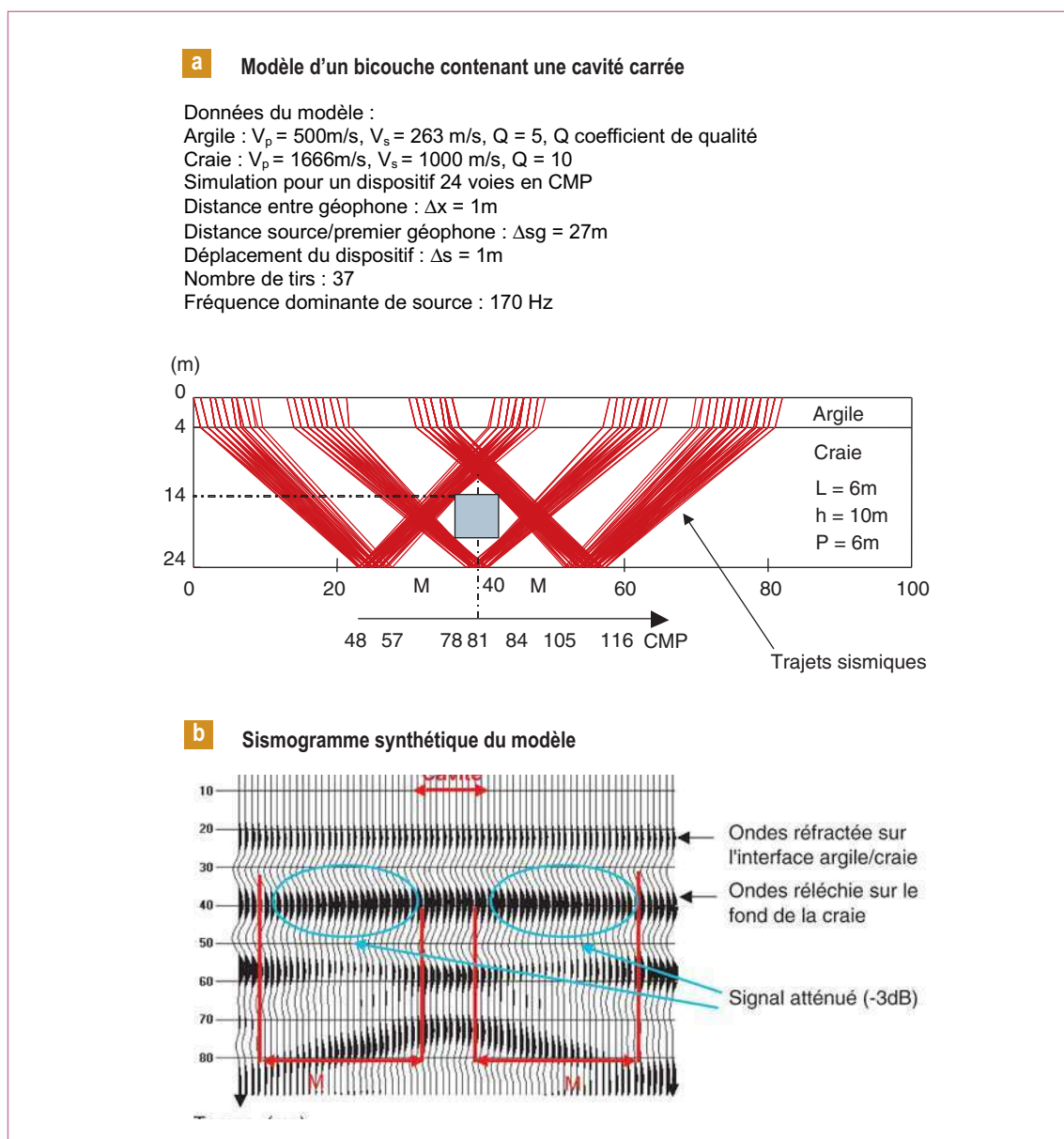
- Représentation qualitative de l'effet de masquage.
- Coupe géologique du terrain ausculté.
- Plan de carrières souterraines (Inspection des carrières souterraines de Douai).
- Sismogramme réalisé au-dessus des carrières (Piwakowski B. et *al.*, 1998).

2.4 Modélisation

La modélisation de la propagation des ondes sismiques est un outil utile à la compréhension et à l'interprétation des phénomènes d'interaction dans le terrain. En particulier, lorsque les études préalables à la campagne de mesure permettent de supposer la profondeur et la taille des cavités recherchées, une modélisation peut permettre d'optimiser les paramètres de mesure et d'enrichir l'interprétation des sismogrammes.

Les principales méthodes utilisées sont la modélisation par éléments finis ((Leonard, 2000) et (Moreaux, 1997), la modélisation par éléments de frontières (Pedersen, 1994) et la modélisation par différences finies (Virieux, 1986).

Sur la figure 48, un résultat de modélisation par éléments finis est présenté : il met en évidence un très léger effet d'atténuation de l'horizon réflecteur visible de part et d'autre de la position de la cavité de section carrée 6 m × 6 m (il n'y pas masquage total des ondes réfléchies car la longueur d'onde dans la craie est de l'ordre des dimensions de la cavité et le rapport AN est de l'ordre de 0,16). Les équations de propagation, ainsi que leurs paramètres caractéristiques sont détaillés dans les références suivantes : (Mari et *al.*, 1997) et (Henry, 1994).



►► FIGURE 48 - Effet d'atténuation sur les ondes réfléchies au fond de la craie. On observe une légère atténuation du signal (-3dB) de part et d'autre de la cavité, par rapport au signal à l'aplomb de celle-ci (Leonard, 2000).

2.5 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. Dans certaines conditions exceptionnelles, ces profondeurs d'investigation peuvent atteindre la centaine de mètres. Le principal indice de détection est le masquage des horizons réflecteurs dans les sismogrammes. Dans certains cas, des hyperboles de diffraction peuvent apparaître (carrières exploitées en chambres et en piliers).

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 mesures. Elle est sensible au bruit (activité humaine en particulier). Elle n'est pas préconisée en milieu urbain. Les mesures, leur traitement et leur interprétation doivent être conduits par un géophysicien très expérimenté, sans quoi les résultats de la méthode ne peuvent être garantis.

3. LA SISMIQUE RÉFRACTION

3.1 Principe

◆ Définition

La sismique réfraction est l'étude de la propagation des ondes sismiques réfractées dans le sol. Selon la figure 49, dans un milieu multicouche où le contraste des vitesses croît en fonction de la profondeur ($V_2 > V_1$), il existe un angle critique θ_c au-delà duquel les ondes sont réfractées : leur trajet suit l'interface entre couches et les ondes sont partiellement émises vers la surface suivant le même angle critique.

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

- 1 - la caractérisation de l'état physique des diverses zones du massif rocheux,
- 2 - la recherche et le suivi de l'évolution de la position du substratum sous une couverture meuble.

◆ 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 (en secondes ou millisecondes) et en coordonnées horizontales, la distance entre la source et les géophones. Les amplitudes associées aux réfractions sont représentées en plan (sinusoïde, wiggle en anglais), quelquefois en niveau de couleur.

◆ Résultats attendus : détection de cavités par sismique réfraction

Les résultats se présentent sous la forme d'une dromochronique (Fig. 49b) qui est la représentation du temps de trajet des ondes en fonction de la distance entre la source et les géophones. Les dromochroniques sont établies à partir du pointé des temps de trajet des premières arrivées sur le sismogramme brut. Le pointé des temps de trajet s'effectue à la base du signal (sinusoïde). La qualité de la mesure en sismique réfraction repose en grande partie sur l'attention portée au pointé. Les droites associées au pointé permettent de déterminer les vitesses des ondes sismiques dans le milieu tabulaire. La droite associée à l'onde réfractée coupe, à l'origine des abscisses, l'axe des ordonnées en un point appelé intercept. Dans le cas d'un milieu tabulaire à n couches, sans pendage, chaque délai (moitié de l'intercept) peut être calculé par la formule :

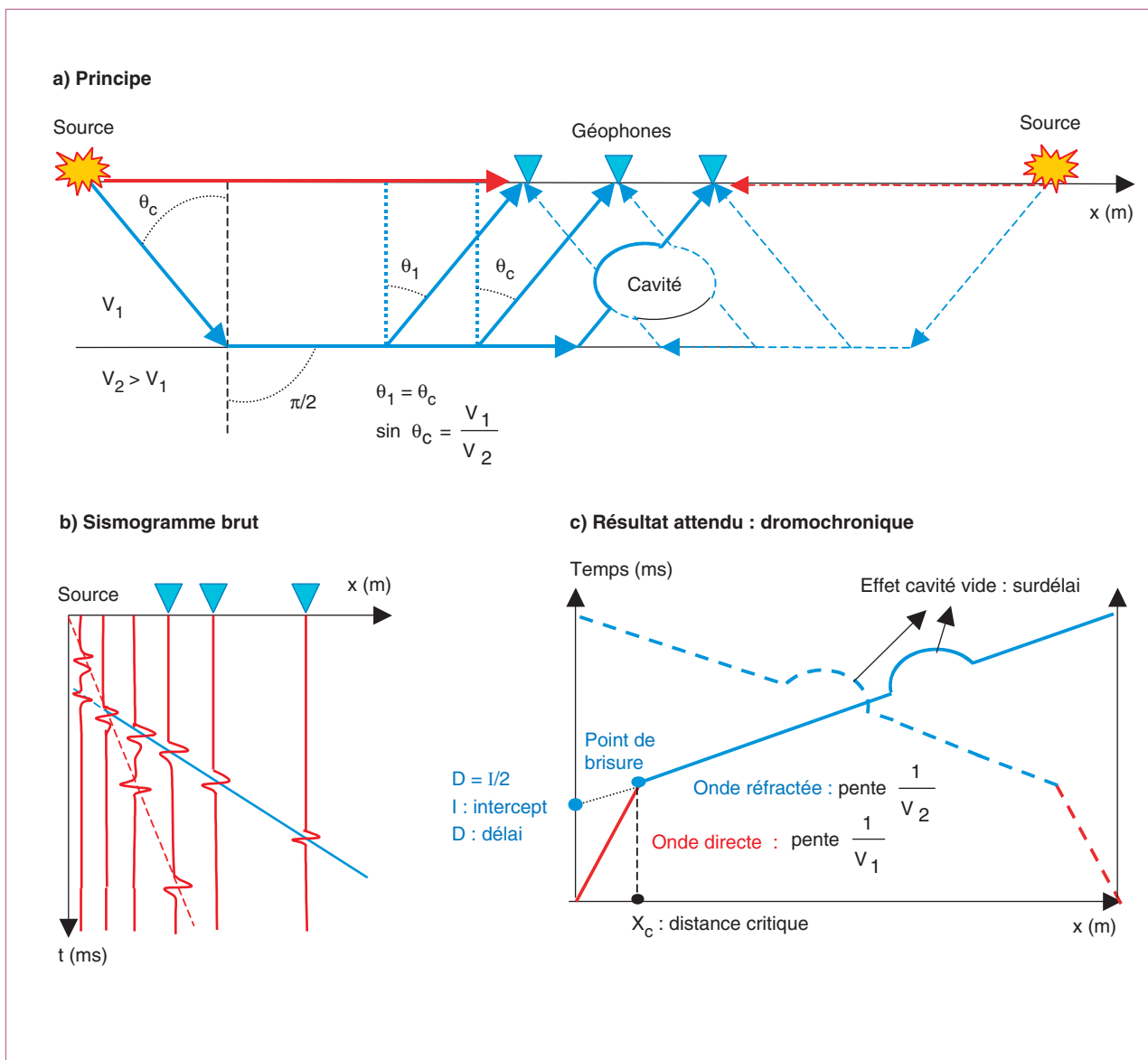
$$D_{n-1} = \sum_{p=1}^{n-1} \frac{e_p \cos \theta_{p,n}}{V_p}$$

où e_p est l'épaisseur de la couche p et $\theta_{p,n}$ l'angle critique entre les couches caractérisées par les vitesses V_p et V_n . La relation issue des lois de Snell-Descartes donne $V_p/V_n = \sin\theta_{p,n}$.

À partir de cette formule, les épaisseurs au droit des géophones sont déterminées et le second résultat attendu est une représentation des horizons réfracteurs en fonction de la profondeur et de la position en surface.

D'autres résultats comme l'interprétation des dromochroniques par la méthode du « plus-moins » peuvent être présentés. Cette méthode n'est pas décrite ici mais pourra être consultée par exemple dans les ouvrages suivants : (Mari *et al.*, 1998) et (Reynolds, 2000).

Enfin, la présence d'une cavité sera révélée par des retards dans les temps d'arrivée (surdélais) correspondant aux horizons réfracteurs. 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 environ 3 % du temps total d'enregistrement.



▶▶▶ FIGURE 49

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.

La présence de cavités peut être révélée par un surdélai, l'éventuel déport constaté (c) est fonction de la profondeur de la cavité.

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

L'existence d'une galerie se manifeste par un retard sur le temps de parcours dans le terrain, et accessoirement par des phénomènes particuliers tels que diffraction et/ou amortissement des amplitudes des ondes sismiques. Ce retard sera d'autant plus grand que la cavité sera entourée d'un anneau de terrain décomprimé.

◆ Modélisation

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

3.2 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 vingt à trente mètres.

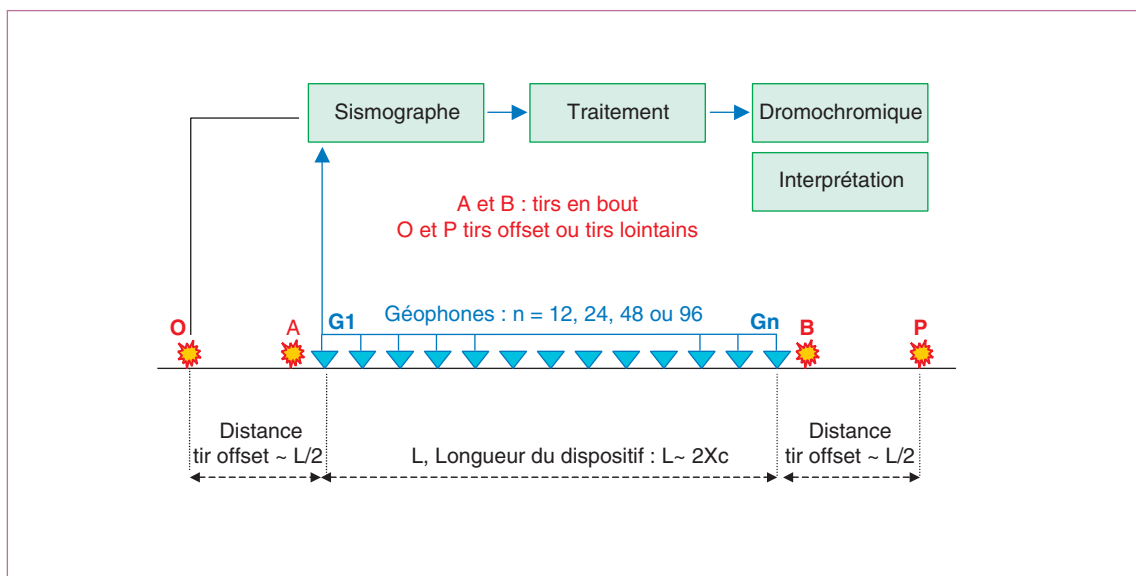
◆ Déroulement d'une campagne de mesure

Choix de l'enregistreur, de la source et des géophones

La description des enregistreurs et des sources sismiques est quasiment identique à celle faite pour la sismique réflexion haute résolution. Les géophones utilisés ont des fréquences de coupure généralement comprises entre 4 et 100 Hz, et leur fréquence maximale de fonctionnement est de l'ordre de quelques centaines de Hz.

Choix de la dimension du dispositif

Le nombre de voies classiquement disponibles sur les sismographes varie de 24 à 96. Un nombre important de capteurs permet de minimiser les déplacements du dispositif, et ainsi d'assurer une meilleure stabilité dans les mesures. Le nombre de tirs dépend de la variabilité du sous-sol et de la précision souhaitée. Dans le cas de la figure 50, si le nombre n de capteurs est de 24, on effectue 5 tirs : 2 tirs en bout, 2 tirs en offset et un tir central. On peut ajouter des tirs intermédiaires entre les tirs en bout et le tir central selon les cas et en fonction du nombre de capteurs utilisés.



▶▶▶ FIGURE 50 - Système d'acquisition en sismique réfraction.

Si l'étude géologique, ou une première campagne de sondages ont permis de déterminer les premiers horizons réfracteurs, la longueur L du dispositif sera choisie telle que :

$$L \sim 2Xc$$

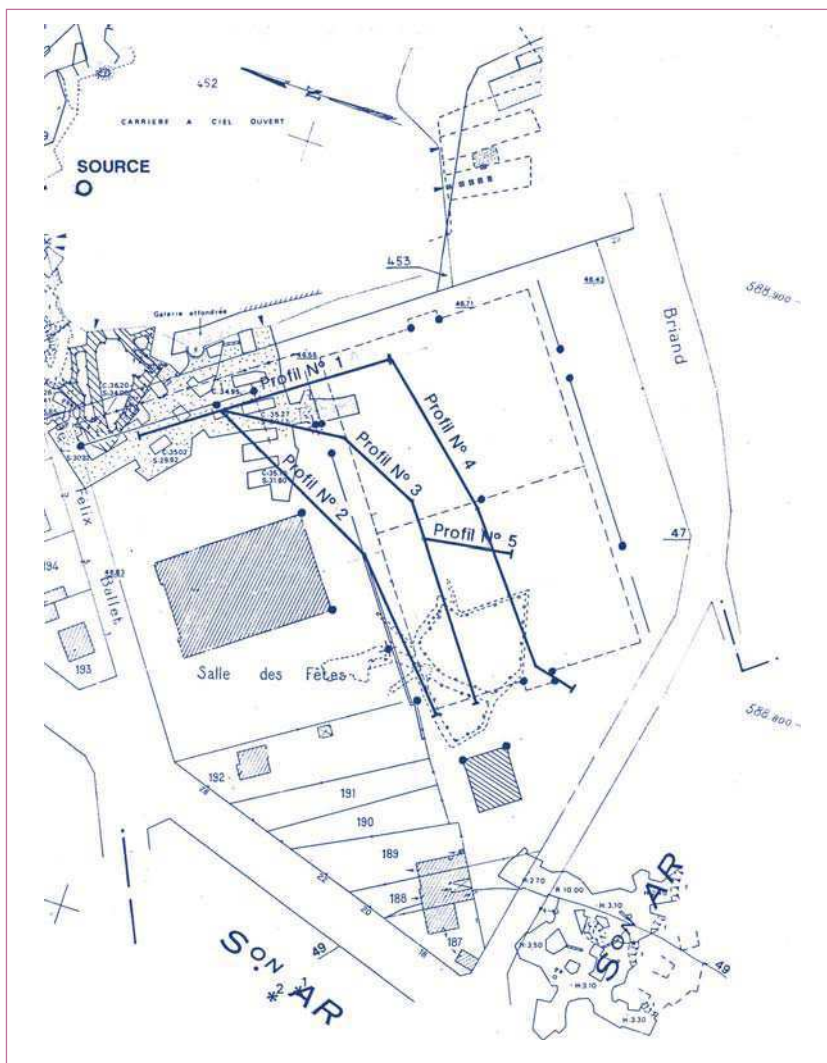
où Xc est la distance du point de brisure (Fig. 49). Dans ce cas, la distance séparant le tir offset (O ou P) avec le géophone le plus proche est de l'ordre de la moitié de la longueur du dispositif.

Si l'on n'a aucun renseignement sur le sous-sol, la longueur du dispositif est fixée selon l'expérience des utilisateurs. La profondeur d'investigation peut être considérée dans une première approximation comme étant égale à $1/6$ de cette longueur. La distance séparant le tir d'offset avec le géophone le plus proche est dans ce cas de l'ordre d'une fois la longueur du dispositif.

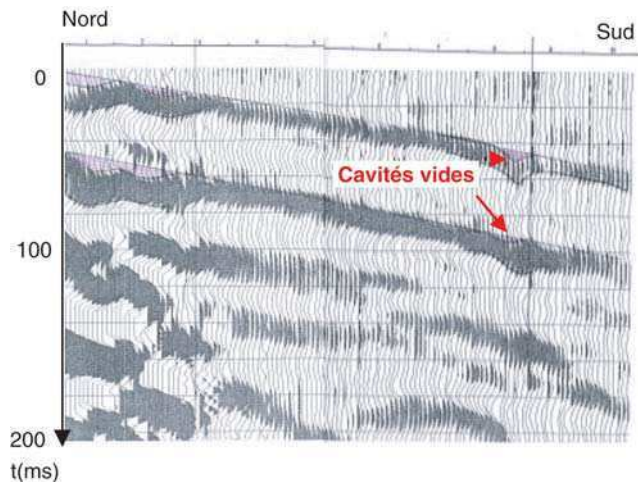
3.3 Exemple de mesure

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

Le profil 3 met en évidence des retards dans les temps de premières arrivées au droit du réseau de galeries localisé au nord, mais aussi une anomalie assez marquée située dans le secteur Sud. À l'aplomb de celle-ci, des sondages destructifs ont rencontré des vides sur une hauteur de 1,5 m. Sur un temps d'enregistrement de 200 ms, le retard associé à cette anomalie est nettement supérieure à l'erreur commise sur le pointé. De plus, l'anomalie apparaît clairement sur plusieurs traces consécutives, et sur deux horizons réfracteurs (Fig. 51 et Fig. 52).



▶▶▶ FIGURE 51
Plan de position des profils
(Document Geostock).



▶▶▶ FIGURE 52
Résultats du profil 3 (Document Geostock).

3.4 Conclusion

La sismique réfraction ne s'applique que pour des milieux tabulaires où le contraste des vitesses entre couches croît avec la profondeur. La détection de cavité est possible par exemple dans le cas de carrières exploitées en banc, pour des profondeurs allant de vingt à trente mètres. Le principal indice de détection est un retard dans les temps d'arrivée.

Cette méthode présente dans sa mise en œuvre des caractéristiques similaires à celles de la sismique réflexion haute résolution. L'emploi de source explosive, le bruit environnant (sismique et électromagnétique) sont autant de contraintes qui restreignent l'utilisation de la méthode en milieu sensible ou urbain. Le traitement des mesures est moins délicat, mais il doit être fait par un géophysicien expérimenté.

4. LA SISMIQUE EN ONDES DE SURFACE

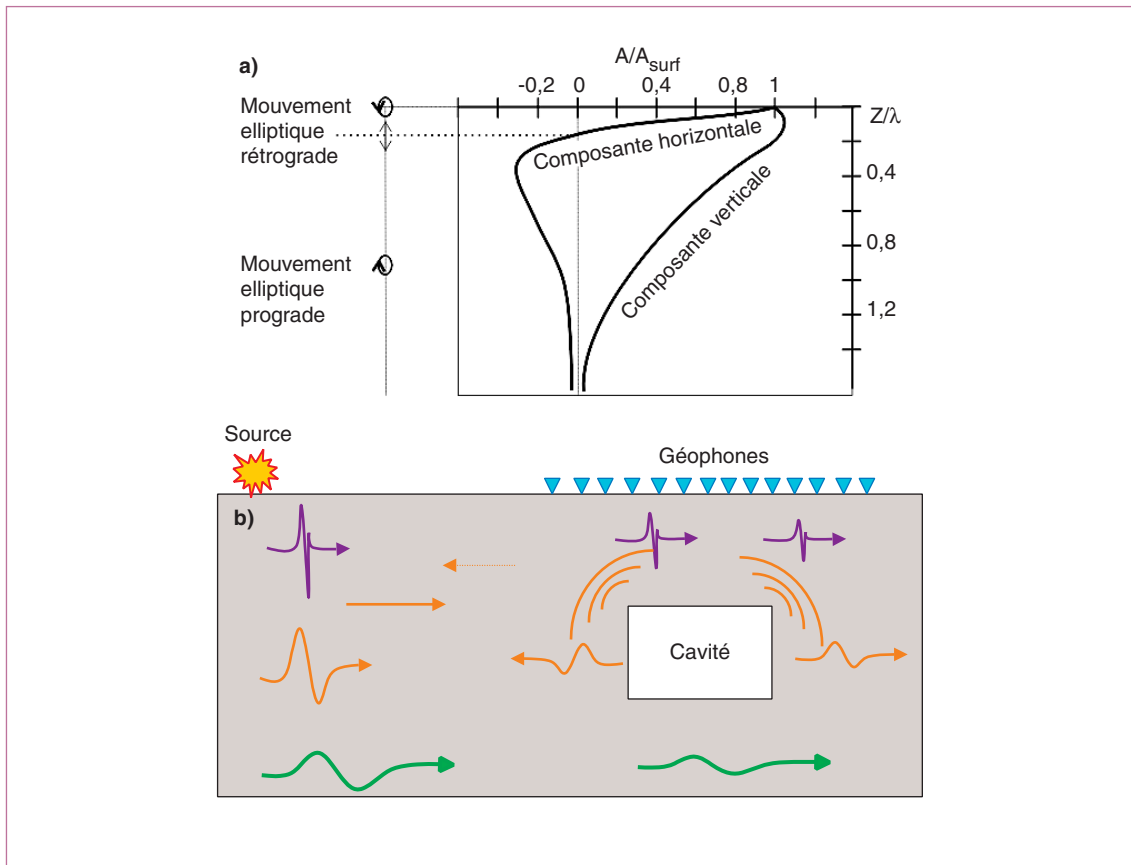
L'application de la méthode sismique en ondes de surface est plus récente. La recherche est encore en développement et a fait l'objet d'études réalisées dans le cadre du Projet National CriTerre (Abraham et al., 2001).

4.1 Principe

L'interaction des ondes P et S en surface génère les ondes de Rayleigh. Dans un milieu semi-infini, élastique, homogène et isotrope, elles représentent environ 70 % de l'énergie propagée. Leurs caractéristiques sont les suivantes en milieu homogène :

- elles présentent un front d'ondes cylindrique autour de la source, et leur amplitude décroît selon une loi en $r^{-1/2}$ en surface,
- elles présentent un mouvement elliptique rétrograde en surface (Fig. 53). À une profondeur d'environ 0,2 fois la longueur d'onde, la composante horizontale des ondes change de signe et le mouvement devient elliptique prograde,
- leur amplitude décroît avec la profondeur en fonction de la longueur d'onde.

En milieu tabulaire, les ondes de surface sont dispersives : d'une part, la majeure partie de l'amplitude se propage sur une épaisseur de terrain liée à la longueur d'onde, les plus hautes fréquences se propageant dans les terrains les plus superficiels. D'autre part, en milieu tabulaire la vitesse de propagation variant avec la profondeur, la vitesse de phase varie avec la profondeur et donc avec la fréquence. L'analyse de cette dispersion permet de caractériser certaines propriétés du sous-sol. Cette technique permet en particulier de mieux connaître la répartition des modules de cisaillement (en faibles déformations).



▶▶▶ FIGURE 53

a. Caractéristiques des composantes des ondes de Rayleigh en fonction de la profondeur normalisée par la longueur d'onde.
 b. Principe de l'interaction des ondes de surface avec une cavité : les petites longueurs en violet ne sont pas affectées par la cavité. En orange, celles qui sont de l'ordre de la dimension de la cavité sont perturbées. Les grandes longueurs d'onde en vert ne sont pas affectées par la cavité.

◆ Grandeurs mesurées

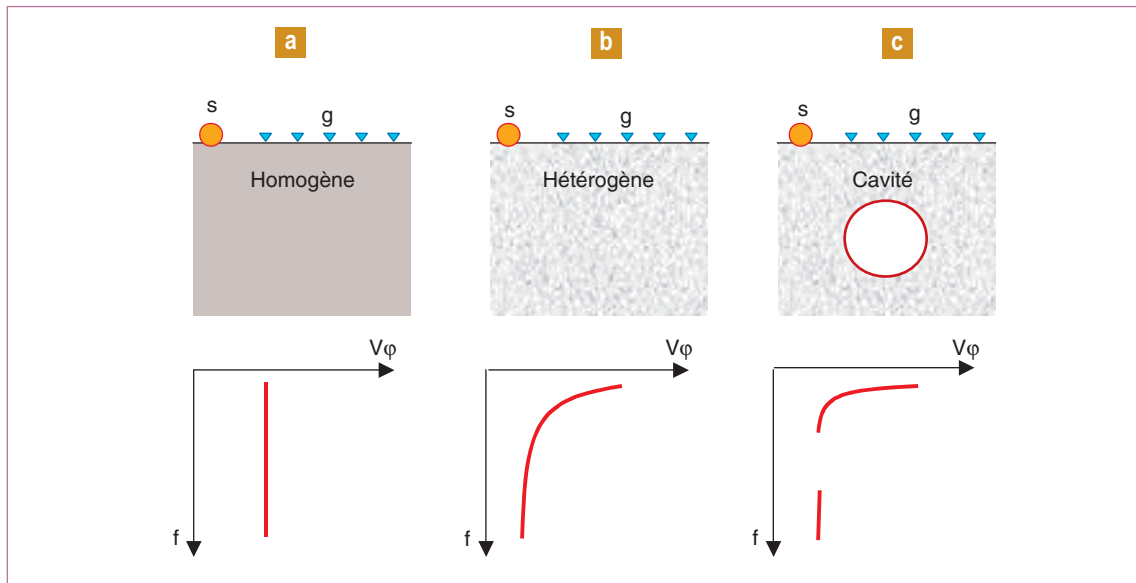
Les grandeurs mesurées sont présentées sous forme de sismogrammes bruts. Pour une position de la source sur le profil, ils représentent en coordonnées verticales les amplitudes en fonction du temps de propagation (en millisecondes) des ondes dans le sol et en coordonnées horizontales, la distance entre la source et les géophones. Les amplitudes associées aux interactions avec le milieu sont représentées en plan (sinusoïde, wiggle en anglais), quelquefois en niveau de couleur.

◆ Résultats attendus : détection de cavités par méthodes sismiques en ondes de surface

Les résultats attendus sont comme en sismique réflexion haute résolution, une coupe temps et une coupe profondeur, obtenues après des traitements particuliers. On notera que des traitements comme la migration en profondeur, utilisés en sismique réflexion ne sont pas adaptés pour la détermination des profondeurs en ondes de surface. Dans l'exemple de mesure ci-après, c'est une loi de conversion profondeur/fréquence qui est utilisée.

La présence d'une cavité dans un sol atténue le front d'onde : elle agit comme un filtre coupe bande. Cette atténuation est visible sur les diagrammes de dispersion pondérés de l'amplitude spectrale. Elle est utilisée dans la méthode de détection par mise en évidence d'anomalies sur des profils en ondes de surface (Leparoux et al., 2000).

Une autre méthode consiste en la présentation des rapports spectraux de l'onde transmise et de l'onde réfléchi (sur la cavité) sur l'onde émise. La cavité agit alors comme un filtre stop-bande sur les ondes de surface. Cette méthode est encore en cours de développement et d'expérimentation (Abraham et al., 2001).



►►► **FIGURE 54** - Représentation qualitative du principe de détection de cavités par analyse du diagramme de dispersion des ondes de surface.

- a. Milieu homogène.
- b. Milieu hétérogène sans cavité.
- c. Milieu hétérogène avec cavité.

4.2 Méthodologie

◆ Domaine d'application

Cette technique est à ce jour en développement et le domaine d'application reste encore à définir. Cependant, les premières études montrent que des cavités d'une dizaine de m^2 de section sont susceptibles d'être détectées dans les dix premiers mètres de la surface, si le milieu est suffisamment homogène. Par ailleurs, l'énergie issue d'un choc sismique étant en grande partie véhiculée par les ondes de surface, la méthode est moins sensible au bruit que la sismique réflexion haute résolution, méthode pour laquelle les ondes de surface sont sources de perturbations. Enfin, cette méthode peut fonctionner sans la nécessité de planter les géophones dans le sol : des applications à plus grand rendement et en milieu urbain (dispositif glissant) sont ainsi envisagées (Bitri *et al.*, 2002).

La longueur d'onde dominante est une donnée capitale pour cette méthode. Expérimentalement, elle est très variable suivant les milieux. Classiquement, elle est de l'ordre de 10 à 30 m et la profondeur d'investigation est de l'ordre du tiers de la longueur d'onde : la détection de cavité par cette méthode ne dépend que de la longueur d'onde dominante et n'obéit pas à des lois d'échelle comme en microgravimétrie par exemple.

◆ Déroulement d'une campagne de mesure

Choix de l'enregistreur, de la source et des géophones

L'enregistreur est identique à celui décrit pour la sismique réflexion haute résolution. En revanche la méthode ne nécessite pas l'emploi de source de cisaillement pure. Les géophones ne sont pas nécessairement implantés de manière destructive dans le sol : des capteurs de type gimbal (Bitri *et al.*, 2002), reposant dans un bain d'huile, entourés d'un cylindre métallique, d'un poids de quelques kilogrammes, pouvant être traînés derrière un véhicule, permettent un bon contact avec la surface. Ce type de dispositif, bien adapté pour l'enregistrement d'ondes énergétiques telles que les ondes de surface, laisse présager des applications en milieu urbain et des rendements supérieurs aux autres méthodes sismiques. Ces géophones ont typiquement une fréquence de coupure de l'ordre de 10 Hz.

Choix de la dimension du dispositif

La dimension du dispositif est similaire à celle présentée en sismique réflexion. Le nombre de tirs et leur position dépendent du nombre de capteurs et de la longueur du dispositif. Classiquement pour une cavité de dimension métrique, dans les dix premiers mètres du sous-sol, le dispositif comporte par exemple vingt-quatre géophones, distants de 1 m ; les tirs en offset sont à 5 m du géophone le plus proche, et le déplacement de la source est de l'ordre du mètre.

Traitements des mesures

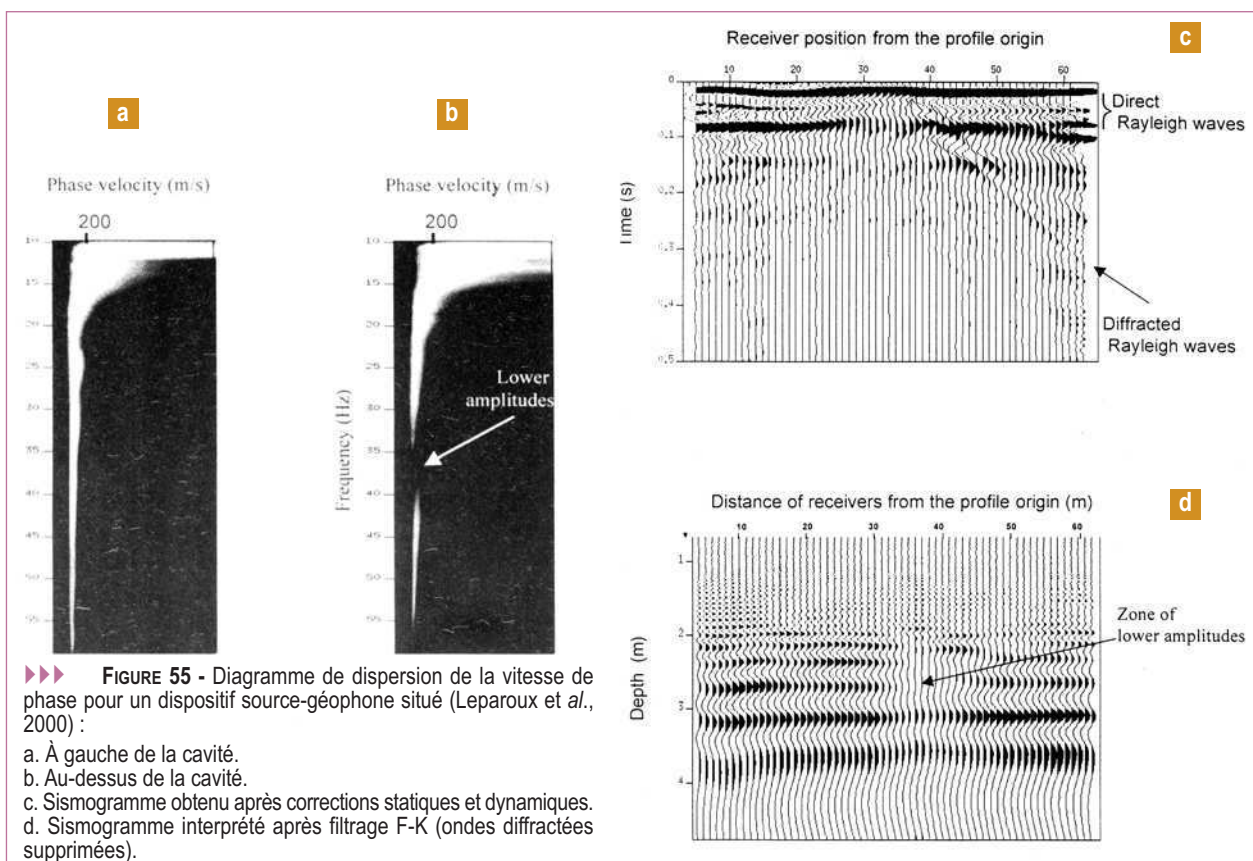
Le traitement des mesures est identique à celui réalisé en sismique réflexion haute résolution, à l'exception des corrections dynamiques. En effet, étant donné le caractère dispersif des ondes de surface, la correction dite Dynamic Linear Move Out (DLMO), consistant à ramener les traces des différents offsets à des traces à déport nul, doit tenir compte de l'offset mais aussi de la vitesse de phase des ondes de surface en fonction de la fréquence (CRG, Common Receiver Gather).

Après cette étape, les tirs d'un même CRG sont sommés, et ce pour chaque CRG. On obtient alors un profil en ondes de surface où ces dernières sont représentées en amplitudes en fonction du temps et de la distance parcourue lors de l'avancement des tirs.

Comme en sismique réflexion haute résolution, la présence de cavité sera plutôt mise en évidence par l'apparition de zone d'atténuation sur les profils obtenus après collection en CRG et correction.

4.3 Exemples de mesures

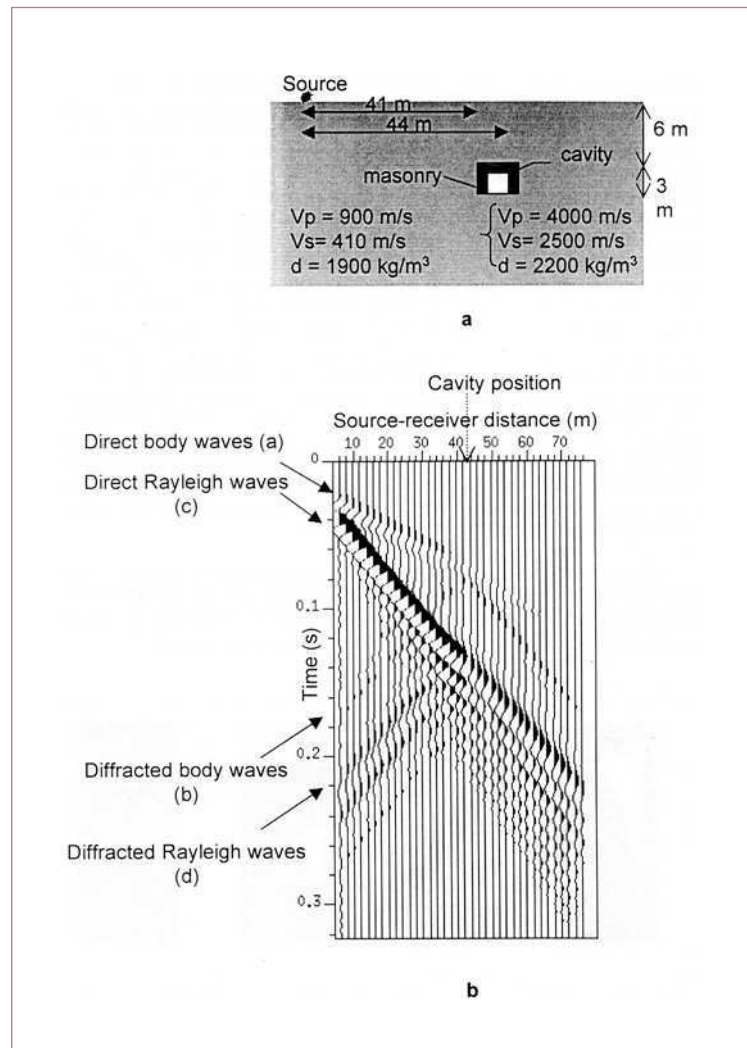
Le dispositif de mesure a été déployé (Leparoux et al., 2000) pour la détection d'une cavité de 2 m de hauteur sur 1,5 mètre de largeur, dont le toit est situé à 3 m de profondeur sur le site de Jargeau (Loiret, France). Il est composé de vingt-quatre géophones 10 Hz, espacés de 1 mètre, et d'une source se déplaçant jusqu'à 5 m au-delà du premier géophone. La figure 55b fait apparaître une bande d'atténuation entre 32 et 40 Hz, ce qui correspond à une longueur d'onde de plus de 5 m. Suivant une loi de conversion profondeur/fréquence énoncée par (Woods R.D., 1999), cette longueur d'onde est corrigée d'un facteur de 0,6 ce qui donne une profondeur d'environ 3 m pour la cavité. Ce même type de loi est appliquée lors des corrections dynamiques des traces CDP, et permet de localiser la cavité à 3 m de profondeur (Fig. 55d).



4.4 Modélisation

Sur la figure 56, un exemple de modélisation d'un dispositif situé au-dessus d'une cavité de 3 m de hauteur par 4 m de largeur à 6 m de profondeur est présenté. Sur ce diagramme, on observe bien les ondes P directes (a), les ondes P diffractées sur la cavité (b), les ondes de Rayleigh (ondes de surface) directes (c), beaucoup plus énergétiques, et les ondes de Rayleigh diffractées (d) sur la cavité.

On notera que la modélisation ne tient pas compte de l'atténuation des ondes P dans le milieu. En réalité, et particulièrement pour les ondes diffractées, le niveau des signaux est tel qu'ils se confondent avec le bruit : ce type d'onde est alors rarement exploitable, au même titre que les ondes réfléchies sur le toit des cavités en sismique réflexion.



►►► **FIGURE 56**
 a. Modèle de milieu et cavité utilisés pour obtenir :
 b. La simulation numérique en différence finie (composante verticale du champ de déplacement) d'un tir sismique en ondes de surface (Leparoux, 2000).

