

N° d'ordre : 2482

# THÈSE DE DOCTORAT

Présentée à:

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE  
LABORATOIRE DE MÉCANIQUE DE LILLE ( U.R.A. 1441)  
ÉCOLE UNIVERSITAIRE D'INGÉNIEURS DE LILLE

Spécialité  
GÉNIE CIVIL

## RECONNAISSANCE DES SOLS A L'AVANCEMENT LORS D'EXCAVATION PAR TUNNELIER : UTILISATION D'UNE MÉTHODE FONDÉE SUR LES RÉSISTIVITÉS ÉLECTRIQUES.

Par  
Pascale BEBOT-COURTOIS

Soutenu le  
5 février 1999



Après avis de :

M. J.P. HENRY, Rapporteur  
M. A. TABBAGH, Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de :

M. G. CAIGNAERT, LML  
M. I. SHAHROUR, USTL-EUDIL  
M. J. URBANIACK, FCB

Je dédie ce travail.

A Paul-Louis, mon mari.

A Paul, Benjamin et Sophie, nos enfants.

Je remercie tous ceux qui ont participé à ce travail de thèse et plus particulièrement,

Monsieur le Professeur Shahrou, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de cette Thèse.  
Veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect.

Monsieur le Professeur Tabbagh, pour m'avoir fait bénéficier de son enseignement. Soyez assuré de ma profonde et respectueuse gratitude.

Monsieur le Professeur Henry, pour avoir accepté d'être rapporteur de ce mémoire.

Monsieur le Professeur Caignaert et Monsieur Urbaniack, pour leur participation au jury.

Je remercie l'ensemble du personnel FCB qui m'a côtoyé pendant ces trois années.  
Merci à tous.

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>CHAPITRE I : RECONNAISSANCE DES SOLS DANS LES TRAVAUX SOUTERRAINS .....</b>	<b>6</b>
1.1. DOMAINE D'UTILISATION DES TUNNELIERS.....	7
1.1.1. <i>Introduction</i> .....	7
1.1.2. <i>Les différents types de tunnelier</i> .....	9
1.1.3. <i>Les fonctions du tunnelier et leurs liaisons</i> .....	13
1.2. RÔLE DE LA GÉOLOGIE DANS LE DÉROULEMENT DU CHANTIER.....	16
1.2.1. <i>Les accidents géologiques</i> .....	16
1.2.2. <i>Les raisons d'une reconnaissance</i> .....	17
1.3. ÉTAT ACTUEL DE LA RECONNAISSANCE DANS LES TUNNELS .....	20
1.3.1. <i>Programme de reconnaissance géotechnique</i> .....	20
1.3.2. <i>Les limites de la reconnaissance classique</i> .....	26
1.3.3. <i>Application de la reconnaissance géophysique aux tunnels</i> .....	27
1.4. CONCLUSION .....	36
<b>CHAPITRE II : LA MÉTHODE DE PROSPECTION ÉLECTRIQUE.....</b>	<b>38</b>
2.1. INTRODUCTION.....	39
2.2. PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES ROCHES ET MINÉRAUX .....	39
2.2.1. <i>Les potentiels électriques spontanés</i> .....	39
2.2.2. <i>Les conductivités électriques</i> .....	41
2.2.3. <i>Les résistivités de quelques formations géologiques</i> .....	43
2.3. CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE.....	45
2.3.1. <i>La densité de courant</i> .....	45
2.3.2. <i>Equation de continuité</i> .....	46
2.3.3. <i>Théorie de l'électromagnétisme : Les équations de Maxwell</i> .....	46
2.4. DISTRIBUTION DU COURANT DANS LE SOUS-SOL.....	48
2.4.1. <i>Dispositifs de prospection</i> .....	48
2.4.2. <i>Distribution du courant continu dans un milieu homogène et isotrope</i> .....	51
2.4.3. <i>Notion de résistivité apparente</i> .....	53
2.4.4. <i>Perturbation du potentiel en courant continu</i> .....	53
2.4.5. <i>Profondeur d'investigation</i> .....	53
2.5. DÉTERMINATION DES RÉSISTIVITÉS : PROBLÈME INVERSE.....	55
2.6. CONCLUSION .....	55

**CHAPITRE III : ADAPTATION DU DISPOSITIF DE RECONNAISSANCE ÉLECTRIQUE SUR UN TUNNELIER..... 56**

3.1. INTRODUCTION .....	57
3.2. QUALIFICATION DES TERRAINS RENCONTRÉS.....	57
3.3. CAHIER DES CHARGES.....	58
3.4. INSTRUMENTATION DU TUNNELIER .....	58
3.4.1. <i>Réalisation technique</i> .....	58
3.4.2. <i>Caractéristiques du courant injecté</i> .....	63
3.4.3. <i>Profondeur de reconnaissance</i> .....	63
3.5. PROBLEMES LIÉS A LA PRÉSENCE DU TUNNELIER.....	64
3.5.1. <i>Etude expérimentale</i> .....	64
3.5.2. <i>Etude numérique</i> .....	67
3.5.3. <i>Conséquence sur le tunnelier</i> .....	69
3.6. CONCLUSION .....	69

**CHAPITRE IV : MODÉLISATION NUMÉRIQUE D'UNE RECONNAISSANCE ÉLECTRIQUE À PARTIR D'UN TUNNELIER..... 71**

4.1. INTRODUCTION.....	72
4.2. LE PROGRAMME DE CALCUL.....	72
4.3. UTILISATION DU PROGRAMME .....	72
4.3.1. <i>Modélisation des éléments</i> .....	72
4.3.2. <i>Calcul des résistivités</i> .....	75
4.3.3. <i>Fichier de résultats</i> .....	76
4.4. ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION D'UNE ANOMALIE CRÉÉE PAR DIFFÉRENTS PARAMÈTRES SUR UN TOUR DU BOUCLIER.....	76
4.4.1. <i>Assignation de la mesure</i> .....	77
4.4.2. <i>Influence de la résistivité de la couche superficielle</i> .....	79
4.4.3. <i>Influence du rapport de résistivité entre le terrain et le tunnelier</i> .....	81
4.4.4. <i>Influence du rapport de résistivité entre le terrain et l'hétérogénéité</i> .....	84
4.4.5. <i>Influence de la position de l'hétérogénéité par rapport au disque de coupe</i> .....	89
4.4.6. <i>Influence de l'étendue de l'hétérogénéité</i> .....	94
4.5. UTILISATION DES MESURES EN CONTINU DURANT L'EXCAVATION, POUR LA LOCALISATION DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ. ....	96
4.6. CONCLUSION .....	100

**CONCLUSION..... 101**

**BIBLIOGRAPHIE**

**ANNEXE**

**INTRODUCTION**

L'accroissement de la densification des réseaux routiers ou ferroviaires fait qu'il est de plus en plus difficile d'envisager la construction en surface des nouveaux projets d'aménagement et de communication.

Les contraintes environnementales, la préservation de la qualité de vie des citoyens, mais aussi les contraintes naturelles, font que la réalisation de ces projets est envisagée de plus en plus en intégrant des solutions techniques enterrées. Elles nécessitent de passer à grande profondeur pour éviter d'intercepter les constructions existantes et ainsi optimiser le tracé.

Grâce aux multiples avancées technologiques dans le domaine du Génie-Civil, et en particulier dans celui des travaux souterrains, il est devenu possible de réaliser de tels projets.

La comparaison de toutes les méthodes de creusement a fait ressortir que l'utilisation des tunneliers apparaissait comme répondant le mieux aux critères de sécurité, de fiabilité et de coût. Un des grands intérêts de ces machines est qu'elles s'enfoncent dans le terrain en ne creusant que le volume nécessaire à la réalisation de l'ouvrage. De ce fait, le tunnelier avance en aveugle dans le terrain sans connaître la nature exacte des terrains en cours d'excavation.

L'objectif de ce travail est de concevoir, de mettre au point, et de tester un dispositif permettant de reconnaître les variations géologiques des terrains situés en avant de la machine d'excavation, au fur et à mesure de sa progression.

Le présent mémoire est composé de quatre chapitres. Dans le premier, nous présentons les différents types de tunneliers, les caractéristiques de chacun d'eux, leurs fonctions et leurs utilisations. Nous expliquons également le rôle de la géologie dans les travaux souterrains en citant des exemples d'accidents géologiques qui prouvent la nécessité d'une reconnaissance. Nous détaillons ensuite les programmes actuels de reconnaissance pour la réalisation des tunnels, les différentes méthodes qui peuvent être destructives ou non destructives, les avantages et les inconvénients de chacune d'elles.

Dans le second chapitre, nous développons la méthode géophysique retenue, celle des résistivités électriques. Nous présenterons les propriétés électriques des roches, les principes de la reconnaissance électrique par la connaissance des champs électrique et magnétique. Les différents dispositifs de mesure pouvant être utilisés, seront également présentés. Enfin nous aborderons brièvement les différentes possibilités de modélisation des mesures électriques.

Le troisième chapitre reprend la réalisation technique de l'instrumentation du tunnelier du chantier du métro de Rennes, par notre dispositif.

Nous recherchons à évaluer expérimentalement l'influence du tunnelier sur les mesures de résistivité à l'aide d'une pièce métallique.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons une étude paramétrique à l'aide du programme EL3DTUN, qui est basé sur la méthode des moments. Cette étude permet de définir les intervalles dans lesquels chaque paramètre servant à définir la nature du terrain, a une influence sur le calcul de la résistivité. Cette étude servira à la l'élaboration d'une méthode

d'interprétation par inversion des données. Nous proposerons également une méthode d'interprétation, par comparaison des calculs pour deux positions différentes du tunnelier, qui donnera une idée sur la possibilité de reconnaître une hétérogénéité de dimension équivalente au quart du diamètre du tunnelier utilisé.

**CHAPITRE I : RECONNAISSANCE DES SOLS DANS LES  
TRAVAUX SOUTERRAINS**

## 1.1. DOMAINE D'UTILISATION DES TUNNELIERS

### 1.1.1. Introduction

Les premiers souterrains artificiels ont été construits pour capter ou conduire l'eau nécessaire aux besoins des hommes. Dans l'île de Samos, au 6<sup>ème</sup> siècle av. J.C., un tunnel fut ainsi creusé dans le calcaire par l'architecte grec Eupalinos (longueur : 1265 m, section : 1,75 m).

Le plus ancien des tunnels routiers français, creusé par l'homme et remplissant toujours ses fonctions, est le tunnel de Saint Christophe, connu maintenant sous le nom de tunnel des Echelles, près de Chambéry (département de la Savoie). D'une longueur de 294 mètres et non revêtu, il fut achevé en 1813 sous Napoléon 1<sup>er</sup>.

À partir du 19<sup>ème</sup> siècle, les tunnels subirent un grand développement grâce au chemin de fer. Les tracés en tunnel se sont alors imposés pour permettre aux voies de communication de franchir les reliefs.

Depuis, les ouvrages souterrains constituent un patrimoine de plus en plus important qui se développe particulièrement dans les grandes métropoles urbaine (NARAI, NAGAI ; CHEZE, 1995). La densification de l'occupation en surface et la nécessité de la préservation de la qualité de vie des citadins conduit à utiliser de façon courante les sous-sols des villes.

Que ce soit pour réaliser des lignes de métropolitain, des voies de circulation routière, mais également pour transporter des fluides divers, dévier les eaux des fleuves pour éviter les inondations, l'utilisation du sous-sol offre une solution élégante et avantageuse.

La réalisation de ces nouveaux réseaux souterrains s'est tout d'abord faite par l'utilisation de tranchées à ciel ouvert ou par des méthodes traditionnelles d'excavation (LATOURET & al, 1990 ; BALAN, LAPLACE, 1991). Les méthodes traditionnelles, telle que la méthode NATM, " New Austrian Tunneling Machine " (VAVROSVSKY, 1995), sont fondées sur le creusement du tunnel par sections divisées avec le plus souvent la mise en place d'un soutènement adapté. La taille des volumes terrassés dans chaque phase dépend du contexte géologique, de la sensibilité des ouvrages environnants et du savoir-faire de l'entreprise.

Le creusement s'effectue à l'aide de machine à attaque ponctuelle (figure 1-1) ou bien à l'explosif (OLSEN & al, 1989). Dans ce dernier cas, les vibrations dues aux tirs d'abattage peuvent provoquer des désordres dans les terrains instables (MAHIEU, 1991). C'est la raison pour laquelle, pour mener à bien le creusement, des rabattements de nappe sont entrepris et des traitements préalables du terrain encaissant sont effectués pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et l'étancher.

Pour limiter la durée des chantiers, ces méthodes nécessitent la multiplication du nombre d'attaques et par conséquent du nombre de puits de chantier.



Figure 1-1 : Machine à attaque ponctuelle.

En raison de ces différents inconvénients, on cherche de plus en plus à utiliser des moyens mécanisés de type tunnelier. En effet ce mode de creusement (GLYNN, 1989) apporte d'indéniables avantages sur les techniques de construction à ciel ouvert ou les méthodes traditionnelles (CORDING, 1991) pour les raisons suivantes :

- réduction de l'impact des travaux sur l'environnement urbain
- réduction des nuisances pour les riverains
- renforcement de la sécurité des travaux (stabilité des terrains durant la construction)
- réduction de coûts et des délais des travaux.

Cette technique de creusement a subi un essor considérable grâce au Japon, où la circulation dans les villes étant très dense, les solutions enterrées ont été reconnues comme nécessaires. Ce n'est que tardivement qu'elle s'est implantée en France avec la construction notamment des tunnels T.G.V. de Villejust. La construction des nouveaux réseaux de métro de Lille, Lyon et Paris, et surtout la concrétisation du tunnel sous la Manche (WEST, 1987), ont affirmé cet essor. Ces évolutions techniques ont permis d'envisager la traversée de terrains de nature différente, entièrement sous la nappe phréatique et pouvant présenter des zones instables.