4.5 Conclusion

La sismique en onde de surface est une méthode en développement. Elle permet de détecter des cavités jusqu'à une dizaine de mètres au plus. Elle peut être utilisée avec des sources non destructives et des géophones dont l'implantation est aussi non destructive. Elle est moins sensible au bruit microsismique et promet des rendements supérieurs aux autres méthodes sismiques. Des applications sont ainsi envisagées en milieu urbain.

5. CONCLUSION GÉNÉRALE SUR LES MÉTHODES SISMIQUES

La sismique réflexion haute résolution est bien indiquée pour la recherche de mines ou de carrières exploitées en banc (calcaire, gypse, etc.) dans les cinquante premiers mètres. La présence de cavités se manifeste principalement par le masquage d'horizons réflecteurs.

On peut aussi mettre en évidence en sismique réfraction des cavités en milieu tabulaire, lorsque le contraste de vitesse entre couche croît avec la profondeur. La présence de cavité se manifeste alors par un retard sur les dromochroniques. Pour cette méthode, les cavités détectables se situent généralement jusqu'à des profondeurs de l'ordre de vingt à trente mètres et doivent être de tailles importantes pour générer d'éventuels écarts temporels visibles. La sismique en ondes de surface ne promet des résultats que dans les dix premiers mètres.

La sismique réflexion haute résolution et la sismique réfraction restent délicates à mettre en œuvre, particulièrement si l'on utilise une source explosive destructive, et si l'on doit déplacer le dispositif. La nécessité d'implanter les géophones dans le sol, le bruit sismique et électromagnétique sont des contraintes qui interdisent leur application en milieu urbain. En revanche, la mise en œuvre du dispositif de la sismique en ondes de surface serait plus aisée, puisque l'implantation des géophones dans le sol n'est pas nécessaire, c'est pourquoi on peut envisager des applications en milieu urbain.

Pour toutes les méthodes, en particulier pour la sismique réflexion haute résolution et pour la sismique en ondes de surface, les traitements et l'interprétation des mesures doivent être réalisés impérativement par un géophysicien expérimenté, sans quoi les résultats des méthodes ne pourraient être garantis.

De même, dans le cadre d'une recherche de cavités sans indices préalables sur leur position, il est impératif de vérifier la nature des anomalies constatées par des forages.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABRAHAM O., LEPAROUX D., GRANDJEAN G., MILOJEVIC Y., *Reconnaissance des anomalies géotechniques de l'art : détection des cavités non maçonnées à l'aide d'ondes de surface*, Projet National CriTerre, **2001**.
- BRAHAM P.J. McDONALD R.J., *Imaging a buried river channel in an intertidal area of South Wales using high resolution seismic techniques*, *Quarterly Journal Engineering Geology*, **Vol.25, 1992**, pp. 227-238.
- BITRI A., PERRIN J., BEAUCE A., *Sismique réflexion haute résolution : principe et applications*, Rapport du Bureau de Recherche Géologique et Minière R 39220, **1996**, 59 pages.
- BITRI A., GRANDJEAN G. et BALTASSAT J.M., *Caractérisation du proche sous-sol le long de tracés linéaires par profilage SASW, AGA*, **2002**.
- CHAMMAS R., *Caractérisation mécanique de sols hétérogènes par ondes de surface*, thèse de l'École doctorale de Mécanique, Thermique et Génie Civil, **2002**.
- CHAPPEL P., *Géophysique appliquée - Dictionnaire et plan d'étude*, Masson, **1980**.
- CÔTE Ph., *Imagerie sismique : inversion en vitesse et en facteur de qualité de mesures de transparence sonique entre forage. Application au contrôle des injections*, thèse de l'Université scientifique et médicale de Grenoble, **1983**.
- DIMRI V., *Deconvolution and inverse theory : application to geophysical problems*, *Methods in geochemistry and geophysics*, 29, Elsevier, **1992**.
- DRIAD L., *Localisation et reconnaissance des cavités souterraines par sismique réflexion haute résolution - application au site de Gréasque (Provence)*, Rapport INERIS DRS-02-25308/RN03, **2002**.
- FRAPPA M., HORN R., MURAU P., PERAGALLO J., *Contribution à la détection par sismique réflexion des cavités souterraines de faible profondeur*, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, nov.-déc. **1977**.
- GANJI, V., GUCUNSKI N. and MAHER, M.H., *Detection of Underground Obstacles by SASW Method*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **Vol. 123, n° 3, 1997**, pp. 212-219.
- GRANDJEAN G., SÉNÉCHAL G., BITRI A., DABAN J-B., *Détection de carrières souterraines par sismique haute résolution à Annet-sur-Marne (France)*, *C.R. Geoscience* 334, **2002**, pp. 441-447.
- HENRY G., *Géophysique des bassins sédimentaires*, Éditions Technip, **1994**.
- HÉVIN G., *Utilisation des ondes de surface pour l'auscultation des structures en génie civil : application à la caractérisation des fissures de surface*, thèse de l'Université J. Fourier, Grenoble I, France, **2000**.

- HILL I.A., *Better than drilling? Some shallow seismic reflection case histories*, Quarterly Journal of Engineering Geology, **Vol. 25**, 1992, pp. 239-248.
- LAVERGNE M., *Méthodes sismiques*, Éditions Technip, 1986.
- LEPAROUX D., BITRI A., GRANDJEAN G., *Underground cavity detection: a new method based on seismic rayleigh waves*, European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, **Vol. 5**, 2000, pp. 33-53.
- LEONARD C., *Détection des cavités souterraines par sismique haute résolution et par impact-écho*, Thèse de l'Université de sciences et de technologie de Lille, 2000, 178 pages.
- MACMECHAN G.A., YEDLIN M.J., *Analysis of dispersive waves by wave field transformation*, Geophysics, **Vol. 46**, n° 6, 1981, pp. 869-874.
- MARI J.L., GLANGEAUD F., COPPENS F., *Traitement du signal pour géologue et géophysicien*, Publications de l'Institut Français du Pétrole, Édition Technip, 1997.
- MARI J.L., ARENS G., CHAPELLIER D., GAUDIANI P., *Géophysique de gisement et de génie civil*, Publications de l'Institut Français du Pétrole, Édition Technip, 1998.
- MATTHEWS M.C., HOPE V.S., CLAYTON C.R.I., *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*, Proc. Instn. Civ. Engng., **Vol. 119**, 1996, pp. 84-95.
- MILLER R.D., PULLAN S.E., WALDNER J.S., HAENI F.P., *Field comparison of seismic sources*, Geophysics, **Vol. 51**, 1986, pp. 2067-2092.
- MOKHTAR T.A., HERRMANN R.B., RUSSEL D.R., *Seismic velocity and Q model for the shallow structure of the Arabian shield from short-period Rayleigh waves*, Geophysics, **Vol. 53**, n° 11, 1998, pp. 1379-1387.
- MOREAUX D., *Localisation de cavités souterraines par réflexion sismique haute résolution : étude numérique, étude de terrain*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1997.
- PARASNIS D.S., *Principles of applied geophysics*, Chapman and Hall, Fourth edition, 1986.
- PEDERSEN H.A., SANCHEZ-SESMA F.J., CAMPILLO, M., *Three-dimensional scattering by two-dimensional topographies*, Bull. Seism. Soc. Am., **Vol. 84**, 1994, pp. 1169-1183.
- PIWAKOWSKI B., LEONARD C., *High resolution seismic imaging as a NDT tool for the shallow subsurface survey*, Vth Meeting of International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering, NDT CE 2000, Japan, 2000.
- PIWAKOWSKI B., WATELET J-M., MOREAUX D., *High resolution seismic prospecting of old gypsum mines - evaluation of detection possibilities*, European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, **Vol. 2**, 1997, pp. 109-120.
- PIWAKOWSKI B., SHAHROUR I., *Imagerie du proche sous-sol par la sismique réflexion haute résolution : application à la détection des cavités*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, **Vol. 214**, 1998, pp. 19-29.
- PIWAKOWSKI B., LEONARD C., SHAHROUR I., *La sismique réflexion haute résolution, un outil pour la reconnaissance des couches superficielles*, Revue Française de Géophysique, n° 101, 2003.
- REYNOLDS J.M., *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley and Sons, 2000.
- SABATIER P.C., *Applied inverse problems*, Springer-Verlag, 1978.
- SHERIFF R.E and GELDART L.P., *Exploration Seismology*, Cambridge University Press, Seconde édition, 1995.
- VIRIEUX J., *P-SV wave propagation in heterogeneous media : velocity-stress finite-difference method*, Geophysics, **Vol. 51**, n° 4, 1986, pp. 889-901.
- WOODS R.D., *Screening of surface waves in soils*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1968, pp. 951-979.

Les méthodes électriques en courant continu

Chapitre 6

Notations	
ρ	résistivité ($\Omega.m$)
ρ_a	résistivité apparente ($\Omega.m$)
ρ_e	résistivité de l'eau contenue dans les pores ($\Omega.m$)
Φ	porosité
S	la fraction volumique de pores contenant de l'eau (saturation)
k	le facteur géométrique d'un dispositif électrique (m)
A,B	électrodes d'injection de courant
M, N	électrodes de mesure de potentiel

1. PRÉSENTATION DES MÉTHODES ÉLECTRIQUES EN COURANT CONTINU

1.1 Définition de la résistivité

Les méthodes électriques par courant continu en géophysique ont pour objet de déterminer les propriétés des sols par la mesure de leur *résistivité* ρ . L'unité de mesure est l'ohm.mètre ($\Omega.m$). La résistivité d'un matériau est l'*inverse de la conductivité* σ mesurée en siemens par mètre ($S.m^{-1}$). Un matériau conduit d'autant mieux le courant électrique que sa résistivité est faible (ou sa conductivité élevée).

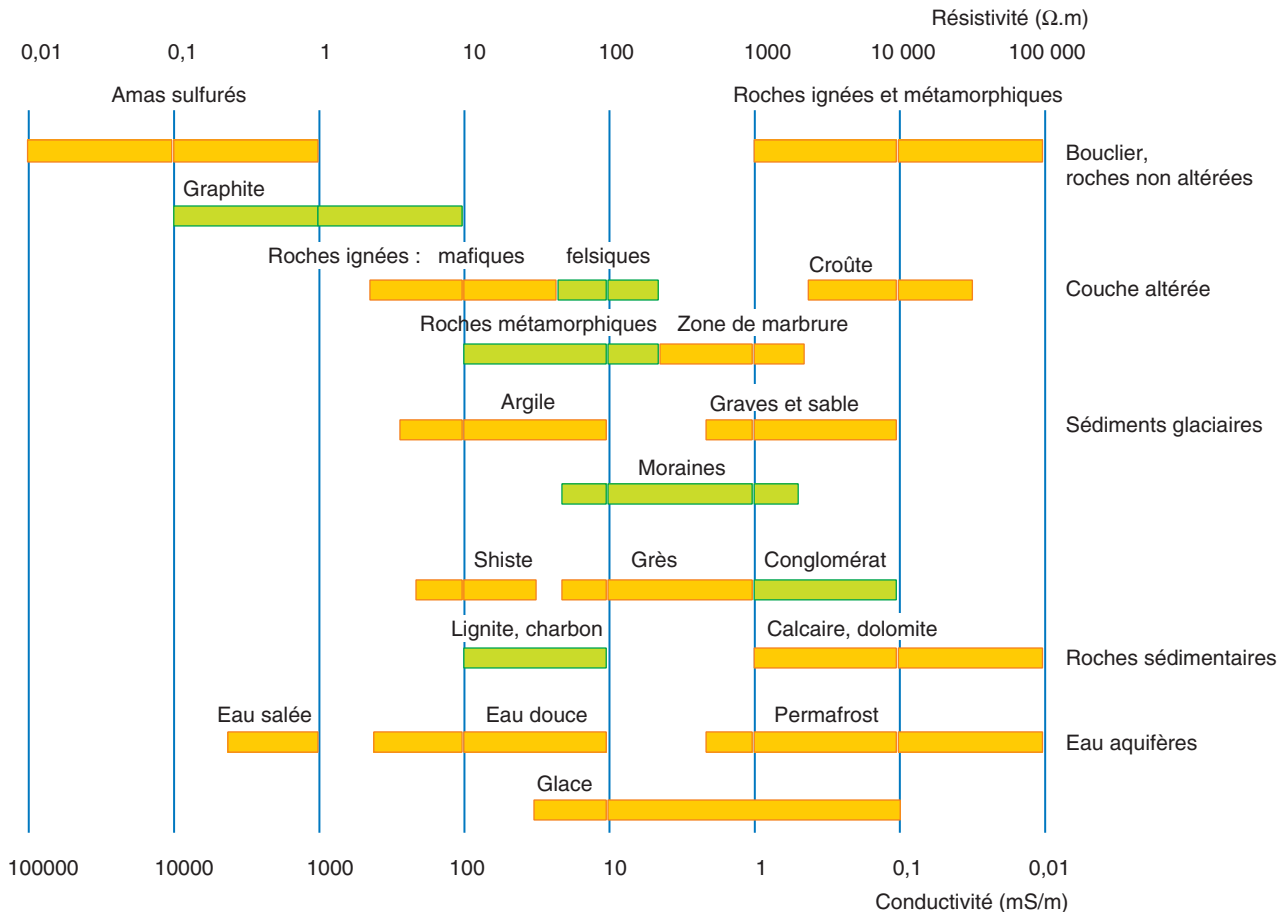
La résistivité des matériaux dépend essentiellement des phénomènes de conduction électrolytique et d'une manière moindre de conduction électronique. Les valeurs des résistivités dépendent de la nature du matériau et couvrent un large domaine. Les contrastes de résistivité doivent être suffisants pour que les hétérogénéités soient détectables. La valeur de la résistivité d'un matériau

géologique dépend aussi de la teneur en eau, de la porosité du milieu, du mode de communication entre les vides (la tortuosité) et de la salinité de l'eau. La loi d'Archie (loi empirique (Reynolds, 2000)) synthétise ces propriétés :

$$\rho = \rho_e \Phi^m S^n$$

où ρ et ρ_e sont respectivement les résistivités du matériau sec et de l'eau contenue dans les pores, Φ est la porosité, S la fraction volumique de pores contenant de l'eau, a , m , et n sont des constantes telles que : $0,5 \leq a \leq 2,5$, $1,3 \leq m \leq 2,5$ et $n = 2$.

L'ordre de grandeur de la résistivité (et inversement de la conductivité) des principaux composants des sols est représenté sur la figure 57.



▶▶ FIGURE 57 - Gamme des résistivités des principaux sols terrestres (Palacky, 1991).

1.2 Le principe de mesure des méthodes électriques en courant continu

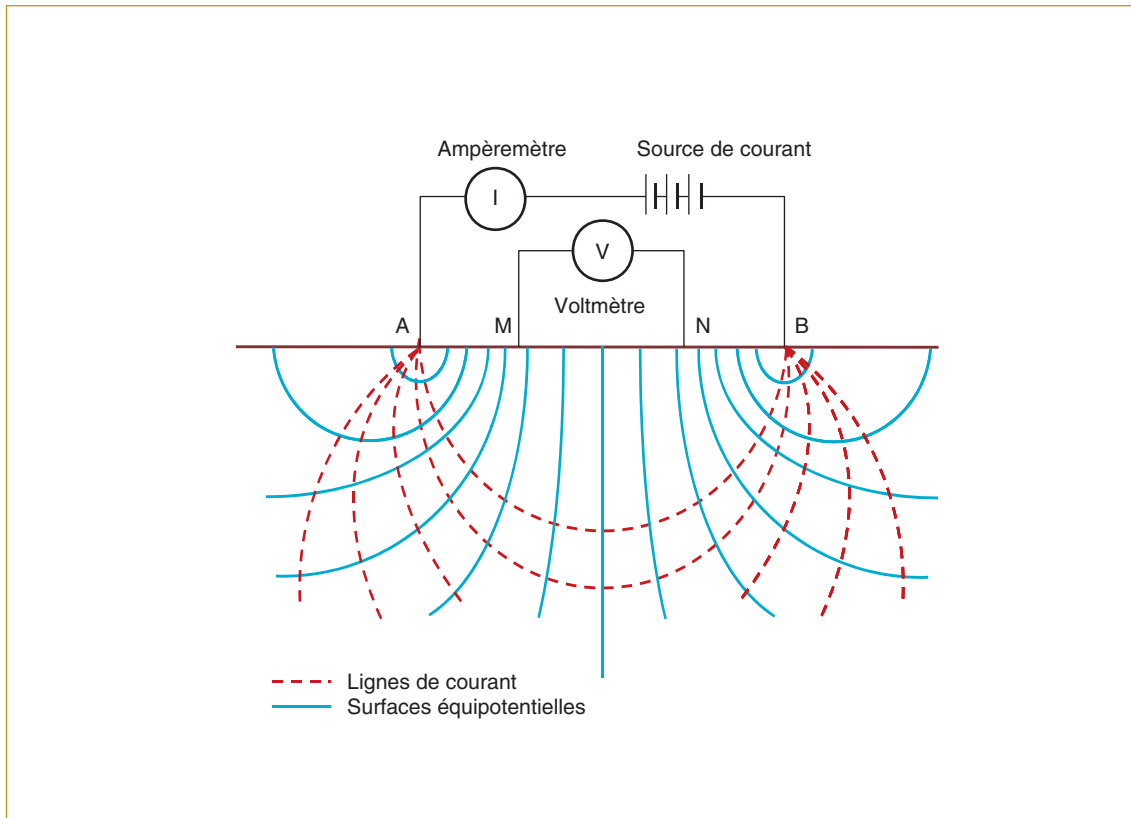
Le principe de mesure est le suivant : un courant continu I est injecté dans le sol par deux électrodes A et B . La différence de potentiel V est mesurée aux bornes de deux autres électrodes notées M et N (Fig. 58).

La *résistivité apparente* est « le rapport de la différence de potentiel mesurée sur le terrain à celle que l'on mesurerait avec le même dispositif et la même injection de courant sur un terrain homogène de résistivité $1 \Omega.m$ ». Cette grandeur a les dimensions d'une résistivité. Elle vaut :

$$\rho_a = k \frac{V_M - V_N}{I}$$

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 58 - Principe de la prospection électrique par courant continu.

Les principaux dispositifs sont présentés sur la figure 59. Ce sont tous des quadripôles. Les plus utilisés sont les dispositifs Wenner, Schlumberger, et le dipôle-dipôle.

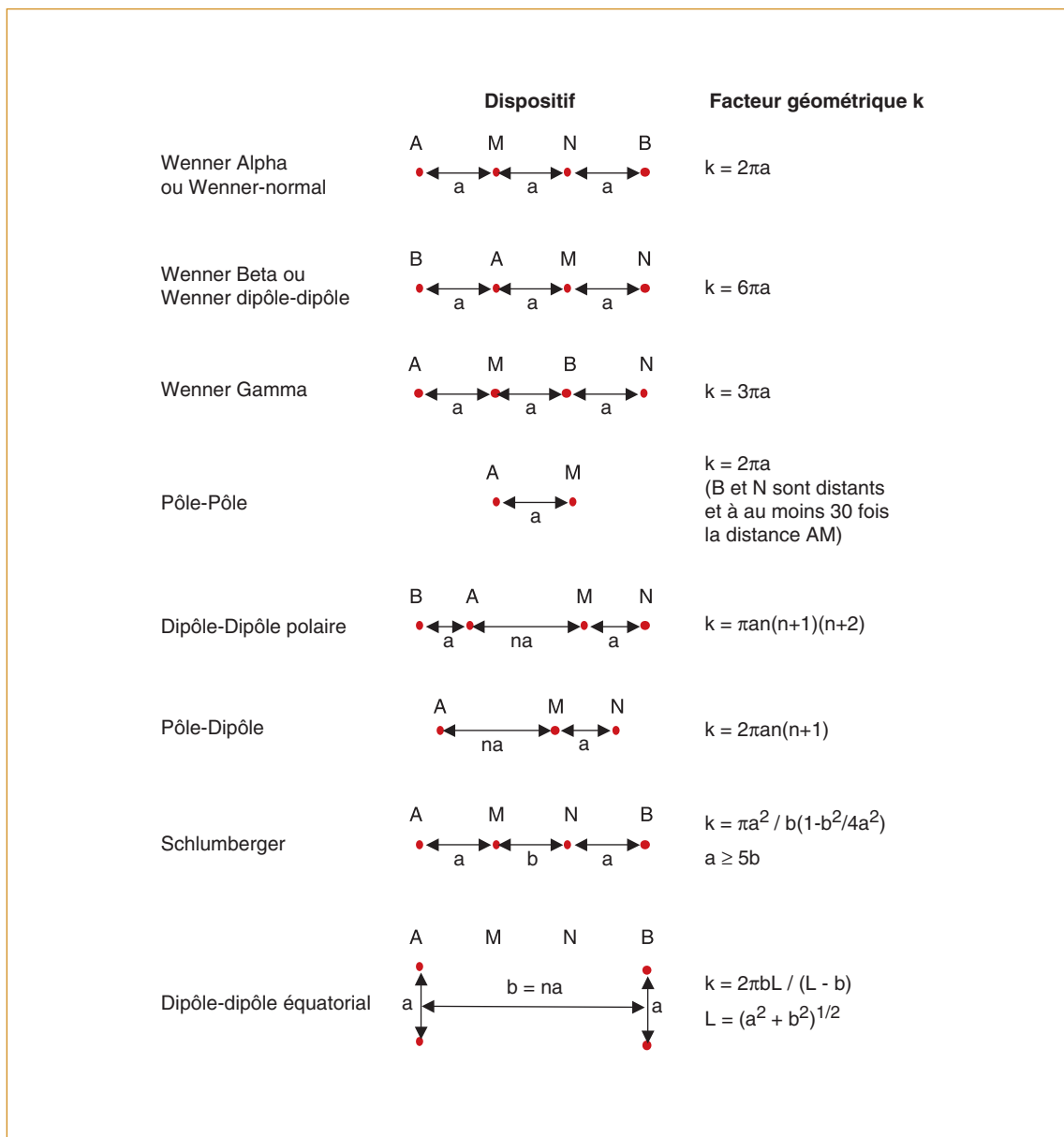
Leur profondeur d'investigation est une fonction croissante de la longueur du dispositif. Pour tous les types de dispositifs, cette distance est définie comme la plus petite entre l'électrode d'injection et l'électrode de potentiel.

Si on prend comme référence cette distance AM , tous les dispositifs ont une profondeur d'investigation équivalente. Des auteurs comme (Militzer *et al.*, 1979) et (Roy et Appareo, 1971) ont étudié plus précisément les profondeurs d'investigation en fonction des dispositifs. Dans une première approximation, on peut considérer que la profondeur investiguée est de l'ordre de $1/6$ à $1/8$ de la longueur du dispositif.

Il y a trois types de mise en œuvre de la prospection électrique par courant continu depuis la surface :

- le sondage électrique : en un point fixe en surface, les électrodes sont écartées,
- le traîné 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. C'est la méthode présentée ici pour la détection des cavités souterraines.

Les deux premières méthodes sont brièvement explicitées. La troisième, le panneau électrique est une méthode de localisation de structures conductrices (poches, fractures, failles). Elle est très utilisée en milieu karstique.



►►► FIGURE 59 - Dispositifs et facteurs géométriques associés (Loke, 2002), (Parasnis, 1986) ou (Reynolds, 2000).

1.3 Le sondage électrique

◆ Principe

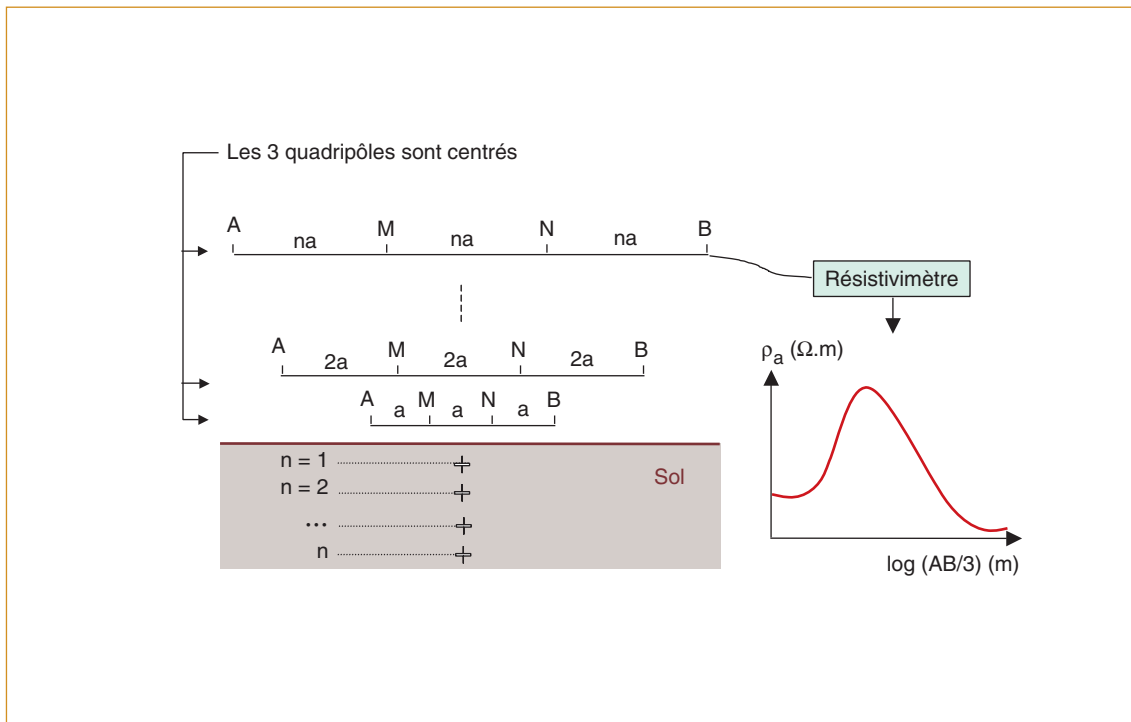
Dans le dispositif du sondage électrique, le centre est fixe et les électrodes sont écartées pour mesurer la résistivité apparente en fonction de la longueur du dispositif. Ce principe est illustré sur la figure 60 pour un dispositif Wenner : les distances entre électrodes des points A, B, M et N varient d'un nombre entier de fois l'écartement initial a.

◆ 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 ($\Omega.m$) en fonction de la distance entre électrodes d'injection (exprimée généralement en mètres, en échelle logarithmique). Pour les milieux tabulaires, l'interprétation des résultats se fait en terme d'épaisseurs et de résistivités des couches. On utilisait auparavant des abaques où étaient représentées les résistivités apparentes du milieu multicouche (Parasnis, 1986). On a recours aujourd'hui à des logiciels d'interprétation automatique assistés par ordinateur. L'interprétation n'est pas unique à cause des lois de similitude : le résultat est basé sur l'hypothèse de la répartition 1D des structures, alors que les mesures intègrent le demi-espace continué par le sol et délimité par la surface.



▶▶ FIGURE 60 - Principe du sondage électrique en dispositif de Wenner (alpha).

1.4 Principe du traîné électrique

◆ Principe

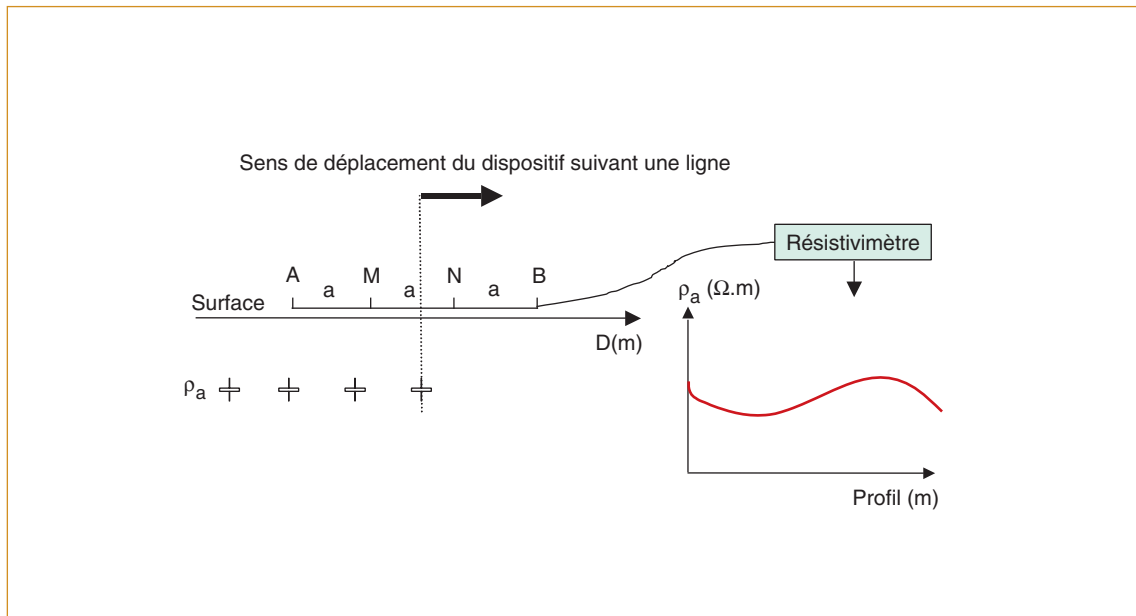
Le traîné électrique consiste à conduire les mesures avec un dispositif aux dimensions fixes, le long d'un profil dirigé dans l'alignement des électrodes. Le principe est illustré sur la figure 61.

◆ 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.

◆ Présentations des attendus

Le résultat d'un traîné de résistivité est une courbe représentant la résistivité apparente (en $\Omega.m$) du terrain en fonction de la position du dispositif de mesure le long du profil en m (Fig. 61).



►►► FIGURE 61 - Principe du traîné électrique, cas d'un dispositif Wenner.

2. LE PANNEAU ÉLECTRIQUE

2.1 Principe

Cette méthode combine le traîné électrique et le sondage électrique (Fig. 62). Elle consiste à implanter 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. Le système (l'injection de courant et la mesure du potentiel) est piloté par ordinateur. Les électrodes jouent alternativement le rôle d'électrodes d'injection et d'électrodes de mesure du potentiel. On réalise automatiquement pour un quadripôle de longueur donnée un traîné électrique, et on fait varier la longueur du quadripôle pour le combiner au sondage : on réalise alors les mesures pour toutes les longueurs possibles du dispositif.

◆ Résultats attendus : détection de cavités par méthodes électriques

Le résultat brut (Fig. 62) d'une mesure en panneau électrique est une carte de résistivité apparente ($\Omega.m$), souvent appelée pseudo-section. L'échelle des couleurs est proportionnelle à la valeur de la résistivité. Les coordonnées horizontales représentent la position du centre du dispositif le long du profil. Les coordonnées verticales représentent la longueur du dispositif. Ce n'est pas une représentation d'une coupe de terrain : pour une ordonnée donnée, c'est-à-dire pour une longueur de dispositif donnée, c'est la résistivité apparente qui est représentée le long du profil. Les résultats bruts, très variés suivant le type de dispositif, sont difficiles à interpréter et nécessitent une grande expérience de la méthode.

Le résultat attendu est une carte de résistivité inversée (Fig. 62). Il existe des logiciels qui permettent de réaliser l'inversion des mesures en terme de variation de la résistivité interprétée en fonction de la position du dispositif et de la profondeur. Il faut savoir que le résultat est basé sur l'hypothèse de la répartition 2D des matériaux, alors que la mesure en panneau électrique intègre le demi-volume sous la surface. En réalisant une acquisition suivant un maillage en surface, l'inversion donne un diagramme de résistivité avec l'hypothèse d'une répartition 3D des structures.

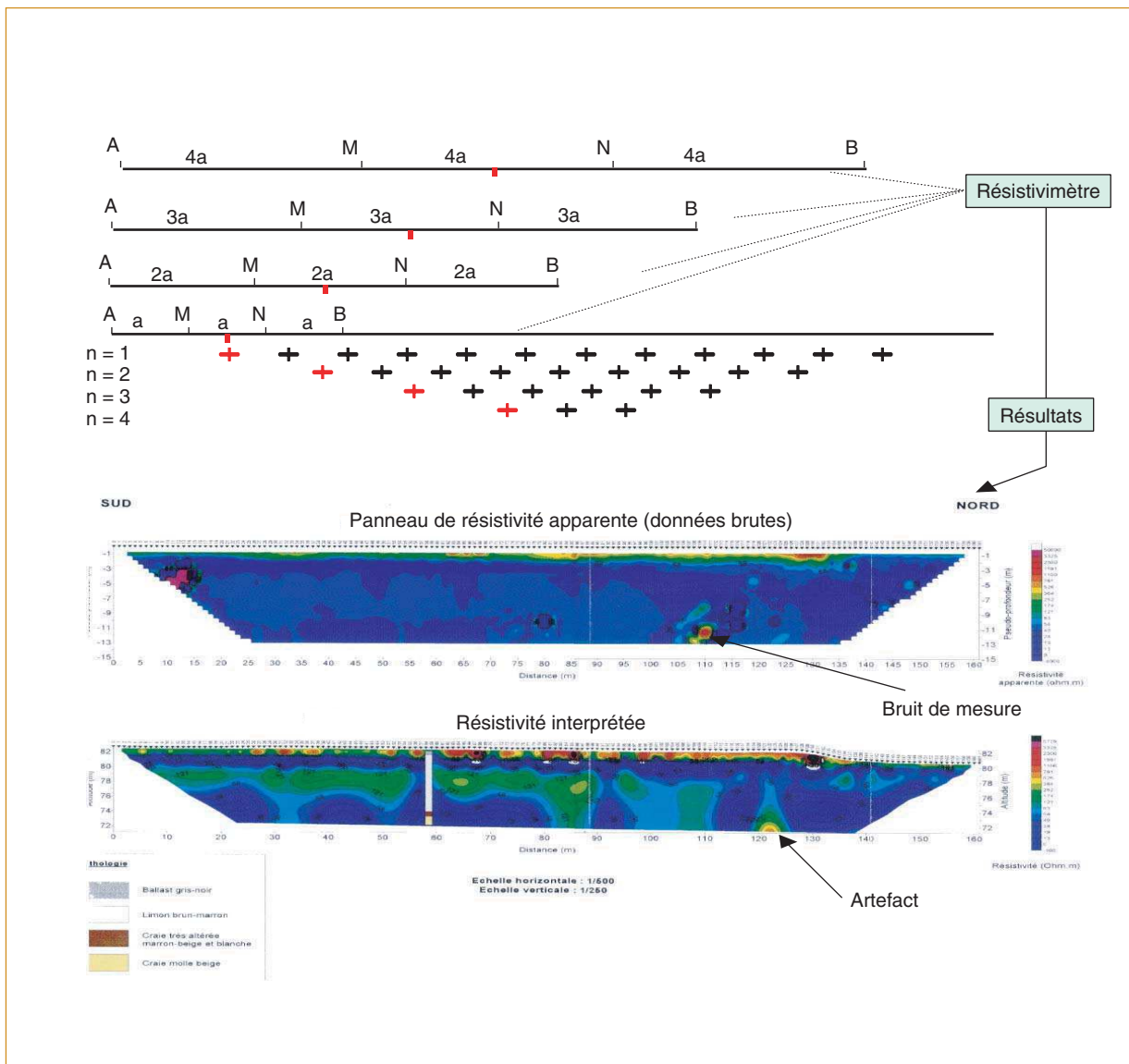
Détection de cavités conductrices

Le panneau électrique peut être riche d'informations pour affiner le modèle géologique (stratification, pendage, faille). Il permet ainsi de détecter les conséquences de la présence de cavités. Il est donc utile en milieu karstique. Il détecte une poche conductrice à plus grande profondeur qu'un vide à contraste égal de résistivité avec l'encaissant.

Détection de vides

Comme pour toutes les méthodes, le panneau électrique permet de localiser des vides peu profonds. Typiquement tant que la profondeur du toit d'une cavité sphérique est de l'ordre de son rayon, la méthode peut donner des indications sur la position à l'aplomb. Mais elle permet difficilement de préciser la profondeur et ses dimensions.

Pour la recherche de vides, elle ne peut être préconisée puisque dans le meilleur des cas, cette méthode d'investigation locale, donc à petit rendement, met en évidence des cavités grandes par rapport à leur profondeur, donc des cavités susceptibles d'être détectées par des méthodes mieux indiquées (microgravimétrie) à plus grand rendement (méthodes électromagnétiques) ou à plus grandes profondeurs d'investigation (méthodes sismiques).



►►► FIGURE 62 - Principe du panneau électrique et exemple de résultats. En haut, l'anomalie rouge à 110 m est du bruit (Document SNCF).

2.2 Méthodologie

◆ Domaine d'application

Il faut vérifier que les contrastes de résistivité sont suffisants pour appliquer la méthode. Une modélisation permet de les évaluer. Un contraste de résistivité apparente de 10 % est généralement considéré comme significatif.

En milieu karstique, le panneau électrique permet d'imager les structures remplies d'eau ou de matériaux argileux ou limoneux. Il est donc préconisé pour la recherche de structures (failles, poches ou boyaux karstiques) conductrices, facteurs d'instabilité et pouvant déboucher sur des vides.

L'utilisation d'un dispositif particulier dépend des objectifs fixés, et bien souvent des habitudes des responsables des mesures. Quelques grandes caractéristiques sont néanmoins à retenir pour certains dispositifs :

- pour les profondeurs inférieures à 20 m, le dispositif pôle-pôle est bien indiqué. Seules les électrodes A (de courant) et M (de potentiel) sont mobiles, les électrodes B et N sont à une distance de plus de 30 fois AM.
- le dispositif quadripôle symétrique est utilisé pour de plus grandes profondeurs, de même que le dispositif pôle-dipôle.
- le dispositif dipôle-dipôle est souvent utilisé pour le panneau mais peut conduire à des résultats difficiles à interpréter, car il est très sensible aux à-coups de prises (très bruité).

◆ Déroulement d'une campagne de mesure

Tout d'abord il faut vérifier que la résistivité apparente mesurée varie avec la longueur de ligne (sondage électrique). Ce test permet d'ajuster les longueurs des dispositifs qui doivent être de l'ordre de six à huit fois la profondeur visée.

Une modélisation aide à fixer les paramètres du dispositif. Ils doivent être maintenus aussi constants que possible. Dans le cas d'un dispositif rectiligne, il ne faut pas dévier de plus de 10° en direction du profil de référence. La variation des distances entre électrodes doit permettre de réaliser au moins 5 mesures par décade. La distance entre électrodes doit être connue à 5 % près. La mesure du rapport V/I doit être connue à 3 % près, et celle de la différence de potentiel entre les électrodes V, doit être supérieure à 0,5 mV. Cette dernière est particulièrement sensible aux phénomènes de polarisation des électrodes, et aux courants présents dans le sol (courants telluriques).

Sa mise en place est simple et les mesures sont réalisées automatiquement par une unité centrale qui pilote alternativement l'injection de courant et la mesure des potentiels aux électrodes. Si possible on réalise plusieurs panneaux en surface. Les corrélations entre panneaux permettent de s'approcher de la répartition 3D des matériaux dans le sol.

⚡ *Remarque* : Il existe des méthodes ne nécessitant pas l'implantation d'électrodes dans le sol. Ces dispositifs possèdent un alignement de capteurs capacitifs traînés au sol. Ils offrent alors un rendement beaucoup plus grand. La profondeur d'investigation est faible (2 à 4 m) et les conditions d'application restreignent leur utilisation à des surfaces planes et peu enherbées.

◆ Interprétation des résultats

Les résultats bruts sont délicats à interpréter : il est difficile de relier la géométrie des anomalies constatées à celle de la cause qui les crée. Si on est assuré que la résistivité du matériau ne varie pas dans une direction perpendiculaire au panneau (pas d'effet 3D), on peut inverser les mesures pour obtenir une coupe verticale du terrain en terme de résistivité interprétée.

En milieu karstique, la présence de vide se traduit par une augmentation de la résistivité apparente et les fractures remplies d'eau ou d'argile par une diminution de celle-ci. Si en général une zone argileuse est moins résistante qu'une zone remplie d'eau, il est difficile de distinguer la nature du remplissage. Le panneau électrique est alors essentiellement utilisé pour délimiter des failles, des fractures et des contacts entre couches.

◆ Limites de la méthode

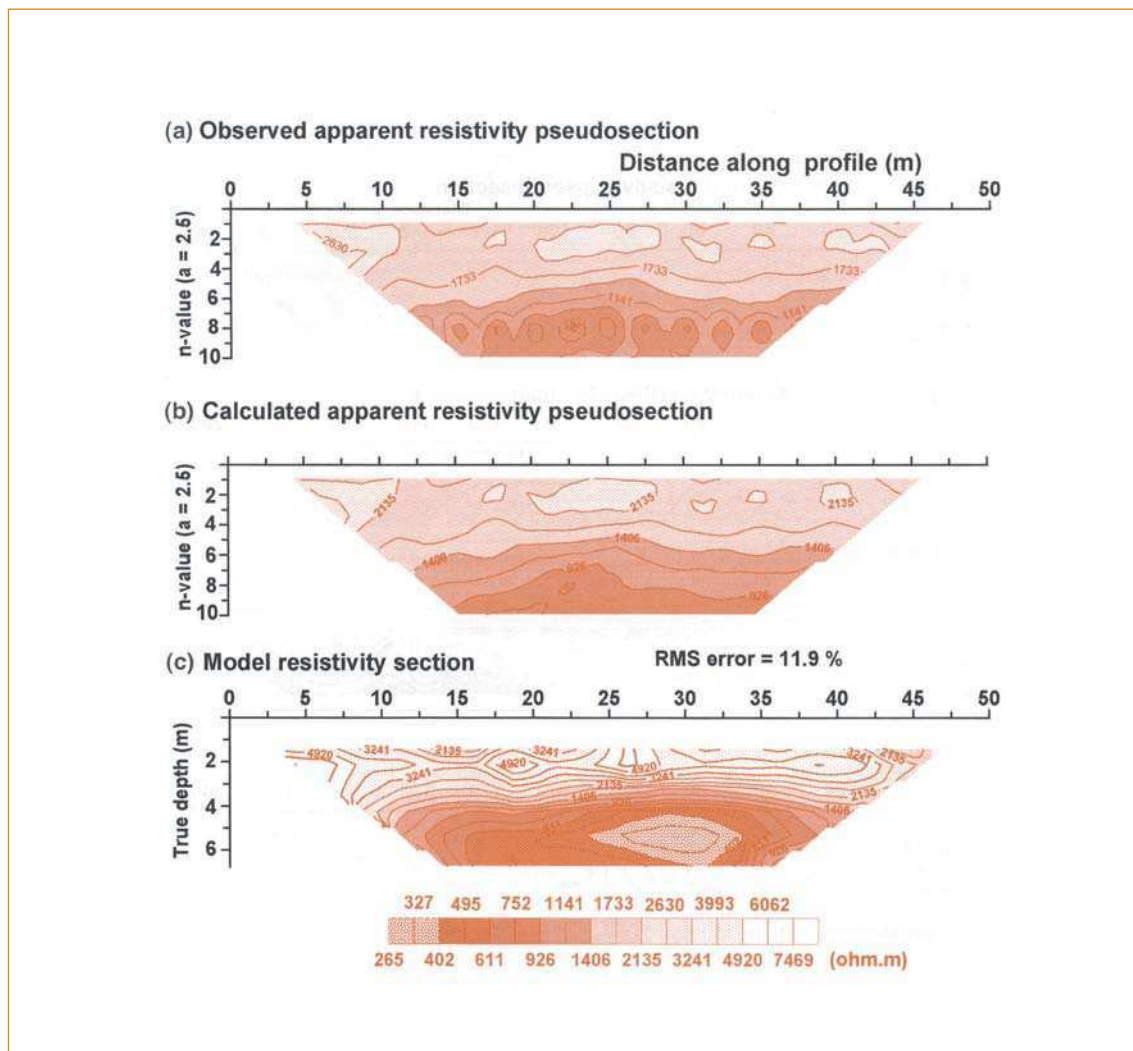
Pour les dispositifs nécessitant d'implanter les électrodes dans le sol, le rendement est faible mais tout de même nettement meilleur qu'en microgravimétrie. Il est conditionné par le temps qu'il faut pour implanter les électrodes, et celui passé à inverser et interpréter les mesures.

Si les matériaux de surface sont très conducteurs, le courant est canalisé et l'investigation à plus grande profondeur devient délicate à interpréter.

2.3 Exemples de mesures

Il existe des cas de localisation de cavités vides (Piro et *al.*, 1998-1999) (Batayneh et Al Zoubi, 2000) et (Berche, 2002). Ces vides présentent des extensions plus grandes que leur profondeur.

Les mesures en milieu karstique sont beaucoup plus fréquentes, et souvent couplées avec une, voire plusieurs méthodes (Sumanovac et Weisser, 2001). La figure 63 (Gautam et *al.*, 2000) illustre les mesures réalisées en dispositif dipôle-dipôle ($n = 10$ et $a = 2,5$ m) en milieu karstique. Les mesures montrent un milieu bi-couches d'une épaisseur de 6 à 7 m, composé d'une première couche graveleuse et résistante, propice à la formation de cavités proches de la surface et une seconde couche argilo-limoneuse, de résistivité plus faible.



▶▶ FIGURE 63

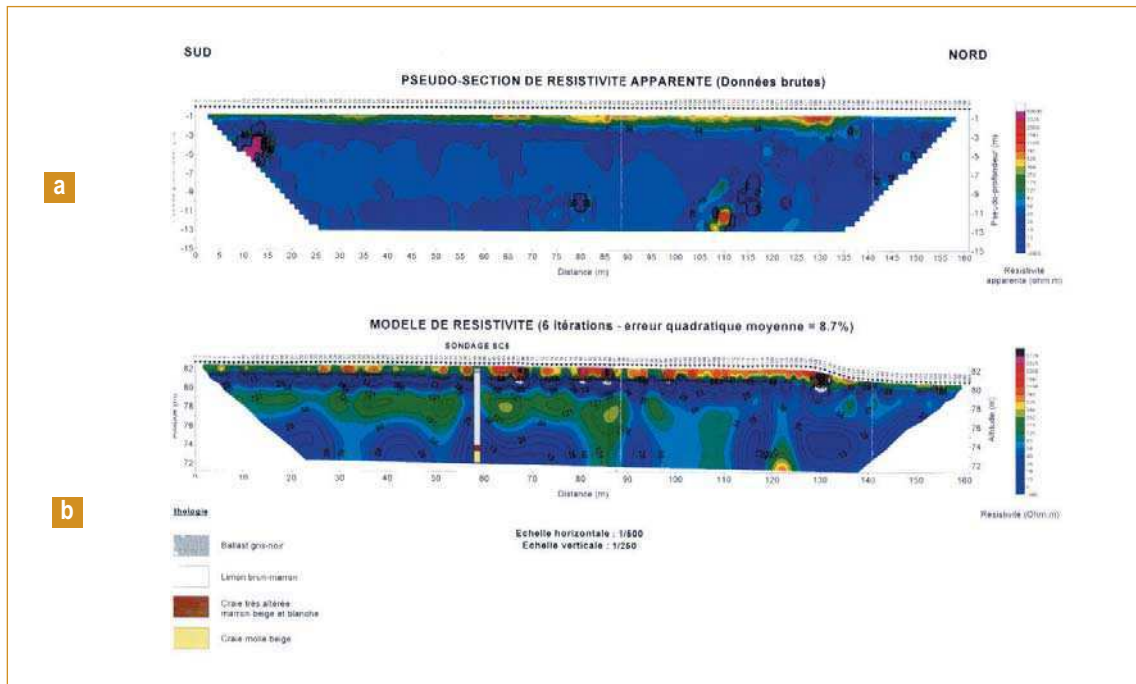
a. Résistivité apparente mesurée en milieu karstique, en dispositif dipôle-dipôle.

b. Résistivité calculée.

c. Modèle de résistivité obtenu avec le logiciel RES2DINV (Loke, 1999-2002). Le modèle obtenu montre un milieu d'une épaisseur de 6 à 7 m, composé de deux couches : une couche graveleuse (résistivité élevée) et une couche argilo-limoneuse (résistivité plus faible) (Gautam et *al.*, 2000).

Le site test présenté en microgravimétrie a été testé en panneau électrique. Les données brutes (Fig. 64a) ne sont pas interprétables pour caractériser les galeries, comme prévu par la modélisation. Cet exemple confirme que la méthode électrique n'est pas faite pour détecter des cavités vides, pourtant relativement volumineuses et peu profondes et qui sont par ailleurs détectées en microgravimétrie.

En revanche, la méthode a mis en évidence une couche plus résistante dans les limons (Fig. 64b) ce qui contribue à la compréhension des phénomènes de formation des cavités naturelles. Elle aide, ainsi, à l'interprétation des mesures des autres méthodes car elle précise le modèle géologique.



▶▶ FIGURE 64 - Exemple de mesures et mesures inversées sur site test (Document SNCF).

2.4 Modélisation

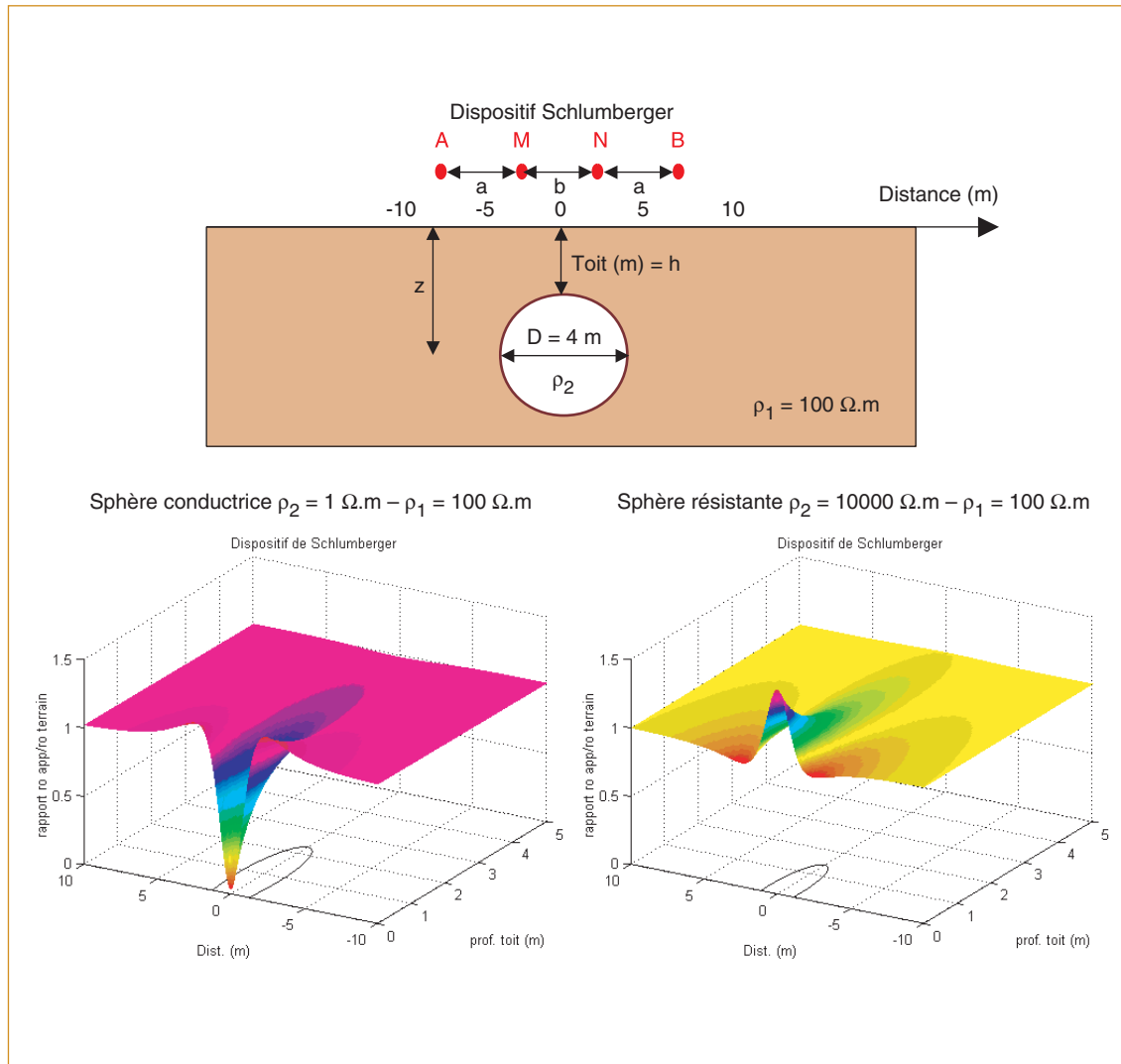
◆ Cas de la sphère résistante ou conductrice

La modélisation du problème direct peut se faire pour un traîné électrique au-dessus d'un sol homogène, contenant un corps simple comme une cavité sphérique. L'anomalie de résistivité créée par une sphère conductrice d'un diamètre de 4 m, de 1 $\Omega.m$ dans un milieu encaissant de 100 $\Omega.m$, est comparée avec celle créée par une sphère résistante d'un diamètre de 4 m, de 10000 $\Omega.m$ dans le même encaissant. La formule de la résistivité apparente normalisée pour un dispositif Schlumberger (rapport de la résistivité apparente sur celle de l'encaissant) pour ce cas simple est donnée par (Telford *et al.*, 1990) :

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{(\rho_1 + 2\rho_2)} \left(\frac{a}{z} \right)^3 \frac{2 \frac{x^2}{z^2} - 1}{\left(1 + \frac{x^2}{z^2} \right)^{\frac{5}{2}}}$$

où ρ_a est la résistivité apparente en $\Omega.m$, ρ_1 est la résistivité de l'encaissant en $\Omega.m$, ρ_2 est la résistivité de la sphère en $\Omega.m$, a le rayon de la sphère en mètres et z la profondeur en mètres de son centre par rapport à la surface.

La sphère conductrice présente une anomalie plus forte que la sphère résistante pour un rapport égal de résistivité avec l'encaissant. Si on fixe un seuil de détection à une anomalie significative de 10 % (contour noir sur les figures), la sphère conductrice est détectable jusqu'à une profondeur de toit d'un peu plus de 2 m, tandis que la sphère vide est détectable jusqu'à une profondeur de 1 m environ. On voit sur cet exemple simple qu'une cavité vide ou même conductrice présente des contrastes très faibles de résistivité apparente en mesure électrique (Fig. 65).

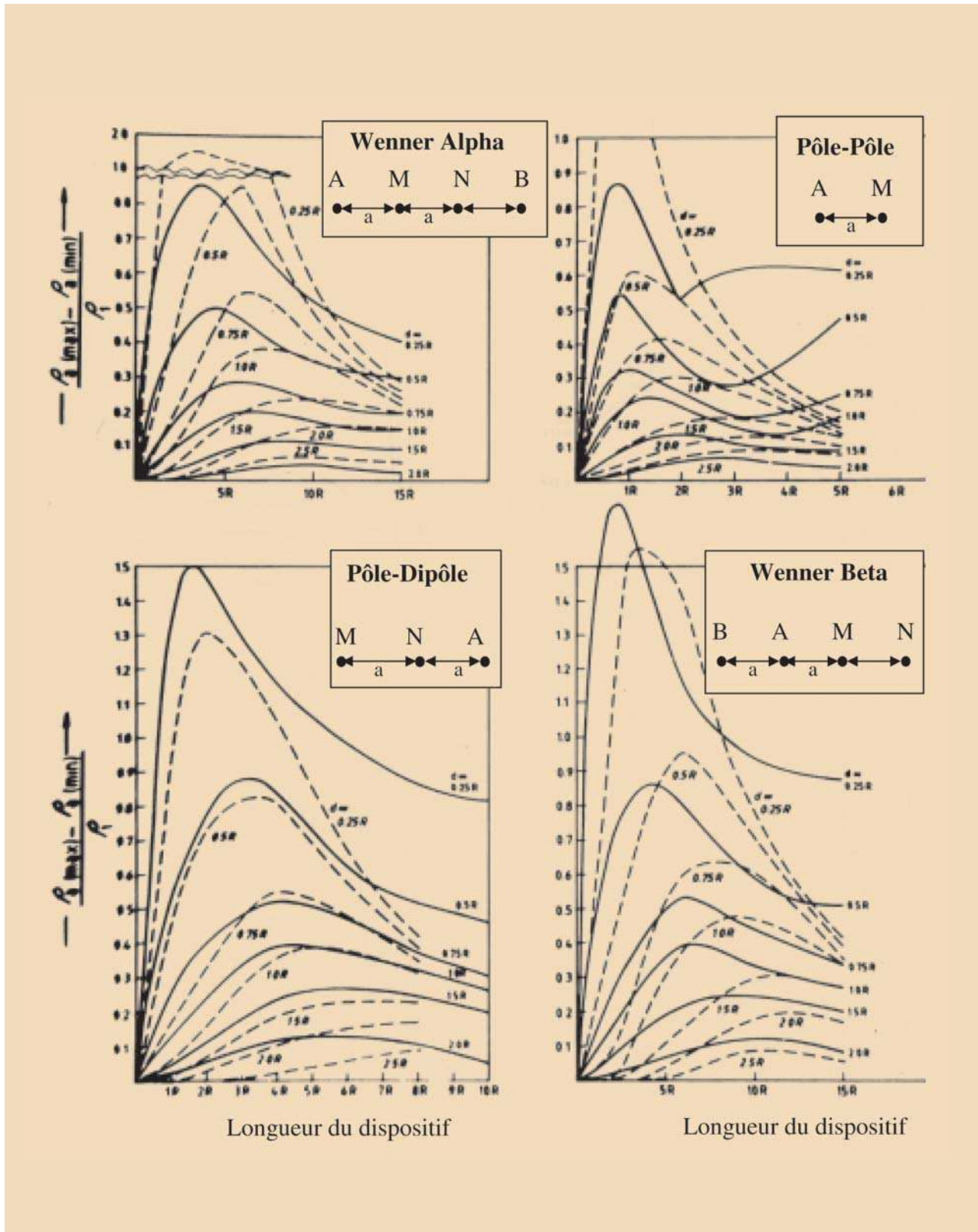


▶▶▶ FIGURE 65 - Exemple de la réponse d'une sphère conductrice et d'une sphère résistante pour un rapport de résistivité de 100 avec le terrain encaissant. Le seuil de détection pour une anomalie significative de 10 % est en contour noir sur les figures.

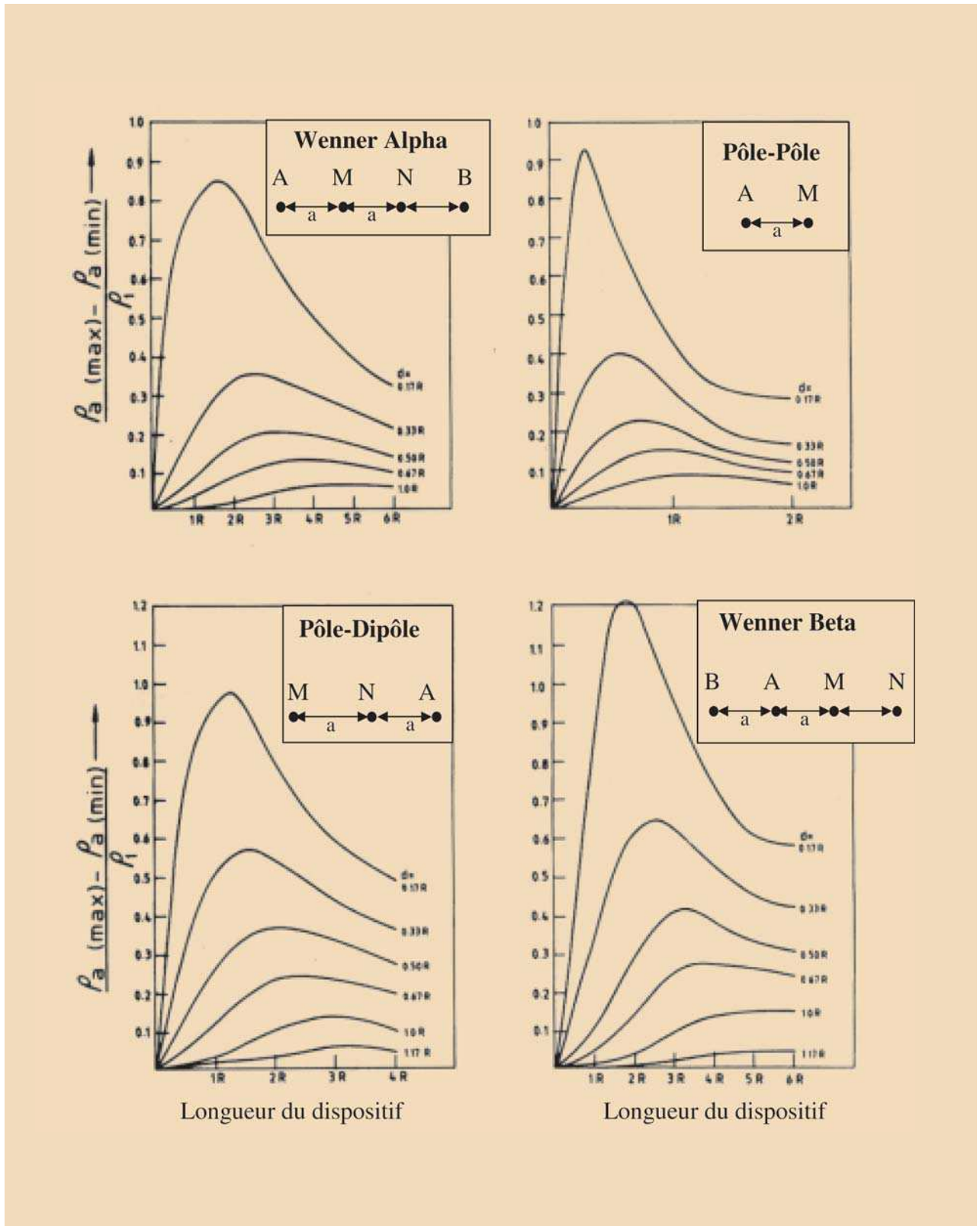
◆ Cas d'un cylindre et d'une sphère en fonction du type de dispositif

Une étude plus générale de (Apparao et *al.*, 1997), présente une synthèse des profondeurs de détection pour quatre dispositifs différents, de longueur L variable, au-dessus d'une cavité sphérique et cylindrique de rayon R.

Le seuil de détection est défini pour une variation de l'anomalie de résistivité apparente de 10 %. Lorsque les électrodes sont alignées et perpendiculaires à l'axe d'un cylindre infiniment résistant de rayon R, la profondeur de détection est de 1,5 R pour un dispositif Wenner Alpha, 1,8 R pour un pôle-pôle, 2,0 R pour un pôle-dipôle et 2,0 R pour un Wenner Béta. Si les électrodes sont parallèles à la direction du cylindre, cette distance est de l'ordre de 2,5 R pour tous les dispositifs (Fig. 66 et Fig. 67).



►►► FIGURE 66 - Courbes de résistivité apparente au-dessus d'un cylindre infiniment résistant de rayon R , pour plusieurs dispositifs. En traits pleins, le dispositif de longueur $L = 1R, 2R$, etc. est perpendiculaire à l'axe du cylindre. En traits pointillés, il est parallèle.



►► FIGURE 67 - Courbes de résistivité apparente au-dessus d'une sphère infiniment résistante de rayon R, pour plusieurs dispositifs.

La profondeur de détection pour une sphère résistante est de 0,8 R pour un dispositif Wenner Alpha, 1 R pour un pôle-pôle, 1,1 R pour un pôle-dipôle et 1,1 R pour un Wenner Béta.

Ces résultats sont résumés dans le tableau IX) :

▶▶▶ **TABEAU IX**

Profondeurs de détection pour différents dispositifs d'une anomalie conductrice ou résistante (cylindre et sphère de rayon R). Le seuil de détection est défini pour une anomalie significative de 10 %

Dispositif	Nature de la cavité	Cylindre horizontal		Sphère
		Parallèle	Perpendiculaire	
Wenner Alpha	Conductrice	1,5 R	9 R	1 R
	Résistante	1,5 R	2,5 R	0,8 R
Pôle-pôle	Conductrice	7 R	10 R	1,5 R
	Résistante	1,8 R	2,5 R	1 R
Pôle-dipôle	Conductrice	6 R	7 R	1,5 R
	Résistante	2 R	2,5 R	1,1 R
Wenner Béta	Conductrice	5 R	6 R	1,5 R
	Résistante	2 R	2,5 R	1,1 R

◆ **Exemple de modélisation : carte de résistivité, inversion**

Le logiciel le plus utilisé en panneau électrique est RES2DINV (Loke, 2002). Une version de démonstration est en libre accès sur internet. Il permet de modéliser des cavités souterraines vides ou remplies de matériaux conducteurs, dans des milieux quelconques. Ce type de logiciel est fondé sur l'hypothèse de la répartition à deux dimensions des résistivités des matériaux qui constituent le sous-sol, alors que les mesures en méthodes électriques englobent un volume à trois dimensions. C'est pourquoi une hétérogénéité constatée sur les résultats inversés peut très bien avoir pour origine une anomalie en surface, et non pas en profondeur.

L'exemple suivant est une modélisation d'une cavité carrée de 1 m de côté, dont le toit est situé à 2 m de profondeur. Une erreur de 5 % est prise en compte sur les résistivités apparentes calculées par le modèle. Du bruit géologique (inclusions de section de 5 à 10 cm conductrices et résistantes) a été ajouté. Le dispositif est de type Schlumberger. La distance entre électrodes est de 1 m. On voit qu'à contraste égal de résistivité, le panneau électrique met mieux en évidence une poche conductrice qu'une poche résistante (Fig. 68).

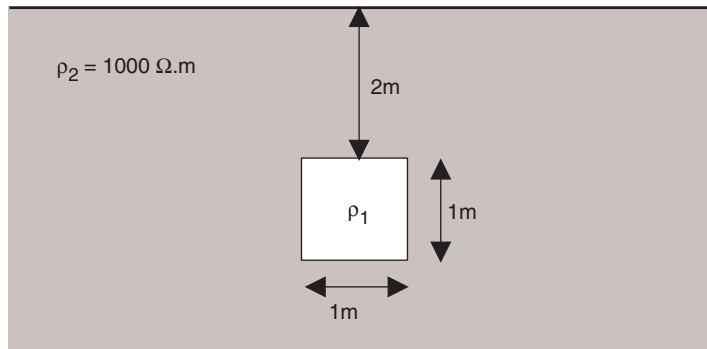
Des méthodes plus élaborées peuvent être consultées dans (Pessel, 2000) : une méthode de modélisation multi-grille permet une résolution rapide du problème direct, et une méthode d'inversion basée sur une résolution multi-échelle, couplant des algorithmes de recuit simulé et de descente du simplexe, améliore nettement les temps de calcul et la résolution du problème.

2.5 Conclusion

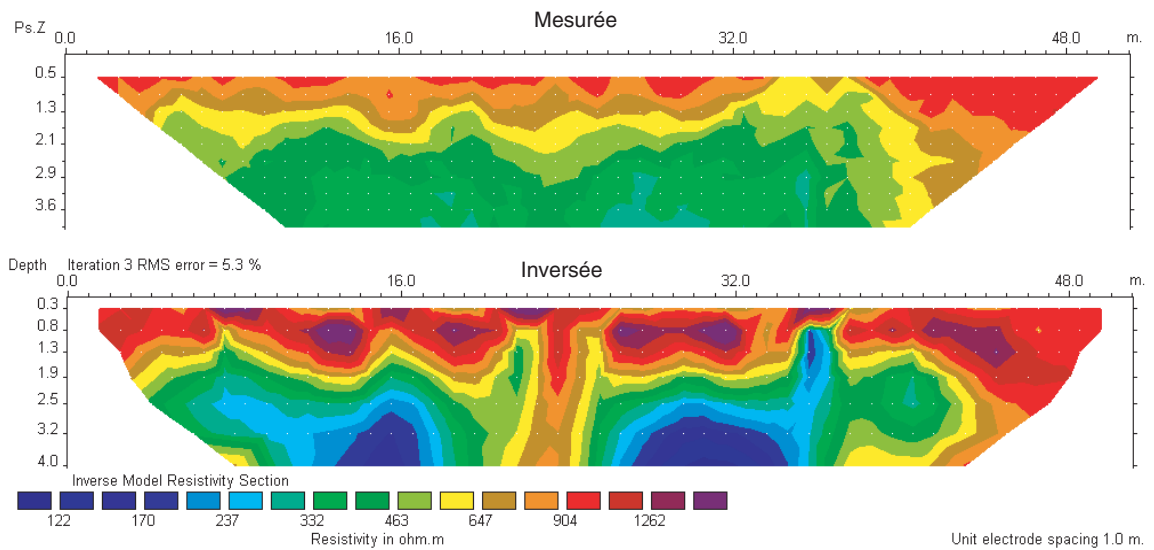
Les méthodes électriques en panneau ne sont pas des méthodes préconisées pour la recherche de vides. À contraste égal avec l'encaissant, une anomalie conductrice est beaucoup plus facilement détectable qu'une anomalie résistante. Ces méthodes permettent de préciser le modèle géologique, en particulier les contacts entre couches, les failles et les pendages. Elles sont utiles dans ce sens pour affiner le modèle géologique et décrire les phénomènes associés à la formation de cavités en milieu karstique. Le rendement de ces méthodes est faible car leur mise en place est longue. L'interprétation sur les mesures brutes est exclue. Elle se fait en terme de résistivité apparente sur les cartes de résistivité inversée. Elle doit être corrélée avec des forages pour être validée.

Modèle de terrain

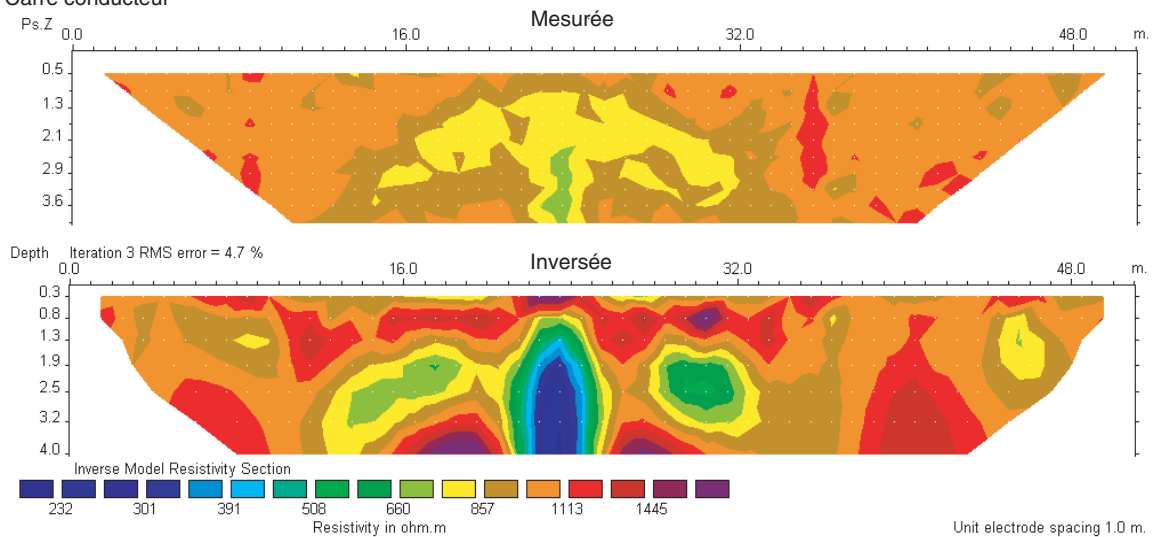
- Carré résistant : $\rho_1 = 100\ 000\ \Omega.m$
- Carré conducteur : $\rho_1 = 10\ \Omega.m$



a) Carré résistant



b) Carré conducteur



►►► FIGURE 68 - Modélisation avec le logiciel Res2Dmod et Res2Dinv (Loke, 2002) d'une cavité carrée (1 m × 1 m), résistante ou conductrice, située à 2 m de profondeur, pour un rapport égal entre l'encaissant et la cavité. La cavité conductrice est bien identifiée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- APPARAO A., SIVARAMA SASTRY R., SUBRAHMANYA SARMA V., *Depth of detection of buried resistive targets with some electrode arrays in electrical prospecting*, *Geophysical Prospecting*, **Vol. 45**, 1997, pp. 365-375.
- BARKER R.D., *Depth investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays*, *Geophysics*, **Vol. 54**, n° 8, 1989, pp. 1031-1037.
- BATAYNEH A.T., AL-ZOUBI A.S., *Detection of a solution cavity adjacent to a highway in Southwest Jordan using electrical resistivity methods*, *Journal of Environmental and Engineering geophysics*, **Vol. 5**, Issue 4, 2000, pp. 25-30.
- BERCHE V., *Méthodes d'investigation géophysique à Laon*, Thème Carrières souterraines 1.38.01.0, 2002.
- DAHLIN T., *On the automation of 2D resistivity surveying engineering and environmental applications*, Thesis of Lund University, 1993.
- EDWARDS L.S., *A modified pseudosection for resistivity an IP*, *Geophysics*, **Vol. 42**, n° 5, 1997, pp. 1020-1036.
- GAUTAM P., RAJ PANT S., ANDO H., *Mapping of subsurface karst structure with gamma ray and electrical resistivity profiles : a case study from Pokhara valley, central Nepal*, *Journal of Applied Geophysics*, **Vol. 45**, 2000, pp. 97-100.
- LOKE M.H., *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*, *Practical guide to 2D and 3D surveys*, 1999-2002.
- MILTZER M., RÖSLER R., LÖSCH W., *Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods*, *Geophysical Prospecting*, **Vol. 27**, 1979, pp. 640-652.
- PALACKY G.J., *Resistivity characteristics of geological targets*, in : M. N. Nabighian (Editor), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Soc. Explor. Geophys., **Vol. 1**, 1991, pp. 53-129.
- PARASNIS D.S., *Principles of applied geophysics*, Chapman and Hall, Fourth edition, 1986.
- PELSEL M., *Tomographie électrique : développements, méthodologie et applications*, Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes, 2000.
- PIRO S., TSOURLOS P.I., TSOKAS G.N., *Cavity detection employing advanced geophysical techniques : a case study*, *European Journal of Environmental and Engineering geophysics*, **Vol. 6**, 1998-1999, pp. 3-31.
- RAHMANI N., *Détection des cavités souterraines par la méthode des résistivités*, thèse de l'Université de Bordeaux I, 1998.
- REYNOLDS J.M., *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley and Sons, 2000.
- ROY A., APPARAO A., *Depth of investigation in direct current methods*, *Geophysics*, **Vol. 36**, n° 5, 1971, pp. 943-959.
- SUMANOVAC F., WEISSER M., *Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological mapping in karst terrains*, *Journal of Applied Geophysics*, **Vol. 47**, 2001, pp. 13-28.
- TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E., *Applied geophysics*, Second Edition, Cambridge University Press, 1990.

Les méthodes électromagnétiques

Notations	
c	est la vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
f	la fréquence (Hz)
ω	la pulsation, $\omega = 2 \pi f \text{ (rad.s}^{-1}\text{)}$
λ	longueur d'onde (m)
k	vecteur d'onde (m^{-1})
ρ_a	résistivité apparente ($\Omega \cdot \text{m}$)
σ_a	conductivité apparente (S.m^{-1})
NI	nombre d'induction
ϵ'_r et ϵ''_r	les permittivités relatives réelle et imaginaire
ϵ'_e et ϵ''_e	les permittivités effectives réelle et imaginaire
ϵ_0	$8.84 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
$\mu_0 =$	$4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

1. GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

1.1 Régime de propagation et régime de diffusion

La prospection géophysique par méthodes électromagnétiques consiste à étudier les propriétés des ondes électromagnétiques et leur interaction avec le terrain. Elles 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 que sont la conductivité (inverse de la résistivité) et la permittivité du matériau. La frontière entre ces deux régimes est définie par une fréquence caractéristique dépendant des propriétés du sol. Elle est la limite en dessous de laquelle les phénomènes de conduction dominent et au-dessus de laquelle les phénomènes de polarisation dominent :

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\rho\epsilon} \text{ [Hz]}$$

où σ ($S.m^{-1}$) est la conductivité du sol, ϵ la permittivité diélectrique, ρ ($\Omega.m$) la résistivité. Pour la plupart des matériaux géologiques, cette fréquence caractéristique se situe entre 10 et 20 MHz.

1.2 Les différentes méthodes électromagnétiques

Si l'on parle des fréquences utilisées pour la prospection et du mode de propagation, on distingue les méthodes basse fréquence et les méthodes haute fréquence.

Si on parle de la distance qui sépare le récepteur de la source électromagnétique, on distingue les méthodes en champ lointain et les méthodes en champ proche.

Si on parle de la nature du champ électromagnétique utilisé, on distingue les méthodes passives et les méthodes actives.

Si on parle du mode de mesure envisagé, de son traitement et particulièrement du type de source utilisée, on distingue les méthodes fréquentielles et les méthodes temporelles.

◆ Méthodes basse fréquence / méthodes haute fréquence

Les méthodes basse fréquence sont basées sur la diffusion des champs. Elles sont sensibles uniquement aux contrastes de conductivité. Les méthodes haute fréquence ou méthodes radar sont basées sur la propagation des champs. Elles sont sensibles principalement aux contrastes de permittivité. Entre 100 kHz et 10 MHz, les deux phénomènes coexistent : une méthode électromagnétique fonctionnant dans cette bande est sensible à la fois aux contrastes de conductivité et de permittivité.

◆ Méthodes en champ proche / méthodes en champ lointain

Les méthodes en champ proche sont des méthodes pour lesquelles on travaille à moins d'une longueur d'onde de la source (qui est une source contrôlée), et où le champ primaire varie très rapidement. Les réponses sont donc très dépendantes 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 forage, etc.
- les méthodes à émetteur mobile : méthodes Slingram (MaxMin, conductivimètres de basse induction ou LIN = Low Induction Number, type EM31, EM34), détecteurs de métaux, méthodes aéroportées.

Les méthodes en champ lointain, dites aussi en ondes planes, sont des méthodes pour lesquelles la distance émetteur-récepteur est supérieure à une longueur d'onde dans le sol, comme les méthodes dites Very Low Frequency (VLF), magnéto-tellurique (MT), radio magnéto tellurique (RMT), audio magnéto tellurique à source contrôlée (CSAMT ou Controlled Source Audio-MT), ou radar, où le champ primaire est localement uniforme et les réponses sont indépendantes de la géométrie de la source et de sa distance.

◆ Méthodes passives / méthodes actives

Les méthodes passives comme la MT ou l'Afmag (mesures aéroportées des composantes magnétiques) utilisent les signaux naturels (courant magnétiques terrestres, solaires, etc.), et les méthodes actives utilisent des sources artificielles, telles que des stations de radio pour la RMT ou le VLF, ou bien des boucles de courant, éventuellement mises à la terre comme pour la CSAMT.

◆ Méthodes fréquentielles / méthodes temporelles

La méthode fréquentielle consiste à observer les phénomènes électromagnétiques à une fréquence particulière (onde monochromatique) 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 (encore appelée « pulse », fonction d'Heaviside ou « step ») et d'observer l'interaction en terme de temps et d'amplitude comme pour les méthodes sismiques. En réalité, plutôt que de méthodes, il s'agit de domaines de description des phénomènes : le domaine temporel et le domaine fréquentiel. Le passage de l'un à l'autre se fait classiquement par la transformation de Fourier.

◆ Méthodes adaptées pour la détection de cavités

La combinaison entre chacune de ces descriptions est possible, c'est pourquoi il existe un très grand nombre de matériels et de méthodes électromagnétiques dédiées à la prospection du sous-sol. Il est difficile d'être exhaustif : les méthodes électromagnétiques en surface les plus courantes, qui ont déjà permis la détection de cavités souterraines, sont présentées ici. Ce n'est pas pour autant que les méthodes non décrites sont à éliminer. Par ailleurs les méthodes présentées répondent aux critères suivants :

- faible encombrement du dispositif : le dispositif de mesure est portable à dos d'homme ou tractable derrière un véhicule,
- haut rendement : profils de plusieurs kilomètres par jour, nécessitant un ou deux opérateurs.

Ainsi, les méthodes prédominantes sont :

- d'une part les méthodes basse fréquence en champ proche (type Slingram) et en champ lointain (type VLF) dont la source est active et pour lesquelles les phénomènes sont mesurés dans le domaine fréquentiel,
- d'autre part les méthodes haute fréquence en champ lointain (radar) dont la source est active et pour lesquelles les phénomènes sont mesurés dans le domaine temporel.

Les méthodes basse fréquence en champ lointain décrites ici sont les méthodes appelées VLF et RMT : ces méthodes sont nées avec les télécommunications par l'utilisation opportune et astucieuse des ondes radio dédiées initialement à des applications militaires et civiles, la fréquence de fonctionnement de ces émetteurs étant considérée ici comme ponctuelle.

Les méthodes basse fréquence en champ proche sont les méthodes à deux boucles (solénoïdes) ou Slingram. Les méthodes type Sundberg, Turam ou CSAMT présentent aussi une source mono fréquentielle, en générale fixe, et un dispositif récepteur mobile, mais le tout reste encombrant et coûteux pour les applications envisagées ici. Par ailleurs, il existe des méthodes temporelles basse fréquence (Transient field methods ou Time-Domain Electromagnetic Methods (TDEM)). Elles sont rarement utilisées pour la recherche de cavités en génie civil.

Enfin, les méthodes haute fréquence en champ lointain sont essentiellement les méthodes radar, dont les mesures sont conduites dans le domaine temporel. La source est un générateur d'impulsions (de l'ordre de la nanoseconde) émise à travers une antenne. La réception se fait par cette même antenne (cas monostatique) ou par une autre antenne (cas bistatique), ou par plusieurs autres antennes (cas multistatique). Les matériels expérimentaux (analyseur vectoriel de spectre et antennes) avec lesquels les mesures sont conduites dans le domaine fréquentiel ne sont pas abordés ici.

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.

La première utilise les émetteurs militaires destinés à la radiocommunication sous-marine dans la gamme de fréquences 10-30 kHz (la gamme VLF en radio s'étend de 3 à 30 kHz).

La seconde exploite les mêmes émetteurs et les émetteurs commerciaux de radio sur la bande 10 kHz-1 MHz environ.