La taille, la longueur des ouvrages, les conditions dans lesquelles se déroulent les chantiers paraissent ne plus avoir de limites (TAIK & al, 1991). Les récentes réalisations routières, ferroviaires ou hydrauliques témoignent des progrès des techniques et de la vitalité des entreprises dans ce domaine.

### 1.1.2. Les différents types de tunnelier

Il existe plusieurs types de tunnelier dont les principaux sont les suivants :

- les micro-tunneliers
- les tunneliers au rocher : front ouvert
- les tunneliers à confinement du front.

Le choix du tunnelier, c'est à dire du type et des équipements, est l'élément déterminant du bon déroulement d'un chantier (TAQUET, 1988 ; HERVET, 1993). Il est primordial de sélectionner le type qui supportera le mieux les impacts des surprises géologiques, tout en gardant une vitesse d'excavation optimale afin de minimiser les temps et les prix d'exécution (PELIZZA, 1991).

#### Les micro-tunneliers

Ils sont généralement utilisés pour mettre en place les tuyaux d'évacuation des eaux usées ou pour d'autres fonctions semblables nécessitant un conduit d'un diamètre de l'ordre du mètre. Pour un tunnel de 600 mm de diamètre, on utilise des stations de poussée intermédiaires permettant de réaliser des tronçons d'une longueur supérieure à 200 m. Des outillages élargissant sont prévus pour pousser n'importe quel type de tuyau.

Cette technique est économique (CRUZ, 1992), car elle permet d'éviter de perturber les cités par des travaux situés généralement sur les axes de circulation. Malgré le faible diamètre des micro-tunneliers, cela reste tout de même des projets à risque vis à vis des obstacles inconnus tels que des conduites déjà en place et non répertoriées.

#### Les tunneliers au rocher

Ce sont des tunneliers pleine-face appelés TBM : Tunnel Boring Machine (figure 1-2). Ils sont conçus pour les projets dont le tracé se déroule dans les terrains rocheux.

La résistance, la dureté, l'abrasivité et l'état de fissuration de la roche, sont les paramètres qui conditionnent le choix des caractéristiques du tunnelier, telles que le choix des outils, la puissance de la machine et l'appui des patins.

Les tunneliers au rocher se caractérisent par le fait qu'ils sont conçus, pour la plupart, comme de simples machines à forer. La mise en place du soutènement, même si elle est

prévue avec des dispositifs appropriés, installés sur les machines dès l'origine (boulonneurs, érecteurs de cintres), reste en principe une opération limitée dans le temps.

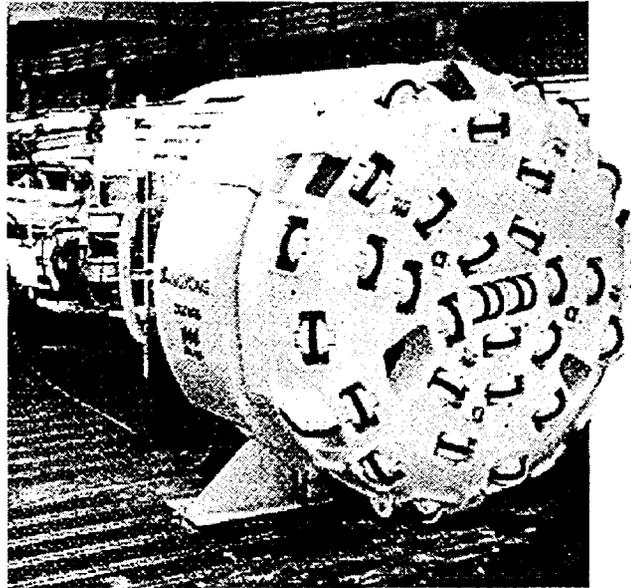


Figure 1-2 : Tunnelier «roches dures » TBM Ø 4,50.

### Les tunneliers à confinement du front

En raison de l'implantation originelle des cités à proximité des cours d'eau, les terrains à excaver sont généralement de faible consistance mécanique (sable, graviers, argiles) et fortement humidifiés. Ces conditions géologiques peu favorables imposent par conséquent l'utilisation de machines d'excavation qui assurent le maintien des terres en phase de foration: les tunneliers à confinement.

Ils comportent, outre la fonction de foration, deux fonctions de soutènement.

- le soutènement provisoire du front par confinement et celui des parois par l'intermédiaire du corps circulaire du tunnelier, encore appelé jupe
- le soutènement définitif par la pose d'un revêtement généralement constitué de voussoirs en béton.

Le confinement du front peut être effectué de trois façons différentes, par pression de terre, de boue ou par air comprimé.

- **Les boucliers à pression de terre**, tunnelier du type E.P.B.S. (Earth Pressure Balanced Shield) (figure 1-3).

La pression est générée par la terre excavée. Ceci présente des avantages (pression de confinement relativement faible, évacuation des gros éléments, faible coût), mais également des inconvénients (couple important, usure des outils, difficulté d'intervention dans la chambre, tassement en surface, difficulté à obtenir la pression de confinement voulue).

A partir d'un certain niveau de pression, le fonctionnement du tunnelier à confinement de terre est nécessairement mixte (pression partielle de terre + pression partielle liquide ou gazeuse). Le tunnelier à boue ou à air comprimé représente le cas extrême de fonctionnement à pression partielle solide nulle.

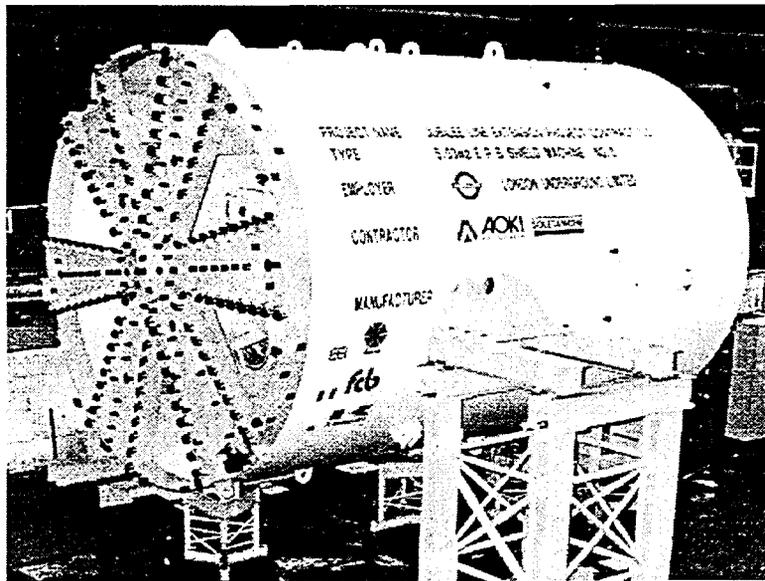


Figure 1-3 : Tunnelier à pression de terre (Ø 5m).

- **Les boucliers à pression de boue**, tunnelier du type Slurry (figure 1-4)

La pression est générée par un fluide injecté dans la chambre et peut être très forte. Le confinement du front de taille exercé par la pression de boue s'oppose à une déformation du massif à excaver, assurant ainsi une diminution importante du risque de tassement en surface. C'est le type de tunnelier le mieux adapté aux sols sans cohésion.

Ce mode de confinement nécessite l'installation en surface d'une centrale de traitement et de séparation des boues. Cette installation très onéreuse, est très encombrante, donc mal adaptée au site urbain. De plus les liaisons hydrauliques entre les pompes et la station ne permettent pas de réguler rapidement la pression au front.

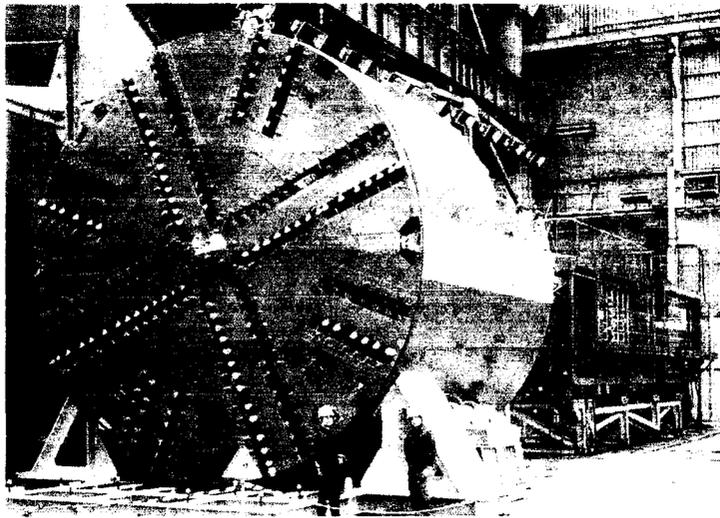


Figure 1-4 : Tunnelier à pression de boue ( $\varnothing$  7.50m).

- **Les boucliers à air comprimé** (figure 1-5)

La technique de l'air comprimé dans la chambre d'abattage ne procure pas une solution efficace et sûre pour l'excavation des tunnels en zone urbaine, surtout lorsque des failles sont rencontrées. Ce mode de confinement est réputé aléatoire, inopérant dans les terrains perméables et dangereux pour le personnel, qui est soumis de façon permanente aux conditions de travail en hyperbare. De plus il n'est généralement pas possible d'appliquer une forte pression.

Le seul avantage que procure ce mode de confinement est que la pression de l'air peut être plus précise que pour un tunnelier à pression de boue.



Figure 1-5 : Tunnelier à pression d'air ( $\varnothing$  1.84m).

Le choix du tunnelier à confinement est le résultat d'un compromis entre différents facteurs, en particulier :

- la nature des terrains : conditions de stabilité du terrain à court terme, perméabilité à l'air et à l'eau, homogénéité, granulométrie, teneur en eau, gradient hydraulique
- la géométrie de l'ouvrage : diamètre, rayon de courbure, pente et longueur
- les modalités de démarrage et d'exécution, (en particulier espace disponible en surface)
- le programme général du chantier.

Dans certains cas, l'analyse de ces paramètres laisse des possibilités ouvertes, en particulier en ce qui concerne le choix entre tunnelier à pression de boue ou à pression de terre (HUANG, 1995).

En conclusion, les méthodes de creusement par confinement apportent une sécurité importante au niveau de la stabilité du front par rapport aux méthodes d'excavation traditionnelles. Il faut tout de même noter que chaque intervention dans la chambre, ou au niveau du disque de coupe, doit s'effectuer sous forte pression, ce qui n'est pas sans poser des problèmes techniques et de sécurité.

Il faut préciser que la méthode n'est pas sans faille. La présence sur le parcours de cavités ou de puits communiquant avec la surface, provoque une chute de la pression de confinement et une déstabilisation du front de taille. Cette déstabilisation peut entraîner des tassements en surface, qui restent acceptables dans les environnements peu denses, mais deviennent problématiques dans les centres villes. Il est alors nécessaire d'injecter du mortier dans les cavités rencontrées pour « reformer » le terrain (GUICHARD & al, 1993). L'intérêt de l'utilisation d'un tunnelier à confinement permet de limiter l'importance des dégâts par rapport à l'utilisation d'une méthode de foration classique.

### **1.1.3. Les fonctions du tunnelier et leurs liaisons**

Un tunnelier s'analyse comme un ensemble de fonctions individuelles, chacune accomplissant une tâche spécifique, mais interactives, car elles dépendent les unes des autres par des liaisons fonctionnelles ou simplement logiques (figure 1-6).

Un tunnelier présente les fonctions suivantes :

- Navigation : système de repérage topographique comprenant en particulier des cibles solidaires du bouclier
- Guidage : système de commande des vérins de poussée permettant d'orienter le bouclier dans la direction souhaitée

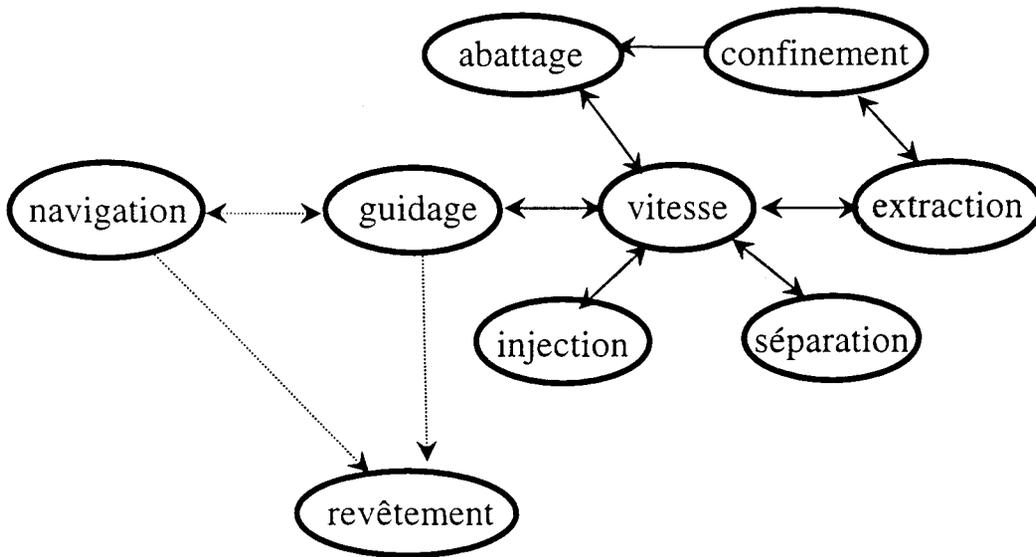


Figure 1- 6 : Les fonctions du tunnelier.