2.1 Principe

◆ Champ primaire et champ secondaire

Les émetteurs sont considérés comme lointains, de telle sorte que les ondes électromagnétiques reçues au point de mesure sont planes. Ces ondes se propagent à la surface du sol. En présence d'une anomalie conductrice ou résistante, le champ induit est modifié en surface. Trois phénomènes interviennent (Chouteau, 2001) (Fig. 69) :

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

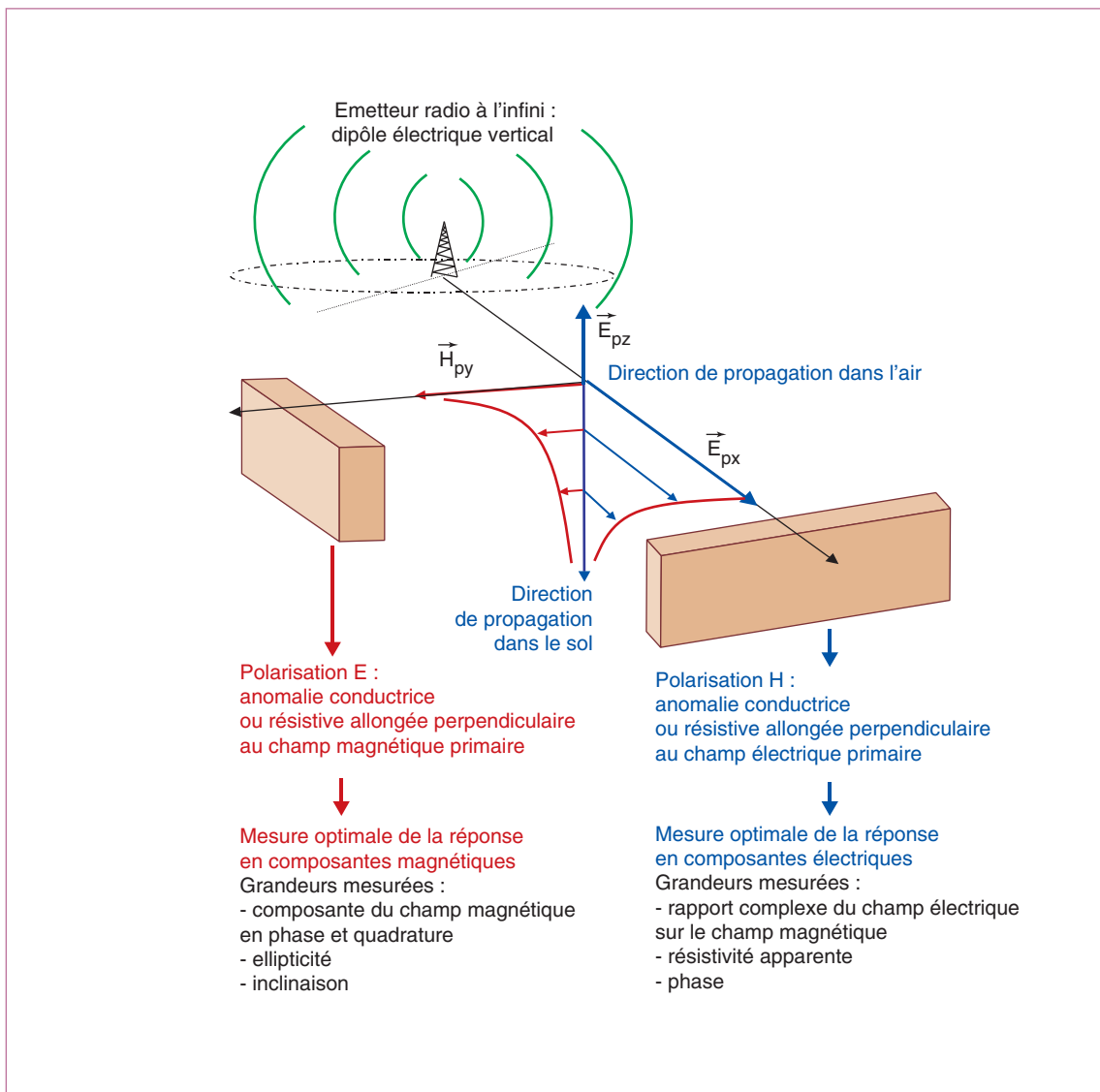
- ce champ induit des courants (courants de Foucault) dans le sol,
- ces courants sont modifiés par la présence d'hétérogénéités (Fig. 70 et Fig. 71).

Pour une hétérogénéité 3D bornée, deux mécanismes complémentaires peuvent intervenir (West et Macnae, 1991) et (Bourgeois, 2000) :

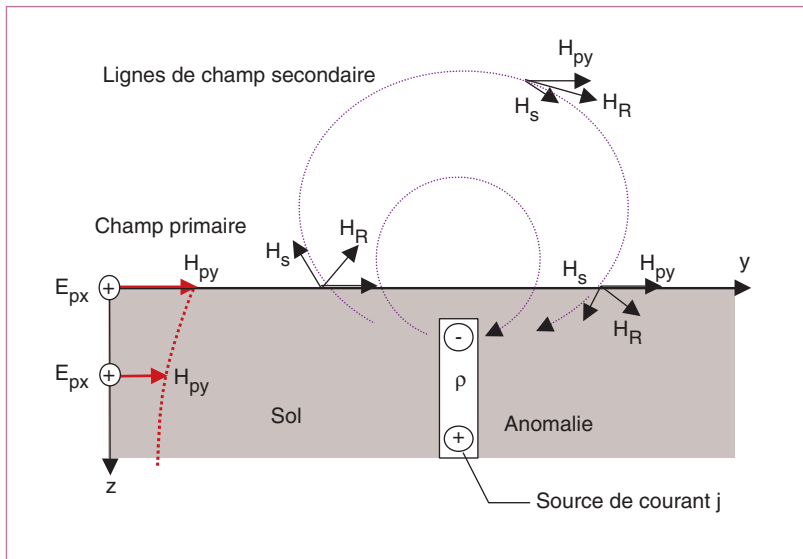
1 - *un effet d'induction*, produit par le flux du champ magnétique primaire à travers l'hétérogénéité (loi de Faraday). Cet effet est généralement qualifié *d'effet vortex*, car il génère des courants de Foucault tourbillonnaires à l'intérieur du corps. Il n'existe que pour un corps conducteur.

2 - *un effet statique*, produit par la déviation par l'hétérogénéité des courants de Foucault induits dans le milieu hôte ; cet effet est qualifié *d'effet galvanique*, car il est identique dans son principe aux méthodes électriques. La déviation des courants est une concentration des courants vers l'intérieur du corps si ce dernier est relativement conducteur, ou au contraire un contournement autour du corps si ce dernier est relativement résistant.

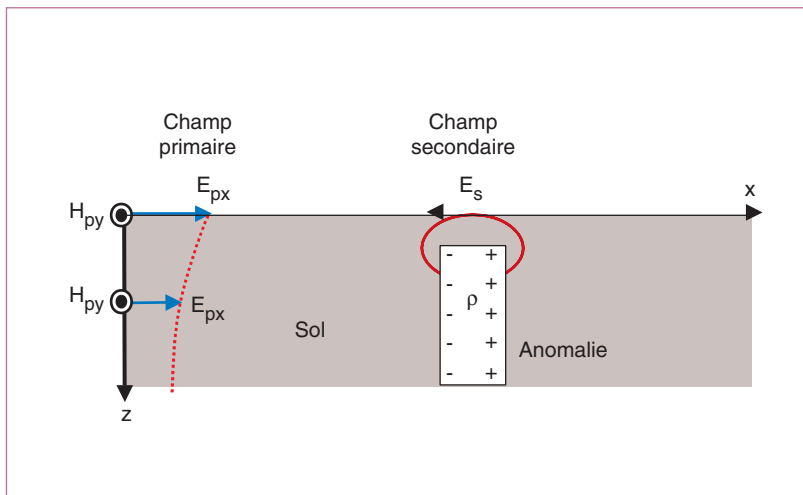
~~~~~ **Remarque** : Les méthodes d'onde plane fonctionnent essentiellement par l'effet galvanique, (Mc Neil et Labson, 1991, pp. 576-577). Il n'y a que dans les milieux encaissants très résistants ( $> 10^4 \Omega.m$ ) que l'effet vortex prédomine. Ces méthodes sont donc comparables aux méthodes électriques en courant continu. À ce titre elles sont sensibles non seulement à la présence d'objets conducteurs, mais aussi à celle d'objets résistants. ~~~~~



▶▶ FIGURE 69 - Principes des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain, polarisations et modes de mesure.



►►► **FIGURE 70**  
Polarisation E : champ magnétique secondaire créé par une anomalie conductrice allongée perpendiculaire au champ magnétique primaire.



►►► **FIGURE 71**  
Polarisation H : champ électrique secondaire créée par une hétérogénéité conductrice recoupant le champ électrique primaire.

◆ **Polarisation**

Enfin la réponse d'une anomalie dans le sol dépend de son allongement par rapport à la direction du champ primaire. On distingue ainsi :

- la *polarisation H* pour laquelle le champ magnétique primaire est parallèle à l'allongement de l'hétérogénéité. La réponse du corps se manifeste essentiellement par son effet statique,
- la *polarisation E* pour laquelle le champ magnétique primaire est perpendiculaire à l'allongement de l'hétérogénéité. La réponse du corps se manifeste par la création d'un champ électromagnétique secondaire, dont on mesure les composantes magnétiques verticales, en phase et en quadrature avec la composante horizontale, à l'aide de boucles au-dessus du sol.

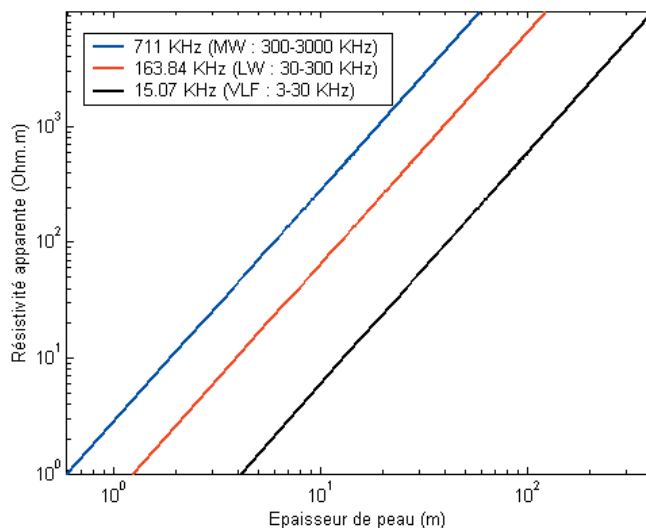
◆ **Épaisseur de peau**

Une notion importante est l'épaisseur de peau (profondeur de pénétration des ondes)  $\delta$  (Fig. 72), profondeur pour laquelle l'amplitude des champs est divisée par  $e \sim 2.718$  ; elle vaut :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0 f}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

On considère généralement que la profondeur d'investigation des méthodes basse fréquence en onde plane est égale à la moitié de l'épaisseur de peau.





▶▶▶ **FIGURE 72**  
Profondeur de pénétration en fonction  
de la résistivité apparente pour quelques  
fréquences usuelles.

#### ◆ Grandeurs mesurées en mode inclinaison : VLF-EM

Le « mode inclinaison » (encore appelé VLF-EM ou VLF-Z) est le mode dans lequel on mesure la composante magnétique verticale  $H_z$  et la composante magnétique horizontale  $H_y$  perpendiculaire à la direction de l'émetteur. Il est particulièrement adapté à la prospection d'hétérogénéités conductrices 2D ou 3D allongées sensiblement dans la direction de la source. Les mesures sont alors pratiquées sur des profils perpendiculaires à cette direction.

Les appareils VLF fonctionnant dans ce mode utilisent deux (parfois trois) bobines réceptrices perpendiculaires qui mesurent respectivement la composante horizontale et la composante verticale du champ magnétique : on mesure en fait le rapport complexe  $H_z/H_y$ .

#### ◆ Résultats attendus en mode inclinaison

Ces données permettent de calculer les paramètres dérivés suivants :

1 - *L'amplitude du champ magnétique vertical*, exprimée en pour cent du champ horizontal de référence, en fonction de la distance le long d'un profil. Cette composante est purement anomalique. La juxtaposition de plusieurs profils permet de représenter les mesures en cartes de couleur, graduées en fonction du rapport  $H_z/H_y$  (cf. Fig. 77).

2 - *La phase* de ce même champ par rapport au champ horizontal de référence, en fonction de la distance le long d'un profil.

3 - *L'inclinaison* (le tilt) du grand axe de l'ellipse de polarisation, et *l'ellipticité*, rapport du petit axe sur le grand axe de l'ellipse, en fonction de la distance le long d'un profil.

La résistivité apparente peut être recalculée en fonction de ces grandeurs.

#### ◆ Grandeurs mesurées en mode résistivité : VLF-R et RMT

Le mode électrique-magnétique ou « mode résistivité » (encore appelé VLF-R) permet de mesurer le champ électrique horizontal radial et le champ magnétique horizontal perpendiculaire.

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

#### ◆ Résultats attendus en mode résistivité

Ce rapport donne accès aux paramètres suivants :

1 - *La résistivité apparente* (en  $\Omega.m$ ), par la formule de Cagniard (Cagniard, 1953), représentée le long d'un profil. La juxtaposition de plusieurs profils permet de représenter les mesures en cartes de couleur graduées en fonction de la résistivité apparente (cf. Fig. 78).

La formule de Cagniard permet d'obtenir la résistivité apparente  $\rho_a$ , égale à la résistivité d'un sol homogène équivalent au sol vrai (c'est-à-dire rendant compte des mesures de E et de H) :

$$\rho_a = \frac{1}{2\pi\mu_0 f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}$$

$\mu_0$  étant la perméabilité magnétique du vide,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  (H.m<sup>-1</sup>), et f (Hz) la fréquence radio utilisée.

2 - La *phase* du champ électrique par rapport au champ magnétique.

Quand le sol est homogène, la résistivité apparente est égale à la résistivité vraie. La phase  $\phi$  est égale à 45°. Toute autre valeur révèle la présence d'une hétérogénéité : une phase inférieure à 45° implique une succession conducteur sur résistif et une phase supérieure à 45° implique une succession résistif sur conducteur.

#### ◆ Corrections des mesures en mode résistivité : verticalisation et invariants

La polarisation du champ primaire introduit une anisotropie qui se manifeste par un allongement de l'anomalie de résistivité apparente mesurée dans une direction perpendiculaire au champ électrique primaire. Deux solutions sont envisageables pour corriger cet effet :

1 - Lorsqu'un seul émetteur est disponible, la *verticalisation* du champ électrique  $E_x$  (Tabbagh et al., 1991) permet d'obtenir des cartes de résistivité qui décrivent plus justement la répartition des corps dans le sol.

2 - L'utilisation de *deux émetteurs orthogonaux aux fréquences proches* est préférable. On montre alors (Guérin et al., 1994) qu'il est préférable de calculer l'un ou l'autre des deux invariants suivants :

$$\rho_{inv1} = \left( \frac{\sqrt{\rho_{a1}} + \sqrt{\rho_{a2}}}{2} \right)^2 \quad \text{ou} \quad \rho_{inv2} = \sqrt{\rho_{a1}\rho_{a2}}$$

où  $\rho_{a1}$  est la résistivité apparente mesurée avec l'émetteur 1,  $\rho_{a2}$  est la résistivité apparente mesurée avec l'émetteur 2, et où l'émetteur 1 et l'émetteur 2 sont orthogonaux. Ce traitement double le temps d'intervention mais permet d'affiner la qualité et l'interprétation des résultats. De plus des mesures menées avec des émetteurs à 70° et 50° ont montré que le calcul des invariants donnaient encore de bons résultats.

#### ◆ Résultats attendus : détection de cavités par méthodes électromagnétiques basse fréquence

Les cavités conductrices seront plus aisément mises en évidence par le mode inclinaison, d'autant plus qu'elles seront allongées dans la direction du champ électrique (polarisation E). De manière générale, il faut compter sur un contraste d'au moins 10 % entre la résistivité de la cavité et celle du matériau environnant pour avoir une anomalie significative. La synthèse de (Benderitter, 1997) présente les cas favorables à la détection de structures karstiques, en particulier les structures karstiques de dimensions décamétriques en hauteur et métriques en largeur, avec extension vers le haut proche de la surface, contenant un milieu argileux et sableux plus conducteur que le milieu environnant.

Pour des cavités vides, l'effet galvanique étant prédominant (sauf cas particulier énoncé plus haut), les lignes de courant primaire dans le terrain hôte sont déviées le long des parois. On observe alors une augmentation du champ électrique en surface, et donc une augmentation de la résistivité apparente. Cet effet est d'autant plus important que la cavité est allongée perpendiculairement au champ électrique primaire (cas de détection de tunnel (Ogilvy et al., 1991)), que la cavité présente une extension verticale vers la surface (cas des catiches détectées (Dupis, 1977)) ou que la cavité est de type faille verticale karstique pouvant déboucher sur des vides (Bosch et Gurk, 2000).

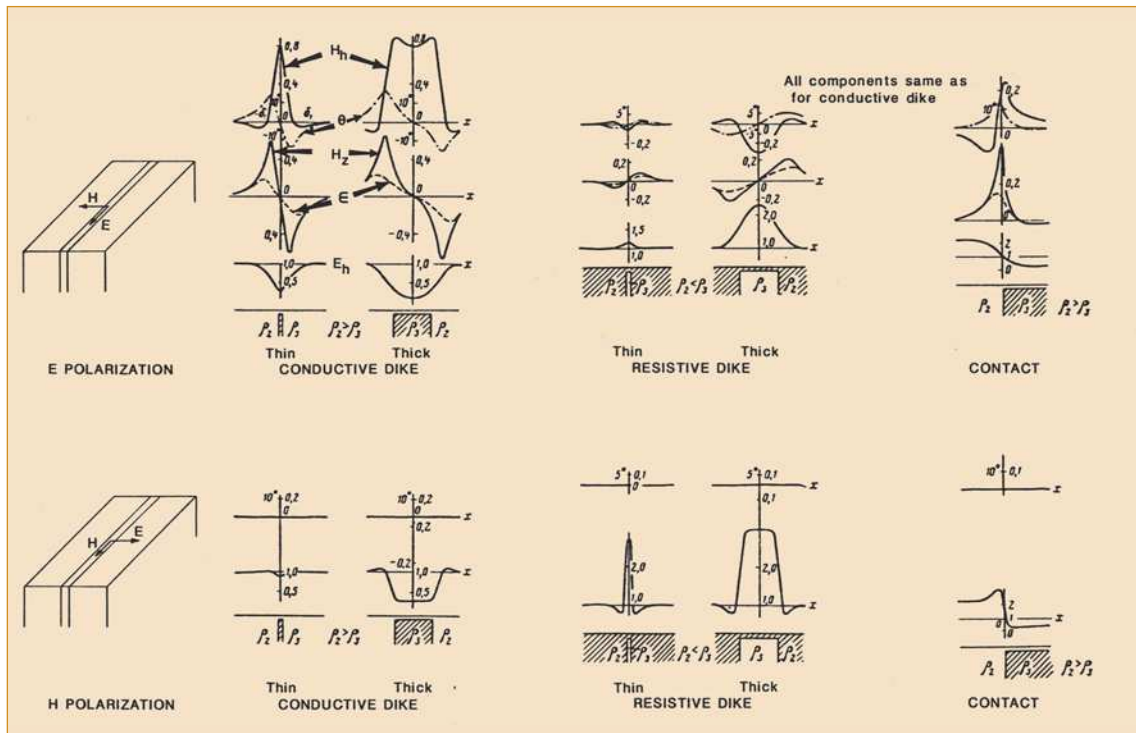
### Détection de cavités conductrices

Les cavités conductrices (milieu karstique) peuvent être mises en évidence en mode inclinaison (VLF-EM ou VLF-Z), d'autant mieux qu'elles présentent une structure allongée parallèle au champ électrique primaire (polarisation E), avec une extension verticale proche de la surface.

### Détection de cavités vides

Les cavités vides peuvent être mises en évidence en mode résistivité (RMT ou VLF-R), d'autant mieux qu'elles présentent une structure allongée perpendiculaire au champ électrique primaire (polarisation E) et une extension verticale vers la surface.

Ces remarques sont synthétisées sur la figure 73 qui représente les variations des champs électriques et magnétiques en phase et en quadrature en fonction des polarisations E et H, pour des anomalies résistantes et conductrices.



►►► FIGURE 73 - Représentation qualitative des réponses en phase et en quadrature des champs électriques et magnétiques au-dessus d'anomalies conductrices et résistantes en fonction du mode de polarisation (Mc Neill et Labson, 1991).

## 2.2 Méthodologie

### ◆ Domaine d'application

De manière générale, ces méthodes s'appliquent pour 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 aussi bien pour des cibles conductrices ou résistantes.

Pour la recherche de cavités, ces méthodes permettent d'imager une zone karstique, pour déterminer des poches conductrices pouvant déboucher sur des vides (VLF-EM), ou des vides proches de la surface (profondeur < 5 m) (RMT).

Ces zones 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).

Les vides sont d'autant mieux mis en évidence s'ils présentent une structure allongée perpendiculaire au champ électrique primaire et une extension verticale vers la surface (polarisation H).

Dans tous les cas, les informations recueillies seront *essentiellement qualitatives* et exigeront une campagne de sondages pour être interprétées.

### ◆ Déroulement d'une campagne de mesures

Tout d'abord, il faut s'assurer de la bonne réception des fréquences radio. L'idéal est de disposer de *deux émetteurs* dont les directions des champs sont *perpendiculaires* entre eux sur la surface étudiée, pour pouvoir conduire les mesures selon les deux modes de *polarisation E et H*. En mode résistivité on peut alors calculer les invariants de résistivité.

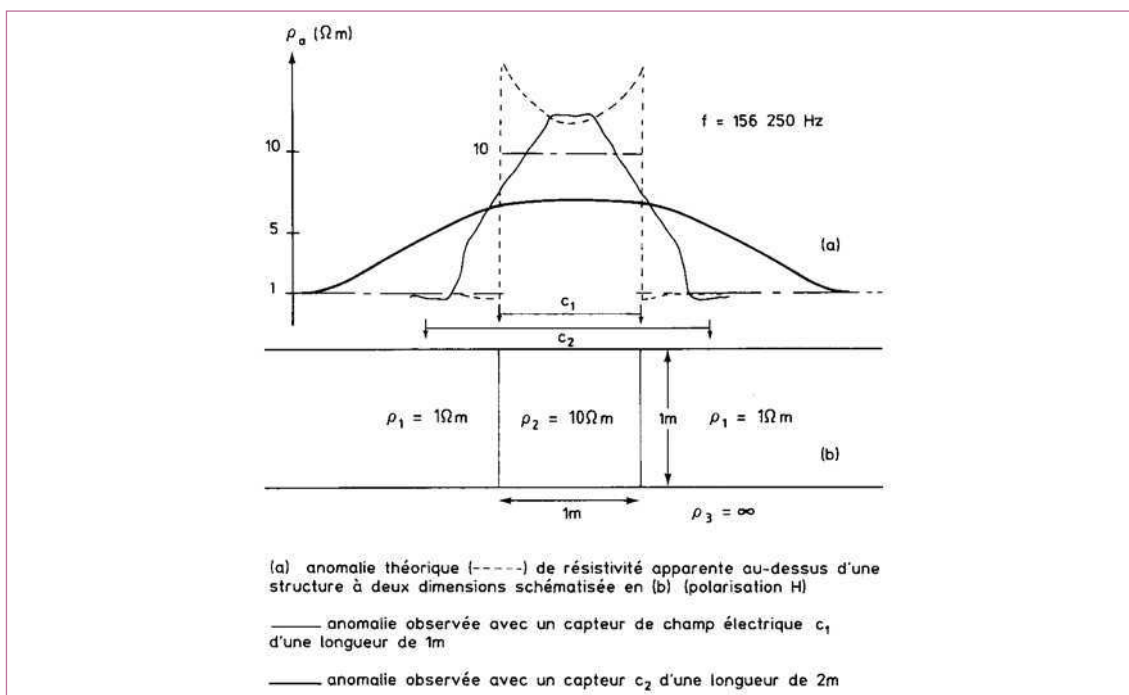
En fonction des informations des études préliminaires, une modélisation des cavités recherchées permettra de fixer l'ordre de grandeur des paramètres de mesure et les fréquences susceptibles d'atteindre les cavités. La maille de mesure est généralement de l'ordre de 3 à 5 m.

#### En mode inclinaison

Les appareils à triples bobines aujourd'hui disponibles, portables sur le dos par un seul utilisateur, permettent la mesure du tilt, du champ magnétique total (composantes verticales et horizontales) et des caractéristiques de l'ellipse de polarisation, sans se soucier de l'orientation du champ électrique primaire, ni de l'inclinaison des capteurs de champ magnétique pour la mesure de l'ellipticité. La mesure est généralement déclenchée par l'utilisateur aux points repérés sur le profil. Ces mesures peuvent être visualisées *in situ*. Le rendement de ces 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. Pour cela, des systèmes d'orientation automatique peuvent être mis en œuvre (Hollier-Larousse, 1997). Ces électrodes peuvent être piquées dans le sol (Bosch, 2000). Des capteurs capacitifs posés sur le sol, composés par exemple de deux plaques métalliques noyées dans un isolant, permettent de conduire les mesures à plus grand rendement. Ce type de dispositif présente cependant une plus grande sensibilité à la composante du champ électrique  $E_z$  perpendiculaire à la surface : la présence de végétaux et d'irrégularités topographiques perturbent ainsi la qualité des mesures. La distance entre électrodes est choisie en fonction du niveau de détail souhaité (Fig. 74). Le capteur de champ magnétique est orienté dans un plan horizontal (dipôle magnétique horizontal), parallèle à la direction du champ magnétique primaire. Le rendement de cette méthode est de quelques kilomètres par jour (cas d'électrodes piquées dans le sol) à plusieurs dizaines de kilomètres par jour pour des vitesses allant de 4 km/h à 30 km/h.



▶▶ FIGURE 74 - Anomalie de résistivité apparente d'une structure métrique en fonction de la distance entre capteurs (Hollier-Larousse, 1997).

### ◆ Interprétation des mesures

Pour de grands linéaires et suivant les fréquences utilisées, les variations de résistivité apparente oscillent autour d'une variation plus globale, une anomalie régionale, le long des profils résultant de la géologie profonde. Cette anomalie régionale est parfois filtrée pour ne rendre compte que des variations locales de résistivité.

L'interprétation des mesures est essentiellement qualitative. Les mesures en basse fréquence rendent compte des variations de résistivité mais permettent difficilement de caractériser en profondeur et en dimension les structures rencontrées, sauf dans des cas particuliers comme la détermination de l'épaisseur de recouvrement d'une couche conductrice sur une couche résistante.

L'interprétation quantitative se réalise alors à l'aide de sondages mécaniques effectués sur les zones d'anomalies révélées par la mesure. L'analyse de ces sondages conduit à l'interprétation des profils en terme de nature et d'épaisseurs de matériaux. La modélisation et l'inversion des mesures comme dans (Beamish, 2000) et (Ogilvy, 1991), apportent une information qualitative complémentaire. Elles nécessitent cependant une connaissance *a priori* des grandeurs physiques du terrain, comme l'épaisseur de recouvrement de la première couche ou la nature et la profondeur approximative de la cavité.

### ◆ Limites de la méthode

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

Plus le milieu est conducteur (de même, plus la fréquence est élevée), plus la profondeur d'investigation est faible. Lorsque des fréquences proches du MHz sont exploitées, les effets propagatifs non négligeables (polarisation) (Person, 2002) doivent être pris en compte dans l'interprétation.

En général, le nombre de fréquences disponibles sur le terrain ne dépasse pas trois, ce qui limite le choix des profondeurs d'investigation. De plus, il n'est pas toujours possible d'avoir sur la zone d'étude la possibilité de conduire les mesures selon les deux modes de polarisation E et H.

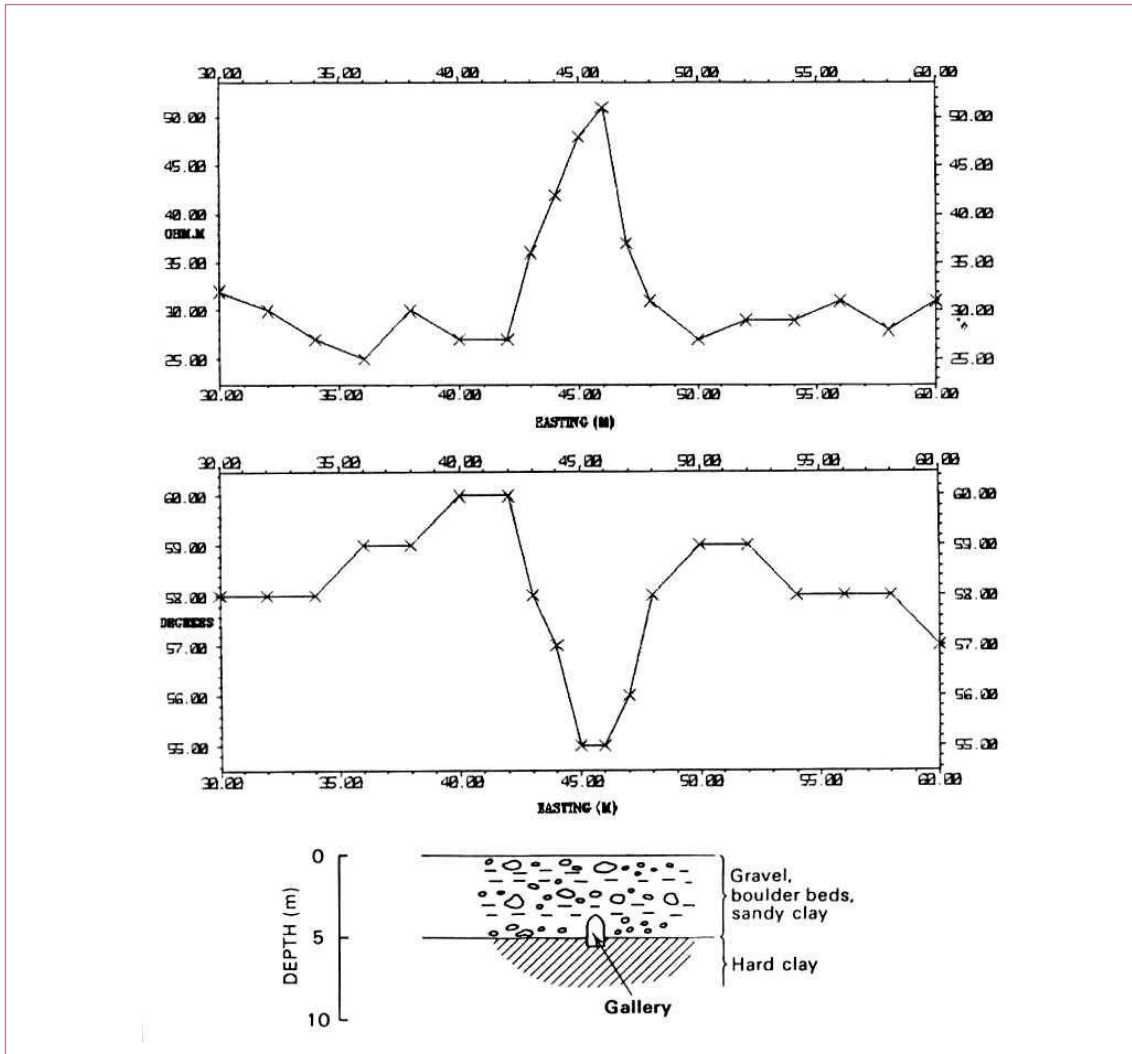
Si un seul émetteur est disponible, il faut savoir que les résultats des mesures ont tendance en mode résistivité à allonger les anomalies perpendiculairement à la direction du champ électrique incident (déformation due à l'effet de polarisation du champ primaire). Si les mesures sont possibles dans les deux modes de polarisation, alors des traitements spécifiques comme la verticalisation du champ électrique (Tabbagh, 1991) permettront d'obtenir des cartes de résistivité apparente mieux corrélées avec la réelle répartition des anomalies dans le sol.

## 2.3 Exemple de mesures

Les résultats présentés sont issus de publications. Les mesures de la figure 75 sont réalisées en mode résistivité au-dessus d'une galerie de 2 m de hauteur et de 1 m de largeur (Ogilvy, 1991) dont le toit est situé à un mètre de profondeur. Le champ électrique primaire est perpendiculaire à la galerie (polarisation H). On notera que le terrain hôte est suffisamment conducteur ( $200 \Omega.m$ ) pour que les courants induits y circulent et contournent les parois (effet galvanique) de la cavité de résistivité infinie : la résistivité apparente (formule de Cagniard) augmente et la phase diminue, indiquant la présence d'une anomalie résistante. La présence connue d'un substratum conducteur ( $10 \Omega.m$ ) permet de conclure à la détection d'un vide souterrain.

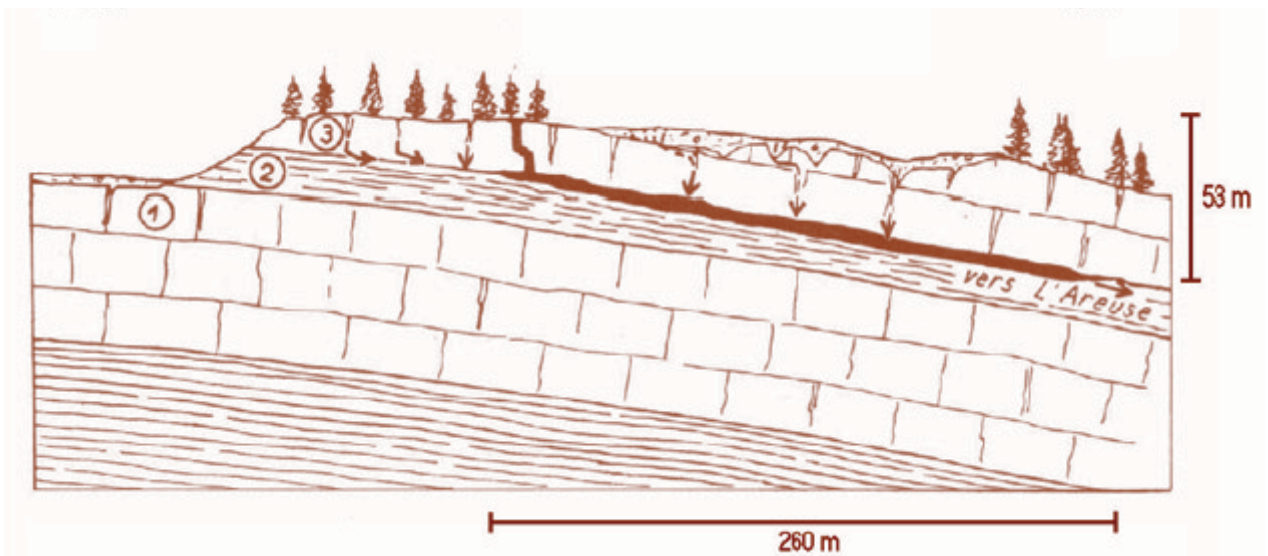
Les deux exemples suivants présentent les mesures réalisées au-dessus d'une zone karstique en mode inclinaison et en mode résistivité (Bosch et Gurk, 2000). La zone explorée est représentée sur la figure 76. Les profils réalisés en mode inclinaison à 234 kHz et 16 kHz et en mode résistivité à 162 kHz et 19.6 kHz sont présentés en carte de couleur sur la figure 77 et la figure 78. Les traits blancs notés I et II sont les zones de fracturation et de karstification connues et constatées sur le terrain. La croix blanche est une cheminée débouchant sur un vide à 12 m de profondeur, mis en évidence lors des mesures. Cette anomalie apparaît clairement sur les profils individuels (Fig. 79) dans les deux techniques de mesure. Aucune des deux méthodes ne détecte la cavité connue, située à une distance de l'ordre de 10 à 20 m suivant la position en surface. En revanche, les extensions verticales remontant en surface (faille de karstification), constatées au sein de la cavité (visitable), sont plus aisément mises en évidence sur les profils.





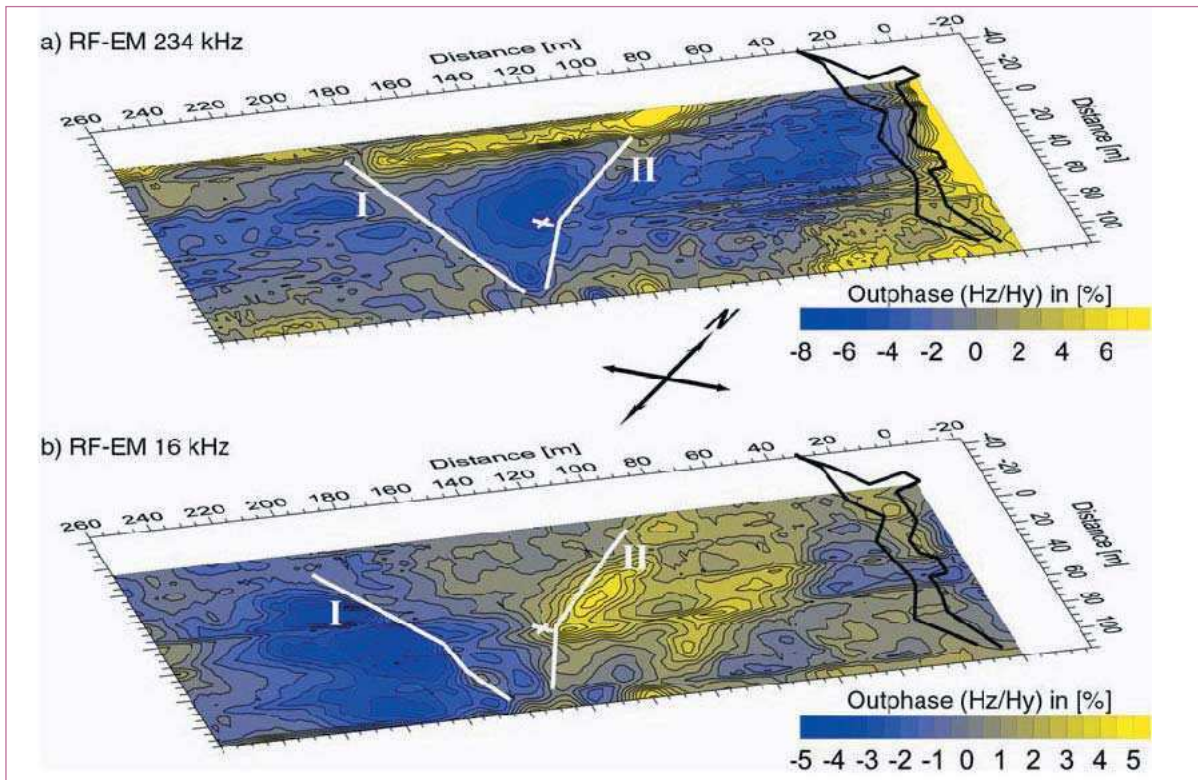
▶▶ FIGURE 75

- a. Mesure de la résistivité apparente dans le cas d'une anomalie allongée perpendiculaire au champ électrique primaire en bleu (polarisation H en mode résistivité).
- b. Mesure du déphasage.
- c. Plan en coupe de la galerie de drainage (1 m × 2 m).



▶▶ FIGURE 76 - Coupe géologique de la cavité « Chez le Brandt » : 1 et 3 calcaire karstifié et 2, marbre (Müller, 1981).

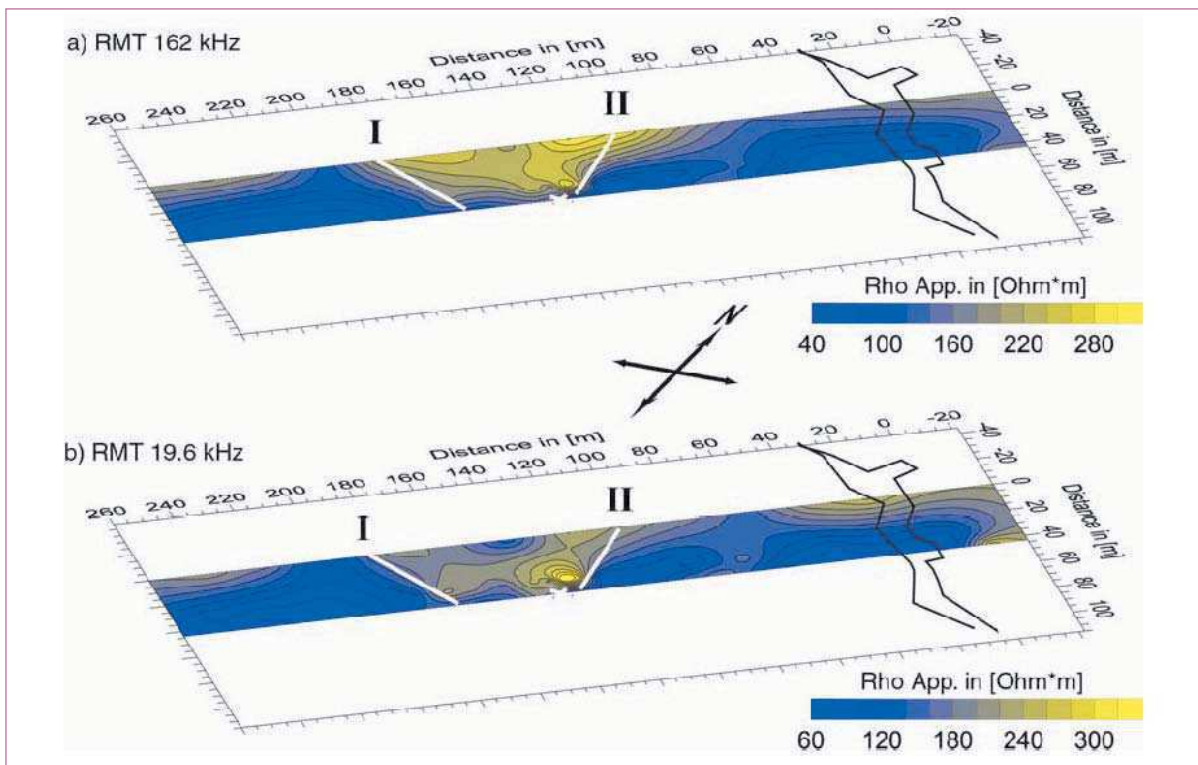




►► FIGURE 77 - Exemple de résultats de mesure avec une méthode VLF en mode inclinaison (RF-EM pour radio fréquence electromagnetic) à :

a. 234 kHz.

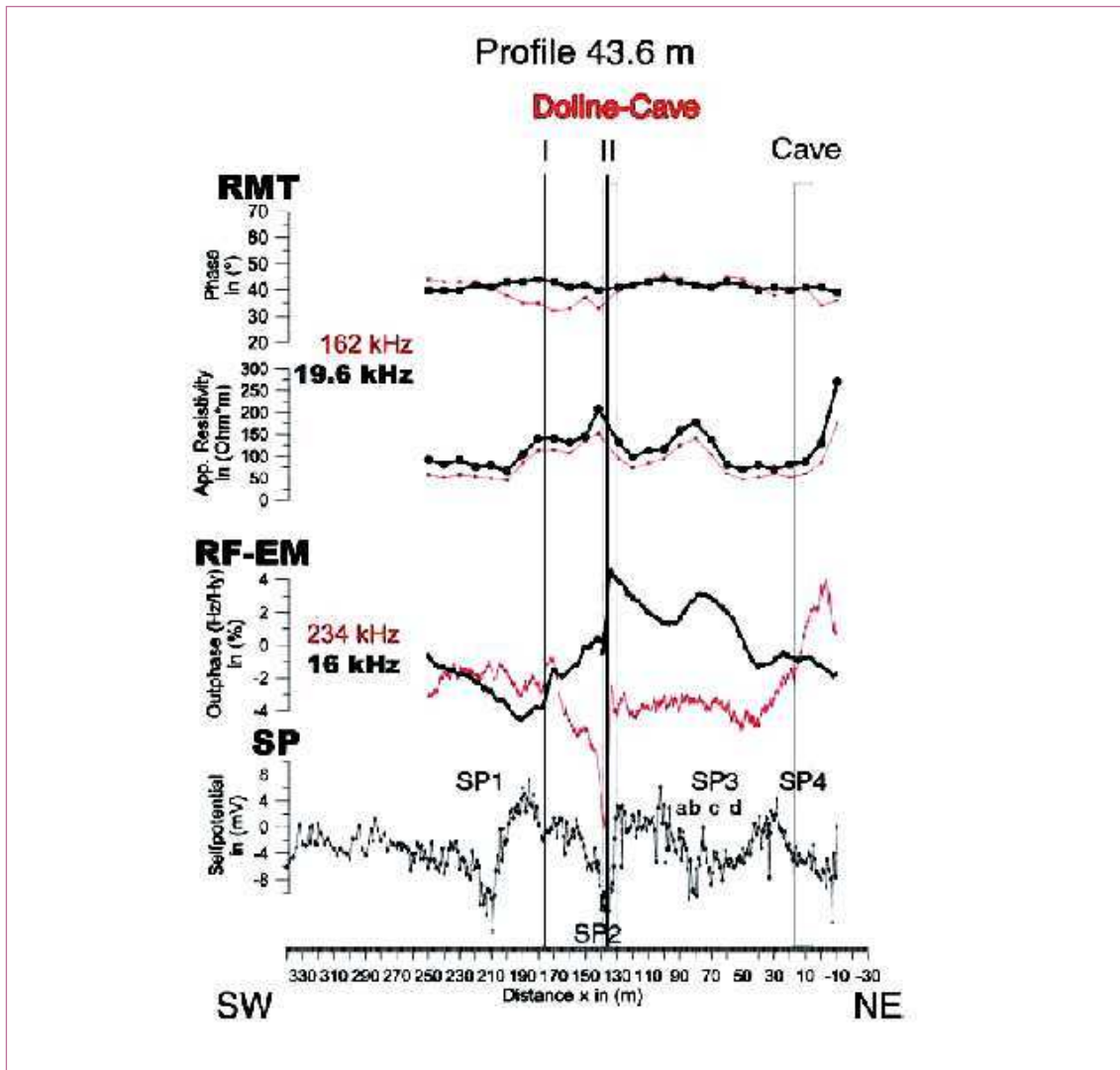
b. 16 kHz au-dessus d'une zone karstique. Les traits blancs délimitent une zone d'anomalie relative à l'activité tectonique du site dont les effets secondaires sont l'apparition de failles karstiques (Bosch et Gurk, 2000).



►► FIGURE 78 - Exemple de résultats de mesure avec une méthode RMT en mode résistivité à :

a. 162 kHz.

b. 19,6 kHz au-dessus d'une zone karstique. Les traits blancs délimitent une zone plus résistante relative à une activité tectonique dont les effets secondaires sont l'apparition de failles karstiques (Bosch, 2000).



▶▶ FIGURE 79 - Profils en mode résistivité et en mode inclinaison à 43,6 m (Bosch, 2000).

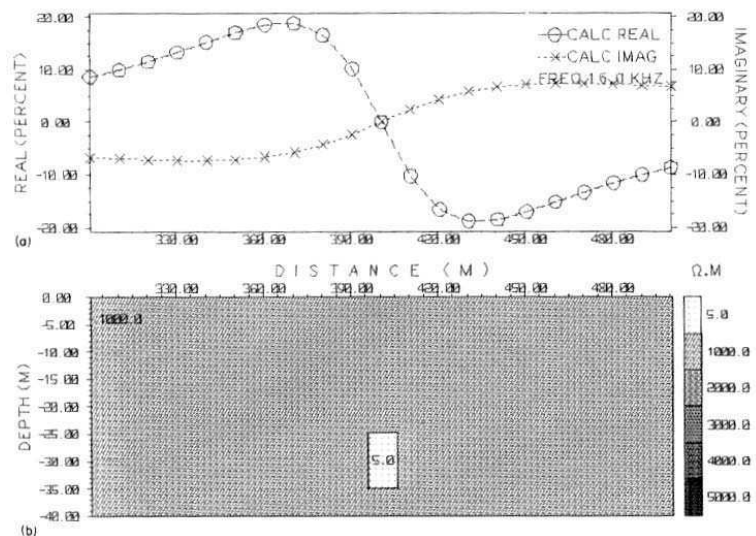
## 2.4 Modélisation

Comme pour les autres méthodes, la modélisation est un outil particulièrement utile à l'interprétation des mesures. Il existe des logiciels permettant d'implémenter rapidement des modèles de terrain et des cavités pour obtenir la réponse en mode inclinaison ou résistivité. Pour la théorie électromagnétique basse fréquence en géophysique appliquée, la référence (Mc Neill et Labson, 1991) est un ouvrage particulièrement complet. Des exemples de modélisation peuvent être trouvés dans (Beamish, 2000), (Ogilvy et al., 1991 ; Ogilvy and Lee, 1991) et (Guérin et al., 1994) et sur la figure 80.

On peut aussi estimer à partir des formules des champs dans un milieu tabulaire, les résistivités apparentes que l'on peut s'attendre à mesurer sur le terrain. On considère l'exemple d'un milieu composé de trois couches. La deuxième est une couche infiniment résistante (vide) de longueur infinie et d'épaisseur  $h_2$ . Le rapport de la résistivité apparente sur la résistivité du premier terrain est donnée par (Lagabrielle, 1986) :

$$\rho_a = \frac{2 \frac{h_2^2}{p^2} + 2 \frac{h_2}{p} e^\theta (\cos \theta + \sin \theta) + e^{2\theta}}{2 \frac{h_2^2}{p^2} - 2 \frac{h_2}{p} e^\theta (\cos \theta + \sin \theta) + e^{2\theta}}$$

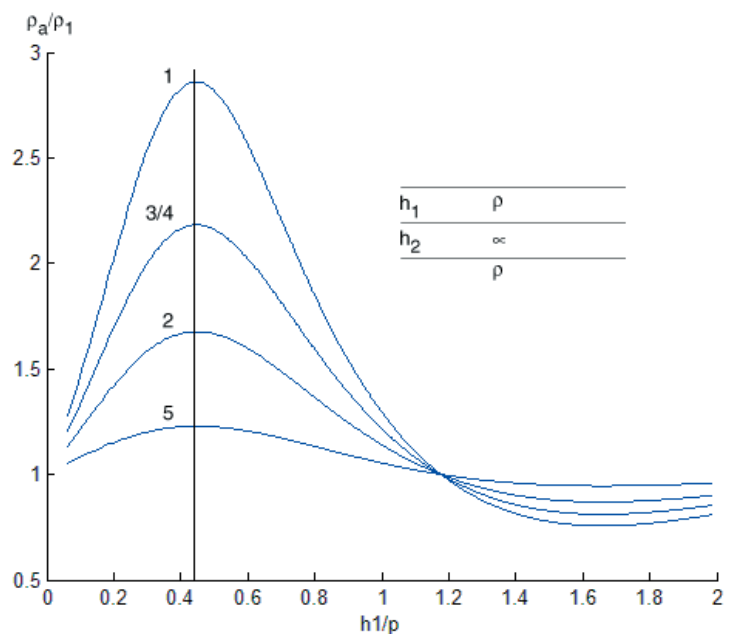
avec  $\theta = 2 \cdot h_1/p$ , et où  $\rho_a$  est la résistivité apparente du milieu,  $\rho$  la résistivité du milieu encaissant,  $h_1$  l'épaisseur de la première couche,  $h_2$  celle de la seconde, et  $p$  la profondeur de pénétration dans le milieu encaissant.



▶▶▶ **FIGURE 80**  
Exemple de modélisation  
d'une cavité conductrice dans un  
milieu résistant en mode VLF-EM  
(Ogily et Lee, 1991).

La représentation de l'anomalie de résistivité est donnée sur la figure 81 pour plusieurs rapports  $h_1/h_2$  en fonction du rapport de la profondeur  $h_1$  du toit de la cavité sur la profondeur de pénétration de l'onde dans le milieu. Il existe une fréquence optimale pour laquelle l'anomalie de résistivité apparente est la plus forte :

$$\frac{h_1}{p} = 0,4$$



▶▶▶ **FIGURE 81**  
Anomalie de résistivité créée par  
une couche vide de longueur infinie  
et de hauteur  $h_2$  (vide), en fonction  
du rapport de la profondeur de son  
toit à la profondeur de pénétration  
de l'onde dans le milieu.

## 2.5 Conclusion

Les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain sont des méthodes adaptées pour la réalisation d'un premier zonage. En zone karstique, le mode tout magnétique (VLF-EM) est le mieux indiqué pour la localisation de poches conductrices (pouvant éventuellement déboucher sur des vides), d'autant plus si elles présentent des extensions verticales vers la surface. Pour la recherche de vides, comme les puits d'accès de certaines carrières ou les vides proches de la surface (< 5 m), le mode résistivité (VLF-R et RMT) est le plus adapté.

La réponse d'une cavité dépend aussi de sa géométrie et de son orientation par rapport au champ primaire. Dans l'idéal, il faudrait conduire les mesures selon deux orientations (polarisation E et polarisation H), à des fréquences proches pour avoir des profondeurs d'investigation équivalentes, et procéder à des traitements spécifiques (verticalisation du champ électrique) afin de décrire au mieux la répartition des matériaux dans le sol.

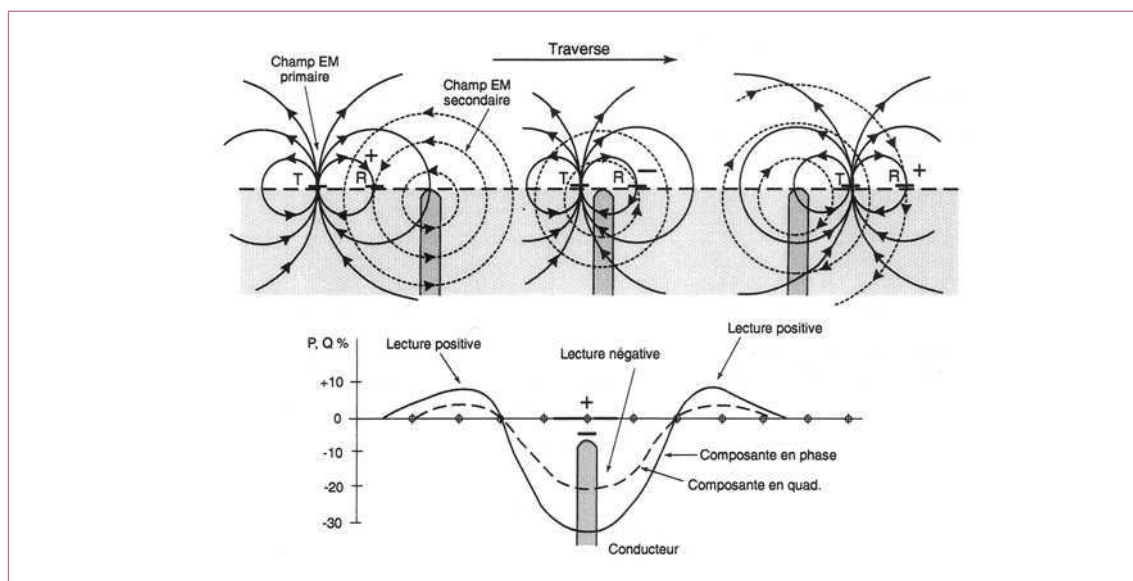
L'interprétation reste essentiellement qualitative et se fait en terme de variation des composantes du champ magnétique ou de contraste de résistivités apparentes. Pour corréler ces mesures avec la présence de cavités, les informations de la recherche d'indices sont essentielles mais insuffisantes. Seuls les sondages mécaniques permettront de mettre en évidence une cavité.

## 3. MÉTHODES BASSE FRÉQUENCE EN CHAMP PROCHE (SLINGRAM)

### 3.1 Principe

#### ◆ Champ primaire et champ secondaire

Les méthodes basse fréquence en champ proche décrites ici, sont des méthodes utilisant comme émetteur et récepteur des dipôles magnétiques (boucles de courant) verticaux ou horizontaux par rapport au sol. La source génère un champ magnétique primaire à une fréquence donnée via une bobine d'induction reliée à une source oscillante (Mc Neil, 1980a ; 1980b). Lorsque le champ primaire rencontre une anomalie conductrice, le champ secondaire, beaucoup plus faible, est modifié (Fig. 82).



▶▶▶ FIGURE 82 - Principe des méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ proche : cas d'un système Slingram à dipôle magnétique horizontal (deux boucles posées sur le sol). La mesure de la composante en quadrature permet de déduire la conductivité apparente (S/m) (inverse de la résistivité apparente ( $\Omega.m$ )) du terrain (Chouteau, 2001).



### ◆ Grandeurs mesurées

C'est la mesure du rapport de la composante du champ secondaire en quadrature au champ primaire qui va permettre de décrire les hétérogénéités conductrices du sous-sol en terme de conductivité apparente (inverse de la résistivité apparente).

Dans le type de dispositif de la figure 82 (cas de dipôles magnétiques verticaux, DMV, ou bobines horizontales HCP), la composante en quadrature est directement proportionnelle au champ secondaire : à une distance séparant l'émetteur du récepteur très inférieure à une longueur d'onde dans le sol, ce champ présente un déphasage de  $90^\circ$  par rapport au champ primaire. Le rapport des champs magnétiques primaire et secondaire en quadrature, est alors directement proportionnel à la conductivité apparente du terrain :

$$\frac{|H_s|}{|H_p|} = \frac{NI^2}{2} = \frac{\pi f \mu_0 \sigma_a s^2}{2} \quad \text{et} \quad \sigma_a = \frac{|H_s|}{|H_p|} \frac{2}{\pi f \mu_0 s^2} = \frac{1}{\rho_a} \quad (\text{S/m})$$

Ces méthodes sont dites à faible nombre d'induction (le facteur de propagation  $k$  à la distance  $r$  est tel que  $|kr| \ll 1$ ). Ce paramètre caractéristique est noté  $NI$  et est défini pour ces méthodes par :

$$NI = s/\delta \quad \text{et} \quad \text{ici} \quad NI \ll 1$$

où  $\delta$  est l'épaisseur de peau définie précédemment et  $s$  la distance émetteur-récepteur.

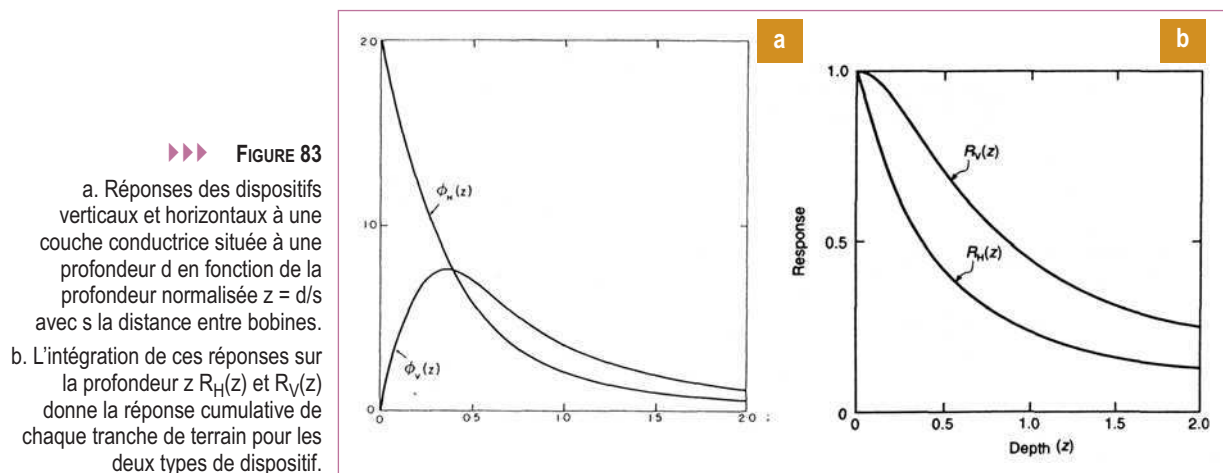
~~~~~ **Remarque** : La profondeur d'investigation annoncée par les constructeurs n'est pas celle définie pour la propagation en champ lointain. Elle est ramenée à la notion de profondeur pour laquelle le dispositif est sensible en champ proche à la présence d'une couche conductrice.

Ce type d'appareil fonctionne généralement avec des fréquences de l'ordre de quelques kHz. Les distances entre bobines (quelques mètres à quelques dizaines de mètres) sont telles que la réponse au champ émis, dans la gamme de résistivité apparente des terrains les plus fréquemment rencontrés, se fait en champ proche (le nombre d'induction NI est tel que $NI \ll 1$). Dans ces conditions, seules la distance s entre bobines et leur orientation par rapport à la surface influent sur la profondeur d'investigation.

Ainsi, pour un dispositif à dipôles magnétiques verticaux (HCP), la réponse du système ($\phi_V(z)$) à la présence d'une couche conductrice située à une profondeur d est maximale pour une profondeur de l'ordre de 0,5 fois la distance s ($z = d/S$) et significative jusqu'à 1,5 s (profondeur d'investigation en mode HCP).

Pour un dispositif à dipôles magnétiques horizontaux (VCP), les couches superficielles contribuent majoritairement à la réponse du système ($\phi_H(z)$) jusqu'à 0,5 s (profondeur d'investigation en mode HCP). Ainsi, une mesure en mode HCP rend compte de la répartition des conductivités apparentes plus en profondeur qu'en mode VCP.

L'intégration des fonctions ϕ en fonction de la profondeur normalisée z donne la réponse cumulative du terrain. Ces courbes permettent aisément d'interpréter les mesures au-dessus de milieux tabulaires lorsque le nombre de couches est connue (Mc Neill, 1980a et 1980b) (Fig. 83).



◆ Résultats attendus : détection de cavités par méthodes en champ proche

Les résultats attendus sont des profils de résistivité apparente ($\Omega.m$) ou moins souvent des profils de conductivité apparente (S/m) en fonction de la distance. La représentation de plusieurs profils parallèles donne une carte de couleurs (ou d'iso valeurs) graduée en fonction de la résistivité apparente. Les coordonnées horizontales et verticales délimitent la surface prospectée (en m).

Détection de cavités conductrices

Ce type de méthode est bien indiqué pour des cavités profondes de 20 à 50 m dans de bonnes conditions de mesures, remplies de matériaux conducteurs ou pour des structures karstiques, et plus particulièrement celles présentant des remontées verticales vers la surface. Des exemples sont reportés par (Vogelsang, 1987).

Détection de cavités vides

Ces méthodes ne sont pas préconisées. La galerie de la figure 75 (1 m \times 2 m à 2,5 m de profondeur) a été testée en méthode Slingram mais n'a pas été détectée (Ogilvy and Lee, 1991) directement. C'est le drainage induit par la galerie au niveau de son toit (et donc une anomalie conductrice) qui a permis de la mettre en évidence.

Évidemment pour les vides peu profonds, il existe de nombreux exemples comme dans (Reynolds, 2000, p. 616). La cavité est plus large que sa profondeur et le milieu hôte est très conducteur. Ainsi, lorsque la profondeur des cavités est connue et lorsque les dimensions du dispositif sont adaptées (distance entre bobine et orientation des dipôles), les méthodes en champ proche peuvent servir à un premier zonage pour localiser les zones résistantes. Un autre exemple est donné sur la figure 85.

3.2 Méthodologie

◆ Domaine d'application

Ces méthodes sont préconisées essentiellement pour la cartographie de zones karstiques en milieu rural et donc pour la recherche de cavités remplies d'un matériau conducteur.

◆ Déroulement d'une campagne de mesure

Comme pour toute méthode, sur une carte géoréférencée, on définit un ou plusieurs profils au-dessus de la zone de prospection. Le choix de la distance entre 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.

Pour les dispositifs portables par un seul opérateur, les profondeurs visées sont alors inférieures à 10 m et le parallélisme entre les deux boucles est continuellement assuré. Pour les dispositifs à un opérateur par boucle les profondeurs visées atteignent 50 m. Les dispositions des boucles l'une par rapport à l'autre, et par rapport au sol sont nombreuses.

La maille adoptée est couramment de l'ordre de 5 m suivant le niveau de détail souhaité. Le rendement de ces méthodes peut être très grand (2 ha/jour suivant une maille carrée de 5 \times 5 m sur un terrain dégagé, en acquisition point par point, pour des dispositifs portable par un seul opérateur, maintenus à une hauteur constante au-dessus du sol (Guérin et al., 2002)).

◆ Interprétation des résultats

L'interprétation des mesures en champ proche reste essentiellement qualitative, sauf pour les milieux tabulaires à deux voire trois couches (exemples d'interprétations lithologiques par 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). Par ailleurs l'anomalie conductrice décrit un phénomène identique à la figure 70, qui se traduit, par une diminution locale du rapport d'amplitude du champ vertical sur le champ horizontal, en phase et en quadrature.

Pour passer à une interprétation quantitative, on a recours à d'autres méthodes géophysique comme les méthodes électriques (Guérin et al., 2002), ou à l'implantation de sondages mécaniques. L'analyse de ces sondages en terme de type de matériau et de profondeur permet d'extrapoler ces propriétés à l'ensemble des profils et apporte une première information quantitative sur l'extension et la profondeur de l'anomalie. Des méthodes de modélisation et d'inversion comme décrit dans

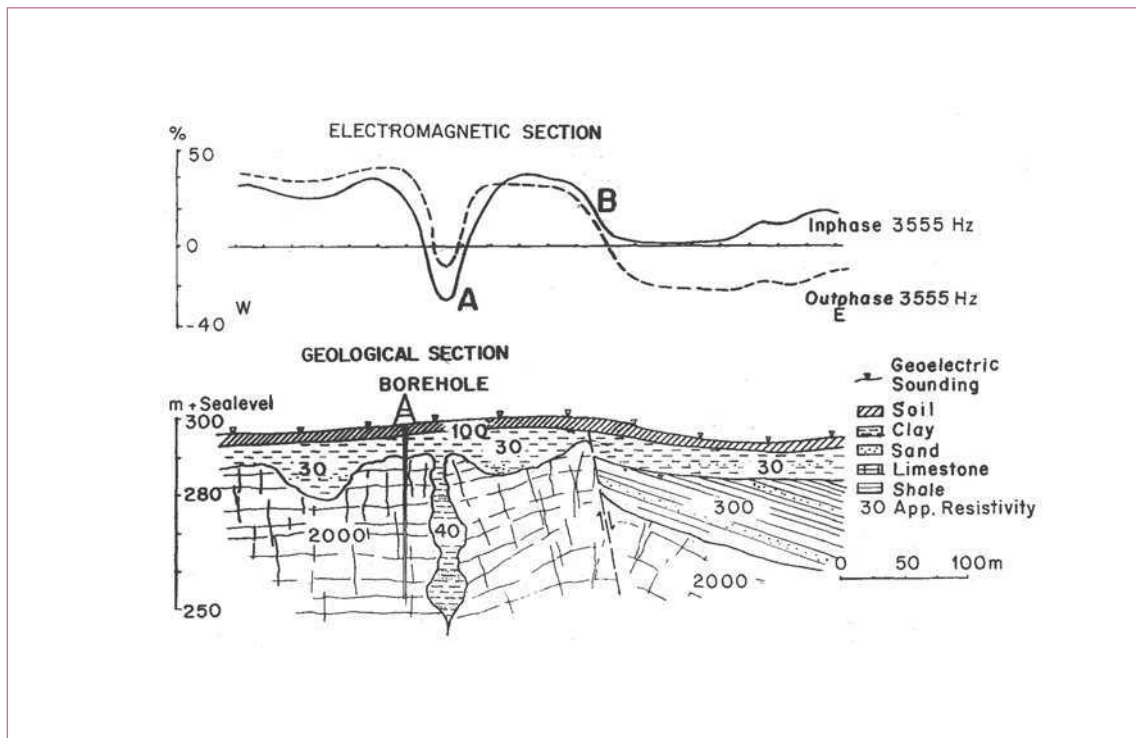
(Ogilvy and Lee, 1991) permettent d'affiner l'analyse des résultats. De manière générale, les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ proche restent plutôt des méthodes de détection d'anomalies conductrices.

◆ Limites de la méthode

Les éléments conducteurs environnants (tuyaux, lignes électriques, câbles métalliques, etc.) sont à prendre en compte dans les mesures.

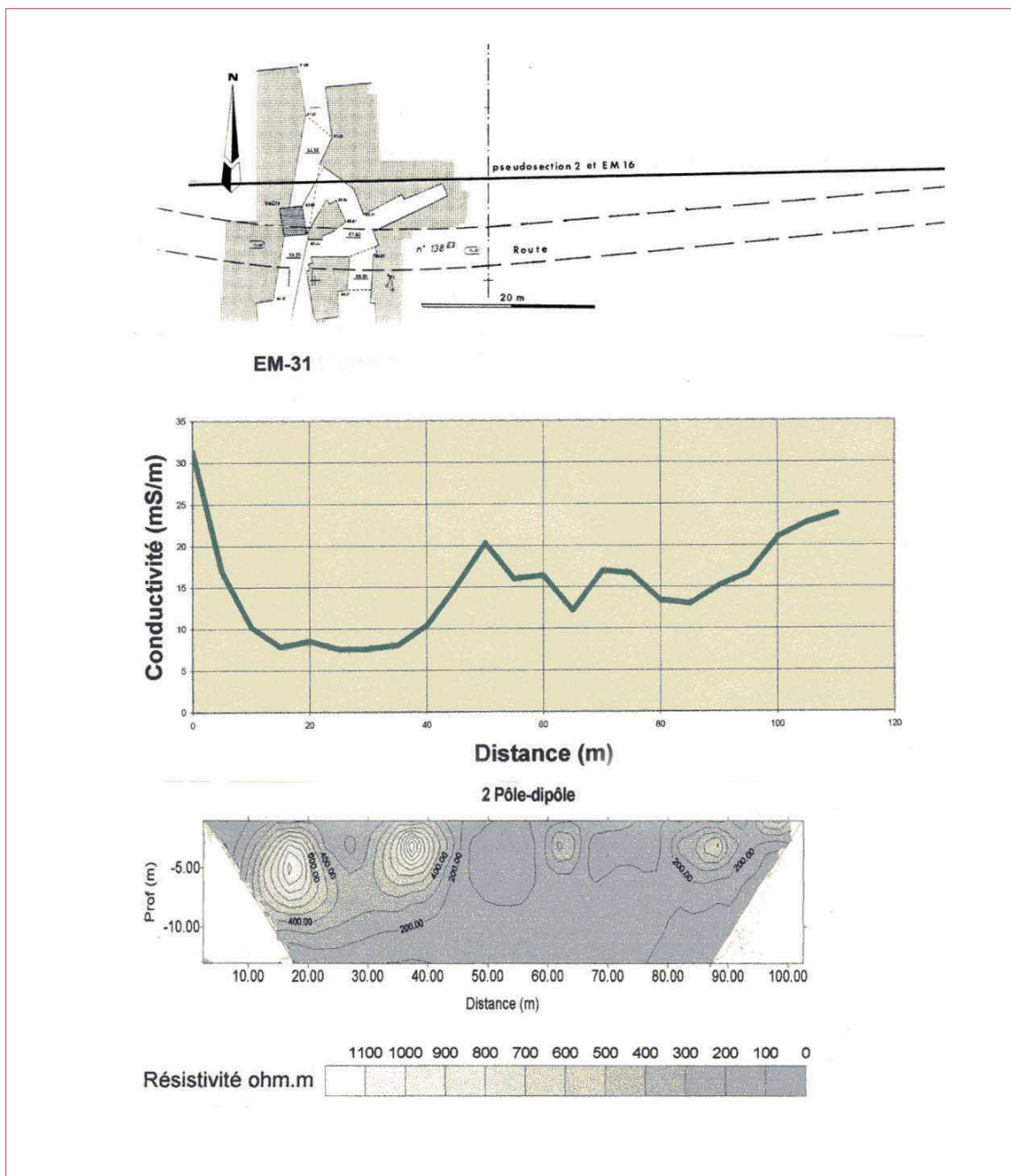
3.3 Exemple de mesures

Un exemple de résultats est donné sur la figure 84. Il présente l'anomalie en phase et en quadrature d'une zone fissurée, comblée d'un matériau conducteur ($40 \Omega.m$) dans un matériau résistant ($2000 \Omega.m$).



▶▶▶ FIGURE 84 - Exemple de mesure en méthode Slingram : la zone karstique induit un champ magnétique secondaire. Le rapport des champs passe alors par un minimum (anomalie A) (Vosgelsang, 1987).

Comme toutes les méthodes, la méthode Slingram permet de localiser des vides peu profonds. Un exemple de mesure est illustré sur la figure 85. La mesure Slingram est couplée avec un panneau électrique pour la localisation de vides connus et proches de la surface. La méthode est utilisée ici pour un premier zonage. Le panneau électrique permet de localiser plus précisément les vides recherchés.



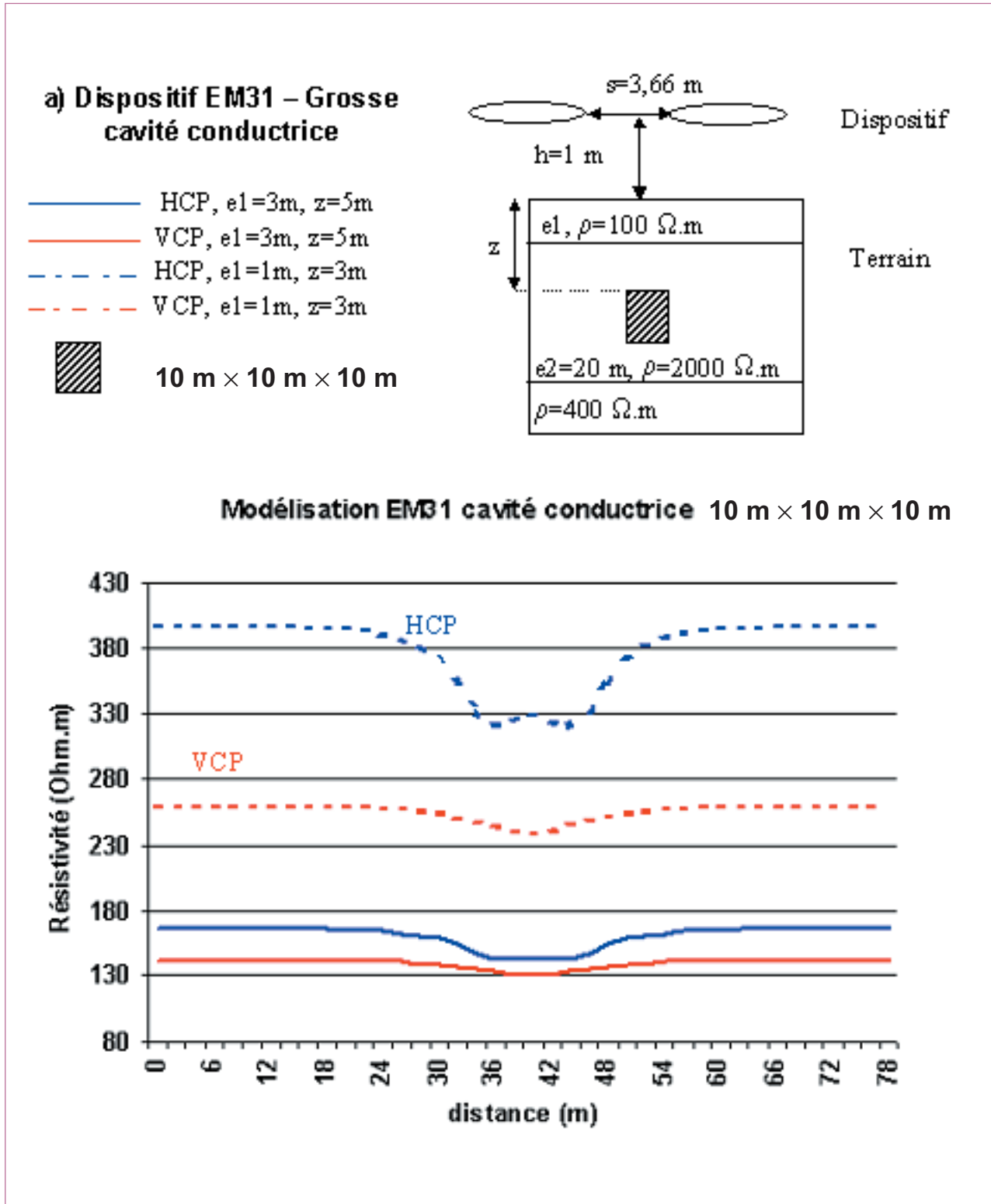
►► FIGURE 85 - Exemple de mesure Slingram (EM31) au-dessus de vides connus. La méthode est ici employée en premier zonage. Le panneau électrique permet de situer plus précisément les vides recherchés (Doc. CDGA Bordeaux).

3.4 Modélisation

Il existe des formules analytiques, données pour des structures simples (sphère) (Ward et Hohmann, 1991). Spies et Frischknecht présentent un ensemble quasi-exhaustif des formules des champs électromagnétiques en champ proche et champ lointain, dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel, en espace libre et au-dessus d'un demi-espace homogène, pour les configurations Slingram les plus répandues (Spies et Frischknecht, 1991). Pour des modèles plus complexes, des logiciels permettent la modélisation de la réponse en mode Slingram de cavité vide ou envoyée.

Un exemple de modélisation de la réponse d'un dispositif Slingram à dipôles verticaux et horizontaux situé à 1 m au-dessus du sol est présenté sur la figure 86. Une anomalie est significative si elle dépasse 10 % de la valeur moyenne.

La cavité est conductrice et de dimensions importantes ($10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 10\text{ m}$). Son toit est situé à 3 ou 5 m de profondeur. La cavité pourtant volumineuse au regard de la profondeur de son toit n'est pas détectable en mode vertical à 5 m de profondeur et très faiblement à 3 m. En mode horizontal, elle est très nettement détectée à 3 m de profondeur et plus faiblement à 5 m. Pour des géométries identiques, des cavités vides ne sont pas détectables.



▶▶▶ FIGURE 86

Modélisation de la réponse d'un dispositif Slingram (EM31) en mode HCP (horizontal coplanar polarization) et VCP (vertical coplanar polarization) au-dessus d'une cavité conductrice ($10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 10\text{ m}$) pour deux profondeurs (Source : Logiciel PEM3D, A. Tabbagh, UMR Sisyphe).

3.5 Conclusion

Les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ proche ne sont pas préconisées pour la détection de vides, sauf si leur présence est connue et si ceux-ci sont relativement volumineux et proches de la surface. Elles sont essentiellement sensibles à la présence de conducteurs. La profondeur d'investigation de ces méthodes dépend de la distance émetteur-récepteur. Dans ces conditions, c'est plutôt en zones karstiques et pour la mise en évidence d'anomalies conductrices, pouvant déboucher sur des vides, que les méthodes Slingram sont préconisées.

Elles présentent par ailleurs une grande maniabilité et un rendement relativement élevé, dans des zones difficiles d'accès. Leur coût est faible.

L'interprétation est essentiellement qualitative et décrit les contrastes de résistivités apparentes créés par les hétérogénéités du sous-sol. Une campagne de sondages mène à l'interprétation quantitative des mesures.

4. MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES HAUTE FRÉQUENCE : LE RADAR GÉOLOGIQUE

4.1 Principe

Les méthodes de reconnaissance radar en géophysique sont basées sur l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques dans le sol dans un domaine de fréquences variant de quelques dizaines de MHz à quelques GHz. Ces ondes sont émises sous forme d'impulsions temporelles de très courte durée, en un point de la surface par une antenne émettrice. Elles interagissent avec le milieu en créant des phénomènes de conduction et de polarisation qui dépendent de la permittivité complexe ε^*_e des matériaux rencontrés :

$$\varepsilon^*_e = \left(\varepsilon' + \frac{\sigma''}{\omega} \right) - j \left(\varepsilon'' + \frac{\sigma'}{\omega} \right)$$

avec ε' et ε'' les parties réelle et imaginaire de la permittivité, σ' et σ'' les parties réelle et imaginaire de la conductivité et ω la pulsation de l'onde.

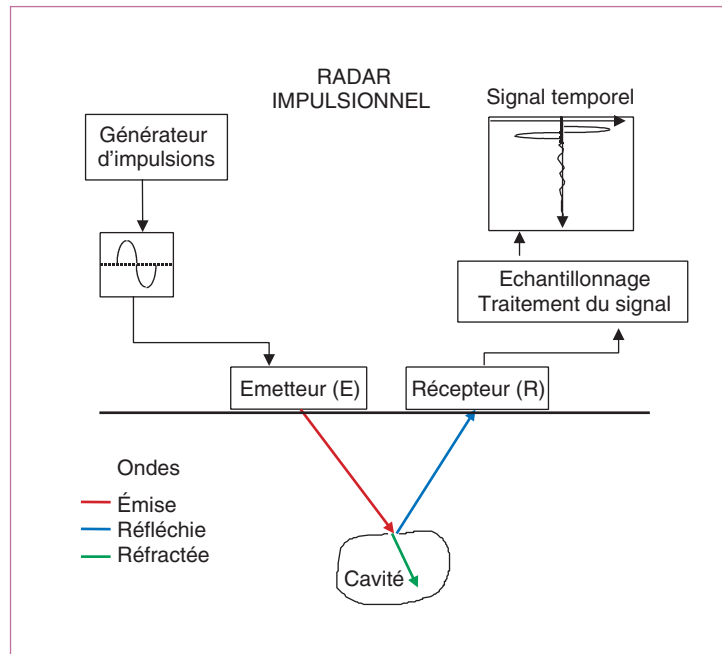
Dans la plupart des matériaux rencontrés dans le génie civil, les termes σ'' et ε'' sont négligés. Aux fréquences radar, dans des milieux faiblement conducteurs (calcaires), ces termes sont faibles, seul ε' influe notablement sur la propagation des ondes : les phénomènes de polarisation dominent. Dans les milieux plus conducteurs, les phénomènes de conduction (σ') dominent, les ondes ne pénètrent plus dans le milieu.

Lorsque les ondes rencontrent un contraste diélectrique, elles se réfléchissent partiellement vers la surface (lois de Snell-Descartes) où leurs caractéristiques sont mesurées par une antenne et sont analysées pour en déduire les propriétés du sous-sol (Fig. 87).

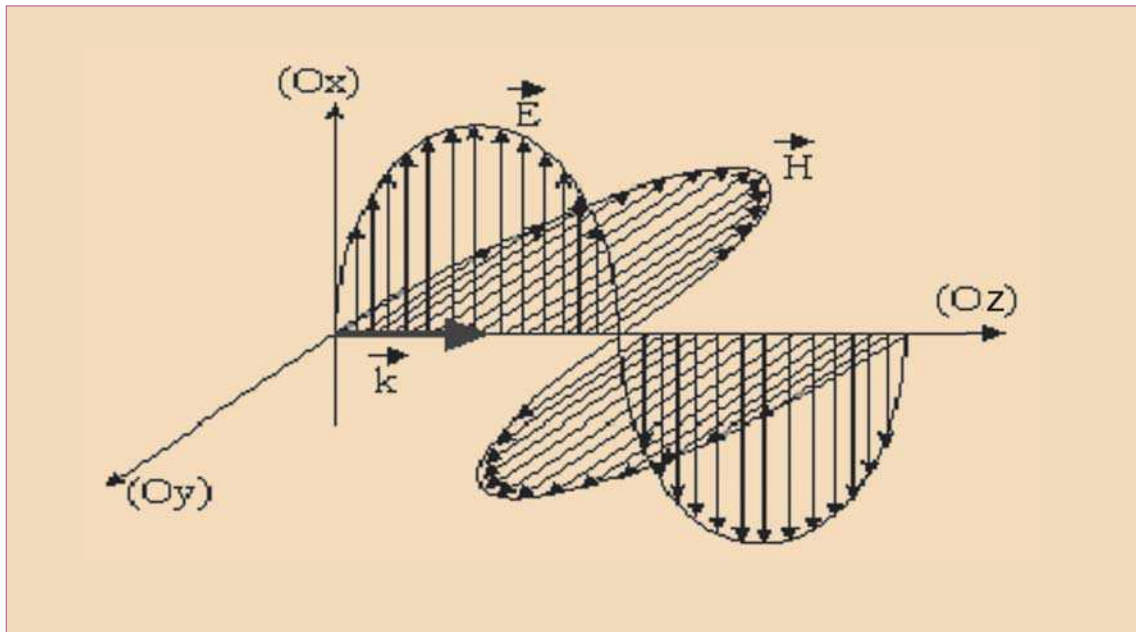
En mode monostatique, une antenne fait office de récepteur et d'émetteur. En mode bistatique, il y a une antenne émettrice et une antenne réceptrice. Des dispositifs avec un plus grand nombre d'antennes sont aussi utilisés.

Remarque : Dans l'hypothèse du champ lointain, on considère, qu'à une fréquence donnée, une onde électromagnétique issue de l'antenne émettrice est une onde plane en régime harmonique dont la représentation des champs électrique et magnétique dans l'espace est schématisée sur la figure 88.

L'onde est dite plane si tous les points d'un plan perpendiculaire à la direction de propagation sont soumis à des champs égaux en amplitude et en phase. Le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{H} sont, dans le plan d'onde, perpendiculaires à la direction de propagation. Généralement, l'orientation du champ électrique est perpendiculaire au plan d'incidence. Les mesures peuvent cependant se faire selon les deux polarisations suivant l'application et les traitements envisagés.



▶▶▶ FIGURE 87
Principe de la méthode radar.



▶▶▶ FIGURE 88 - Onde plane : représentation en régime harmonique des champs électrique et magnétique suivant le vecteur \vec{k} , vecteur de propagation, ici dirigé suivant (Oz).

La propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux matériels est régie par les équations de Maxwell. Les caractéristiques de la propagation des ondes électromagnétiques peuvent être consultées par exemple dans les ouvrages suivants : (Chew, 1990), (Daniels et *al.*, 1988), (Daniels, 1996) et (Davis et Annan, 1989).

Les ondes électromagnétiques sont fortement dépendantes du milieu dans lequel elles se propagent. Leurs caractéristiques varient suivant les propriétés diélectriques et spatiales des hétérogénéités rencontrées dans le sol (Hollender, 1999). En génie civil, les sols rencontrés ont des propriétés très différentes suivant leur nature. Les propriétés physiques de ces matériaux peuvent être abordées dans (Guegen et Palciauskas). Les caractéristiques de la propagation électromagnétique dans les matériaux du génie civil font par ailleurs toujours l'objet de recherches : certaines d'entre elles sont abordées dans (Tillard, 1991), (Thuéry, 1989), (Robert, 1995) et (Xiong et Tripp, 1997).