- Abattage : ce travail est effectué par les outils de coupe disposés sur le disque et par le système d'entraînement. Le disque de coupe supporte en général trois types d'outils, qui entrent en action progressivement (figure1-7) Ce sont d'abord :
  - les molettes (roller bits) qui fracturent les roches,
  - les scarificateurs qui déchiquettent le terrain,
  - les outils de coupe ou couteaux (cutter bits) destinés à découper les terrains tendres (sols).
- Confinement : système de régulation de la pression qui permet le soutènement du front de taille. Il maintient une contre-pression s'opposant à la poussée des terres du front de taille, ainsi qu'à la pression hydrostatique de l'eau contenue dans les sols
- Evacuation : cette évacuation se fait à l'arrière de la machine. Elle est assurée soit par des conduites hydrauliques dans le cas des tunneliers à pression de boue, soit par un transporteur à bande ou des wagons pour les tunneliers à pression de terre. Le volume évacué est fonction du niveau de pression à maintenir dans la chambre d'abattage
- Séparation : centrale de traitement des boues de marinage (uniquement pour les tunneliers à pression de boue)

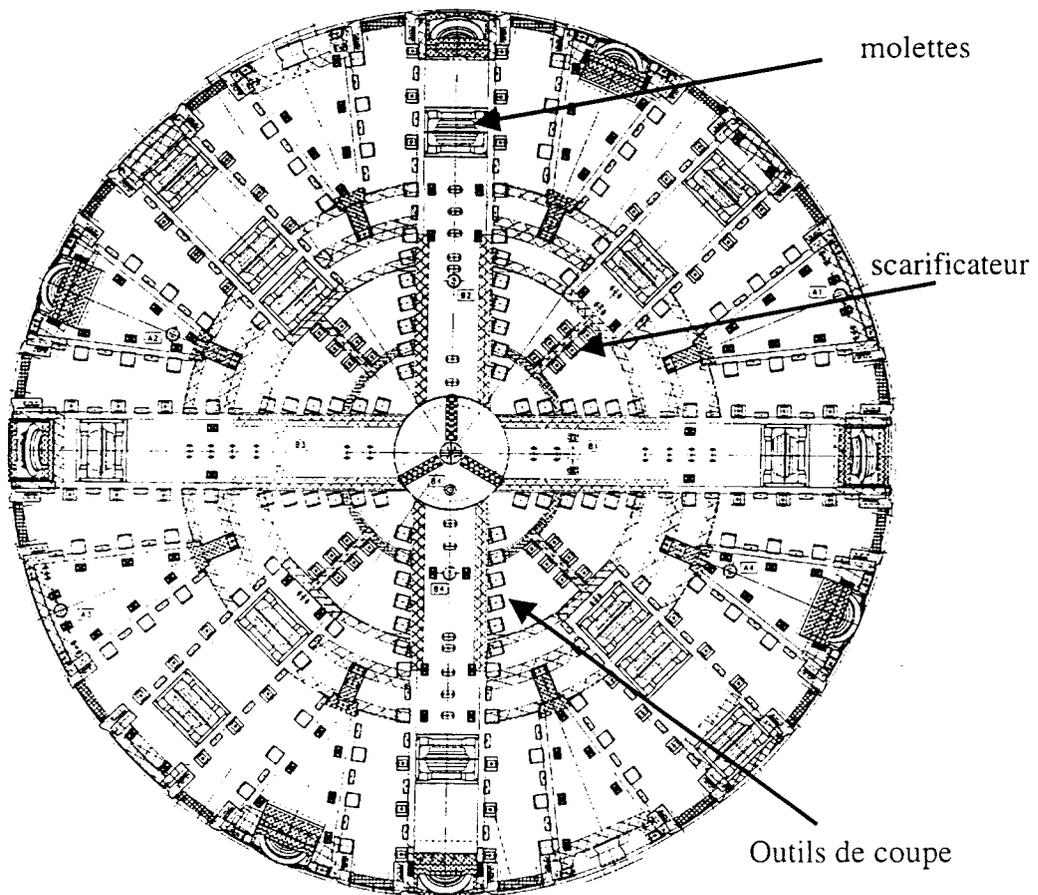


Figure 1- 7 : Répartition des outils sur le disque de coupe.

- Vitesse : système de commande de la vitesse de progression du tunnelier. Elle est liée à la puissance nécessaire sur le disque de coupe qui elle-même résulte de trois sollicitations distinctes :
  - l'abattage du terrain,
  - le brassage des matériaux dans la chambre de confinement, dont le volume dépend du taux de remplissage,
  - le frottement des matériaux comprimés qui dépend de la pression de confinement des matériaux solides
- Revêtement : il est composé d'anneaux métalliques ou en béton préfabriqués, fractionnés en plusieurs parties : les voussoirs, tous identiques, et la clé (voussoir de plus petite taille). L'anneau de voussoir est mis en place à l'abri de la jupe et bloqué à l'aide de la clé. La difficulté réside dans le choix de la position de la clé

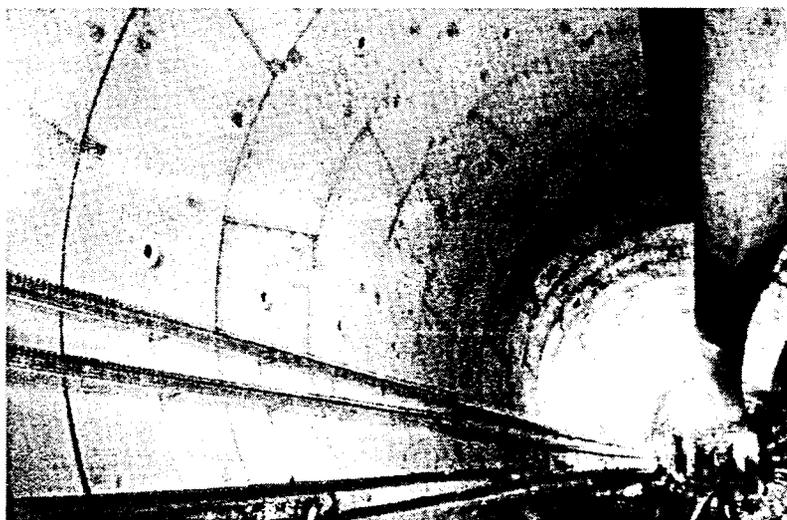


Figure 1- 8 : Disposition des voussoirs.

- Injection : système de remplissage du vide annulaire localisé entre le terrain et les voussoirs. Ce remplissage à l'aide de mortier bloque ainsi le revêtement dans le terrain et évite les tassements en surface.

## 1.2. ROLE DE LA GEOLOGIE DANS LE DEROULEMENT DU CHANTIER.

### 1.2.1. Les accidents géologiques

Les problèmes majeurs que peut rencontrer un tunnelier lors de la foration sont dus à des pannes mécaniques, à l'eau ou au gaz contenue dans le sol, à la dureté des roches, ou encore au foisonnement ( KNIGHTS, 1986). Dans presque tous les cas, ces problèmes sont dus à l'ignorance des détails de la géologie.

L'invisibilité du terrain peut provoquer l'arrêt d'un tunnelier. Les causes principales des accidents géologiques rencontrés sont de deux types.

Le premier peut être du à la présence d'un élément de dureté supérieure au terrain encaissant (anciennes fondations, canalisations ou blocs rocheux). Cela peut entraîner des dommages paralysants pour les systèmes d'abattage (cassure d'outils) et d'évacuation (mise hors service de la vis), occasionnant des retards et des coûts importants (FOILLARD,

GEORGE, 1995 ; PAGE, 1996). Cela peut aussi avoir des conséquences sur le guidage du tunnelier dans un trajet courbe. Si une hétérogénéité verticale, dans un terrain peu consistant, est à l'extérieur de la courbe, on assiste à un phénomène de dérapage.

La seconde cause d'arrêt de la machine peut être provoquée par un éboulement du front de taille. Ceci est dû à une modification ponctuelle de la géologie, comme les karsts (EFREMIDIS, 1996) qui forment un réseau de galeries complexe et tourmenté (GUICHARD & al, 1993). Le débouché d'un tunnel dans une zone karstique importante provoque l'arrêt de la machine et la nécessité de la reconnaissance de la zone (A.F.T.E.S., 1992a). L'instabilité locale au front de taille, due à la présence du karst, peut se propager vers la surface, provoquant un fontis. Ce dernier peut être responsable de tassements importants conduisant à des désordres majeurs en surface (HAEGEMAN, 1997), comme la ruine de certains bâtiments, ou la destruction de réseaux. Il faut alors consolider le terrain depuis la surface ou à partir de la machine, mais ceci entraîne une perte de productivité et donc un surcoût pour le chantier. Lors de la construction du tunnel de la bretelle de Monaco, le surcoût lié aux karsts a été de 10 millions de francs. A la suite de cet incident, il a été effectuée une campagne de reconnaissance minutieuse, à l'issue de laquelle une méthode d'avancement a été mise au point. Des forages de contrôle ont été réalisés en arrière du front de taille par sondages latéraux et verticaux. Les karsts qui ont été rencontrés n'auraient pu être appréhendés à l'aide des méthodes de reconnaissance classiques que par une galerie de reconnaissance.

L'ignorance de la géologie peut être responsable d'accidents corporels graves, c'est la raison pour laquelle on doit tendre à limiter au maximum ce que l'on continue d'appeler *aléas* (CORBETTA, DEMILECAMPS, 1994). La limitation de ces aléas géologiques en cours de chantier n'est possible que par une reconnaissance totale des terrains.

### 1.2.2. Les raisons d'une reconnaissance

#### Le prix des tunnels

Le terrain a une grande influence sur les projets de tunnels comme sur tous les travaux souterrains (MELLORS, 1995). Les problèmes découlant de l'invisibilité des conditions géologiques constituent de nombreuses sources de réclamations entre le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage, pénalisantes pour le bon déroulement du chantier. ( HUSE, 1992 ; HINDLE, 1995 ; ATKINSON, 1996). En effet le prix des tunnels et des excavations souterraines varie dans une fourchette de 1 à 10 (pour le mètre cube excavé) selon les conditions géologiques (LEES, 1995).

L'incidence de la géologie sur les travaux est importante avant même leur démarrage (puits, prégalerie). Cette incidence se chiffre, en terme de délai, à plusieurs mois, et en terme de coût, à plusieurs millions de francs.

Le travail de l'ingénieur consiste alors à définir des coefficients de sécurité suffisants pour rendre les ouvrages le plus économique possible.

Le but d'une campagne de mesures étant soit la vérification de cette sécurité fixée a priori, soit la recherche d'un niveau de sécurité plus réel en réduisant la part d'ignorance contenue dans le coefficient de sécurité (PROVOST & al. 1988).

Il convient de distinguer quatre types de campagnes de mesures :

- les campagnes de contrôle, dont l'objectif est la vérification de la sécurité
- les campagnes de mesures locales, principalement axées sur l'examen *in situ*, dont l'objectif est l'économie sur le chantier expérimenté
- les campagnes de mesures générales, principalement axées sur l'auscultation, dont l'objectif est l'économie sur de futurs chantiers
- les campagnes de mesures fondamentales, davantage axées sur la recherche appliquée, réalisées sur des chantiers expérimentaux.

### Objet d'une reconnaissance

Les tunneliers d'une technologie avancée ne permettent pas d'avoir un accès visuel à la qualité des terres en cours d'excavation. Ce manque visuel est un inconvénient majeur, qui se traduit, dans le cas des creusements s'effectuant dans des terrains géologiquement perturbés, par une baisse de la sécurité des travaux. L'attitude qu'il est préférable d'adopter dans les chantiers au tunnelier peut se résumer par cette injection de HAWKINS (1988) qui reste d'actualité 10 ans plus tard : "**be prepared for anything**" !!!

Plus l'ouvrage est important et plus l'étude doit se développer en profondeur (CAMBEFORT, 1971). Déjà au XV<sup>ème</sup> siècle on utilisait des tarières pour remonter des sédiments et en faire une reconnaissance. Mais peut-être s'agissait-il simplement de dégager le déblai de forage tout autant que de reconnaître le terrain.

Dans le cas d'un tunnel, la reconnaissance a pour objet de contrôler la présence éventuelle d'hétérogénéité dans une enveloppe d'environ six mètres autour de l'ouvrage. On considère qu'au-delà de six mètres, tout éboulement ou écroulement éventuel ne peut plus avoir d'influence sur l'ouvrage (MAILLANT, 1992).

Une méthode d'exploration se caractérise par sa fiabilité qui désigne la probabilité que les résultats de l'exploration indiquent des conditions réelles (EINSTEIN, 1991). Elle doit fournir :

- la nature des différentes couches : établir un profil géologique prévisionnel, identifier et décrire les massifs rocheux, localiser les facteurs qui limitent l'emploi de certaines méthodes
- des échantillons intacts des roches caractéristiques, pour l'étude en laboratoire
- les caractéristiques de la nappe aquifère
- le degré de perméabilité.

La synthèse de ces documents permet :

- d'optimiser en plan le tracé des tunnels entre les points d'aboutissement obligés, et en profil pour aller chercher les couches géologiques les plus favorables en passant à grande profondeur sous tous les réseaux (BOIVIN, 1990 ; MARQUART, SCHULZ, TROGISCH, 1995).
- de réaliser une investigation adéquate du site, de laquelle dériveront les cartes géologiques et hydrologiques et les profils du sol. Elle est aussi nécessaire pour choisir la forme appropriée du tunnel et la méthode d'excavation (DUDDECK, 1989).
- de connaître l'état de contrainte (direction et intensité des contraintes principales), l'orientation et la forme des grandes cavités souterraines, la conception et le dimensionnement du soutènement provisoire et définitif, ce qui est fondamental pour optimiser la situation du tunnel (BRIGLIA, BURLET, PIRAUD, 1994).

### Planification de la reconnaissance

La reconnaissance des terrains s'effectue généralement avant le début des travaux. Or pour les ouvrages creusés en souterrain l'appréciation des conditions de terrain doit intervenir à tous les stades de l'avancement du projet (GUILLAUME, 1994).

Toute interprétation sur le type, la qualité et le comportement du terrain au voisinage du front de taille doit être portée à la connaissance du pilote et des responsables du fonctionnement de la machine (DARLING, 1994).