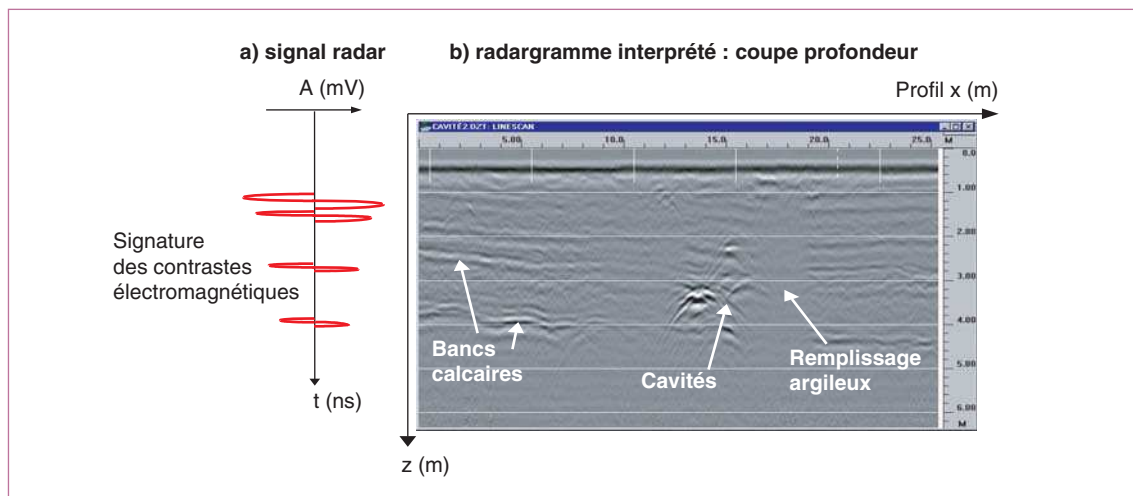
D'autres grandeurs utiles suivant les prospections et les besoins sont résumées dans le tableau en annexe (page 148) (Daniels, 1996) :

◆ Grandeurs mesurées

On mesure 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 (mesuré en nanosecondes) des ondes dans le milieu.

◆ Résultats attendus : détection de cavités par méthodes radars

Le premier résultat attendu s'appelle un *radargramme brut* (ou *coupe temps*) (Fig. 89). Il est similaire aux représentations obtenues en sismique : l'amplitude de chaque signal, graduée en niveau de couleur, est donnée en fonction du temps de propagation (ns) et les signaux sont juxtaposés en fonction de la position en surface.



▶▶▶ FIGURE 89

a. Signal radar.

b. Exemple de radargramme interprété, réalisé à une fréquence centrale $f_c = 200$ MHz (Document LRPC de Saint-Brieuc).

Le deuxième résultat attendu est le *radargramme interprété* (ou *coupe profondeur*) : la connaissance des vitesses dans le milieu permet de représenter les signaux en fonction de la profondeur (m).

La réalisation de plusieurs profils permet de visualiser les mesures en trois dimensions (surface auscultée en coordonnées horizontales et profondeur en coordonnées verticales), par des coupes en plan à une profondeur donnée ou selon un profil donné.

Pour connaître les vitesses dans le milieu, il faut évaluer ou connaître la permittivité et la conductivité des matériaux considérés généralement à faibles pertes. La grandeur traduisant ces pertes est notée $\tan\delta$. Elle est définie par :

$$\tan \delta = \frac{\sigma'}{\omega \epsilon'_r}$$

Aux fréquences d'utilisation radar, les milieux à faibles pertes sont tels que :

$$\tan \delta \ll 1$$

La profondeur de pénétration dans ce cas est définie par :

$$d = \frac{2}{\sigma'} \sqrt{\frac{\epsilon'_r}{\mu_0}} \quad (\text{m})$$

La vitesse des ondes électromagnétiques est alors approchée par la formule suivante :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'_r}} \quad (\text{m.s}^{-1})$$

où ϵ'_r est la permittivité relative réelle et traduit les pertes capacitives du matériau (polarisation des charges liées). Cette grandeur est une caractéristique du matériau que l'on trouve dans la littérature pour des fréquences données. *À partir de la vitesse et du pointé des temps de trajet sur le radargramme, les épaisseurs peuvent alors être déduites (voir formules complémentaires en annexe de fin de chapitre).*

L'estimation de l'épaisseur se déduit aussi du rapport des amplitudes réfléchies sur l'amplitude en réflexion totale (cas des milieux tabulaires), par des analyses de vitesse ou par des inversions de temps de trajet lorsque les mesures sont réalisées en mode bistatique, en écartant symétriquement par rapport à un point milieu commun (CMP) (Fauchard, 2001), ou plus simplement par des forages de validation.

D'autres traitements spécifiques sont utilisés pour l'interprétation des mesures. Ainsi la déconvolution permet d'affiner les échos associés aux contrastes. Elle est d'autant plus efficace si le signal émis et certaines propriétés du sous-sol sont connues. La migration des signaux permet d'éliminer les branches d'hyperboles, gênantes pour l'interprétation, tout en localisant les amplitudes sur la position des anomalies. Des filtrages permettent de sélectionner les fréquences les plus porteuses d'information, de minimiser le bruit enregistré, d'éliminer les réflexions multiples, etc. (Daniels et al., 1988), (Leparoux, 1997). Enfin, l'analyse de la polarisation des réflexions peut parfois permettre de se prononcer sur la nature des réflecteurs.

Détection de cavités

La signature d'une cavité est un contraste d'amplitude plus ou moins prononcé sur le radargramme, proportionnel au rapport des permittivités effectives de l'encaissant et de la cavité et fonction de l'atténuation intrinsèque de l'encaissant. La connaissance *a priori* de la cavité permet d'attribuer les signaux réfléchis à sa présence.

Ce contraste est relativement fort pour une cavité vide (Fig. 89) puisque la permittivité de l'air est de 1 et celle de la plupart des matériaux géologiques est au moins égale à 4 (Tableau X). Le signal associé à ce contraste présente souvent des hyperboles de diffraction issues des interactions avec les bords et toit de la cavité. Il est très élevé pour une cavité ennoyée puisque la permittivité de l'eau est de 81, mais le signal est fortement atténué lorsque les ondes traversent un milieu rempli de matériaux conducteurs comme les argiles (Fig. 89).

■ Proposition de classification des anomalies radar

- **Type 1** : Coefficient de réflexion positif
Extension horizontale supérieure à 2 m ou supérieure à 1 m et à moins de 5 m en profondeur
→ **Cavité franche possible**
- **Type 2** : Échos internes et nombreux dans la tranche [0-5]m
→ **Zones hétérogènes fracturées / zones karstiques**
- **Type 3** : Atténuation locale sur 0,5 à 2 m de largeur sur un ou plusieurs profils, hyperboles de diffraction aux intersections des failles de stratification
→ **Cavités subverticales remplies de matériaux conducteurs.**

▶▶▶ TABLEAU X

Valeur des permittivités relatives réelles pour quelques matériaux

| Roches | Conductivité (S/m) | Résistivité ($\Omega \cdot m$) | Permittivité relative réelle |
|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Argiles | 10^{-3} -2 | 0,5-1000 | 8-12 |
| Basaltes | 10^{-4} - 10^{-3} | 10^3 - 10^4 | 5-7 |
| Calcaire sec | 10^{-4} - 10^{-3} | 10^3 - 10^4 | 6-8 |
| Granite | $7 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-3} | 10^3 - $1,5 \cdot 10^4$ | 5-6,5 |
| Grès | $3 \cdot 10^{-4}$ - $2 \cdot 10^{-3}$ | 500- $3 \cdot 10^3$ | 4-5 |
| Quartzites | 10^{-4} - 10^{-3} | 10^3 - 10^3 | 4-5 |
| Sables secs | 10^{-7} - 10^{-3} | 10^3 - 10^7 | 4-6 |
| Sables saturés d'eau douce | 10^{-4} - 10^{-1} | 10 - 10^4 | 30 |
| Sel | 10^{-6} - 10^{-5} | 10^5 - 10^6 | 5-6 |
| Glace | 10^{-6} - $3 \cdot 10^{-5}$ | $3 \cdot 10^4$ - 10^6 | 3,2 |
| Eau douce | 10^{-6} - 10^{-4} | 10^4 - 10^6 | 81 |
| Eau salée (salinité 32 ‰) | 3 | 0,3 | 77 |

4.2 Méthodologie

◆ Domaine d'application

La méthode est préconisée pour la recherche de vides et de conducteurs en milieu résistant pour des profondeurs qui dépendent fortement de la conductivité des terrains. L'expérience montre que la profondeur d'investigation atteint exceptionnellement 20 m pour des milieux géologiques favorables (les profondeurs d'investigation dans la glace peuvent être bien plus grandes).

Les conditions de détection imposent que *l'encaissant soit tel que* $\rho > 100 \Omega.m$ et $\tan \delta \ll 1$. La méthode est donc à proscrire dans les milieux conducteurs comme les limons et les argiles. Quel que 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 de mesure

Les mesures sont réalisées en continu suivant un ou plusieurs profils parallèles, distants de un à plusieurs mètres, suivant les applications visées et la taille des cibles et de la zone de prospection. Selon les matériels et les conditions, le dispositif est porté par l'opérateur ou traîné par un véhicule.

Le choix de la *fréquence centrale d'auscultation* est important. Il est lié à la bande passante de l'antenne : il faut que les longueurs d'ondes utilisées soient de l'ordre de la dimension de la cible et que la bande passante soit large pour avoir une bonne résolution temporelle. Elle se situe en général entre 100 et 500 MHz.

Le *temps d'enregistrement* des signaux est fixé en fonction des informations recueillies lors de la recherche d'indices. Si l'on connaît approximativement la vitesse des ondes dans le sol et la profondeur des cavités recherchées, on déduit le temps de propagation des ondes jusqu'à la cible. Le temps d'enregistrement est le temps double, correspondant au trajet aller-retour des ondes.

Ensuite, l'utilisateur doit ajuster un *pas d'enregistrement des signaux*. Il peut le régler suivant une roue codeuse, qui déclenchera une acquisition à un pas de distance donné. L'acquisition peut aussi se faire en continu. Dans ce cas, l'utilisateur doit marcher à vitesse constante, et signaler régulièrement le long du profil des points dont les coordonnées sont connues. Pour des cibles métriques, il convient d'enregistrer un minimum de trente signaux par mètre.

D'autres paramètres doivent être réglés :

- *Le stacking* : c'est un paramètre qui permet de sommer plusieurs signaux pour un même point du profil, afin d'améliorer le rapport signal sur bruit.
- *Le gain* : les radars commerciaux proposent généralement la possibilité d'appliquer des gains permettant d'amplifier le signal en fonction du temps d'écoute de manière à optimiser la conversion analogique - numérique. Si un gain est appliqué pendant les mesures, les traitements qui peuvent être faits sur les amplitudes des signaux doivent en tenir compte.
- *Les filtres* : des filtres passe-bande sont généralement appliqués dès l'acquisition. Il faut bien connaître leurs caractéristiques et les prendre en compte dans les traitements après l'acquisition.

Enfin, comme pour toutes les méthodes, un *relevé de la topographie*, lorsque les mesures sont faites directement sur la surface du sol, est nécessaire pour recalibrer les signaux par rapport à l'origine en surface.

Les structures environnantes, comme les lignes haute tension, les bâtiments contenant des parois métalliques, les câbles enterrés, les émetteurs radio proches, etc. suivant la qualité du blindage des antennes, génèrent des réflexions dans les signaux enregistrés, et peuvent mener à des erreurs d'interprétation.

◆ Quelques caractéristiques des matériels de mesure

Le *radar impulsionnel* (ou radar géologique) est un appareil qui émet, reçoit et enregistre des signaux électromagnétiques (en fait l'amplitude du champ électrique). Les signaux émis sont des signaux temporels (impulsions) d'une période de l'ordre de la nanoseconde (application type chaussées ou recherche d'acier dans les bétons) à quelques dizaines de nanosecondes (applications géologiques). La fréquence de répétition des signaux peut atteindre plusieurs centaines de kHz. Les signaux réfléchis (scan en anglais) sont enregistrés sur une fenêtre temporelle. Les radars récents enregistrent plusieurs centaines de signaux par seconde, avec une résolution temporelle

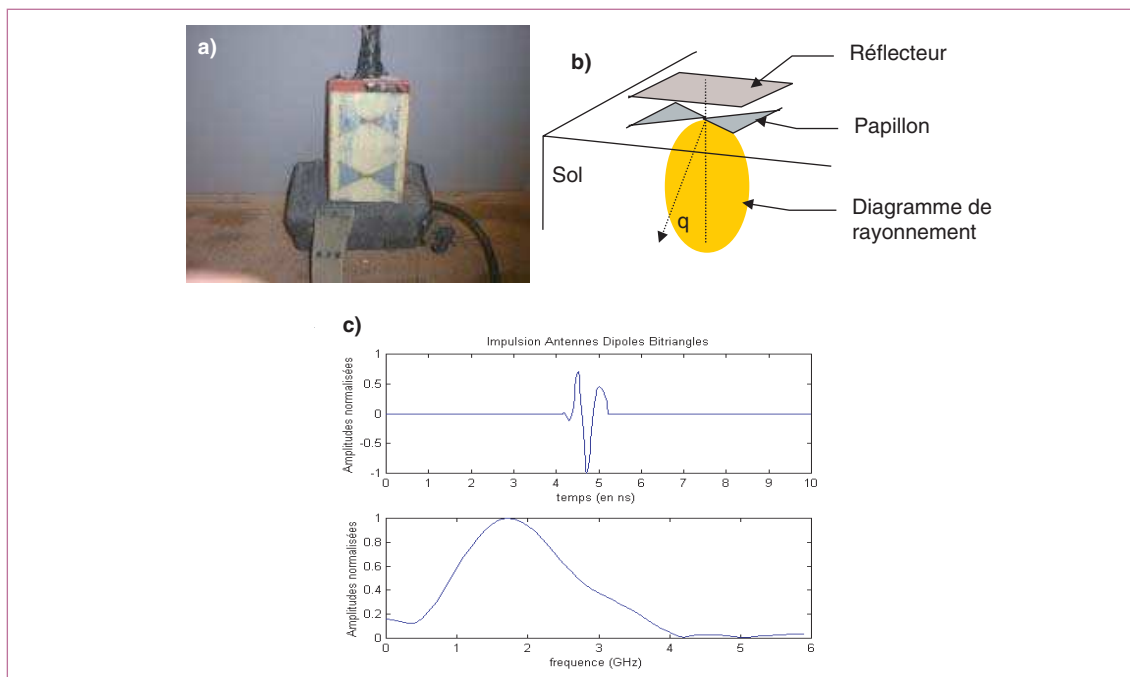
de l'ordre de 5 picosecondes. La dynamique des radars est de l'ordre de 110 dB. Ces matériels traitent en temps réel les signaux reçus (filtres passe bande et sommation des signaux). Ils se présentent physiquement sous la forme d'un boîtier comportant l'unité d'acquisition et un système de pilotage et d'enregistrement type PC.

Le *radar à saut de fréquence* (ou radar fréquentiel) constitue une technique plus confidentielle que la précédente. L'unité génératrice (émission et réception) des signaux est un analyseur de réseau, piloté par un PC, qui permet l'enregistrement et la visualisation des mesures : des ondes monochromatiques sont générées successivement sur une bande de fréquence donnée (en adéquation avec la bande passante des antennes). Il est équivalent au radar temporel lorsque l'on réalise la transformée de Fourier inverse des ondes reçues sur le spectre utilisé. La vitesse d'acquisition d'un signal est plus lente (quelques scans par seconde pour les analyseurs récents), mais la résolution temporelle et la dynamique sont largement améliorées.

Les *antennes* d'émission et de réception des radars géologiques sont très diversifiées. Leurs caractéristiques, leur fonctionnement et leur diagramme de rayonnement électromagnétique sont des données importantes (Combes, 1996) et (Eyraud et al, 1973). Les antennes sont généralement des dipôles cylindriques pour les applications basse fréquence, des dipôles bi-triangle (antennes « papillon ») pour les applications intermédiaires et certaines applications haute fréquence, et des cornets pour des applications type chaussées. À l'exception des antennes cornets, les antennes utilisées en radar fonctionnent en contact du sol, ou à quelques centimètres du sol, ce qui par ailleurs pose des problèmes en ce qui concerne la connaissance de leur diagramme de rayonnement dans des terrains que l'on cherche à caractériser. Elles possèdent le plus souvent un blindage afin de se protéger des bruits électromagnétiques provenant d'au-dessus du sol.

Elles sont caractérisées par (Fig. 90) :

- une *fréquence centrale de rayonnement*, c'est-à-dire, la fréquence pour laquelle l'énergie émise est maximale,
- une *bande passante* qui est la plage de fréquence exploitable autour de la fréquence centrale,
- un *diagramme de rayonnement* qui représente la répartition de l'énergie rayonnée autour de la direction principale de rayonnement,
- une *ouverture à mi-puissance (-3dB)* qui est l'angle dans l'un des plans (plan E ou H) de polarisation autour de la direction principale, et qui définit la zone où la puissance émise est la moitié de la puissance maximale.



▶▶▶ FIGURE 90

- a. Antenne dipôle bitriangle (GSSI fréquence centrale de 1,5 GHz).
- b. La forme générale du diagramme de rayonnement dans le sol.
- c. Impulsion émise à la sortie de l'antenne et amplitude spectrale (fréquence centrale mesurée de 1,6 GHz).

◆ 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 terme de profondeur. Les dimensions des cavités peuvent être évaluées en déterminant la résolution verticale que l'on estime égal au quart de la longueur d'onde correspondant à la fréquence centrale dans le matériau :

$$r_v = \lambda / 4 = \frac{1}{4} \frac{c}{\sqrt{\epsilon'_r} f_c} \quad (\text{m})$$

et la résolution horizontale est définie pour une profondeur z par :

$$r_h \approx \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{\lambda z}{2}} \quad (\text{m}).$$

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

◆ Limites de la méthode

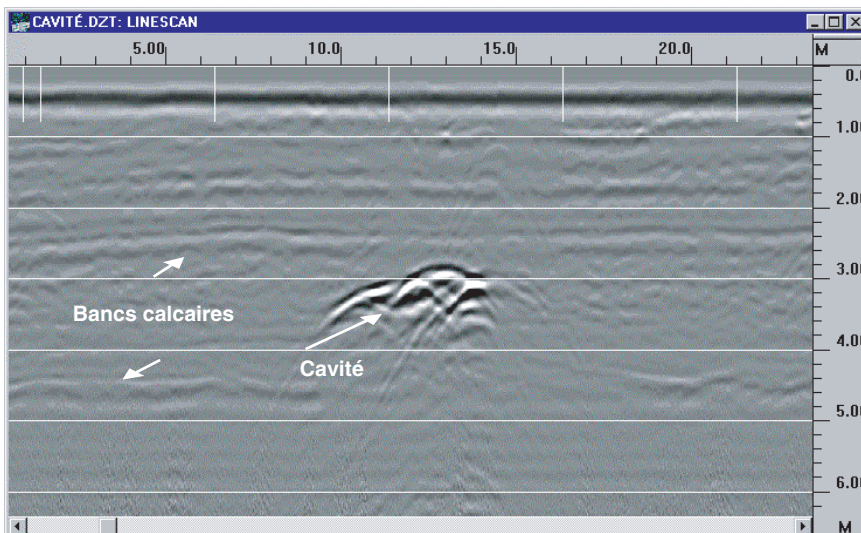
La méthode n'est pas adaptée à la détection de cavités en milieu conducteur ou en présence d'une couverture conductrice, car les ondes ne s'y propagent pas.

Plus les fréquences des ondes électromagnétiques seront élevées, meilleure sera la résolution et moins grande sera la profondeur de pénétration des ondes. À l'opposé, plus basses seront les fréquences utilisées, plus grande sera la profondeur de pénétration mais moins bonne sera la résolution.

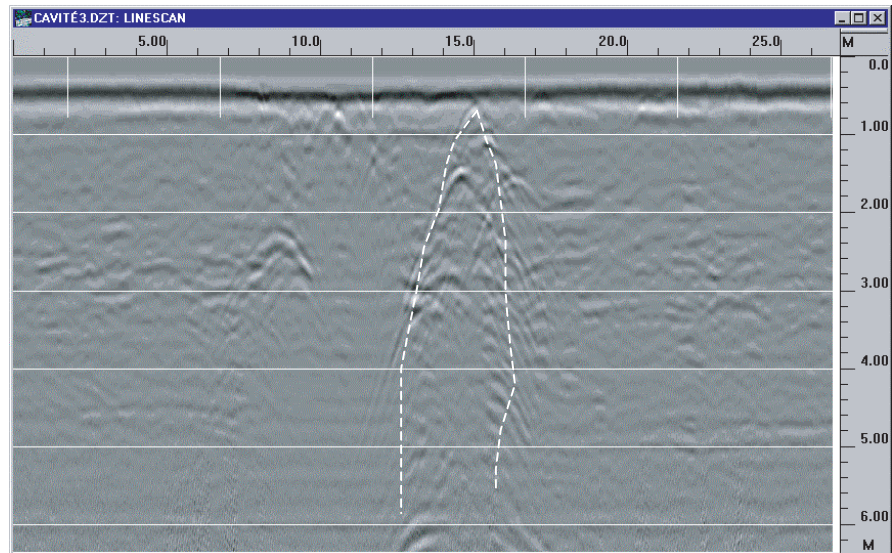
Le blindage des antennes est parfois de mauvaise qualité (inexistant dans certains cas) et les perturbations de réseaux radio ou de structures métalliques environnantes sont source de leurre.

4.3 Exemple de mesures

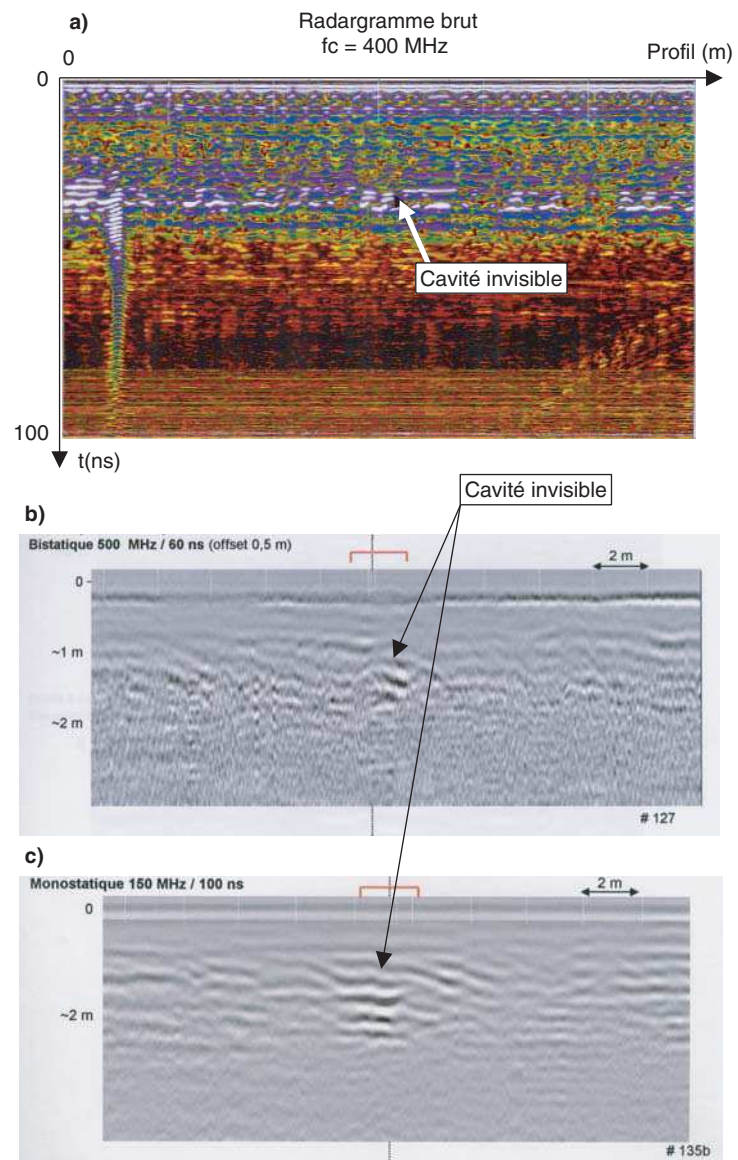
Le premier exemple de mesure représenté sur la figure 89 a été réalisé avec des antennes de 200 MHz de fréquence centrale. Les conditions de mesures sont idéales car le milieu encaissant, du calcaire, est relativement résistant. Les contrastes induits par les vides sont alors bien visibles. La présence de matériaux argileux se traduit par une atténuation quasi totale des signaux radar. L'exemple de la figure 91, réalisé dans les mêmes conditions que celles de la figure 89, montre un cas de détection de cavité vide de 2,7 m de hauteur par 5 m de largeur (reconnue par sondage à



▶▶▶ **FIGURE 91**
Détection de cavités vides
en milieu calcaire à $f_c = 200$ MHz
(Document LRPC de Saint-Brieuc).



▶▶▶ **FIGURE 92**
 Détection de cavité
 en milieu calcaire à $f_c = 200$ MHz
 avec remontée verticale
 (cheminée) jusqu'à la surface
 (Document LRPC
 de Saint-Brieuc).



▶▶▶ **FIGURE 93**
 a. Exemple de radargramme brut
 à 400 MHz sur le site test. La
 cavité sous la couche de limon
 de 2 m ne se distingue pas du
 reste de l'enregistrement.
 b. À 500 MHz en mode
 bistatique.
 c. À 150 MHz en mode mono-
 statique, le toit de la cavité situé
 juste sous la couche de limon
 est détectable avec un matériel
 de laboratoire
 (Document SNCF).

la suite de la campagne radar). Les vides francs apparaissent nettement sur le radargramme et se caractérisent par des hyperboles de diffraction.

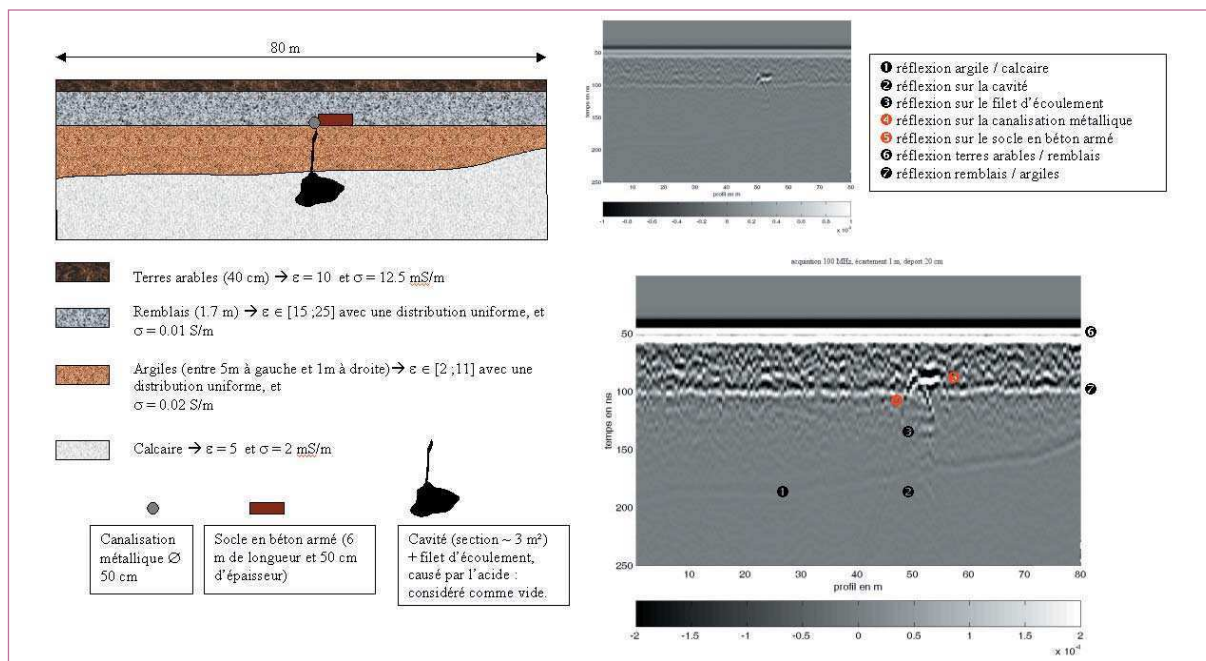
Une remontée dans les bancs calcaires jusqu'à la surface fait apparaître des hyperboles de diffractions sur les bords (Fig. 92).

Les mesures radar de la figure 93a ont été réalisées sur le site test présenté en mesure microgravimétrique après le creusement de deux galeries dans la craie de sections 2×2 m sous une couche de limon. Leur toit se situe respectivement à 1,5 et 3,5 m de profondeur. Les mesures ont été réalisées à une fréquence centrale de 400 MHz, sur un temps d'enregistrement de 100 ns. Des filtres à moyenne mobile sur huit termes, des filtres verticaux passe-haut (30 MHz à deux pôles) et passe-bas (800 MHz à un pôle), ainsi qu'un gain variable, ont été appliqués. La figure montre qu'il n'est pas possible d'extraire la signature des cavités dans ces conditions : la couche superficielle de limon a pour effet d'absorber les réflexions attendues sur les toits des cavités.

D'autres mesures (Fig. 93b) conduites au même endroit à 150 MHz et 500 MHz, se sont avérées plus performantes. Elles sont réalisées avec un matériel optimisé (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux) : le diagramme des antennes est plus étroit que les dipôles commerciaux de telle sorte que l'énergie émise verticalement dans le sol est plus importante. Par ailleurs, des processus de filtrage, de gain et de stacking augmentent la profondeur d'investigation en améliorant le rapport signal/bruit. Le toit de la cavité situé à 1,5 m de profondeur, sous la couche de limon, est alors détectable.

4.4 Modélisation

La méthode la plus utilisée en géophysique est la méthode FDTD (Finite Difference Time Domain). De nombreux logiciels disponibles sur le marché ou en libre accès sur internet sont proposés par les professionnels et les universitaires de la géophysique. Ils permettent de créer rapidement un modèle du milieu ausculté. Un exemple de simulation (Rejiba, 2002) est représenté sur la figure 94.



►►► FIGURE 94 - Exemple de simulation FDTD d'une cavité (Rejiba, 2002).

4.5 Conclusion

Les méthodes électromagnétiques haute fréquence ne sont pas adaptées à la recherche de cavité en milieu conducteur ou en présence de couverture conductrice. Elles sont en revanche conseillées dans les milieux résistants pour mettre en évidence des cavités vides ou ennoyées jusqu'à des profondeurs de l'ordre d'une quinzaine de mètres. De nombreuses applications ont ainsi permis la localisation de vides en milieu calcaire.

L'interprétation est tout d'abord qualitative et permet de localiser aisément sur les radargrammes bruts la présence d'hétérogénéités dans le sol. Les informations recueillies lors de la recherche d'indices permettent de les interpréter en tant que cavité, mais seule une campagne de forages permettra de définir l'origine exacte des hétérogénéités détectées.

Si les vitesses des ondes électromagnétiques sont connues, les mesures permettent d'estimer la profondeur et l'extension des cavités. Il est cependant fortement recommandé de contrôler ces résultats par une campagne de forages.

Les méthodes radars offrent un grand rendement et des dispositifs légers qui permettent d'investiguer de grands linéaires comme des zones difficiles d'accès.

5. CONCLUSION GÉNÉRALE SUR LES MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Les méthodes électromagnétiques basse fréquence en champ lointain mettent en évidence des cavités plutôt conductrices par rapport au milieu encaissant, d'autant mieux si celles-ci présentent des extensions verticales vers la surface. Elles montrent ainsi de bonnes capacités à détecter des failles karstiques remplies de matériaux conducteurs et pouvant déboucher sur des vides en profondeur. La recherche de cavités vides reste peu indiquée, sauf si elles sont peu profondes (cas pour des puits de catiches) et relativement volumineuses par rapport à la profondeur de leur toit. La profondeur d'investigation dépend de la fréquence de l'émetteur source et de la résistivité du terrain. Le rendement de ces méthodes peut être moyen (vitesse de marche) à grand (dispositif tracté par un véhicule). L'idéal est de conduire les mesures selon les deux polarisations, avec plusieurs émetteurs dont les champs seraient orthogonaux aux points de mesure. L'interprétation reste essentiellement qualitative et se réalise en terme de résistivité apparente.

La capacité de détection de cavité par les méthodes électromagnétiques en champ proche est semblable à celle des méthodes en champ lointain. Elles mettent principalement en évidence les extensions verticales plutôt conductrices et pouvant déboucher sur des vides. Leur profondeur d'investigation dépend uniquement de la distance qui sépare l'émetteur du récepteur. Les méthodes présentent les mêmes rendements, et les dispositifs de mesures peuvent être légers et permettre l'accès à des zones difficiles. L'interprétation est d'abord qualitative. Des informations quantitatives sur les épaisseurs de recouvrement peuvent être apportées.

Enfin les méthodes électromagnétiques haute fréquence, qui se limitent ici au radar géologique, sont des méthodes à proscrire si le terrain de surface est conducteur (argiles, limons, etc.). Elle est en revanche bien indiquée pour des milieux relativement résistants ($> 100 \Omega.m$) pour la détection de vides et de cavités ennoyées ou comblées de matériaux conducteurs. Son rendement peut être moyen à grand. La profondeur d'investigation est de l'ordre d'une vingtaine de mètres dans le meilleur des cas. L'interprétation est tout d'abord qualitative. Elle se fait en terme de contraste d'amplitude et reflète les caractéristiques diélectriques du sous-sol. Si les vitesses sont connues, la profondeur et l'extension de la cavité sont quantifiables.

Pour toutes les méthodes, les anomalies soupçonnées d'être des cavités doivent être nécessairement contrôlées par des sondages.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEAMISH D., *Quantitative 2D VLF data interpretation*, Journal of applied Geophysics, **Vol. 45**, 2000, pp. 33-47.
- BENDERITTER Y., *Karst et investigations géophysiques*, Hydrogéologie, n° 3, 1997, pp. 19-30.
- BORNE V., *La méthode électromagnétique EM 34-3 pour la prospection de sub-surface*, Bulletin de l'association internationale de Géologie de l'Ingénieur, n° 42, 1990.
- BOSCH F.P and MÜLLER I., *Continuous gradient VLF measurements: a new possibility for high resolution mapping of karst structures*. First Break, 10, 6, 2001, pp. 343-350.
- BOSCH F.P and GURK M., *Comparison of RF-EM, RMT an SP measurements on a karstic terrain in the Jurra mountains (Switzerland)*, Protokoll über das 18.kolloquim Electromagnetische Tifferforschung in Altenberg von 20-24 März, 2000.
- BOURGOIS B., SUIGNARD K and PERRUSSON G., *Electric and magnetic dipoles for geometric interpretation of three-component electromagnetic data in geophysics*, Inverse Problems, **Vol. 16**, 2000, pp. 1225-1261.

- CAGNIARD, L., *Principe de la magnéto-tellurique, nouvelle méthode de la prospection géophysique*, annales de géophysique, tome 9, fascicule 2, **1953**.
- CHEVASSU G., GRISONI J.C., LAGABRIELLE R., Utilisation de la magnétotellurique pour l'auscultation du sol-support de chaussée, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 166, **1990**, pp. 73-82.
- CHEW W.C., *Waves and field in inhomogeneous media*, Van Nostrand Reinhold, **1990**.
- CHOUTEAU M., *Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering*, Geophysical prospecting, Vol. 44, **1996**, pp. 215-232.
- CHOUTEAU M., *Méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques*, Géophysique appliquée II, GLQ 3202, Notes de cours, Ecole Polytechnique de Montréal, **2001**.
- COMBES P.F., Mico-ondes 1. Lignes, guides et cavités, Dunod, **1996**.
- DANIELS D.J., GUNTON D.J., SCOTT H.F., *Introduction to subsurface radar*, IEE PROCEEDINGS, Vol. 135, Pt. F, n° 4, **1988**.
- DANIELS D.J., *Surface Penetrating Radar*, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics series 6, **1996**.
- DAVIS J.L., ANNAN A.P., *Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy*, Geophysical Prospecting 37, **1989**, pp. 531-551.
- DUPIS A., Localisation des cavités par la méthode magéto-tellurique artificielle, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Vol. 92, **1977**, pp. 66-67.
- EYRAUD L., GRANGE G. et OHANESSIAN H., *Théorie et technique des antennes*, Librairie Vuibert, **1973**.
- FAUCHARD C., *Utilisation de radars très haute fréquence. Application à l'auscultation non destructive des chaussées*, Thèse de l'Université de Nantes, **2001**.
- GUÉRIN R., TABBAGH A., BENDERITTER Y., ANDRIEUX A., *Invariants for correcting field polarisation effect in MT-VLF resistivity mapping*, Journal of Applied Geophysics, Vol. 32, **1994**, pp. 375-383.
- GUÉRIN R., PANISSOD C., THIRY M., BENDERITTER Y., TABBAGH A., HUET-TAILLANTER S., *La friche industrielle de Mortagne-du-Nord-III-Approche méthodologique d'étude géophysique non-destructive des sites pollués par des eaux fortement minéralisées*, Bull. Soc. Géol. France, t. 173, n° 5, **2002**, pp. 471-477.
- GUEGEN Y., PALCIAUSKAS V., *Introduction à la physique des roches*, Hermann, Paris, **1992**.
- HOLLENDER F., *Interprétation de la distorsion des signaux géoradar propagés et réfléchis - Développement d'une tomographie par bandes de fréquences*, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, **1999**.
- HOLLIER-LAROUSSE A., *Contribution à la valorisation d'une méthode géophysique électromagnétique utilisée en géophysique appliquée de subsurface : la radio magnétotellurique*, Rapport du Conservatoire national des arts et métiers, Paris, **1997**.
- LAGABRIELLE R., *Nouvelles applications de méthodes géophysiques à la reconnaissance en génie civil*, Rapport des laboratoires des ponts et chaussées, **1986**.
- LEPAROUX D., *Mises au point de méthodes radar pour l'auscultation structurale et texturale de milieux géologiques très hétérogènes*, Thèse de l'université de Rennes, **1997**.
- MC NEILL J.D., *Electrical conductivity of soil and rocks*, Technical Notes TN-5, Geonics Limited, **1980a**.
- MC NEILL J.D., *Electrical terrain conductivity measurement at low induction numbers*, Technical Notes TN-6, Geonics Limited, **1980b**.
- MC NEILL J.D., Labson V., *Geophysical mapping using VLF radio fields*, in : M. N. Nabighian (Editor), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Soc. Explor. Geophys., Vol. 2, part B, **1991**, pp. 521-640.
- MÜLLER I., La grotte de « Chez le Brandt » [Jura Neuchâtelois Coord ; 526, 425/199000], *Essai de synthèse des données géologiques et hydrogéologiques*, Cavernes (Neuchâtel), Vol. 25, **1981**, pp. 8-14.
- Ogilvy R.D. CUADRA A., JACKSON P.D. and CUELLAR V., Delineation of a resistive drainage channel by EM conductivity survey, *Geoexploration*, Vol. 28, **1991**, pp. 139-152.
- Ogilvy R.D. CUADRA A., JACKSON P.D. and MONTE J.L., *Detection of air-filled drainage gallery by the VLF resistivity method*, Geophysical prospecting, Vol. 39, **1991**, 845-859.
- Ogilvy R.D. and LEE A.C., *Interpretation of VLF-EM in-phase data using current density pseudosections*, Geophysical prospecting, Vol. 39, **1991**, pp. 567-580.
- PARASNIS D.S., Principles of applied geophysics, Chapman and Hall, Fourth edition, **1986**.
- PERSON L., PERDERSEN L., *The importance of displacement currents in RMT measurements in high resistivity environments*, Journal of Applied Geophysics, Vol. 51, **2002**, pp. 11-20.
- REJIBA F., *Modélisation de la propagation des ondes électromagnétique en milieux hétérogènes : application au radar sol*, Thèse de Géophysique Appliquée de l'Université Pierre et Marie Curie, **2002**.
- REYNOLDS J.M., *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley and Sons, **2000**.
- ROBERT A., *Recherche de méthodes d'interprétation des mesures géoradar et de thermographie infrarouge appliquées aux contrôles non-destructifs et à l'auscultation in situ des matériaux de construction*, Thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, **1995**.

SPIES B.R. and FRISCHKNECHT F.C., *Electromagnetic sounding, Electromagnetic methods in applied geophysics*, in : M. N. Nabighian (Editor), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Soc. Explor. Geophys., **Vol. 2**, part A, **1991**, pp.285-386.

TABBAGH A., BENDERITTER Y., ANDRIEUX P., DECRIAUD J.P., GUERIN R., *VLF resistivity mapping and verticalization of the electric field*, *Geophysical Prospecting*, **Vol. 39**, **1991**, pp. 1083-1097.

THUÉRY J., *Les micro-ondes et leurs effets sur la matière, Applications industrielles, agroalimentaires et médicales*, Technique et Documentation, **1989**.

TILLARD S., *Évaluation des performances de la technique radar en prospection géophysique*, Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg I, Institut de Physique du Globe, **1991**.

VOGELSANG D., *Examples of electromagnetic prospecting for karts and fault systems*, *Geophysical prospecting*, Vol. 35, **1987**, pp. 604-617.

WARD H.S., HOHMAN G.W., *Electromagnetic theory for geophysical applications*, in : M. N. Nabighian (Editor), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Soc. Explor. Geophys. **Vol. 1**, **1991**, pp. 131-311.

WEST G.F. and MACNAE J.C., *Physics of the electromagnetic induction exploration method, Electromagnetic methods in applied geophysics*, in : M. N. Nabighian (Editor), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Soc. Explor. Geophys., Vol. 2, part A, **1991**, pp. 5-45.

XIONG Z. and TRIPP A.C., *Ground-penetrating radar responses of dispersive models*, *Geophysics*, **Vol. 62**, n° 4, **1997**, pp. 1127-1131.