En théorie, le pilotage d'un chantier doit être basé sur le suivi du comportement du terrain (A.F.T.E.S., 1992c) :

- étude du problème avant démarrage du chantier, géologie du site la plus précise possible,
- étude du problème pendant le chantier, détection immédiate des anomalies et réactions rapides, anticipation des zones à risques.

Déjà les nouvelles techniques mécanisées mises en œuvre (tunneliers à fond pressurisé, présoutènement) ont permis de limiter l'incidence de la géologie sur les travaux. Mais quelle que soit la technique adoptée, les reconnaissances à l'avancement ne peuvent qu'améliorer la conduite du chantier. Jusqu'à aujourd'hui, le champ des méthodes le plus communément utilisé pour évaluer les grandes lignes du sol, ne comprend que des méthodes destructives et ne répond qu'à une partie des problèmes (KALINSKI, KELLY, 1994). Pour sécuriser au maximum les travaux en milieu souterrain, il est impératif d'effectuer une reconnaissance à l'avancement.

Elle permet de localiser à l'avance les hétérogénéités géologiques, d'adapter les outils, la vitesse de creusement et les caractéristiques du soutènement à la nature et aux propriétés réelles du terrain rencontré. Les reconnaissances à l'avancement contribuent ainsi à diminuer les risques liés aux travaux souterrains, en évitant les accidents de travail et les incidents de chantier qui génèrent des interruptions coûteuses.

De plus en plus de tunnels sont ou seront creusés en site urbain sous très faible couverture ou à proximité immédiate d'ouvrages existants. Ils passent ou passeront à très faible profondeur sous le bâti ou sous des infrastructures de transport sensibles, croisant les ouvrages souterrains.

L'idéal serait de trouver des expériences passées réellement similaires au cas à traiter (similitude géométrique, conditions géotechniques et hydrogéologiques analogues, même ordre de grandeur des déformations admissibles et de la rigidité des ouvrages voisins) (ARISTAGHES, BERBET, MICHELON, 1995). Certains chercheurs ont essayé de développer un système expert d'aide à la décision regroupant toutes ces informations (LAOUANI, 1993), afin de définir le meilleur schéma de reconnaissance. Cette recherche, qui permet de conserver au mieux l'expertise humaine, ne minimise pas de façon significative les risques liés au terrain. Le seul avantage que peut, dans un premier temps, apporter la construction de tunnels dans le même environnement, est une connaissance et une compréhension générales de la géologie du sous-sol et une aide à la planification des investigations souterraines.

Car chaque tunnel reste un ouvrage unique et nécessite le même déploiement de reconnaissance que pour un autre tunnel, même voisin.

### **1.3. ETAT ACTUEL DE LA RECONNAISSANCE DANS LES TUNNELS**

#### **1.3.1. Programme de reconnaissance géotechnique**

Au début de ce siècle, la recherche pétrolière a considérablement fait progresser la technologie de la reconnaissance des terrains. Le Génie-Civil en a bénéficié. Depuis 1945 cette évolution a été particulièrement rapide en raison, notamment, de la prise de conscience simultanée par le maître d'œuvre et par l'entrepreneur de la nécessité d'une bonne connaissance des terrains à traverser (BOUYAT, 1990). Les prévisions concernant la nature, la disposition et le comportement des terrains pouvaient être améliorées et donner lieu à une interprétation utile pour définir les méthodes d'exécution et le dimensionnement des tunnels.

Cette prise de conscience est liée à l'évolution des matériels et des procédés de construction des tunnels, ainsi qu'aux engagements financiers qu'ils représentent.

D'une manière générale, les travaux souterrains bénéficient des progrès accomplis dans les domaines situés en amont de la réalisation tels que : la connaissance de la géologie du sous-sol, la mécanique des sols, la mécanique des roches ou les techniques de laboratoire. En effet ces secteurs ont connu en France des développements rapides et importants dans les vingt dernières années. Les conditions dans lesquelles sont réalisés les ouvrages souterrains ont été améliorées grâce aux recherches effectuées et aux techniques utilisées dans ces secteurs.

Cette évolution des techniques utilisées pour la construction des ouvrages s'est orientée autour des axes suivants :

- amélioration (en qualité et en quantité) des reconnaissances préalables à la construction ou à la réparation des ouvrages
- prise en compte des problèmes d'environnement (zones urbaines en particulier)
- prise en compte des problèmes d'exploitation pour une meilleure conception de l'ouvrage.

La conduite d'un programme d'exploitation souterraine, l'analyse des données et l'élaboration des conclusions sur le type de terrain que l'on va rencontrer durant la foration, nécessitent de la rigueur sur les éléments suivants (DILL & al, 1995) :

- La caractérisation du sol doit aller au-delà de l'analyse des propriétés de base de la roche intacte et de la masse de roche. Elle doit inclure l'évaluation et l'interprétation de la réponse du terrain aux techniques de creusement proposées.

- L'impact de la géologie sur la forme et la construction du projet doit être réévalué continuellement durant le programme sur le terrain. Ce programme doit être flexible afin de tenir compte de toutes les modifications rencontrées.

- Une information détaillée de la géologie du site et de l'expérience des constructions des précédents tunnels à proximité du projet doit être faite durant le planning pour déterminer les zones d'exploration nécessaires à une bonne interprétation.

Le travail de reconnaissance se divise alors en investigation de surface avant, durant et après l'excavation du tunnel.

### *Investigations préliminaires*

L'investigation préliminaire se fait en deux étapes. La première est générale, elle reconnaît les grandes lignes géologiques afin de définir le tracé approximatif du tunnel. La seconde est plus complète et plus approfondie, elle permet d'optimiser le tracé et d'estimer les difficultés susceptibles d'être rencontrées.

La première étape de reconnaissance débute par la collecte des cartes géologiques de la région. Certains indices de surface peuvent se modifier en profondeur, la cartographie détaillée de la surface, dans une bande de terrain, devant être d'autant plus large autour du tracé que le tunnel est profond. Ces cartes sont très souvent complétées par une prospection de surface et par des forages.

Il faut garder à l'esprit que les forages, destructifs, ne constituent pas à eux seuls la reconnaissance, mais plutôt le moyen de densifier les points de reconnaissance. Il est nécessaire de les effectuer suivant un maillage suffisamment rapproché pour masquer l'effet ponctuel de la reconnaissance (FRADIN, ROBERT, 1988 ; THORGRIMSSON & al 1991). La maille de répartition des sondages dépend du site dans lequel se trouve l'ouvrage et dans la plupart des cas, c'est un site urbain, ce qui signifie que la maille ne peut pas toujours être respectée. Dans certaines reconnaissances, l'écart entre deux sondages peut aller jusqu'à 280 mètres (PRAT, 1995), d'où des accidents géologiques non reconnus entraînant durant la

foration des arrêts de chantier pouvant atteindre six mois. La probabilité de détecter un accident géologique de caractère très ponctuel, par sondage destructif, est donc infime. Même si les sondages sont nombreux et rapprochés, l'état réel du terrain entre deux sondages fait obligatoirement l'objet d'une extrapolation.

Pour compléter cette première investigation, la reconnaissance des sites en vue des projets de tunnels prend en compte les aspects géologiques, hydrogéologiques et surtout géotechniques de l'ensemble du tracé de ces tunnels. La géotechnique consiste à analyser les déformations successives enregistrées dans les formations géologiques (DEVILLE, MASSEGLIA, ROBERT, SIRIEYS, 1993). Elle permet d'établir une classification des terrains et de définir finement, lors des études d'avant projet détaillé, les méthodes d'exécution les mieux adaptées aux ouvrages (FRADIN, ROBERT, 1988). Elle fournit également des éléments prévisionnels à l'avancement lors du creusement des galeries. Leur analyse est essentielle pour des prévisions relatives à la vie de l'ouvrage. Bien utilisée, c'est une reconnaissance économique (JOHANNESSON & al, 1988).

Les interdépendances des différentes disciplines précédemment citées ainsi qu'une approche unifiée du problème permettent d'obtenir de bons résultats (DUDDECK, 1989 ; NAUROY, 1995 ; PUECH, 1995). Ces interdépendances portent sur les points suivants :

- la géologie et les investigations du site doivent confirmer la ligne, l'orientation, la profondeur du puits de départ
- les sondages et la mécanique des roches et des sols, doivent être appliqués pour déterminer les caractéristiques du sol, les premières contraintes, les forces du sol et des roches, les défauts, et les conditions de la nappe
- l'expérience et les premières estimations détermineront le choix du type d'excavation ou du type de tunnelier à utiliser, aussi bien que les méthodes de déshumidification des sols et la sélection des éléments de la structure
- après avoir complété les trois premiers points, l'ingénieur dispose de critères de décision qui lui permettent de juger si le projet est viable
- un concept de sécurité est dessiné à partir des hypothèses de défaillance basées sur des critères comme la porosité, les contraintes, les déformations ou les modes de rupture.

Pour accéder à cette connaissance, des procédés nouveaux ont été développés dans différents domaines, dont les principaux sont les suivants :

- Le forage : carottier à câble.
- Les outils de prélèvement : différents des carottiers, notamment pour les sols meubles. Ils ont été mis au point pour prélever des échantillons intacts
- Les dispositifs d'enregistrement et d'interprétation des paramètres de forage (GOUVENOT, HAMELIN, 1996)
- La prospection géophysique : électrique ou électromagnétique, sismique, microgravimétrique
- Les essais *in situ* : pressiomètre, dilatomètre, essais Lefranc, mesures de contraintes au vérin plat ou par surcarottage avec libération des contraintes

- Les essais de laboratoire : essais d'identification de la classification des sols, essais de détermination des caractéristiques mécaniques, étalonnage des paramètres de forage, cellule triaxiale et boîtes de cisaillement à hautes performances
- Les techniques d'auscultation : distancemètre à fil Invar, capteurs de pression, dispositifs d'écoute des bruits.

Selon les premières interprétations, la réalisation d'une galerie de reconnaissance peut être nécessaire. Elle peut être creusée, soit sur le tracé du tunnel ( MAILLANT, 1992), soit à proximité et sert alors de tunnel de service (EINSTEIN, 1991 ; SCHMALZ, 1996). Cette galerie conduit à une estimation plus précise des caractéristiques du terrain et à la mise en avant des difficultés qui rendent la traversée de certaines formations géologiques difficile (A.F.T.E.S., 1992b). Elle n'est réalisée qu'après analyse et synthèse de tous les renseignements concernant la structure du massif et les caractéristiques des roches qui ont pu être obtenues par les observations effectuées en surfaces (DARCY, PERA, 1990).

Les reconnaissances comportant des sondages, des essais *in situ* et en laboratoire et des puits, représentent environ 3 à 5 % du prix total des travaux. Vingt-huit millions de francs ont été consacrés en 1990 pour effectuer les reconnaissances pour le réseau EOLE qui traverse l'agglomération parisienne d'est en ouest. Une des plus importantes campagnes de reconnaissance a été mise en place pour le tunnel le plus imposant de cette fin de siècle : le tunnel sous la Manche ou TML. Les premières investigations ont débuté en 1958-1959. Les plus importantes, pour l'information, ont été effectuées en 1964-1965 et de 1972 à 1974. Elles se sont achevées en 1986-1987 (BAUM, CRIGHTON, MAGNAS, NORIE, 1987). La totalité de ces campagnes a fourni des informations précises sur la géologie du tracé. Elles ont regroupé des milliers de kilomètres de reconnaissance géophysique (principalement sismique) et plus d'une centaine de sondages. Pour cela de nouveaux systèmes d'interprétation ont été développés pour rendre fiable la représentation du terrain. La modélisation du creusement d'un tunnel, à partir de l'exploitation des mesures faites lors des reconnaissances préliminaires, est aussi un moyen de simuler le creusement et d'appréhender ainsi les zones à risques (VANNIERE-FEGER, 1992).

Les reconnaissances préliminaires gardent une grande part d'incertitude. Souvent effectuées par des sondages destructifs, elles ne peuvent être complètement fiables.

Le succès de l'investigation du sol, dépend de la qualité du rapport d'interprétation. Il apparaît donc prudent d'effectuer des reconnaissances systématiques pendant les travaux, préférentiellement durant les postes de nuit, afin de ne pas retarder le chantier si les moyens de reconnaissance nécessitent l'arrêt de la machine.

### Reconnaissance durant les travaux

Le besoin de développer les reconnaissances à l'avancement dans la construction des ouvrages souterrains se fait particulièrement sentir pour le creusement dans les terrains à géologie difficile. Les reconnaissances à l'avancement sont définies comme l'ensemble des méthodes mises en œuvre pendant le chantier, en totalité ou en partie depuis le tunnel, pour atteindre au moins l'un des deux objectifs suivants :

- localiser avec précision les hétérogénéités géologiques ou anthropiques, de dimension métrique, à l'avant du front de taille.
- déterminer avec précision les paramètres géotechniques du terrain, utiles à la définition de la stabilité du front de taille et à l'adaptation en temps réel des moyens mis en œuvre pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

En dehors des incidents dus à la rencontre d'un changement de géologie inattendu comme les vides karstiques, la reconnaissance dans les tunnels se fait par d'importants programmes de mesure. Ils permettent de s'assurer que dans chacune des formations géologiques traversées, l'ouvrage a une bonne stabilité à court et à long terme (A.F.T.E.S., 1992b). Cette reconnaissance est encore plus déterminante dans les tunnels sous le niveau de la mer, où des forages sont effectués en continu pour identifier les changements des conditions géologiques et augmenter ainsi le niveau de sécurité.

Dans le but d'anticiper la présence de zones de terrains susceptibles d'occasionner des instabilités et de mieux maîtriser la conduite du creusement, on analyse en continu certains paramètres caractérisant le comportement du tunnelier. Chaque phase de creusement a une incidence sur le terrain (figure 1-9). La mise en pression à chaque progression d'un tunnelier à confinement, provoque un soulèvement millimétrique des terrains et un tassement à chaque arrêt (CHAPEAU, 1991). Le bouclier par son frottement latéral sur le terrain et sa force axiale appliquée lors de sa progression, a tendance à entraîner le terrain avec lui ou à le repousser latéralement, dans le cas des terrains granulaires. Au passage du front et lors de la propulsion de la virole, le terrain de couverture juste au-dessus du bouclier se déplace vers l'intérieur en direction du tunnel, créant une première cuvette de tassement. Les déplacements sont horizontaux au niveau de l'axe du tunnel et verticaux en clé, et leur sens est fonction de la manière dont est réalisé le remplissage du vide annulaire.

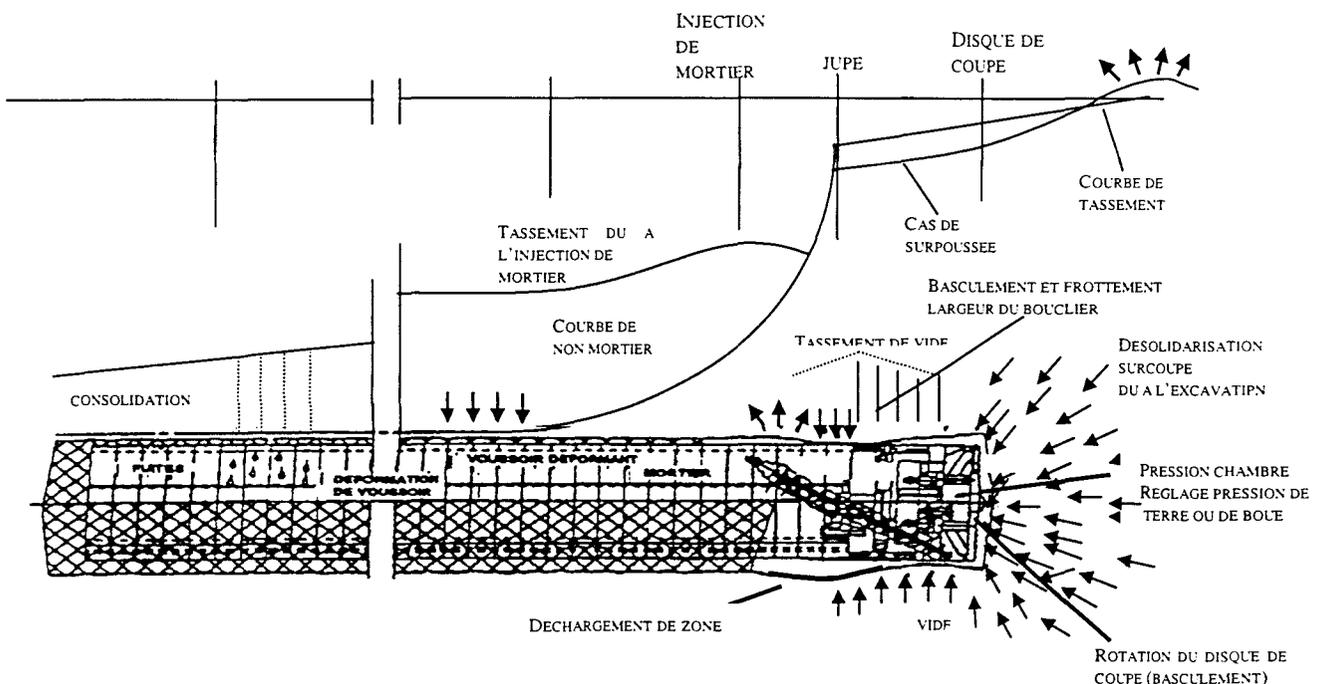


Figure 1- 9 : Origines et évolution des tassements sous un tunnelier.

Des distancemètres ainsi que des extensomètres sont installés à proximité du front de taille mesurant les mouvements du terrain encaissant. De même d'importants dispositifs d'auscultation sont déployés, en surface ou dans des forages, avant le début des travaux pour suivre les déformations du terrain (COLOMBET & al, 1993).

Les déplacements horizontaux, plus difficile à obtenir, sont mesurés au moyen de tubes inclinométriques scellés dans le terrain dans lequel on déplace un clinomètre depuis le bas vers le haut. Les déplacements verticaux sont mesurés au moyen d'extensomètres qui permettent d'obtenir le déplacement relatif entre les différents points de mesure.

Le suivi des tassements se poursuit bien après les travaux, surtout en ce qui concerne leurs impacts sur les constructions voisines de l'ouvrage. C'est le rôle du système SMACS, installé depuis quatre ans sur les chantiers de Londres. Il assure les fonctions suivantes (GOUVENOT, HAMELIN, 1996) :

- affichage en temps réel des mesures lues sur les capteurs électroniques et des dernières valeurs disponibles sur les mesures manuelles. Cet affichage doit se faire sous forme graphique pour donner une image claire des mouvements de la structure et du sol
- contrôle en temps réel du chantier : détection d'alarmes, fonctions d'alerte, connexions à distance
- stockage de toutes les mesures dans une base de données centrale capable de garder la trace de l'histoire complète de chaque point de mesure et de chaque capteur
- possibilité de relire les données, de refaire les calculs de déplacements et d'éditer les graphiques d'analyse
- édition de rapports concernant une période de temps donnée depuis le début du projet.

### Reconnaissance au front de taille

La difficulté croissante des chantiers urbains et le risque du sol omniprésent plaident pour un suivi continu des activités liées au creusement des tunnels (GOUVENOT, HAMELIN, 1996). La surveillance de la qualité et la maîtrise du risque du sol mettent en œuvre un large éventail de techniques : les reconnaissances des sols (faites en surface ou à l'avancement dans le tunnel), les injections de consolidation, l'excavation proprement dite, la surveillance des mouvements de sols et les méthodes destinées à prévenir ces mouvements. De plus, dans tous ces domaines, l'informatique et l'électronique fournissent des outils performants pour instrumenter et surveiller les processus de production et traiter efficacement les données dans des délais compatibles avec l'avancement des chantiers.

L'observation du comportement de la machine peut être à elle seule une source d'informations non négligeable. Elle est utilisée pour la prévention des fontis. Toute instabilité locale au voisinage du front se traduit par des fluctuations rapides de flux de matières ou de l'état de confinement (signaux d'alarme). De même, l'anticipation d'une dégradation des conditions géotechniques se fait par l'analyse des paramètres liés à la convergence du terrain autour du bouclier (pression sur la jupe, frottement du terrain sur le bouclier par exemple) qui constituent les témoins d'évolution (ARISTAGHES, BERBET, MICHELON, 1995). Ces témoins ne sont pas précis mais, s'ils ne permettent pas d'anticiper les événements, ils attirent au moins l'attention.

Cette masse de données importantes permet d'orienter et d'adapter les travaux de creusement.

La méthode la plus couramment utilisée pour une reconnaissance à l'avancement, consiste à équiper le tunnelier d'un outil de sondage par foration. Il est mis au point pour reconnaître la roche en avant du tunnelier pendant le travail d'excavation. Cet équipement peut être localisé juste derrière le haut du bouclier et boulonné sur un morceau de la paroi (KOBEL, 1995; SCHUNNESSON, 1996; TOLLERUP, 1995) ou au niveau du disque de coupe. Les enregistrements des paramètres de forage donnent des informations précises concernant le terrain qui entoure le tunnelier. Les données suivantes sont enregistrées : pénétration et profondeur, pression de poinçonnement, pression de la circulation du fluide injecté, moment de torsion, réflexion des percussions, temps de forage. Ces forages peuvent aussi être utilisés pour le passage d'une tige équipée d'un système de reconnaissance géophysique. Ce type de reconnaissance est utilisé également pour la détection des dépassements d'excavation tout autour de la jupe (YAMAZAKI, 1984). Ces dépassements sont parfois à l'origine des fontis.

Un autre système de reconnaissance à l'avancement a été essayé à l'aide d'un dispositif basé sur la connaissance des efforts s'appliquant sur un outil de coupe. Il a été conçu pour mettre en évidence les limites des zones homogènes (SIMON, 1995). Un effort important traduit une masse de plus forte résistance, tandis qu'une chute de la valeur de l'effort met en évidence une cavité, ou plus généralement une zone de faible cohésion. Ce dispositif, placé en permanence sur le disque de coupe, a l'avantage d'être autonome et de ne pas entraver le bon déroulement du chantier par des arrêts de la machine. Il permet une reconnaissance en continu du front de taille.

### **1.3.2. Les limites de la reconnaissance classique**

Les informations sur la géologie demeurent souvent incomplètes (ATKINSON, 1996) du fait d'une investigation trop grossière et de la mauvaise interprétation des informations disponibles sous forme d'anciennes cartes, de photos aériennes, de premières investigations du site et d'articles publics ou de rapports.

C'est la raison pour laquelle les travaux souterrains ont eu très souvent la réputation d'être aléatoires. Mais cette opinion se trouve battue en brèche au fur et à mesure que se développent des moyens de reconnaissance et que des essais d'interprétation des conditions de réalisation des ouvrages sont tentés. Les prévisions concernant la matière, la disposition et le comportement des terrains sont améliorées, et donnent lieu à une interprétation utile, pour définir les méthodes d'exécution et de dimensionnement des tunnels.

### 1.3.3. Application de la reconnaissance géophysique aux tunnels.

Les techniques géophysiques sont capables aussi bien de déterminer les caractéristiques des milieux homogènes que de détecter des discontinuités. La manière de les détecter dépend de leurs caractéristiques géométriques et des propriétés physiques qui les différencient du milieu environnant.

Les méthodes géophysiques apportent beaucoup dans la détection et la prévention des accidents géologiques (CORBETTA, 1994). Elles sont adaptées pour résoudre les problèmes de description géométrique et géologique du sous-sol (COURTOT, 1988).

Le choix de la méthode géophysique dépend de la composition du terrain à reconnaître. Il faut être attentif à la présence d'eau dans le sol, qui peut conduire à éliminer certaines méthodes (microgravimétrie), ou en favoriser d'autres (méthodes sismiques et soniques). Un terrain trop sec peut être un handicap pour des méthodes électriques et un facteur favorable pour certaines méthodes électromagnétiques (DELAÎTRE, 1993). Enfin l'interface terrain-structure joue un rôle important, aussi bien pour les méthodes électriques, électromagnétiques et surtout sismiques, où une interface marquée assure le retour d'énergie.

Il est toujours préférable d'étalonner les résultats obtenus par au moins un sondage mécanique exécuté sur le même site (RICHTER & al, 1996). Un tel étalonnage permet d'établir localement la relation entre les propriétés physiques et les caractéristiques géotechniques du milieu.

#### Reconnaissance par la méthode des résistivités électriques.

La prospection électrique utilise la résistivité électrique  $\rho$ , ou son inverse la conductivité électrique  $\sigma$  des roches et des minéraux.

Les roches souterraines sont, à de très rares exceptions près, imprégnées d'eau, ce qui leur confère une conductivité électrique non nulle. Cette conductivité dépend du type de la roche et de son état.

La conductivité du sous-sol dépend également, d'une part, de la quantité et de la qualité des eaux contenues dans les roches (à ces deux facteurs on peut ajouter la « tortuosité » qui exprime le mode de communication entre les pores), et d'autre part, de la teneur en argile (ce deuxième paramètre étant largement dominant, à faible profondeur, en milieu continental). La résistivité électrique est, de loin, la propriété physique qui présente la plus grande variabilité dans les roches.

- **Contraintes d'utilisation**

La description de la structure du sous-sol, par l'étude des résistivités électriques des formations qui le composent, ne peut-être réalisée que si les trois conditions suivantes sont remplies :

- les diverses formations doivent être caractérisées par des résistivités nettement différentes ;
- le courant électrique envoyé doit pénétrer jusqu'aux objectifs à étudier ;
- les perturbations apportées au cheminement du courant par les hétérogénéités du sous-sol doivent être mesurables.

### • Principe de la mesure

On injecte dans le sol, un courant d'intensité  $I$ , à l'aide de deux électrodes. On mesure, à l'aide de deux autres électrodes, une différence de potentiel  $\Delta V$ . Cette différence est fonction de la résistivité de tous les terrains traversés par le courant électrique. On utilise des courants continus ou à très basse fréquence rendant négligeables les phénomènes d'induction.

Ces mesures sont faites, généralement, à partir de la surface selon deux principes :

- le traîné, conçu de façon à faire porter l'investigation sur une tranche de sous-sol d'épaisseur plus ou moins constante, permet de visualiser les variations latérales du sous-sol.
- le sondage électrique, qui apporte des informations quantitatives à la verticale du point de mesure. Auparavant, l'interprétation se faisait à l'aide d'abaques (MEDKOUR, 1984) ; désormais ces mesures sont interprétées à l'aide d'algorithmes informatiques, qui permettent une interprétation automatique selon un modèle à  $N$  terrains.

La combinaison de ces deux procédés, sondages et traînés, correspond à une investigation en trois dimensions du sous-sol, elle est réalisée avec des multipôles (PANISSOD, 1997).

### • Domaine d'utilisation

La méthode des résistivités électriques est une méthode fiable et couramment utilisée en géologie, en hydrologie (KALINSKI, KELLY, 1993) et aussi en archéologie (LAJARTHE, 1996). Elle donne de très bons résultats pour la localisation de la limite entre les sols de caractéristiques différentes, comme les sols gelés par rapport aux sols non gelés. Cette limite présente une augmentation aiguë de la résistivité électrique (FORTIER & al, 1994).

Elle est aussi utilisée pour la recherche pétrolière. Les formations ayant une forte résistivité peuvent comporter des hydrocarbures, tandis que les formations ayant une faible résistivité sont généralement saturées en eau (CLARK & al, 1992).

Dans le forage d'un tunnel, l'étude des conductivités permet de détecter à distance et de façon continue les changements ou altérations de la roche telles que les zones faillées, sources partielles des venues d'eau.