◆ Quelques grandeurs caractéristiques des milieux à pertes et à faibles pertes

| Milieux | Faible pertes | A pertes |
|--|---|---|
| Vitesse v (m.s ⁻¹) | $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'_r}}$ | $v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\frac{\epsilon'_r}{2} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + \tan^2 \delta}}}}$ |
| Coefficient d'atténuation α (Np.m ⁻¹)
et coefficient de phase β (rad.m ⁻¹) | $\begin{cases} \alpha = \frac{\pi f}{c} \sqrt{\epsilon'_r} = \frac{\alpha(\text{dB/m})}{8.68} \\ \beta = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon'_r} \end{cases}$ | $\begin{cases} \alpha = \omega \sqrt{\left(\frac{\epsilon'_e \mu_0}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)\right)} \\ \beta = \omega \sqrt{\left(\frac{\epsilon'_e \mu_0}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1)\right)} \end{cases}$ |
| Angle de perte $\tan \delta$ | $\tan \delta = \frac{\sigma'}{\omega \epsilon'_r}$ | $\tan \delta = \frac{\epsilon''_r + \frac{\sigma'}{\omega \epsilon_0}}{\epsilon'_r + \frac{\sigma''}{\omega \epsilon_0}} = \frac{\epsilon''_e}{\epsilon'_e}$ |
| Profondeur de pénétration d (m) | $d = \frac{2}{\sigma'} \sqrt{\frac{\epsilon'_r}{\mu_0}}$ | $d = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\epsilon'_e \mu_0}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}}$ |

Les techniques géophysiques en forage

Chapitre 8

1. AVANT-PROPOS

La reconnaissance géotechnique et géophysique en forage est la troisième phase de la recherche de cavités. Elle va permettre, d'une part, de vérifier les indices et les résultats recueillis lors de la première phase « recherche d'indices et études géologiques du terrain ». Elle va permettre, d'autre part, d'évaluer la qualité de l'information apportée par la deuxième phase « méthodes géophysiques de surface » : les forages sont implantés sur les zones à risques potentiellement sous cavées et délimitées par les études précédentes.

Le but du forage est ici d'identifier localement la nature des structures responsables de l'anomalie observée en surface : si un forage traverse la cavité, alors elle est détectée. Sinon, cela signifie que le zonage n'est pas assez précis et que le forage est passé à côté de la cavité, ou bien que la nature du sol et ses hétérogénéités sont source de leurres. La solution est alors de multiplier les forages selon un maillage déterminé, jusqu'à rencontrer la cavité, ou au moins jusqu'à pouvoir expliquer les anomalies de surface.

Avant de se lancer dans ce type de recherche, les maîtres d'œuvre cherchent généralement à tirer le maximum d'informations dès les premiers forages. Dans un premier temps, elles sont recueillies pendant la foration. Ce sont les diagraphies instantanées. Puis après la foration, au moyen d'une sonde descendue dans le forage : ce sont les diagraphies différées (*cf.* Fig. 97). Ces techniques sont particulièrement précises pour évaluer les propriétés physiques d'un terrain mais dans un rayon limité autour du forage : elles présentent une résolution verticale de l'ordre de quelques centimètres, mais une profondeur de pénétration faible (de quelques mètres au plus) autour du forage. Ces techniques donnent des renseignements très riches sur la nature et la stratification des sols, mais sont rarement efficaces pour localiser directement des cavités.

Il faut donc pouvoir étendre la zone d'exploration sur un plus grand volume. On applique alors les méthodes géophysiques présentées précédemment mais en forage. Elles peuvent se faire dans un seul forage (dont certaines pendant la foration), entre deux forages ou entre un ou plusieurs forages et la surface. L'objectif est d'obtenir une image du terrain, une tomographie, intégrant le volume entre les différents points de mesure.

Étant donné les différents paramètres physiques que l'on peut mesurer, et les configurations multiples que chaque technique peut présenter, il existe un très grand nombre de méthodes en forage dont chacune donne des résultats pour des applications particulières. Seules les techniques les plus courantes pouvant apporter une information supplémentaire à la détection de cavités sont présentées ici.

2. LES FORAGES

Pour l'implantation des diagraphies et des tomographies en génie civil, on a recours au forage destructif ou au forage carotté. Dans les deux cas, les outils de forage sont généralement instrumentés pour mesurer, en cours de foration, des paramètres physiques du sol. On réalise alors une diagraphie instantanée.

Le forage destructif consiste à perforer le terrain à l'aide d'un outil (type tricône, à lames au carbure de tungstène, etc.). Les matériaux sont extraits du forage en cours d'avancement, à la boue argileuse ou à l'air comprimé. L'information déduite des matériaux extraits est dégradée car ils sont très remaniés.

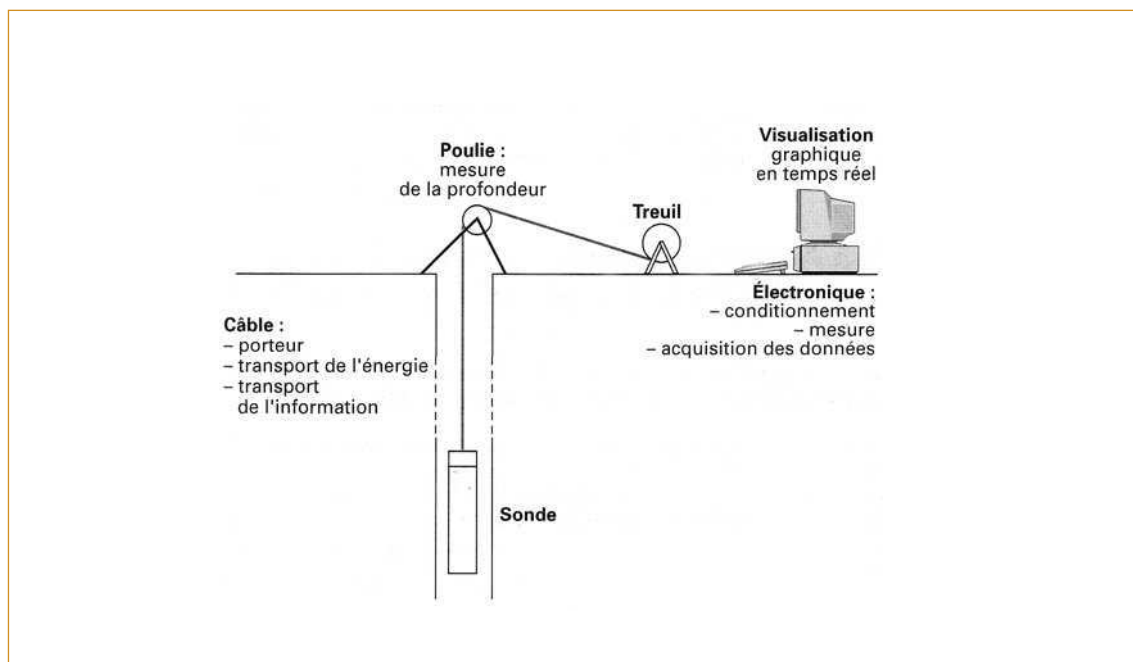
| Dossier : G01506GT | | Date : 11/07/02 | | Inclin.: 0 deg | | X = 240970.47 | | Y = 635719.13 | | Z = 82.20 | | N.C.F. | | | | | | | |
|--------------------|--------|-----------------|--------------------|---|--------------|---|-----------------|---------------|----------|-----------|--------|--------|------|---------|---------|------|---------|------|--|
| DATE | PROFIL | PROF. (m) | LOG | NATURE DU SOL (PRESUMEE) | CAROTTAGE % | RQD % | TUBAGE | OUTIL | EDMILLON | Wn (%) | Wl (%) | Ip (%) | VBS | <0.08mm | Dmax mm | GTR | CaCO3 | | |
| 10/07/02 | | 1 | R R R R
R R R R | BALLAST SNCF
GRIS-NOIR
81.70 N.G.F. | 0 | 100 | TUBAGE DIAM 113 | | | 4.8 | 38 | 20.3 | 2.84 | 98.3 | 0.08 | A2 | 0.9 | | |
| | | | 2 | | LIMON MARRON | | | | | 2.2 | 27 | 5.6 | 1.98 | 99.5 | 0.08 | A1 | 9.6 | | |
| | | | 3 | | | LIMON MARRON | | | | | 2.3 | 28 | 3.6 | 1.91 | 98 | 0.08 | A1 | 13.1 | |
| | | | 4 | | | LIMON MARRON | | | | | 3.6 | 31 | 10.6 | 3.4 | 94.1 | 0.1 | A1 / A2 | 1.1 | |
| | | | 5 | | | LIMON MARRON AVEC MORCEAUX DE SILEX | 100 | | | | 3.6 | 22 | 1.7 | 2.36 | 48.7 | 25 | A1 | 0.1 | |
| | | | 6 | | | LIMON MARRON AVEC MORCEAUX DE SILEX | | | | | 2.9 | 26 | 6.7 | 1.93 | 34.6 | 20 | B6 | 0.2 | |
| | | | 7 | | | LIMON MARRON AVEC MORCEAUX DE SILEX | | | | | 2.8 | 26 | 9.6 | 2.29 | 33.6 | 31.5 | B6 | 0.9 | |
| | | | 8 | | | LIMON ARGILEUX MARRON-JAUNE ET BLANC + BLOCS DE CRAIE + QUELQUES BLOCS DE SILEX GRIS FONCE | | | | | 2.3 | 27 | 13.8 | 1.62 | 34 | 25 | B6 | 39.5 | |
| | | | 9 | | | PASSAGE SABLEUX MARRON-OCRE
73.80 N.G.F.
CRAIE TRES ALTERE MARRON-BEIGE-BLANC
73.40 N.G.F. | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 10 | | | CRAIE BEIGE-BLANC + QUELQUES SILEX
72.20 N.G.F. | | | | | | | | | | | | | |

►►► FIGURE 95 - Résultats d'analyse d'échantillons carottés, réalisés sur le site test présenté dans le chapitre microgravimétrie. Définition des paramètres : la valeur au bleu (VBs), la limite de liquidité (W_L), la limite de plasticité (W_P), l'indice de plasticité (I_P), le pourcentage d'éléments fins (< 0,08 mm), la teneur en carbonate de calcium ($CaCO_3$), la classe de sol selon une norme définie (sur la figure, classe GTR, norme NF P11-300) (Document SNCF).

Le forage carotté consiste à perforer le terrain à l'aide d'un outil cylindrique creux qui permet d'extraire un échantillon du sol, la carotte. Les matériaux prélevés sont très peu remaniés : une observation visuelle directe aide à identifier la nature et les épaisseurs des matériaux, et des études plus poussées peuvent être conduites en laboratoire pour déterminer certains paramètres (Fig. 95).

3. LES DIAGRAPHIES

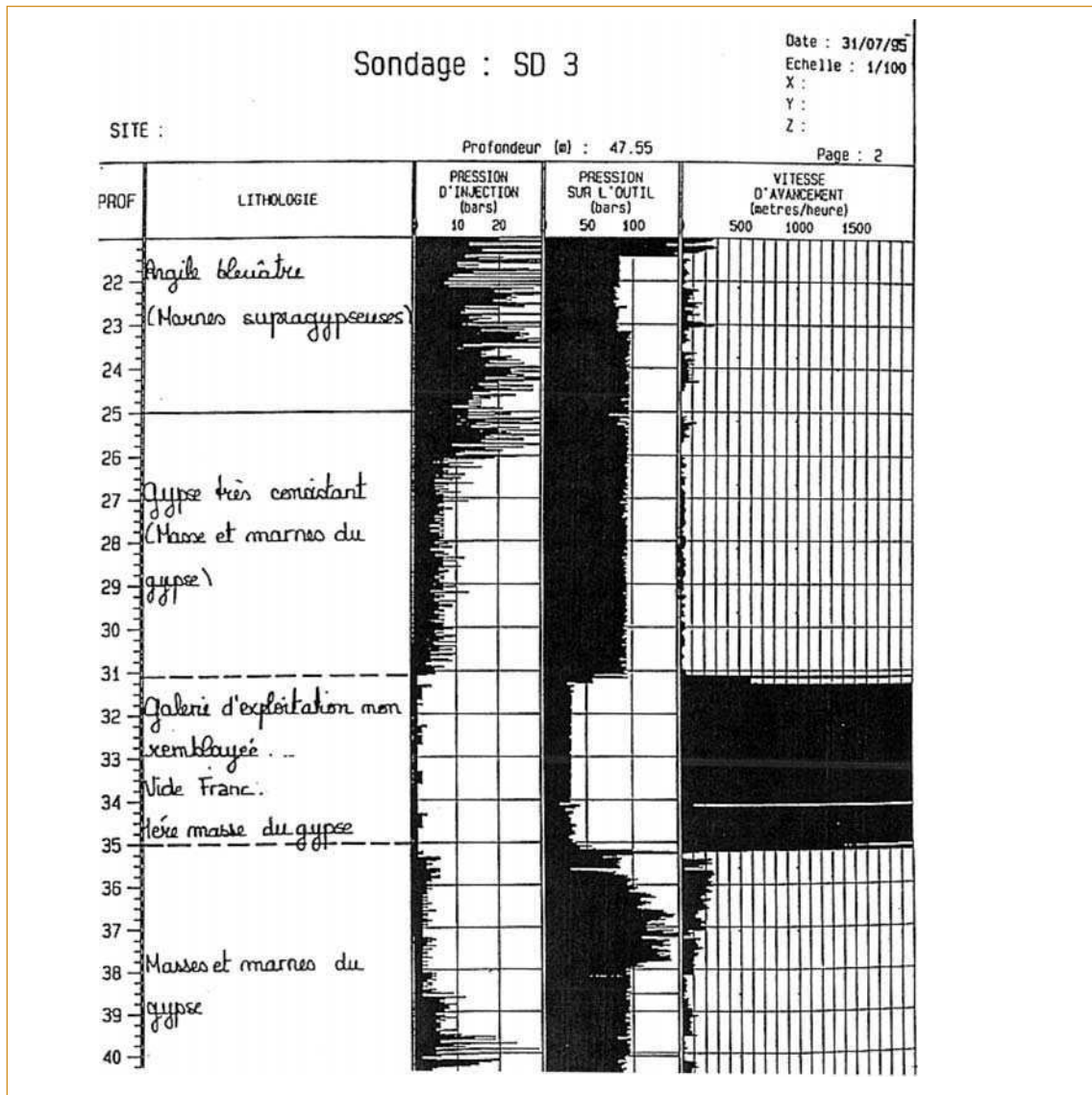
Une diagraphie (Fig. 96) est par définition « tout enregistrement continu en fonction de la profondeur et/ou du temps, d'un paramètre de forage ou d'une caractéristique donnée des formations traversées par un sondage ». Cette technique d'exploration couvre ainsi tous les domaines de la physique. Les méthodes et les types d'appareils (sondes), développés initialement pour les recherches pétrolières et minières sont donc très nombreuses et font déjà l'objet d'ouvrages complets (Serra, 2000) et (Boyer et Mari, 1994). Cette partie présente plus particulièrement les diagraphies de vitesse d'avancement et de radioactivité naturelle. Ce ne sont pas des méthodes spécialement indiquées pour la détection ou la recherche de cavité mais elles sont peu coûteuses en terme de mise en œuvre, de traitement et d'interprétation, et sont très riches d'informations sur la nature des sols traversés. Elles ne peuvent donc être que conseillées dès lors que les sondages sont entrepris au cours d'une étude.



▶▶▶ FIGURE 96 - Schéma de principe de mise en œuvre pour l'obtention des diagraphies (Lagabrielle, 1999).

3.1 Diagraphie instantanée de vitesse d'avancement

La diagraphie instantanée de vitesse d'avancement du forage est une technique très utilisée. L'enregistrement de la vitesse nécessite de maintenir constants les paramètres caractéristiques de la machine de forage (comme le couple de rotation, la pression d'injection, etc.) pour que les variations de vitesses enregistrées ne soient représentatives que des variations mécaniques du sol. Il faut par ailleurs que cet outil ne soit pas trop performant, sans quoi les variations de vitesses seront négligeables. Un exemple de forage avec enregistrement de paramètres est illustré sur la figure 97. On voit que la vitesse d'avancement augmente lorsque le forage rencontre un vide.



▶▶▶ FIGURE 97 - Exemple de détection de cavité par enregistrement de paramètres : pression d'injection, pression sur l'outil et vitesse d'avancement (Document SOLEN Géotechnique).

3.2 La diaggraphie de radioactivité naturelle (RAN)

◆ Principe

La diaggraphie de radioactivité naturelle (RAN ou gamma-ray) permet de mesurer la radioactivité naturelle des terrains traversés. Son principe (Chapellier, 1987) repose sur l'émission de photons gamma par décroissance radioactive d'éléments naturels, comme l'uranium, le thorium et le potassium, et la réception de ces particules par une sonde introduite dans le forage.

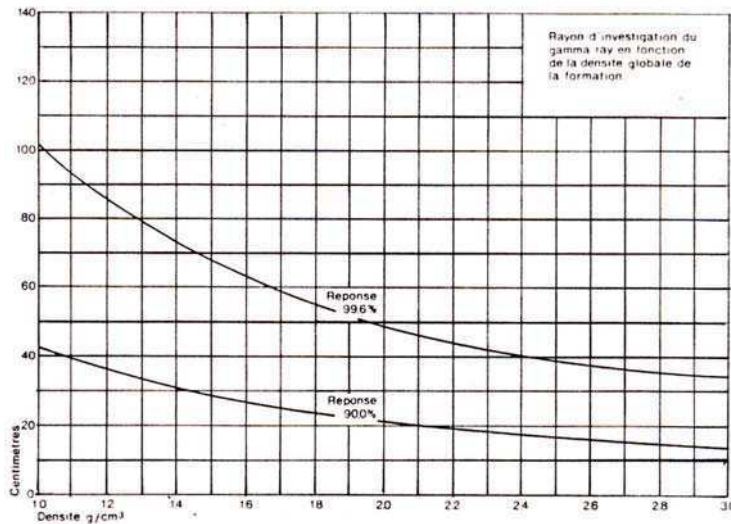
La décroissance radioactive obéit à une loi statistique fonction du temps : chaque élément radioactif a une période caractéristique qui représente le temps au bout duquel le nombre initial d'éléments radioactifs a diminué de moitié. Comme ce nombre initial est inconnu, la mesure est réalisée pendant une certaine durée, dite constante de temps T , afin que le nombre de photons gamma enregistré par la sonde (en coups/seconde) soit représentatif de la concentration en éléments radioactifs. En général, le nombre N de coups pour que l'erreur relative de la mesure de radioactivité soit inférieure à 2,5 % est tel que (Chapellier, 1987) :

$$N \times T > 400$$

Pour déterminer cette constante de temps, un procédé de calibrage peut se faire dans les premiers mètres du forage en répétant les mesures à plusieurs minutes d'intervalle, ou bien au fond du forage, en immobilisant la sonde. Lorsque cette constante de temps est fixée, il faut définir une vitesse d'enregistrement de déplacement de la sonde. En général, cette vitesse est définie par une distance de 30 cm de déplacement pendant la constante de temps :

$$V = 0,3/T$$

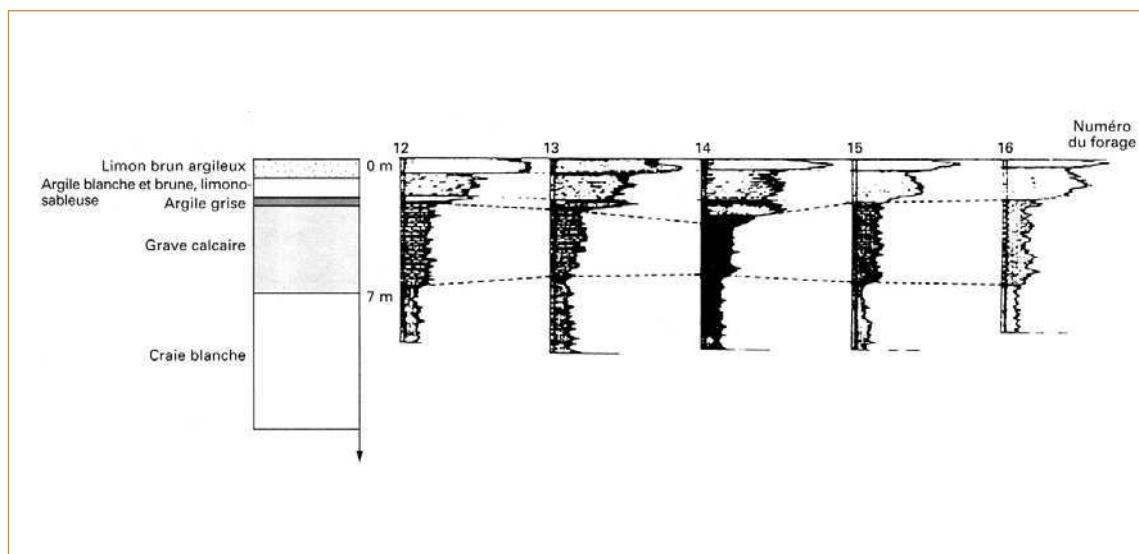
Le rayon d'investigation (Fig. 98) de la diagraphie RAN autour du forage est de quelques centimètres pour les formations les plus denses à un ou deux mètres comme pour les lignites.



▶▶ FIGURE 98
Rayon d'investigation de la RAN en fonction de la densité de la formation (Chapellier, 1987).

◆ Résultat attendu

Le résultat attendu d'une diagraphie RAN est une courbe où les coordonnées horizontales représentent le nombre de coups par seconde (cps/s) et où les coordonnées verticales représentent la profondeur au sein du forage (Fig. 99).



▶▶ FIGURE 99 - Exemple de diagraphie dans un milieu sédimentaire réalisé sur plusieurs forages. La stratification du milieu peut être suivie d'un forage à l'autre (Lagabriele, 1999).

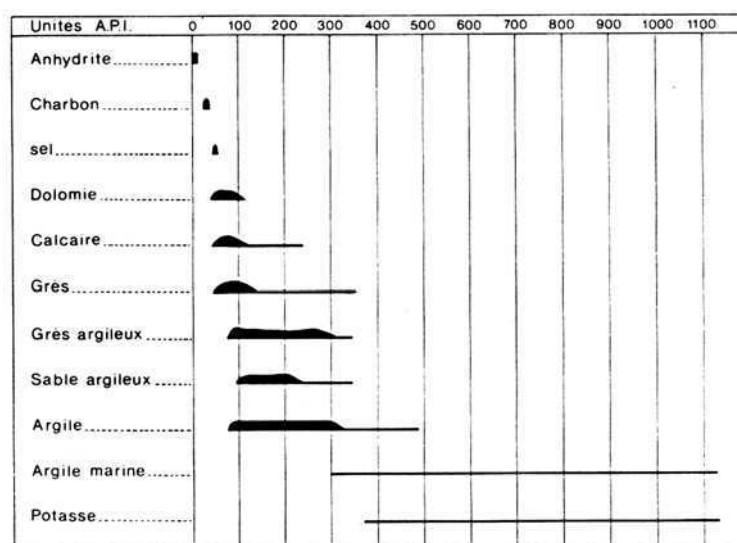
◆ Méthodologie

Domaine d'application

La méthode est fortement conseillée quel que soit le terrain. Elle est facile à mettre en œuvre et ne présente aucune contre-indication. Les renseignements qu'elles apportent sont très utiles pour l'interprétation des mesures géophysiques.

Pour les milieux sédimentaires (Fig. 100), elle est intéressante pour mettre en évidence des couches argileuses. Le cas optimal est celui de la détection d'une cavité remplie d'argile dans un milieu calcaire. L'argile est en effet très radioactive à l'état naturel. Elle sert aussi à définir la stratification du terrain localement lorsqu'elle est pratiquée dans un seul forage (cf. Fig. 103), et à suivre la formation géologique lorsqu'elle est pratiquée sur plusieurs forages (cf. Fig. 99).

▶▶▶ FIGURE 100
Radioactivité naturelle
des principales roches sédimentaires
(Chapellier, 1987).



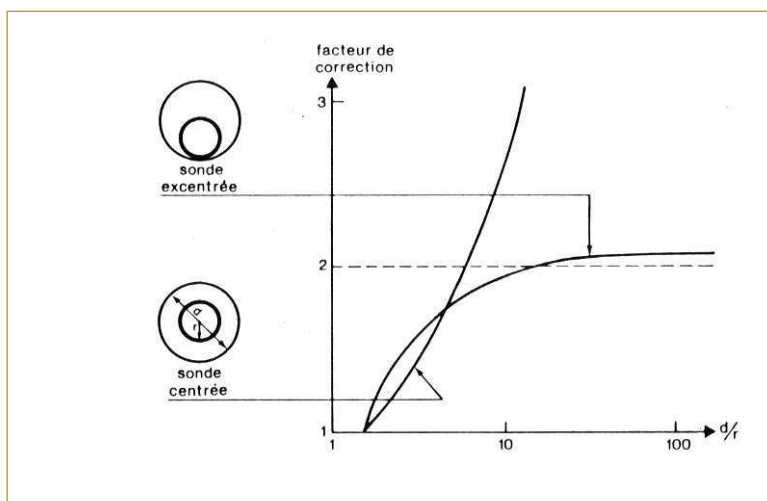
Campagne de mesure

La diagraphie RAN peut être réalisée quasi instantanément en introduisant la sonde dans le train de tige de l'outil de forage. La position de la sonde dans le forage doit être connue à 0,5 % près. Les mesures sont préférentiellement réalisées en remontant la sonde vers la surface, en veillant à garder une vitesse constante. La visualisation des mesures in situ est conseillée.

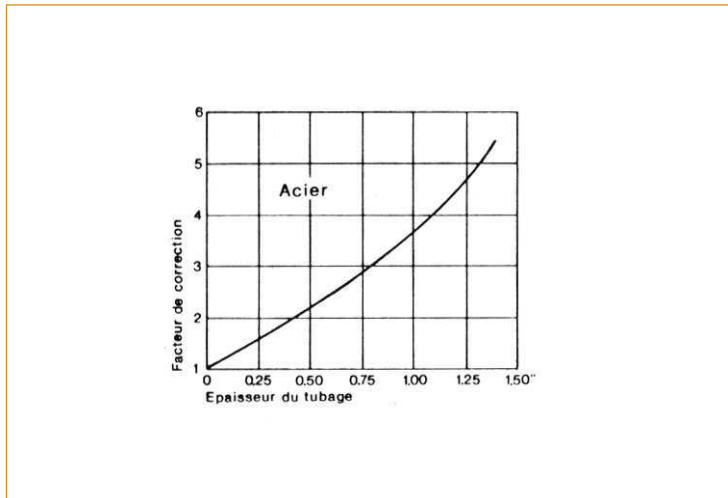
Les paramètres suivants sont à prendre en compte :

➤ le diamètre du forage : si la sonde est de diamètre inférieur à celui du forage, le signal sera atténué. Des facteurs correctifs doivent alors être apportés suivant que la sonde est centrée ou bien colée à la paroi du forage (Fig. 101),

▶▶▶ FIGURE 101
Facteur de correction en fonction du
rapport du diamètre du forage et du
rayon de la sonde, pour une position
centrée et pour une position excentrée
de la sonde (extrait de Chapellier,
1987 d'après Hallenbourg, 1973).



- la nature des boues : si la boue est elle-même radioactive, ou bien de forte densité, le signal sera amplifié ou bien atténué,
- le tubage : l'épaisseur du tubage et sa nature peuvent atténuer le signal (Fig. 102).



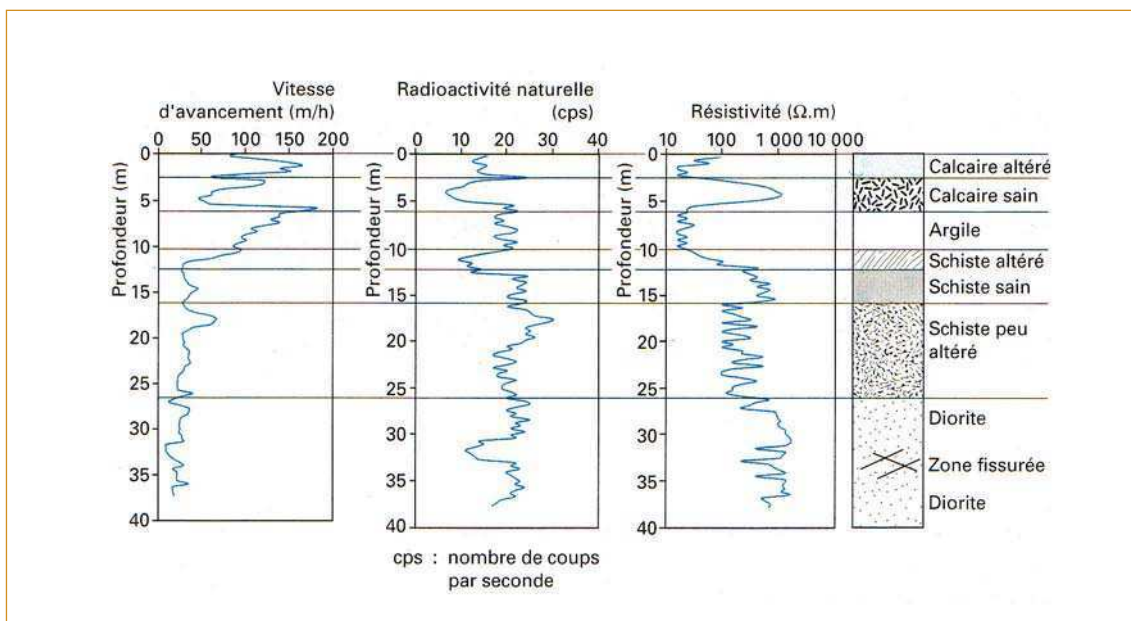
▶▶▶ FIGURE 102
Facteur de correction en fonction de l'épaisseur d'un tubage en acier (extrait de Chapellier, 1987 d'après Hallenbourg, 1973).

◆ Interprétation des mesures

Une zone fortement radioactive implique une augmentation du nombre de coups enregistrés. Elle permet de déduire la lithologie du terrain et de caractériser les formations argileuses, les évaporites, les charbons, les grès, certains sables, etc. Elle permet aussi de caractériser l'état de fissuration d'un massif rocheux et, dans certains cas, d'identifier des fissures remplies d'argiles.

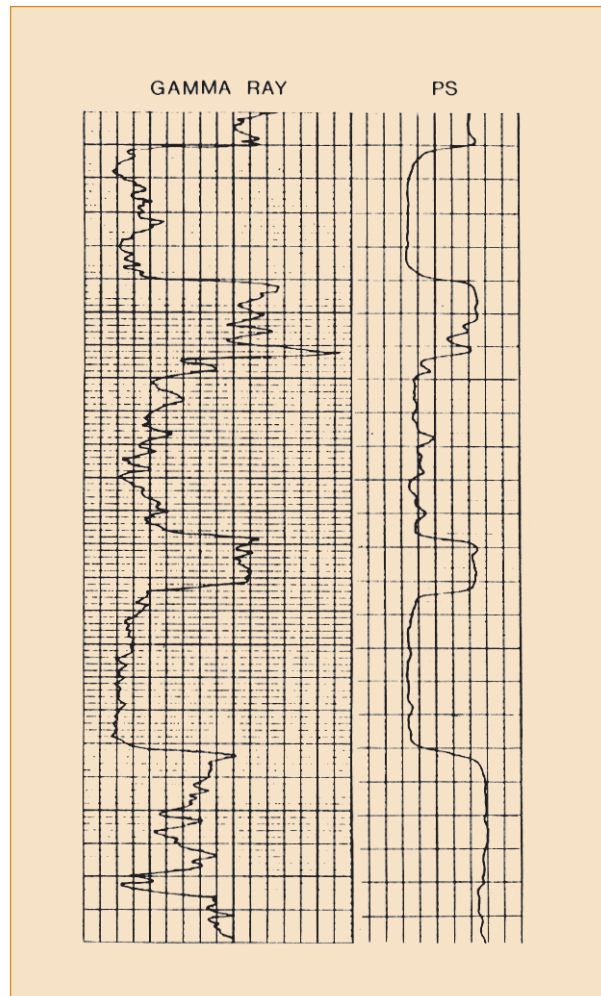
◆ Exemples de mesure

La figure 103 montre des mesures de diagraphies de vitesse d'avancement, de radioactivité naturelle et de résistivité.



▶▶▶ FIGURE 103 - Exemple de diagraphie d'un recouvrement sédimentaire sur un substratum cristallin. À gauche, diagraphie instantanée de vitesse d'avancement. Au milieu, diagraphie de radioactivité naturelle. À droite, diagraphie de résistivité (Lagabrielle, 1999).

⚡ **Remarque** : La diagraphie de résistivité et de polarisation spontanée (PS) ne sont pas présentées. Dans les formations argileuses et sableuses (Fig. 104), la PS donne une signature analogue à la diagraphie RAN. Elles est peu recommandée en forage tubé, rempli d'air ou de boue résistante. La RAN peut alors la remplacer (Chapellier, 1987).



▶▶▶ **FIGURE 104**
Signature de diagraphies RAN et PS
en milieu argileux (Chapellier, 1987).

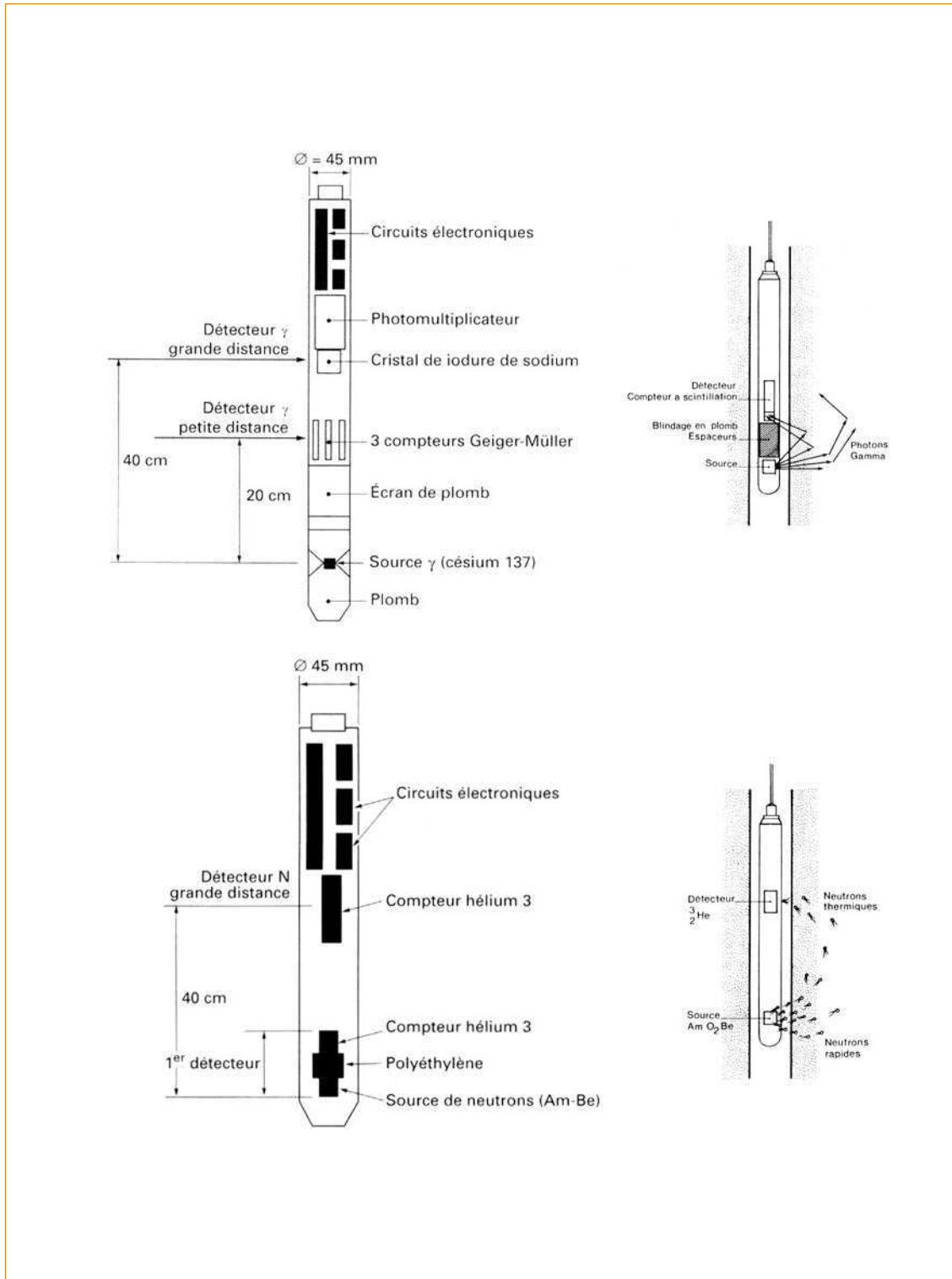
◆ Autres méthodes nucléaires

Il s'agit des diagraphies gamma-gamma, neutron-neutron et neutron-gamma. Des descriptions plus complètes figurent dans (Chapellier, 1987) et (Lagabrielle, 1999). Ce sont des méthodes qui demandent une mise en œuvre précautionneuse en terme de sécurité et exigent l'intervention de spécialistes. Mais les informations que l'on peut en tirer sont particulièrement riches.

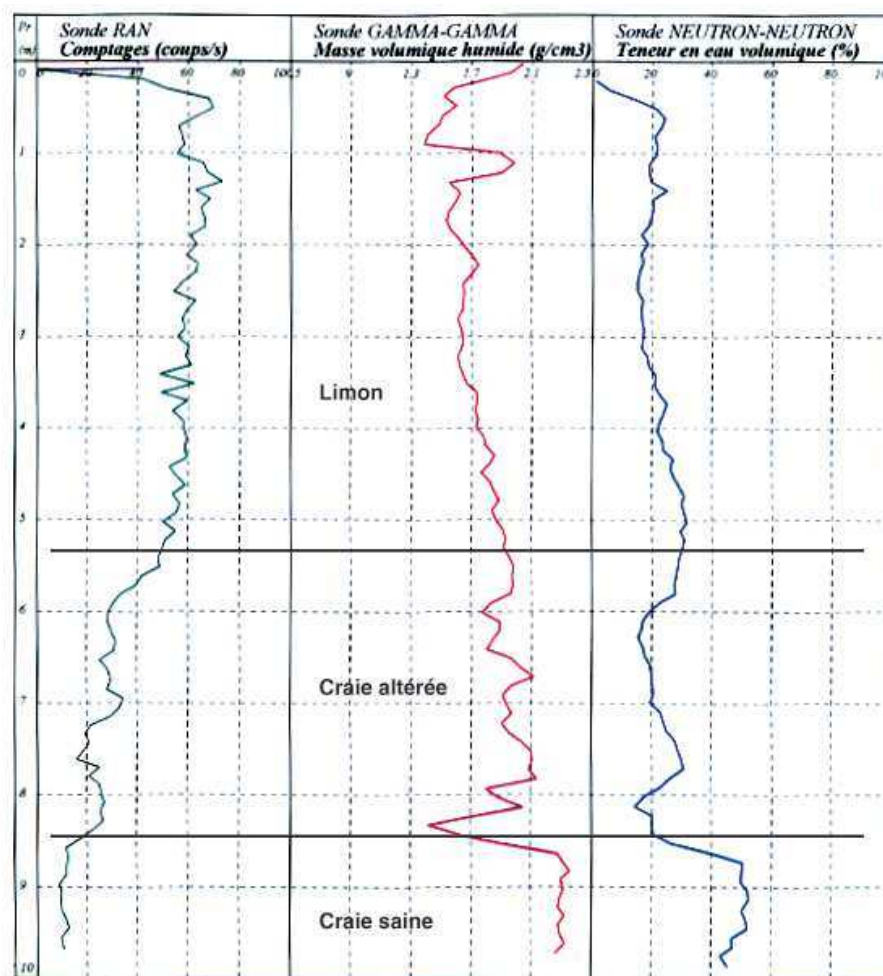
Les sources utilisées sont généralement du cobalt 60 ou du césium 137 pour le rayonnement gamma, de l'américium et du béryllium pour le rayonnement neutron. Le principe de la diagraphie gamma-gamma repose sur la rétrodiffusion des photons sur la matière (effet Compton), celui de la diagraphie neutron-neutron sur la rétrodiffusion de neutron thermique sur la matière, celui de la diagraphie neutron-gamma sur la rétrodiffusion de photons gamma après capture d'un neutron de faible énergie ($< 0,025$ eV) par la matière. Le principe et le type de sonde sont représentés sur la figure 105.

La diagraphie gamma-gamma est utilisée pour l'estimation de la masse volumique des matériaux entourant le forage, la diagraphie neutron-neutron pour l'estimation de leur teneur en eau, et la diagraphie neutron-gamma pour leur composition chimique. Leur profondeur d'investigation est faible : de quelques dizaines de centimètres autour du forage.

Les résultats attendus d'une campagne avec les trois types de diagraphies (RAN, gamma-gamma, neutron-neutron) dans un milieu sédimentaire sont représentés sur la figure 106.



▶▶ FIGURE 105 - Principe de fonctionnement des sondes gamma-gamma et neutron-neutron (Lagabrielle, 1999 et Chapellier, 1987).



▶▶▶ FIGURE 106 - Exemple de diagraphies RAN, gamma-gamma et neutron-neutron en milieu sédimentaire (Document SNCF).

◆ Autres diagraphies

Les autres types de diagraphies les plus répandues sont les diagraphies de résistivité, les diagraphies de polarisation spontanée, les diagraphies microsismiques et les diagraphies acoustiques. Les conditions d'applications sont moins générales et les rayons d'investigations sont de l'ordre de quelques mètres autour du forage.

Les références bibliographiques suivantes sont conseillées : (Serra, 2000), (Boyer et Mari, 1994), (Lagabrielle, 1999) et (Chapellier, 1987).

4. LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES EN FORAGE

4.1 Généralités

Les méthodes géophysiques en forage permettent d'augmenter le rayon d'investigation. Elles 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 techniques en surface. Cette partie se contente de présenter les plus adaptées à la détection des cavités souterraines. Le choix des méthodes présentées repose sur un travail de synthèse réalisé par (Lagabrielle, 1999), résumé dans le tableau XI.

Toutes les méthodes géophysiques en forage sont susceptibles de détecter une cavité dès lors que sa taille est de l'ordre de la distance au forage. Les seules méthodes qui permettent de détecter des cavités pour des distances plus grandes sont les méthodes électromagnétiques (plutôt pour des vides) et les méthodes électriques (plutôt pour des cavités conductrices). Une technique spécifiquement développée dans le cadre du Projet National CriTerre (méthode électrique pendant la foration) est illustrée à la fin du chapitre.