Nous exposerons, ci-après, deux projets différents de reconnaissance électrique dans les tunnels durant la foration. Le premier n'a pas encore été concrétisé, alors que le second a déjà donné des résultats.

La première application de la méthode de reconnaissance électrique (GRIMALDI, SOUHAITE, 1987) propose la surveillance en continu des variations de conductivité frontale et latérale autour d'un tunnelier. Cette application utilise un générateur émettant un courant alternatif entre le tunnelier et une électrode lointaine. Un voltmètre mesure les courants émis par différentes portions du tunnelier, isolées électriquement de la masse du tunnelier (la fréquence  $f$  n'est pas nulle, pour éviter les problèmes dus à la polarisation des électrodes). Chacun des courants mesurés est proportionnel à la densité de courant  $j$  sur le tunnelier, au point de localisation des électrodes considérées. Le tunnelier étant métallique tout élément de sa surface externe en contact direct ou indirect avec le terrain émet du courant dans ce dernier. L'avantage qui résulte de l'utilisation de la densité de courant provient du fait que le courant avoisinant focalise la portion de courant considérée dans une direction perpendiculaire à la surface de l'électrode, permettant ainsi de définir une conductivité apparente locale, principalement liée à la conductivité de la formation dans cette direction. Un programme informatique détermine à partir de différents paramètres les conductivités apparentes du milieu dans différentes directions autour du tunnelier.

Cette méthode de reconnaissance a fait l'objet d'un brevet, mais n'a, à ce jour, pas encore été expérimentée.

Une entreprise de travaux publics, G.T.M., a réalisé une auscultation géophysique électrique à l'avant d'un tunnelier à pression de terre. Elle permet la reconnaissance de terrains karstiques sur plus de 20 mètres de distance, sous la nappe. Le tunnelier creusait dans les calcaires karstiques bordelais de mauvaise qualité : stabilité précaire, risque de déstabilisation du tunnelier en radier, problème de progression du tunnelier en présence de front mixte (meuble/dur), risque de soutirage en voûte, incertitude du terrain à excaver avec variations brutales et soudaines, difficultés de guidage et portance du tunnelier en terrain quasi liquide. Ceci montre l'intérêt d'un tunnelier à confinement, mais ces tunneliers étant aveugles, il est utile de pouvoir « voir » cavités et boyaux à l'avance.

Cette reconnaissance se fit à l'aide du cylindre électrique, mis au point par Techsol (CORBETTA, LANTIER, 1994), qui a donné certains résultats encourageants. L'étude de la répartition des résistivités dans l'espace constitue la finalité du cycle de mesures réalisées. Elle permet de valoriser un forage de reconnaissance par une auscultation de révolution de 5 mètres de rayon. Toute anomalie conductrice ou résistante, vis à vis de son environnement, dans un cylindre de révolution, est repérée en distance le long du forage à 0,5 mètre près.

Le grand intérêt de cette méthode est de ne plus risquer de passer à côté d'une grande anomalie karstique comme cela pouvait être le cas avec les forages de reconnaissance classique.

Les inconvénients de la méthode sont, d'une part, qu'elle nécessite l'arrêt de la machine, et d'autre part, que l'on ne peut faire les mesures spécifiques permettant d'indiquer l'azimut des anomalies. Toutefois, deux ou trois forages horizontaux peuvent permettre de lever peu à

peu cette indétermination, l'essentiel étant d'être prévenu sur une anomalie karstique majeure à une distance donnée du front.

### La méthode électromagnétique

Comme pour la méthode précédente, on utilise la résistivité des roches comme paramètre de reconnaissance. On utilise un courant oscillant, induit dans le sous-sol et non injecté par l'intermédiaire d'électrodes comme pour la méthode électrique. L'utilisation de l'induction électromagnétique apparut au début de notre siècle dans le but de détecter des câbles enterrés (RADIODETECTION, 1990).

Les conducteurs situés dans le sous-sol donnent naissance sous l'effet d'un champ primaire variable à un champ secondaire  $H_s$  (figure 1-10). Toute méthode électromagnétique se fonde sur la mesure des perturbations en surface de ce champ secondaire.

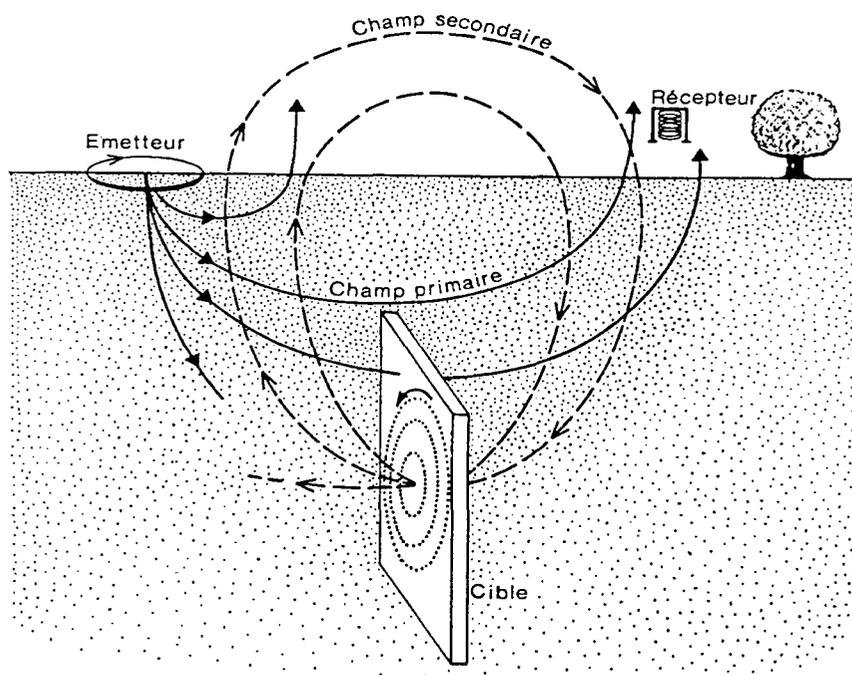


Figure 1- 10 : Disposition schématique : émetteur, champ primaire, cible conductrice, champ secondaire, récepteur.

Le développement de la méthode électromagnétique est la conséquence des avantages propres à cette méthode (TAKIGAWA, EZAWA, 1986 ; PIERSON D'AUTREY & al, 1995), en particulier la continuité de fonctionnement, et une grande facilité d'automatisation dans sa mise en œuvre (ITO, MURAGAWA).

- **Contraintes d'utilisation**

Pour que les méthodes électromagnétiques soient utilisables, trois conditions au moins doivent être remplies :

- certaines formations du sous-sol doivent présenter des conductivités suffisantes pour que des courants électriques non négligeables puissent y prendre naissance,
- le champ magnétique primaire doit pénétrer suffisamment dans le sous-sol,
- le champ secondaire prenant naissance dans les formations conductrices du sous-sol doit pouvoir être perçu en surface.

Pour que les perturbations créées par le champ secondaire provoquent des anomalies discernables, il faut qu'il soit suffisamment fort. Il faut d'autre part que l'atténuation des ondes électromagnétiques entre la source secondaire et le récepteur de surface ne soit pas excessive.

L'atténuation est fonction de la distance entre l'émetteur du champ secondaire et le récepteur, de la géométrie de l'émetteur, du champ, et de l'absorption par l'environnement conducteur. L'absorption est d'autant plus forte que les résistivités sont basses et les fréquences élevées. On cherche à optimiser la liaison électromagnétique en déterminant la meilleure fréquence (FONTAINE, 1969).

Pour un même dispositif la profondeur d'investigation change au cas par cas (COOK, 1975). Sur le terrain, les profondeurs atteintes s'étagent d'ordinaire entre 50 et 100 mètres et elles peuvent atteindre exceptionnellement 500 mètres.

- **Mise en œuvre**

Il existe différents types de prospections électromagnétiques qui se différencient par la fréquence utilisée.

Cas des fréquences nulles : on retrouve le domaine de la prospection électrique par courant continu.

Cas des basses fréquences : c'est le domaine des fréquences inférieures à 300 kHz. On retrouve les exemples d'application de la méthode électrique. Au fur et à mesure que l'on descend en fréquence, on a la possibilité d'augmenter la profondeur d'investigation (DUBUS, 1974).

Le courant est injecté dans le sol par contact direct ou par couplage inductif. Le sondage par induction permet d'élargir le domaine d'application du sondage électrique, car l'émetteur n'a pas nécessairement besoin d'être en contact galvanique avec le sous-sol (GALAN-MALAGA, 1989).

Un autre avantage est l'utilisation d'un appareillage électromagnétique aéroporté (BARTEL, BECKER, 1990). La méthode électromagnétique aéroportée, associée à l'aéromagnétisme, a été largement utilisée en prospection minière.

Les méthodes électromagnétiques sont employées pour la détection des fractures, des karsts aquifères et des cavités (DUBUS, 1968). Elles permettent d'évaluer la continuité des grandes veines de charbon, pour optimiser les percements de galerie de mine (GREENFIELD, WU, 1991). Elles prolongent parfaitement les mesures en courant continu.

Cas des hautes fréquences : On se trouve dans un domaine de fréquences très élevées, c'est à dire, supérieures à 10 MHz. C'est le domaine de la prospection radar.

Le développement actuel des techniques d'investigation par radar peut permettre d'envisager l'utilisation de cette méthode pour la reconnaissance des terrains (JOLLEY, 1994). Elle est couramment utilisée pour le pré-diagnostic d'état d'ouvrage et la reconnaissance de son environnement.

Plus de 40 à 50 km de reconnaissance sont réalisés par la méthode radar chaque année en France, dans les ouvrages visibles d'assainissement, les aqueducs et les tunnels.

Le radar est une technique pouvant détecter les anomalies du sol avant et pendant le creusement, selon différents dispositifs, en fonction des objectifs de l'étude et de la profondeur de l'ouvrage (FOILLARD, 1995). Pour les investigations superficielles, la réflectométrie radar est mise en œuvre depuis la surface jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur. Pour les investigations profondes, on utilise la réflectométrie ou tomographie radar, qui est réalisée à partir de forages verticaux depuis la surface, ou horizontaux à partir du front de taille.

Dans ces forages d'un diamètre de 40 mm, on place une antenne radar. Ce dispositif permet une étude théorique sur un diamètre de 5 à 10 mètres autour du forage.

La présence du bouclier au niveau du front de taille crée une réflexion facilement identifiable.

Le temps d'acquisition est de 6 minutes pour 50 mètres de forage. En revanche le temps d'intervention est de 1 heure, sans compter le temps de foration. Le temps de dépouillement, de traitement des données radar, et d'interprétation d'un rapport de synthèse des reconnaissances, est de 4 heures. Au total, le temps de reconnaissance dépasse 5 heures.

Le radar permet une bonne anticipation et une bonne lecture de la qualité des terrains à excaver. En revanche le temps nécessaire pour obtenir les résultats de la reconnaissance n'est pas compatible avec une reconnaissance à l'avancement. De plus, son emploi nécessite l'arrêt complet de la machine, et pour cette raison, il devient trop coûteux (GOËL, 1995 ; PIERSON D'AUTREY & al, 1995).

### La méthode sismique

Les mesures sismiques portent principalement sur deux paramètres, qui sont les trajets suivis dans le sous-sol par l'ébranlement sismique, et les vitesses de déplacement de ces ébranlements dans les diverses formations rocheuses. L'expérience montre que ces vitesses dépendent de la cohésion des matériaux traversés, de leur porosité, du degré de saturation de leurs pores, et dans une moindre mesure, de leur constitution minéralogique. En connaissant ces trajets et ces vitesses, il est possible de localiser un bon nombre d'hétérogénéités, d'en situer les limites et parfois d'en estimer la porosité.

#### • Contraintes d'utilisation

Pour que les méthodes sismiques soient utilisables, certaines conditions doivent être remplies. Il faut en particulier que :

- la vitesse des ondes élastiques dans le sous-sol soit différenciée d'une formation à l'autre
- toutes les mesures se faisant généralement à la surface du sol, il est indispensable que le signal, consécutif à l'ébranlement provoqué à la source, y soit perceptible. De ce fait, une part des ondes directes demeurent près de la surface et les ondes réfléchies y sont renvoyées par le ou les miroirs, et certaines ondes réfractées y retournent après un passage par le marqueur
- les qualités du miroir ou du marqueur séparant deux formations soient dépendantes du contraste des vitesses. Il faut, en outre, que les couches successives du sous-sol présentent des vitesses croissantes avec la profondeur, pour que les ondes réfractées remontent vers la surface.

Les avantages de cette technique sont son faible coût (BEITNES, BLINDHEIM, 1987), sa rapidité, son aptitude à couvrir de grande surface et ses résultats immédiats (HANSEN & al, 1993).

Utilisée au stade des reconnaissances préliminaires (BOUVARD, HUGONIN, SCHNEIDER, 1994), cette méthode propose un diagnostic général sur la qualité du terrain, qui permet d'orienter, d'une part, le type du projet et, d'autre part, les reconnaissances complémentaires plus élaborées qu'il y aura lieu d'effectuer. Elle confirme bien souvent le tracé du tunnel établi à partir de programme classique d'investigation géologique par sondage (BRULARD, TAILLE, 1995).

- **Mise en œuvre**

Les méthodes sismiques offrent la possibilité d'obtenir les conditions du sous-sol à l'avant de la tête du tunnel. L'analyse d'un certain nombre de projets utilisant des machines à forer a montré que le sondage sismique peut être intégré dans le cycle de creusement, si certaines conditions sur la portée et la durée des sondages sont remplies.

La reconnaissance dans les tunnels peut être envisagée à l'aide de panneaux sismiques, mais cette méthode est peu adaptée en milieu urbain. L'interprétation n'est pas toujours fiable, et les résultats ne sont pas assez précis.

Dans une foration, le tunnel peut être regardé comme un puits, et les émetteurs et récepteurs sont placés le long du mur du tunnel derrière la face. Le principe de cette méthode a été testé en Norvège (NORD & al, 1992), ainsi que dans le tunnel ferroviaire de Centovalli (Suisse). Les ondes sismiques sont générées par une petite charge, mise à feu dans un trou de décharge sur le revêtement de côté du tunnelier. La distance entre le point de détonation et la face du tunnel est de 100 m. Les données sismiques sont acquises pendant les arrêts de chantier. Le début de la zone de prédiction s'étend jusqu'à 28 m au devant de la face du tunnel (SATTEL & al, 1992).

La société Amberg Measuring Technique a mis au point un système de reconnaissance appelé SSP 202 - Sonic Soft Ground Probing System. Ce système balaye en continu le sol à l'avant du disque de coupe à l'aide d'ondes acoustiques afin de détecter les changements de géologie : cavités, anciennes fondations. Les ondes sont envoyées à une fréquence différente de celle du bruit de la machine, et le signal retour est repris par des capteurs placés sur les outils de coupe. Ce système permet de visualiser une image en trois dimensions d'un espace de 50 m de long suivant l'axe de la machine. Des obstacles d'un diamètre inférieur à 1 mètre peuvent être détectés à l'aide de ce système. Il connaît à l'heure actuelle un grand succès, mais on ne connaît pas encore ses véritables performances.

La méthode sismique nécessite tout de même un couplage étroit entre le terrain et le récepteur de l'onde. Or ce couplage est très difficilement réalisable sur le plan technique lorsque le disque de coupe du tunnelier est entraîné en rotation. Ce phénomène rend alors les interprétations sur les signaux recueillis extrêmement aléatoires.

Les limitations de la reconnaissance sismique sont les imprécisions dans les calculs, la possibilité d'erreur dans l'interprétation (NILSEN & al, 1988), les réflexions latérales, et une pénétration insatisfaisante dans certains terrains (moraines très hétérogènes). La réflexion d'un sol rocheux peut aussi être masquée par des réflexions multiples d'éléments superficiels. Malgré cela, c'est un élément puissant pour une investigation détaillée.

### La méthode gravimétrique

La prospection gravimétrique s'intéresse à la mesure des perturbations du champ de pesanteur de la Terre. C'est une méthode passive, dans laquelle les variations locales de la densité des roches au voisinage de la surface du sol correspondent à de minuscules changements du champ principal de la pesanteur.

L'expression de la force de gravité est donnée par la loi de Newton. Cette loi stipule que la force entre deux masses  $m_1$  et  $m_2$  est directement proportionnelle au produit des masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance.

La force d'attraction newtonienne et la force d'inertie axifuge liée à la rotation de la terre provoquent sur toute masse placée près de la surface du globe terrestre une accélération  $g$ , dite accélération de la pesanteur ou simplement pesanteur.

$$g = G \frac{M}{R^2}$$

En l'honneur de Galilée, qui a fait les premières mesures, l'unité d'accélération de la pesanteur,  $1 \text{ cm/s}^2$ , est appelée le gal.

Le paramètre significatif pour une étude gravimétrique est la variation locale de la densité. Les densités des roches varient très peu avec leur composition minéralogique, mais beaucoup avec leur porosité et avec le taux de saturation des pores.

Cette méthode permet la mise en évidence de défauts ou d'excès de masse dans l'environnement tridimensionnel de l'ouvrage. On espère ainsi montrer des variations de densité longitudinales, parmi lesquelles des cavités qui représentent d'excellents contrastes de densité par rapport à l'environnement (LABBE, 1979).

- **Contraintes d'utilisation**

La variation maximale de densité que l'on mesure entre les roches et les minéraux est approximativement égale à deux (cas du vide franc).

C'est une très petite variation, devant l'ordre de grandeur de variation des autres paramètres de prospection géophysique.

- **Mise en œuvre**

A la surface de la terre, la valeur de la pesanteur dépend de cinq facteurs : la latitude, l'altitude, la topographie environnante, les marées terrestres et les variations de densité sous la surface. Seul le dernier facteur est significatif en prospection gravimétrique, et son effet est en général beaucoup plus petit que celui des quatre autres combiné. Il faut alors effectuer des corrections pour ne garder que les variations de densité.

- correction de la latitude liée à la variation de la force d'inertie axifuge et (au deuxième ordre) à l'aplatissement de la terre.
- correction d'altitude. Elle comprend la correction de plateau et la correction d'air libre.

- correction topographique (de relief) qui tient compte des irrégularités de la surface du sol à proximité de la station, par exemple des collines (excès de masse) s'élevant au-dessus de la station, et des vallées (déficit de masse) situées au-dessous.
- correction de marée terrestre : les instruments de mesure de la pesanteur sont assez sensibles pour être influencés par les variations de  $g$  dues au mouvement du soleil et de la lune. L'amplitude de ces variations est d'environ 0.3 gal.

L'utilisation de la microgravimétrie permet l'identification des zones à karstification intense (déficit de masse) mais la sensibilité est faible pour les petits volumes.

Cette technique est de moins en moins utilisée en mesure directe dans les tunnels. Elle est toutefois utilisable en étude comparative, par exemple avant et après les travaux d'injection quand ceux-ci ont porté sur de grand volume.

#### 1.4. CONCLUSION

La sécurité dans la construction des ouvrages souterrains a été considérablement améliorée grâce à l'utilisation des tunneliers à front pressurisé. Ce système permet de limiter les effondrements par un soutènement du front grâce à une pression de terre, de boue ou d'air, et par un soutènement du contour du tunnel par la jupe formant l'enveloppe du tunnelier, puis par les voussoirs.

Bien que ces avantages soient considérables, ce type de tunnelier est « aveugle » et reste à la merci de tout changement brutal de géologie, sur ou à proximité, du parcours du tunnelier.

De plus en plus, les entreprises responsables de ce type de chantier désirent équiper leurs machines d'un système de reconnaissance capable de reconnaître le maximum de terrain à l'avant du tunnelier.

Pour corriger le caractère ponctuel de la reconnaissance par forages destructifs, souvent coûteux et trop longs à mettre en œuvre, les entreprises préfèrent utiliser les méthodes géophysiques :

- la méthode électrique ou électromagnétique basse fréquence,
- la méthode électromagnétique haute fréquence,
- la méthode sismique,
- la méthode gravimétrique.

La méthode gravimétrique permet de reconnaître les grandes cavités, mais la technique ne donne pas satisfaction en site urbain où l'on assiste à une détérioration du rapport signal sur bruit. Elle est très peu utilisée dans le contexte des travaux souterrains aux tunneliers.

La méthode sismique permet de reconnaître une grande quantité de terrain. Son utilisation en site urbain est confrontée aux problèmes de forte hétérogénéité.

La méthode électromagnétique haute fréquence (radar) ne permet pas de reconnaître les terrains en profondeur. Par ailleurs, le temps nécessaire à l'interprétation des mesures est souvent jugé long.

Etant donné le contexte dans lequel doit se faire la reconnaissance, la méthode électrique ou électromagnétique basse fréquence apparaît bien adaptée : nous proposons dans le chapitre suivant d'étudier en détail l'application de cette technique dans la reconnaissance à l'avancement.

**CHAPITRE II : LA METHODE DE PROSPECTION  
ELECTRIQUE**

## 2.1. INTRODUCTION

L'investigation géoélectrique a l'avantage d'être non destructive, peu coûteuse, rapide et reproductible. Des études montrent que la surveillance géoélectrique peut être utilisée pour une évaluation rapide des sols de forte salinité, c'est à dire très conducteurs (SCHRODER & al, 1987 ; CHANDRASEKHARAN & al, 1994). On pourrait penser que la prospection électrique en mer est inutilisable, du fait de la masse d'eau salée qui peut agir comme un shunt pour le courant électrique, et empêcher la pénétration de celui-ci dans le sous-sol marin. Or il n'en est rien (WHITELEY, 1974 ; LAGABRIELLE, 1984), ce qui nous permet de penser que la méthode électrique est tout à fait valable pour la reconnaissance des terrains en présence d'un corps conducteur tel qu'un tunnelier.

La qualité des résultats est très dépendante de la structure électrique de la zone à reconnaître. La succession des contrastes de résistivité peut y être très favorable. Plusieurs instrumentations sur des tunneliers ont déjà été réalisées. L'une d'elles proposait la reconnaissance de l'épaisseur de la couche de boue sur la périphérie extérieure de la machine d'excavation (KANEMITSU & al, 1991) par une méthode de résistivité et permettait d'estimer les risques d'effondrement du sol naturel.

Nous allons aborder dans ce qui suit les grands principes de la prospection électrique. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer aux ouvrages spécialisés (LASFARGUES (1957), PURCELL (1965), TELFORD (1976)).

## 2.2. PROPRIETES ELECTRIQUES DES ROCHES ET MINERAUX

La prospection électrique utilise plusieurs propriétés électriques des roches et des minéraux : les potentiels électriques naturels, la conductivité électrique et la constante diélectrique. C'est la conductivité électrique qui joue le rôle principal.

### 2.2.1. Les potentiels électriques spontanés

Certains minerais possèdent, dans certaines conditions bien définies, la propriété d'émettre un courant électrique dans le sol. On parle de potentiels spontanés. Ces potentiels ne se produisent pas dans le sol seulement à cause des masses métalliques ou des corps particulièrement conducteurs. Ils se produisent également au contact de deux terrains de nature et de résistivité différentes. Certains phénomènes hydrologiques peuvent aussi être à l'origine de courant.

Quatre principaux mécanismes sont responsables de ces potentiels, le premier est d'origine mécanique les trois autres résultent de processus chimiques.

### Potentiel électrocinétique (ou électrofiltration)

C'est l'effet que l'on observe quand une solution de résistivité électrique  $\rho$  et de viscosité  $\eta$  traverse un milieu capillaire ou poreux.

L'écoulement d'une solution électrolytique à travers une membrane poreuse provoque de part et d'autre de celle-ci une différence de potentiel électrique. On appelle ce phénomène l'électrofiltration. Il correspond à la présence d'extréma négatifs sur les sommets topographiques ; l'eau entraîne les charges positives de telle sorte que la région en aval s'électrise positivement.

Ce fait s'explique de deux façons différentes :

- l'eau en circulant dans une roche entraîne avec elle les cations qui se trouvent en périphérie des grains et qui sont plus facilement détachables que les anions.

- les cations, de diamètre plus faible que les anions, peuvent circuler par de faibles interstices et être entraînés plus loin.

### Potentiel de diffusion

Ce potentiel est provoqué par la différence de mobilité des ions dans des solutions de concentrations différentes.

### Potentiel de Nernst

Si l'on immerge deux électrodes identiques, d'un même métal, dans une solution homogène, il n'apparaît pas de tension entre leurs bornes. Mais si la concentration est différente à chacune des électrodes, on observe une différence de potentiel. On appelle potentiel électrochimique ou statique, ou encore spontané, l'effet combiné du potentiel de diffusion et du potentiel de Nernst.

### Potentiel de minéralisation

Lorsque deux électrodes constituées de métaux différents sont plongées dans une solution homogène, il apparaît une tension entre leurs bornes. On l'appelle *potentiel électrolytique de contact*. C'est ce potentiel qui, associé au potentiel électrochimique, constitue l'une des causes fondamentales des forts potentiels que l'on rencontre dans certaines régions minéralisées, et que l'on désigne par l'expression de *potentiels de minéralisation*. Il est beaucoup plus grand que ceux décrits ci-dessus. On le trouve dans les terrains contenant des sulfures ou des graphites.

### 2.2.2. Les conductivités électriques

Le courant électrique peut s'écouler dans un conducteur (notamment un sol) selon deux modes distincts :

- la conduction électronique : conduction normale dans les matériaux contenant des électrons libres (métaux)
- la conduction électrolytique : conduction due au déplacement des ions.

Elles se calculent de la façon suivante :

La résistivité d'un cylindre de longueur  $L$  et de section droite  $A$  est :

$$\rho = RA/L \quad (2.1)$$

Elle s'exprime en  $\Omega\text{m}$  (ohm mètre)

$R$  est la résistance entre ses deux extrémités en  $\Omega$  (ohm)

La résistance est donnée par le rapport de la tension appliquée aux extrémités du cylindre sur le courant qui le traverse selon la loi d'ohm :

$$R = V/I \quad (2.2)$$

$\sigma$  la conductivité, inverse de la résistivité, s'exprime en S/m (Siemens/mètre)

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA} = (I/A)/(V/L) = \frac{j}{E} \quad (2.3a)$$

$j$ : densité de courant (en A/m<sup>2</sup>)

$E$  : champ électrique (en V/m)

- Conduction électronique

Dans le cas de conduction électronique, la matière du conducteur ne participe nullement au déplacement ; il y a transport d'électrons : la conductivité est dite électronique ou métallique.

- Conductivité électrolytique

Comme la plupart des roches sont de mauvais conducteurs, leurs résistivités seraient très élevées si elles n'étaient pas souvent poreuses. La conductivité est assurée par le fluide que contiennent les roches et le courant correspond à un déplacement d'ions. La résistivité varie avec la mobilité, la concentration et le degré d'ionisation de la solution. La conductivité des roches poreuses varie avec le volume et l'arrangement des pores et plus encore avec la quantité et la conductivité de l'eau contenue. Pour modéliser la conductivité des roches ou son

inverse, la résistivité, on doit distinguer deux catégories, selon que la roche contient ou non de l'argile.

Roche sans argile (loi d'Archie, 1941)

On distinguera deux cas :

(i) les roches saturées pour lesquelles la conduction est une conduction volumique due à l'eau. On introduit le facteur de formation F

$$F = \frac{\rho_{\text{roche}}}{\rho_{\text{eau}}} \quad F = a\phi^{-m} \quad (2.4)$$

$\phi$  est la porosité.