▶▶▶ TABLEAU XI

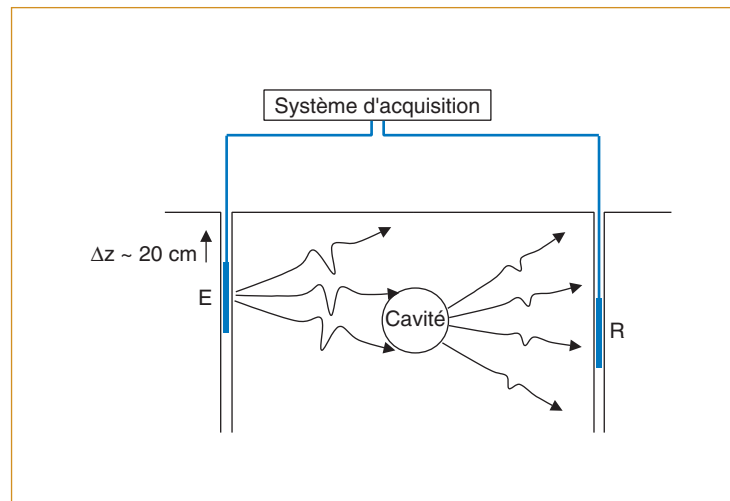
Performances de quelques techniques géophysiques entre deux forages distants de 10 m, pour la détection d'une petite cavité sphérique de 2 m de diamètre, vide ou remplie d'eau ou d'argile (Lagabrielle, 1999)

| 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 notablement plus grande que dans l'encaissement 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 |

4.2 Tomographie monofréquentielle en forage

◆ Principe

Le principe de la tomographie monofréquentielle (Côte et *al.*, 1995) repose sur l'émission et la réception d'une onde monochromatique entre deux forages. Il est illustré sur la figure 107. Une antenne émettrice de type dipôle est descendue dans un forage, à une profondeur déterminée. L'antenne réceptrice est descendue dans l'autre forage et mesure le champ électrique reçu à toutes les positions en remontant dans le forage. L'opération est répétée pour l'antenne d'émission à toutes les positions dans le forage.



▶▶▶ FIGURE 107
Représentation qualitative de la tomographie monofréquentielle.

Grandeurs mesurées

Les grandeurs mesurées sont l'amplitude du champ électrique A :

$$A = A_0 e^{-\frac{z}{L_c}} \text{ (V/m)}$$

et la longueur caractéristique, ou longueur critique du matériau à la fréquence de mesure :

$$L_c = \frac{\rho}{60\pi} \sqrt{\epsilon_r} \text{ (m)}$$

Résultats attendus

Les résultats attendus sont des cartes de longueurs caractéristiques du matériau représentées en fonction de la profondeur dans le forage en ordonnées et en fonction de la distance entre forages en abscisses. Ces longueurs caractéristiques sont issues d'un algorithme d'inversion pour lequel les hypothèses de terrain sont simplifiées par rapport au terrain réel. Elles reposent sur l'étude des trajets empruntés par l'onde monochromatique. L'interprétation est donc délicate. Elle permet cependant de bien déterminer les positions des hétérogénéités.

◆ Méthodologie

Domaine d'application

Le terrain encaissant de la cavité doit être suffisamment résistant ($> 100 \Omega \cdot \text{m}$). La taille supposée des cavités (quelques mètres cubes au minimum) permet de choisir une fréquence adaptée : la longueur d'onde dans le matériau doit être inférieure ou de l'ordre de la taille de la cavité. Une modélisation numérique peut aider à l'interprétation des résultats. Il faut ensuite tenir compte de la présence éventuelle d'eau dans les forages pour le choix des antennes. Si les forages sont tubés, le tubage doit être non métallique. Il faut enfin connaître l'orientation des forages dans le sol : pas de déviation importante de l'une par rapport à l'autre.

Déroulement d'une campagne de mesure

La position relative des antennes est contrôlée au moyen de roues codeuses : la hauteur de l'une par rapport à l'autre doit être connue à 0,5 % près. Le déplacement des antennes dans le forage se fait selon un pas de 20 cm environ. Les amplitudes du champ électrique sont enregistrées pour toutes les positions.

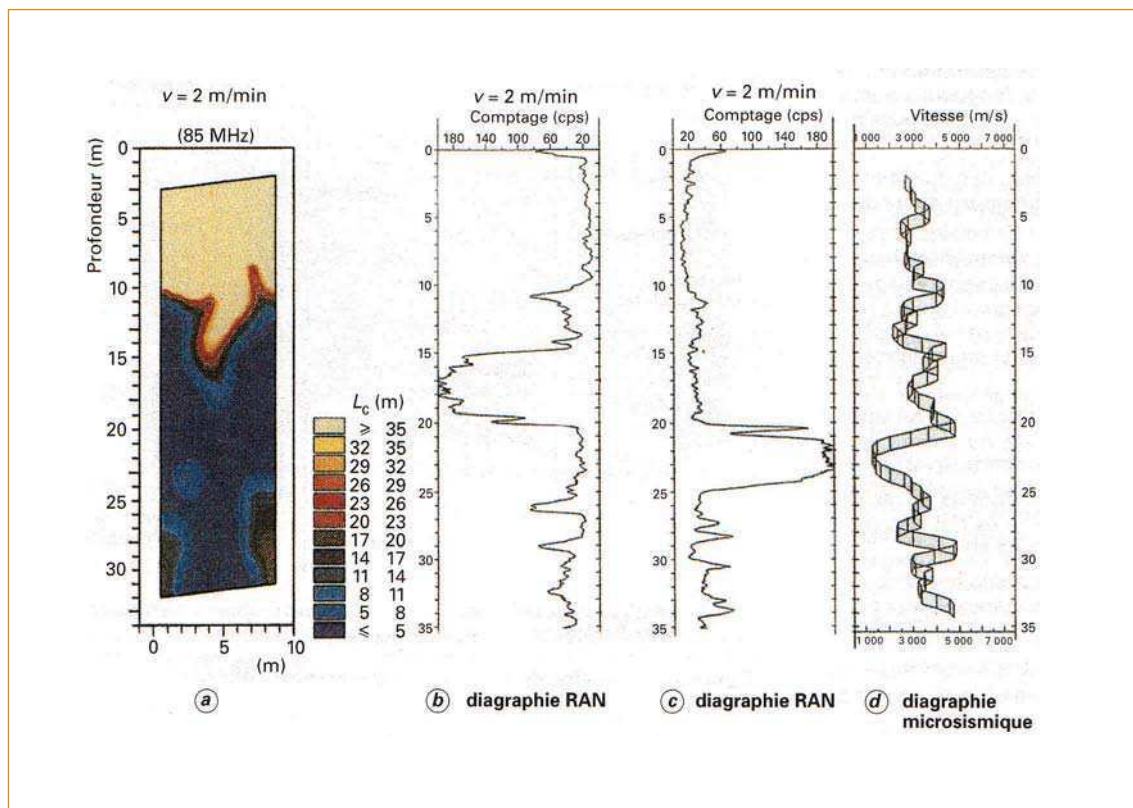
Le matériel peut être composé d'un analyseur permettant de générer une onde monofréquentielle, généralement amplifiée et envoyée vers l'antenne émettrice. L'antenne réceptrice est reliée à l'analyseur où l'amplitude du champ reçu est mesurée.

Interprétation des résultats

L'interprétation des données se fait en terme de longueurs caractéristiques. Les hétérogénéités du terrain sont localisées en profondeur et en distance entre forages directement sur l'image obtenue. Une cavité vide ou plus résistante que le milieu hôte se manifeste par des longueurs caractéristiques plus grandes que celles du terrain hôte et, inversement, pour une cavité remplie de matériaux conducteurs dans un terrain plus résistant.

◆ Exemple de mesure

Sur la figure 108, la tomographie est réalisée à 85 MHz. Les forages de 35 m de profondeur sont distants de 8 m. Les mesures de longueurs caractéristiques mettent en évidence la répartition d'un calcaire sain (couleur claire) et l'extension latérale du karst qu'il surplombe (couleur sombre).



▶▶ FIGURE 108 - Exemple de tomographie électromagnétique à la fréquence de 85 MHz (Document LCPC).

4.3 La tomographie radar

◆ Le principe

Il est identique à celui décrit pour la tomographie monofréquentielle. Une antenne descendue dans un forage émet une impulsion électromagnétique dans le domaine temporel et une antenne réceptrice mesure le champ reçu dans l'autre forage. On détermine pour chaque position de l'émetteur et du récepteur les temps de propagation des ondes dans le matériau compris entre les deux forages (on suppose en général que la vitesse des ondes est reliée par une simple relation avec la permittivité réelle du matériau). L'ensemble des temps de propagation mesurés permet de remonter par inversion à une carte des vitesses dans le milieu.

◆ Les limites

Une interface parallèle aux forages est souvent source d'artéfacts dans les mesures. De plus les techniques d'inversion classiques, qui reposent sur l'hypothèse que le trajet des ondes (rais) reste confiné dans le plan des forages, sont parfois insuffisantes. Il faut alors pouvoir prendre en compte les rais courbes dans le plan mais aussi autour des forages (3D).

4.4 La réflectivité radar

C'est le radar dans un seul forage. Une antenne émettrice et une antenne réceptrice sont descendues en même temps dans un forage et sont déplacées d'un pas de l'ordre d'une demi-longueur. Le principe et les grandeurs mesurées sont identiques à ce qui a été présenté pour le radar de surface. Ces antennes sont en général omnidirectionnelles.

Le résultat d'une mesure est une représentation de l'amplitude du signal reçu dans le milieu autour du forage en fonction du temps de propagation en abscisses et de la profondeur de(s) l'antenne(s) dans le forage.

On obtient une première information sur la localisation des anomalies autour du forage, mais on n'a aucune information sur leur localisation azimutale (la direction autour du forage). Cette ambiguïté peut être levée selon les résultats des informations préalablement recueillies ou bien en recoupant les informations d'un ou plusieurs forages proches. Des développements récents ont mis au point des antennes directionnelles.

4.5 Les méthodes électriques après la foration

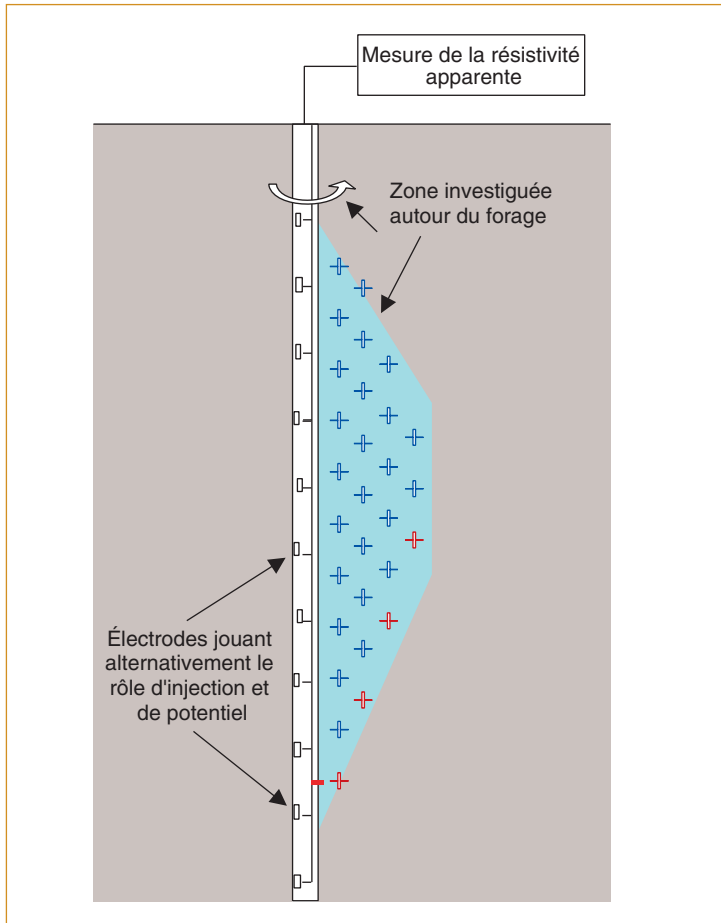
Les dispositifs et les différentes techniques présentés dans la partie « méthodes électriques » en surface montrent encore une plus grande diversité pour les applications en forage, entre forages et entre forages et surface (Bing et Greenhalgh, 2000).

◆ Principe

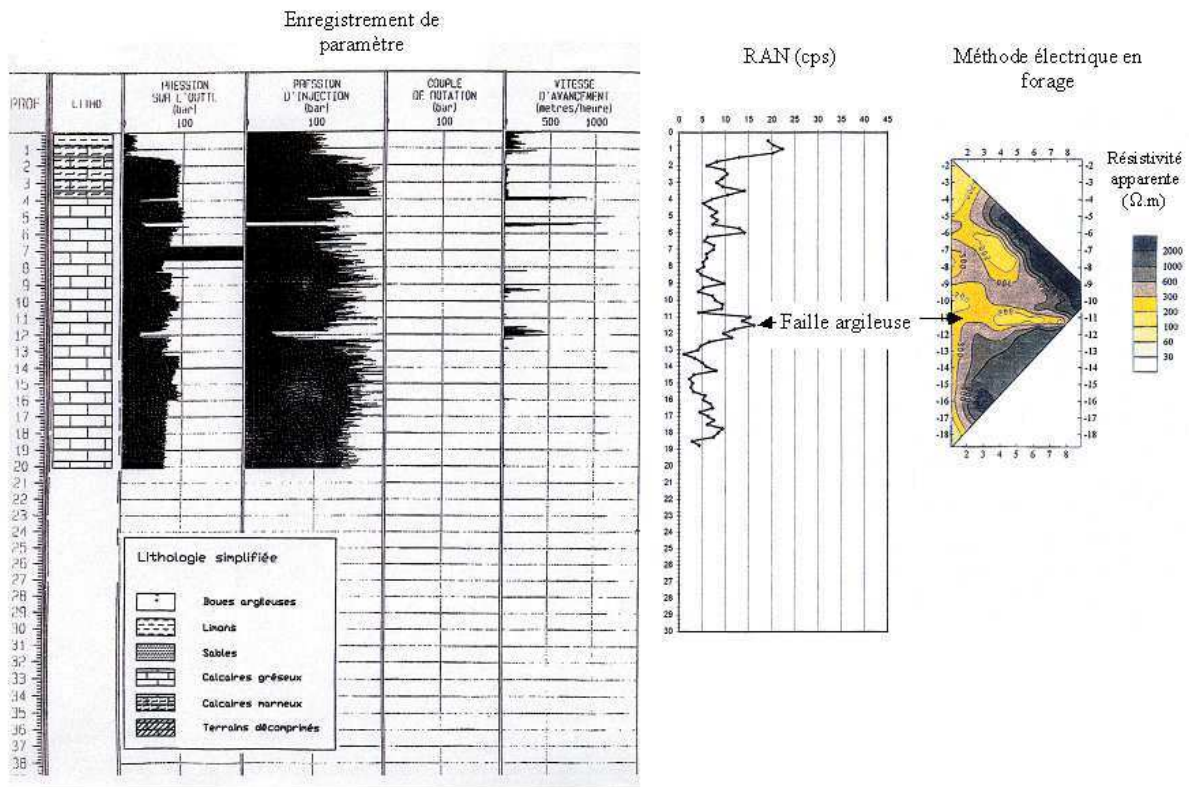
Un dispositif d'électrodes d'injection de courant et de mesure de potentiel est introduit dans le forage. Selon la configuration et l'espacement inter-électrodes, les données mesurées concernent le volume autour du forage. Le rayon d'investigation dépend de la longueur du dispositif et de la résistivité des matériaux rencontrés (de l'ordre de 1/6 à 1/8 de la longueur du dispositif en milieu homogène). La résolution latérale dépend de la distance entre électrodes (Fig. 109).

◆ Exemples de mesure

L'exemple présenté concerne la localisation autour des forages de karst argileux et de vides (Fig. 110). Les mesures de résistivité apparentes sont accompagnées de mesures en diagraphie RAN et d'enregistrement de paramètres. L'ensemble des résultats permet de conclure plus facilement sur la présence et la nature des anomalies rencontrées.



▶▶▶ FIGURE 109
Exemple de méthode électrique en forage. Les mesures concernent ici tout le volume autour du forage.

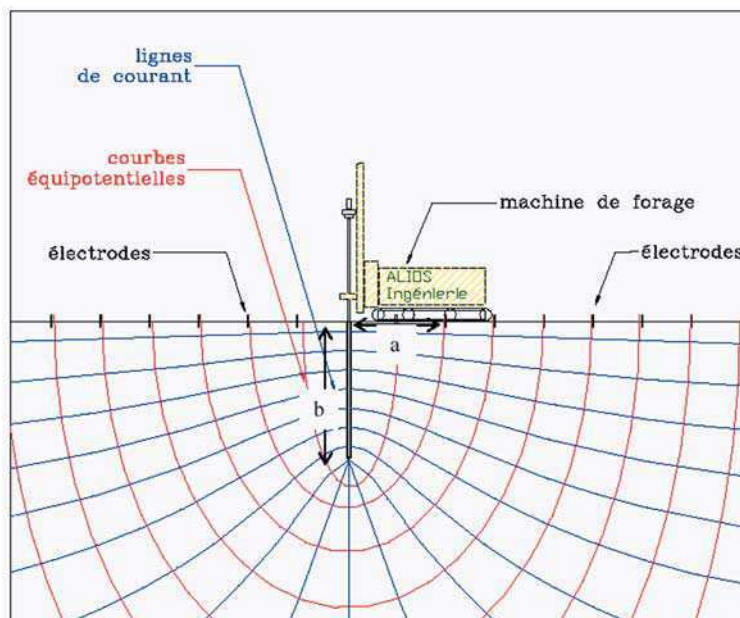


▶▶▶ FIGURE 110 - Exemple de détection d'une faille argileuse en milieu calcaire par mesure en méthode électrique en forage (Document EDG).

4.6 Méthode électrique pendant la foration

◆ Principe

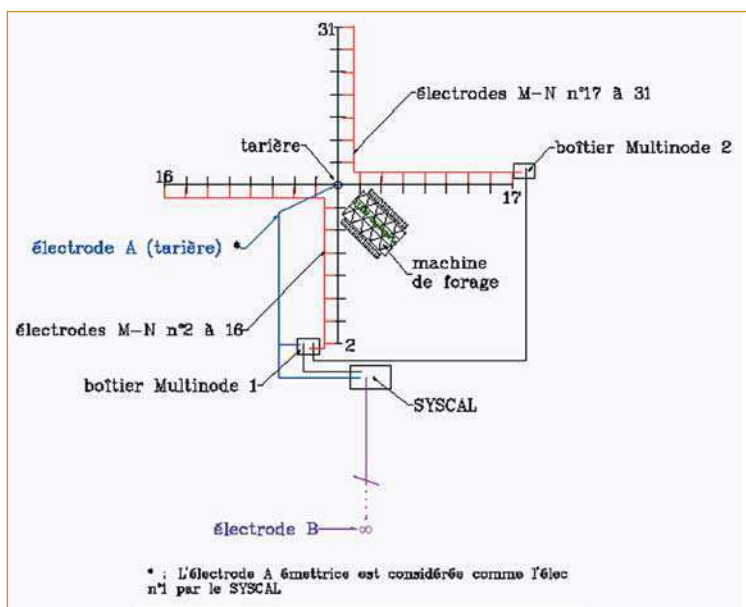
Le dispositif présenté ici est de type tripôle. Il a été mis au point dans le cadre du Projet National CriTerre (Denis et al., 2003), (Conil et al., 2001). Il se propose de réaliser des mesures en injectant le courant par l'intermédiaire du train de tige (Fig. 111). Les électrodes de mesures sont placées en surface selon deux ou quatre axes autour du forage. L'injection est faite le long du train de tiges (électrode A).



▶▶▶ FIGURE 111
Représentation schématique du champ de potentiel lors d'une injection de courant par l'intermédiaire du train de tiges (Denis et al., 2003).

◆ Méthodologie

Le dispositif de mesure est représenté sur la figure 112. Les électrodes (31) de mesure de potentiel sont espacées de 1 m selon quatre axes en surface. Elles permettent une reconnaissance de 7 m autour du forage. L'intensité du courant injecté et la différence de potentiel entre chaque couple d'électrodes sont mesurées à différentes profondeurs, espacées de 1 m. Ces mesures permettent de calculer pour chaque couple d'électrodes une résistivité apparente, fonction de la longueur de tige et de la distance des électrodes au forage. Le temps de mesure est de l'ordre de 2 à 7 mn pour chaque palier. Entre trois et dix mesures sont enregistrées pour obtenir une valeur moyenne de différence de potentiel.

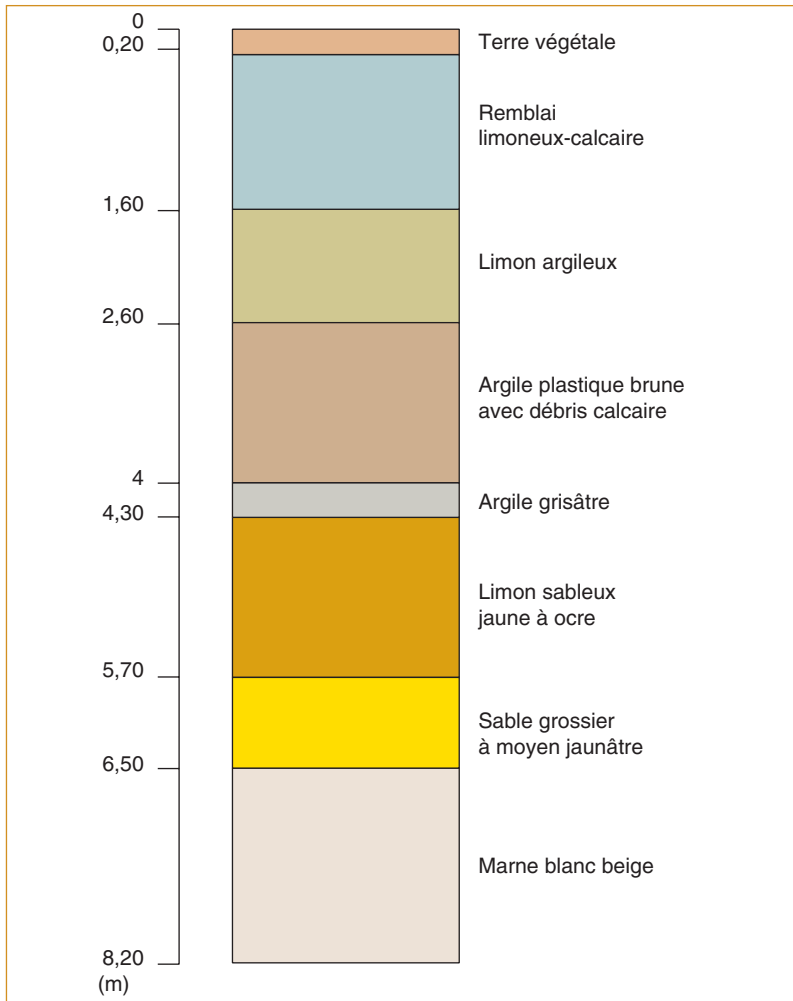


▶▶▶ FIGURE 112
Positionnement du dispositif de mesure (Denis et al., 2003).

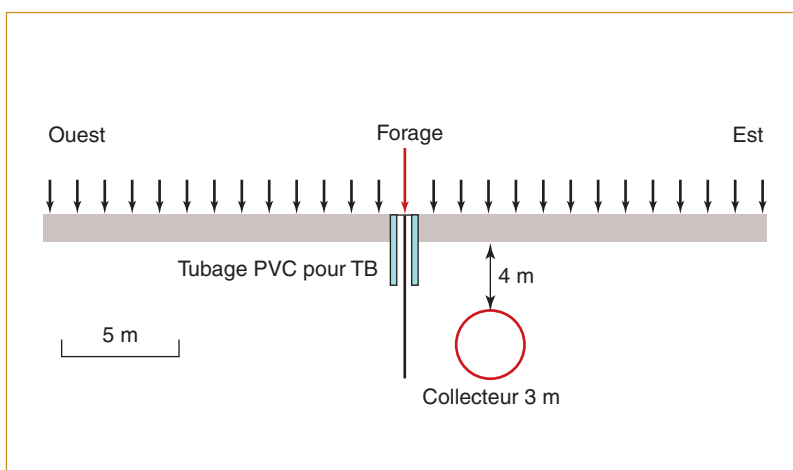
◆ Exemples de résultats

La coupe géologique de la zone d'étude est décrite sur la figure 113. Un collecteur de 3 m de diamètre est situé à 4 m de profondeur environ (Fig. 114). Plusieurs types de forages réalisés à différentes distances du collecteur ont permis de réaliser des mesures électriques pendant la foration. Deux exemples sont illustrés ici.

Le premier forage noté TC, d'une profondeur de 10 m, est réalisé à la tarière continue. Il est situé à 4 m de l'axe du collecteur. Le second forage noté TB, d'une profondeur de 10 m, est réalisé à la tarière continue sur 3 mètres et tubé en PVC, puis jusqu'à 10 mètres en destructif avec un fluide de forage. Il est distant de 3,5 à 4 m de l'axe du collecteur. Le tubage du forage permet de focaliser l'injection de courant et de se rapprocher d'une injection ponctuelle.

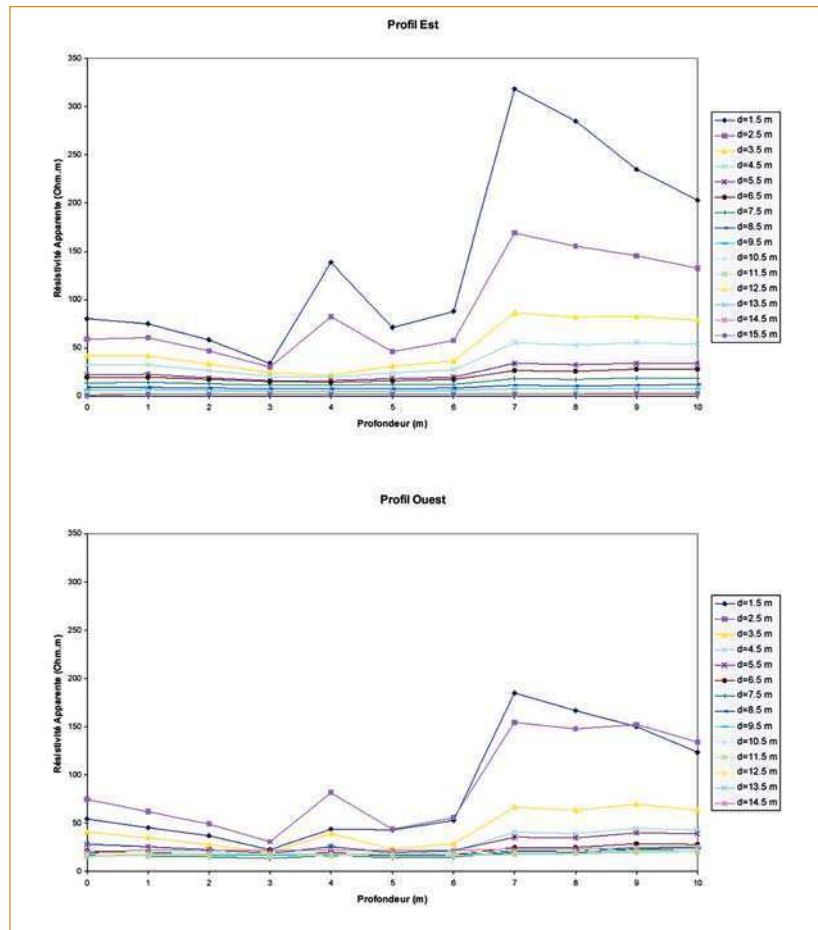


▶▶▶ FIGURE 113
Log lithologique de la zone d'étude (Denis et al., 2003).

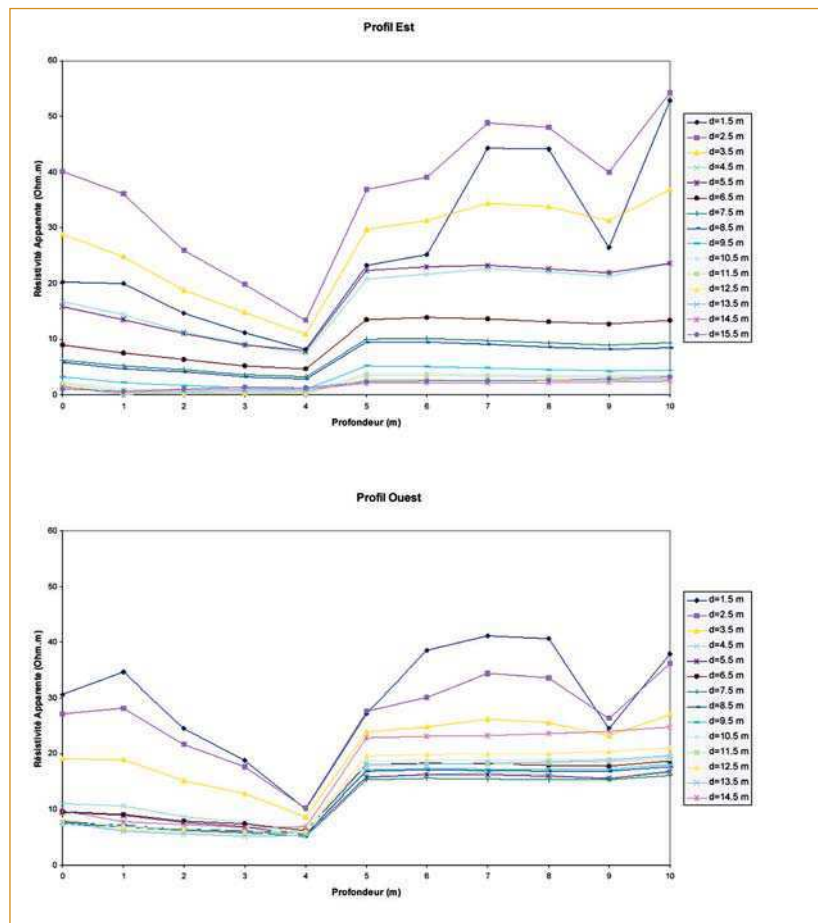


▶▶▶ FIGURE 114
Position du collecteur par rapport aux électrodes de potentiel - Coupe ouest-est (Denis et al., 2003).

▶▶▶ FIGURE 115
Valeurs de la résistivité apparente obtenues au forage TC en fonction de la profondeur de tiges pour différentes distances au forage et pour deux directions (Denis et al., 2003).



▶▶▶ FIGURE 116
Valeurs de la résistivité apparente obtenues au forage TB en fonction de la profondeur de tige pour différentes distances au forage et pour deux directions (Denis et al., 2003).



La figure 115 et la figure 116 montrent les résultats de mesure de résistivité obtenus pendant la foration pour des dispositifs en ligne avec le forage TC et avec le forage TB.

Pour le forage TC, à partir de 4 m de profondeur, la résistivité apparente augmente fortement jusqu'à la base de la canalisation située à 7 mètres de profondeur. Cette augmentation est d'autant plus forte que les électrodes sont proches du sondage (électrodes de 1 à 5). Le profil Est recoupe le collecteur. Il montre de plus fortes valeurs de résistivités que le profil Ouest. On notera que pour les électrodes les plus éloignées, les faibles valeurs de résistivité semblent correspondre au substratum marneux. Celui-ci étant situé moins profond du côté Est que du côté Ouest, il semble aussi responsable de la diminution globale des valeurs des résistivités sur le profil Est.

Pour le forage TB., la même augmentation des résistivités est observée à partir de 4 m de profondeur pour les électrodes distantes jusqu'à 6 m du forage. Au-delà de 8 m, la baisse des résistivités est moins marquée que pour le forage TC.

◆ Conclusion et perspectives

La méthode de mesure de résistivité pendant la foration a fait l'objet d'étude de faisabilité (Conil et al., 2001) que les expérimentations menées dans le cadre du Projet National CriTerre (Denis et al., 2003) ont confirmé. L'injection de courant est réalisée tout le long du train de tiges. Le dispositif présenté permet ici de détecter le collecteur, ce qui par ailleurs est conforme aux modélisations.

Les résultats obtenus avec un outil bilame et un fluide de forage sont analogues à ceux obtenus par tarière continue sur les trois à quatre premiers mètres du forage. L'utilisation d'un tubage permet de focaliser l'injection de courant, et favoriserait la détection d'anomalies au-delà de la profondeur du tubage. Il reste à déterminer l'influence du fluide de forage sur les valeurs des résistivités mesurées.

5. CONCLUSION GÉNÉRALE SUR LES DIAGRAPHIES ET LES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES EN FORAGE

Les diagraphies et les méthodes géophysiques en forage constituent la dernière étape de la recherche de cavités souterraines. Les diagraphies visent à décrire la géologie du terrain par l'enregistrement de paramètres physiques au moyen d'une sonde descendue dans le forage. Les diagraphies préconisées sont les diagraphies instantanées permettant l'enregistrement de paramètres mécaniques de l'outil de forage (vitesse d'avancement, pression sur l'outil, etc.) et la diagraphie de radioactivité naturelle (RAN). Les diagraphies ne sont pas des méthodes dédiées à la recherche de cavités, car leur rayon d'investigation est très limité. Cependant les informations qu'elles apportent sont très riches, elles sont peu coûteuses, leur mise en œuvre est simple et l'interprétation souvent immédiate. Les méthodes géophysiques en forage permettent d'étendre le rayon d'investigation autour du forage. Les plus efficaces pour détecter des cavités sont les méthodes électromagnétiques (tomographie monofréquentielle, tomographie radar, réflectivité radar), préférentiellement déployées pour la recherche de vides, et les méthodes électriques pour la recherche de poches conductrices.

Lorsqu'une cavité est découverte, d'autres moyens techniques peuvent être déployés pour caractériser les dimensions des anomalies rencontrées, comme les sonars ou les caméras. Le travail concernant les dispositions à entreprendre pour sécuriser les zones à risques peuvent alors commencer.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BING Z. and GREENHALGH S.A., *Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations*, Geophysical Prospecting, **Vol. 48**, 2000, pp. 887-912.
- BOYER S., MARI J.L., *Sismique et diagraphies*, Éditions Technip, publication de L'Institut Français du Pétrole, 1994.
- CONIL L., HOUY L., DENIS A., BREYSSE D., CHASSAGNE P., *Investigations géophysiques pendant la foration. Méthode des résistivités*, Étude de Faisabilité, Projet National Criterre - CDGA Bordeaux, 2001.
- CHAPPELLIER D., *Diagraphie appliquée à l'hydrologie*, Édition Lavoisier, 1987.
- CÔTE Ph., DEGAUQUE P., LAGABRIELLE R. and LEVENT N., *Detection of underground cavities with monofrequency electromagnetic tomography between boreholes in the frequency range 100 MHz to 1 GHz*, Geophysical Prospecting, **Vol. 43**, 1995, pp. 1083-1107.
- DENIS A., HOUY L., BREYSSE D., *Investigation géophysique pendant la foration- Forage électrique - Expérimentation du Bourget*, Projet National Criterre, CDGA Bordeaux, 2003.
- DENIS A., MARACHE A., OBELLIANNE D., *Electrical resistivity borehole measurements: applications to an urban tunnel site*, Journal of Applied Geophysics, article in press, 2002.
- HALLENBURG J.K., *Interpretation of gamma ray logs*, The Log Analyst, **Vol. 14**, n° 1, 1973.
- LAGABRIELLE R., *Diagraphie et géophysique de forage*, Technique de l'ingénieur, C-225, 1999.
- SERRA O. et L., *Diagraphies - Acquisition et applications*, Éditions Serralog, 2000.
- WOODS, R.D., *Borehole methods in shallow seismic exploration*, Geophysical Characterization of sites : Volume prepared by ISSMFE Technical Committee #10. XIII ICSMFE, 1999, pp. 91-100.

Conclusion

Ce guide propose un ensemble de recommandations liées à l'utilisation de méthodes géophysiques pour la détection de cavités souterraines. Il résulte du besoin fort exprimé par les donneurs d'ordre soucieux de sécuriser le plus efficacement possible des terrains susceptibles d'être sous-cavés. Il tente d'apporter quelques informations concrètes à ces donneurs d'ordre :

- Identifier la place et l'apport potentiel de la géophysique dans la phase générale des reconnaissances.
- Rassembler en un seul volume les principes de base de la géophysique et les méthodologies particulières visant à la détection des cavités.

Nous espérons que les informations rassemblées ici seront de nature à les aider dans l'établissement des commandes correspondantes.

Par ailleurs, ce guide regroupe également, à destination des géophysiciens, des informations pratiques relatives à la mise en œuvre des méthodes géophysiques pour l'application particulière détection des cavités :

- Rassembler en un seul volume une description précise du besoin et les capacités et limites des outils de détection.
- Indiquer (grâce à la multiplicité des contributeurs spécialistes) un point de vue consensuel sur le bon usage de chaque technique pour ce besoin précis.

La tâche n'était pas aisée. La diversité des approches et des publics visés nous a conduit à établir des compromis. De plus, la forte contrainte liée au caractère nécessairement succinct d'un tel ouvrage a impliqué quelques limitations dans la description d'un certain nombre de points.

Le guide présente tout d'abord les principaux types de cavités naturelles et anthropiques, et le contexte dans lequel elles se situent. Il propose une méthodologie générale d'étude qui permet de choisir les méthodes géophysiques adéquates, dont l'objectif est de déterminer le plus judicieusement possible l'emplacement des forages de contrôle. Il détaille enfin le principe, les résultats, le domaine d'application, la méthodologie de mise en œuvre, les limites et les avantages des méthodes les plus utilisées pour la détection des cavités souterraines.

Les recommandations formulées résultent d'un consensus issu des conseils et de l'expérience de professionnels des mondes académiques et industriels de la géophysique et de la reconnaissance. Qu'ils soient une nouvelle fois remerciés ici pour leurs apports, leurs nombreuses relectures et pour les discussions passionnantes générées.

Les conclusions des experts consultés ont parfois différé quant à l'efficacité des méthodes à détecter des cavités souterraines. En effet, toute cavité très proche de la surface peut être détectée avec un grand nombre de méthodes. De plus, il existe toujours un exemple réel de détection avec une méthode employée dans un contexte géologique et pour un type de cavité non favorable qui constitue un contre exemple manifeste. Les recommandations proposées tentent donc de décrire de manière consensuelle « l'art et la manière » d'utiliser à bon escient les techniques géophysiques dans les différents environnements susceptibles d'abriter des cavités.

Par ailleurs, une cavité souterraine ne se limite pas à un objet ponctuel localisé en profondeur, et il s'avère parfois plus efficace de mettre en évidence des structures connexes (puis d'accès aux carrières et fissures karstiques en particulier). C'est pourquoi des méthodes géophysiques comme la photo-interprétation et la radiométrie infrarouge thermique, qui ne font généralement pas partie des méthodes géophysiques classiquement décrites, sont présentées dans ce guide.

Enfin, les méthodes géophysiques présentées sont généralement complexes à mettre en œuvre et nécessitent l'analyse et l'expérience de géophysiciens confirmés à toutes les étapes de leur réalisation. L'obtention de résultats utiles et fiables, quelle que soit la méthode, dépend fortement de ce facteur.

Une hiérarchisation de l'efficacité des méthodes en fonction des différents contextes a été proposée dans le chapitre de synthèse. Ces conclusions seront bien sûr à pondérer en fonction de particularismes locaux. De plus, le lecteur ne manquera d'y apporter de pertinentes améliorations grâce à sa propre expérience et face à l'apparition d'éventuelles innovations testées.

Dans tous les cas, l'utilisation d'une méthode géophysique doit être considérée comme une étape dans la méthodologie générale de reconnaissance et de détection de cavités souterraines. Son objectif principal est d'apporter des compléments aux études préalables, et de définir en surface les zones à risques où des forages seront implantés. Ce guide ne peut être considéré comme un règlement à appliquer pour la détection de cavités souterraines, mais comme un outil d'aide au choix et à la mise en œuvre des méthodes géophysiques.

Document publié par le LCPC sous le numéro J1050374
Conception et réalisation LCPC-IST, Marie-Christine Pautré
Dessins LCPC-IST, Philippe Caquelard
Impression Jouve - N°
Dépôt légal 4e trimestre 2004



Ce guide, rédigé dans le cadre du projet National CriTerre, propose un ensemble de recommandations liées à l'utilisation de méthodes géophysiques pour la détection de cavités souterraines. Il vise à assister les donneurs d'ordre en identifiant la place et l'apport de la géophysique dans la phase des reconnaissances générales. Par ailleurs les géophysiciens et les donneurs d'ordre y trouveront une description sommaire des principes des techniques envisageables et leurs capacités et limites pour ce besoin particulier ainsi qu'un point de vue consensuel sur " le bon usage " de ces méthodes.

Il s'articule autour d'une synthèse générale qui décrit la démarche conduisant au choix des techniques convenables. Elle est précédée d'un chapitre décrivant les cavités, leur contexte et la démarche générale de reconnaissance. Enfin, la synthèse générale est suivie des chapitres géophysiques qui exposent les principes, capacités, limites et mises en œuvre pour chacune des méthodes.

L'utilisation d'une méthode géophysique doit être considérée comme une étape dans la méthodologie générale de reconnaissance et de détection de cavités souterraines. Son objectif principal est d'apporter des compléments aux études préalables, et de définir en surface les zones à risques où des forages seront implantés.

This guide was composed in the framework of the French National Project "CriTerre". It indicates a set of recommendations relative to the use of geophysical techniques applied to cavity detection. It aims to assist project owners by the determination of the time and the contribution of geophysical techniques in the general reconnaissance phase. Moreover, geophysicists and project owners will find a brief description of basic principles, limits and performances for each methods. A consensus about appropriate way of operating is also enounced.

It is scheduled as follows. The first chapter is devoted to the description of the cavities, their environment and the general reconnaissance campaign. Then, a general synthesis describe the way leading to the choice of the appropriate techniques. And finally, several geophysical chapters explain principles, performances, limits and dedicated operating instructions.

The use of a geophysical method has to be considered as a step in the general reconnaissance methodology for cavity detection. Its main aim is to bring helpful complements to first surveys and to implement risk areas where boreholes will be drilled.