**a** et **m** dépendent de la forme des grains solides et de la géométrie de leur empilement. **a** est proche de 1 et la valeur de **m** dépend de la sphéricité des particules. Elle est minimale pour une sphère ( $1,3 \leq m \leq 2,5$ ).

et (ii) les roches non saturées :

$$F = a \phi^{-m} s^{-n} \quad (2.5)$$

s : fraction des pores contenant l'eau (saturation en eau)

n ≈ 2

Roche avec argile.

Dans les argiles, où la surface spécifique est importante, une conduction par la surface des grains intervient en plus de la conduction dans le volume d'eau.

On a alors :

$$\sigma_{\text{totale}} = \sigma_{\text{due à l'eau interstitielle}} + \sigma_{\text{due à l'argile}}$$

Pour calculer  $\sigma_{\text{roche}}$  quand on a :

-  $\sigma_{\text{due à l'eau interstitielle}}$  : On utilise la loi d'Archie  $\frac{1}{F}$  ( $\sigma_{\text{eau}}$ )

-  $\sigma_{\text{due à l'argile}}$  : on calcule à partir de la loi d'Archie, dans laquelle on remplace l'eau par l'argile ; on a  $\frac{1}{F'}$  ( $\sigma_{\text{argile}}$ ), F' facteur de formation pour l'argile qui dépend de la disposition géométrique des grains d'argile.

On a :

$$\sigma_{\text{tot.}} = \frac{1}{F} \sigma_{\text{eau}} + \frac{1}{F'} \sigma_{\text{argile}} \quad (2.6)$$

La conductivité des roches dépend donc des facteurs suivants :

- du volume des pores,
- du volume des pores rempli d'eau,
- de la disposition des pores,

- de la conductivité de l'eau d'imbibition.
- de la teneur en argile et de sa nature.
- de la disposition des grains d'argile.

La conductivité de l'eau varie sensiblement selon la qualité et la quantité de chlorures et de sulfates dissous, et la présence d'autres minéraux.

### 2.2.3. Les résistivités de quelques formations géologiques

C'est la résistivité électrique qui montre les plus grandes variations, parmi toutes les propriétés physiques des roches et minéraux. Si la gamme des densités, des vitesses de propagation des ondes élastiques ou de la radioactivité est étroite, celle des résistivités peut être beaucoup plus forte et varier dans un rapport de 1000. La gamme maximale varie de l'argent natif  $1.6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ , au soufre pur  $10^{16} \Omega\text{m}$ . Elle est mesurée en laboratoire à partir d'un échantillon de forme régulière (cylindre, cube).

On appelle conducteur un matériel de résistivité inférieure à  $10^5 \Omega\text{m}$ , et isolant celui pour lequel cette valeur dépasse  $10^7 \Omega\text{m}$ . Entre les deux, ce sont des semi-conducteurs.

Les métaux et graphites sont tous conducteurs, les électrons libres qu'ils possèdent sont très mobiles et en nombre très élevé. Les semi-conducteurs possèdent également des électrons libres, mais en nombre plus réduit. Les isolants sont caractérisés par des liaisons ioniques de telle sorte que les électrons de valence ne sont pas libres, ce sont les ions qui transportent les charges. Ils doivent surmonter des barrières de potentiel plus fortes que celles qui existent dans les semi-conducteurs et dans les conducteurs.

Très sommairement, les roches ignées ont les plus hautes résistivités, les sédiments les plus faibles et les roches métamorphiques des valeurs intermédiaires. Cependant, les recouvrements sont importants, comme c'est le cas pour d'autres propriétés physiques ; de plus, la résistivité d'une roche donnée est fonction de son âge et de sa lithologie, car la porosité de la roche et la salinité de l'eau d'imbibition en dépendent. Par exemple, des roches volcaniques du Précambrien donnent des résistivités de 200 à 5000  $\Omega\text{m}$ , tandis que pour des roches analogues du quaternaire, on a des résistivités de 10 à 200  $\Omega\text{m}$ . L'effet de la teneur en eau sur la résistivité d'ensemble des roches est souvent observée. Dans tous les cas, une variation faible de la teneur en eau modifie considérablement la résistivité. Parfois, celle-ci est favorisée par une accumulation des minéraux eux-mêmes conducteurs, tels que les nombreux sulfures ou le graphite. Cependant, dans la plupart des cas, on rencontre une conductibilité électrolytique.

Les grandes différences entre les résistivités observées pour une même roche s'expliquent, en partie, par une différence de saturation (pour les sables et les graviers par exemple), par une fracturation plus ou moins intense, par les différences de salinité des eaux (pour les sédiments), par la présence d'argile (dans les grès et les roches carbonatées), ou encore par les degrés d'altération plus ou moins poussés (pour les roches plutoniques et métamorphiques principalement). Ces variations peuvent entraîner des confusions. Ainsi des sables, des moraines et des grès marneux peuvent très bien présenter des résistivités

identiques. Malgré l'importance des variations observées et les chevauchements possibles, l'étude électrique appuyée sur le bon sens géologique apporte, dans bien des cas, des informations sans ambiguïté.

Le tableau 2-1 (LASFARGUES, 1957) nous donne les ordres de grandeur de la résistivité de différents matériaux.

<b>EAUX</b>	
Eau d'exhaure	0,30 $\Omega$ .m
Eau de subsurface(contenant Na, K, Ca, Mg sous forme de chlorure)	0,03 à 0,10 $\Omega$ .m
Eau de source ordinaire :	1 $\Omega$ .m à 150 $\Omega$ .m
Eau de surface (lac, rivière, etc.)	0,10 à 3000 $\Omega$ .m
Eau de pluie (ruissellement)	30 à 1000 $\Omega$ .m
<b>MARNES ET SABLES IMBIBES D'EAU SALEE</b>	<b>0.5 à 10 <math>\Omega</math>.m</b>
Vases du port d'Alger	0,75 $\Omega$ .m
Marnes du pliocène de l'Apchéron	0,5 à 2 $\Omega$ .m
Marnes du Sarmatien russe	0,5 à 2 $\Omega$ .m
Marnes du Méiotique roumain	1 à 2 $\Omega$ .m
Marnes oligocènes d'Alsace	3 à 4 $\Omega$ .m
Marnes éocènes de l'Afrique du Nord	4 à 7 $\Omega$ .m
<b>MINERAUX</b>	
Graphite	$3 \cdot 10^{-4}$ $\Omega$ .m
Pyrite	$1 \cdot 10^{-3}$ $\Omega$ .m
Chalcopyrite	$1,2 \cdot 10^{-3}$ $\Omega$ .m
Galène	5 à $50 \cdot 10^{-3}$ $\Omega$ .m
Molybdénite	0,08 $\Omega$ .m
Blende	$10^5$ $\Omega$ .m
Stibine	$5 \cdot 10^6$ $\Omega$ .m
Oligiste	4 à $8 \cdot 10^{-3}$ $\Omega$ .m
Magnétite	6 à 10 $\Omega$ .m
Pyrolusite	0,5 à 5 $\Omega$ .m
Ilménite	5 à 10 $\Omega$ .m
Anthracite	1,2 $\Omega$ .m
Mica	$1,5 \cdot 10^8$ $\Omega$ .m
Quartz	$3,8 \cdot 10^{10}$ à $1,2 \cdot 10^{12}$ $\Omega$ .m
Calcite	$5,5 \cdot 10^{12}$ $\Omega$ .m
Soufre	$10^{28}$ à $10^{33}$ $\Omega$ .m

<b>ARGILES ET MARNO-CALCAIRE</b> (sans eau salée)	<b>10 à 50 Ω.m</b>
Marnes du jurassique lorrain	30 Ω.m
Argiles alluvionnaires africaines	10 Ω.m
Argiles et marnes du trias lorrain	30 à 50 Ω.m
<b>SCHISTES</b> (sans eau salée)	<b>50 à 300 Ω.m et plus</b>
Schistes gothlandiens	40 à 60 Ω.m
Schistes à Calymène	200 Ω.m
Schistes précambriens	250 à 300 Ω.m
Micachistes de Carmaux	800 Ω.m
<b>CALCAIRES</b> (sans eau salée)	<b>80 à 5000 Ω.m et plus</b>
Calcaires jurassiques lorrains	80 à 300 Ω.m
Calcaires crétacés de l'Afrique du Nord	80 à 5000 Ω.m et plus
Calcaires paléozoïques du Saint-Laurent	1000 à 3000 Ω.m
<b>GRES, QUARTZITES ET SABLES</b> (sans eau salée)	<b>60 à 10000 Ω.m et plus</b>
Grès burdigaliens de l'Afrique du Nord	60 à 80 Ω.m
Grès du Silurien normand	500 à 4000 Ω.m
Grès lutétiens de Normandie	5000 à 10000 Ω.m
Sables précambrien du bouclier canadien	1000 à 20000 Ω.m
<b>ROCHES PLUTONIQUES ET ERUPTIVES</b>	<b>300 à 10000 Ω.m et plus</b>
Granites de Vire	300 à 500 Ω.m
Granites de la Truyère, suivant altération	10000 à 15000 Ω.m
Basaltes, andésites serpentine	800 à 10000 Ω.m et plus
Tufs silicifiés	20000 Ω.m et plus

Tableau 2-1 : Mesures de résistivité.

## 2.3. CHAMPS ELECTRIQUE ET MAGNETIQUE

### 2.3.1. La densité de courant

Dans les matériaux solides homogènes, la densité de courant est proportionnelle en tout point au champ électrique et la constante de proportionnalité ne dépend que de la nature du matériau.

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J}, \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.7)$$

Avec:

$$\begin{array}{ll} \mathbf{E} & \text{en } \text{V.m}^{-1} \\ \mathbf{J} & \text{en } \text{A.m}^{-2} \\ \rho & \text{en } \Omega.\text{m} \\ \sigma & \text{en } \text{S.m}^{-1} \end{array}$$

### 2.3.2. Equation de continuité

La circulation du courant dans le sol obéit au principe de la conservation de la charge. Ce principe s'écrit sous la forme d'une équation de continuité exprimant le fait que lorsqu'une charge quitte un point, la densité de charge en ce point diminue, alors que la densité de courant en ce même point augmente.

La densité de courant  $\mathbf{J}$  et la densité de charge  $q$  satisfont la condition :

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = - \frac{\partial q}{\partial t} \quad (2.8)$$

La densité volumique des charges électriques  $q$  est exprimée en  $C/m^3$ .

Si la densité de courant  $\mathbf{J}$  est constante au cours du temps, on a une distribution du courant stationnaire, alors :

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = 0 \quad (2.9)$$

C'est le cas de la prospection par courant continu.

### 2.3.3. Théorie de l'électromagnétisme : Les équations de Maxwell

James Clerk Maxwell a introduit le *courant de déplacement* sous le terme  $\epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ .

La description de Maxwell du champ électromagnétique correspond aux *équations de Maxwell*. Elles relient entre eux quatre champs de grandeurs vectorielles : le champ électrique  $\mathbf{E}$ , l'induction magnétique  $\mathbf{B}$ , le champ magnétique  $\mathbf{H}$  et l'induction électrique  $\mathbf{D}$ .

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.10a)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.10b)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = q \quad (2.10c)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.10d)$$

L'équation 2-10a décrit le couplage entre le champ magnétique et le champ électrique, c'est la *loi de l'induction* de Faraday. L'équation 2.10b exprime la dépendance du champ magnétique par rapport à la densité de *courant de déplacement* (ou taux de variation du champ électrique), et par rapport à la densité de *courant de conduction* (ou taux de mouvement des

charges), c'est la loi d'Ampère. L'équation 2.10c est équivalente à la loi de Coulomb. L'équation 2.10d énonce que l'*induction magnétique*  $\mathbf{B}$  est produite par la densité de courant  $j$ .

Ces équations sont complétées par l'énoncé de deux relations reliant respectivement l'induction magnétique  $\mathbf{B}$  au champ magnétique  $\mathbf{H}$  et le champ de déplacement  $\mathbf{D}$  au champ électrique  $\mathbf{E}$ , valables dans un milieu continu isotrope :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (2.11a)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (2.12a)$$

Le coefficient  $\mu$  de proportionnalité entre  $\mathbf{B}$  et  $\mathbf{H}$  est appelé perméabilité magnétique.  $\mu_0$  est la perméabilité du vide et  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (H.m<sup>-1</sup>).  $\mu_r$  est la perméabilité relative du milieu (sans unité).

Le coefficient  $\varepsilon$  de proportionnalité entre  $\mathbf{D}$  et  $\mathbf{E}$  est appelé permittivité électrique.  $\varepsilon_0$  est la permittivité du vide et  $\varepsilon_0 = 1/(36\pi \cdot 10^9)$  (F.m<sup>-1</sup>).  $\varepsilon_r$  est la permittivité relative du milieu (sans unité).

Les équations (2.11a) et (2.12a) s'expriment aussi de la façon suivante :

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.11b)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.12b)$$

Les deux champs de vecteurs  $\mathbf{P}$ , pour la polarisation, et  $\mathbf{M}$ , pour l'aimantation, sont introduits pour tenir compte des phénomènes de polarisation électrique et magnétique, c'est à dire de l'existence ou de l'apparition de dipôles électriques ou magnétiques sous l'effet d'un champ inducteur.

Dans le cas d'un état stationnaire (ou statique), on a vu précédemment que la densité de courant est constante, ce qui se traduit par l'équation :

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = -\frac{\partial a}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div} \mathbf{D} = -\operatorname{div} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0 \quad (2.13)$$

Ce qui implique :

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0 \quad (2.14)$$

On a également :

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.15)$$

Les équations de Maxwell se réduisent donc à :

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0 \quad (2.16a)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2.16b)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0 \quad (2.16c)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.16d)$$

## 2.4. DISTRIBUTION DU COURANT DANS LE SOUS-SOL

### 2.4.1. Dispositifs de prospection

Depuis les premiers essais de prospection géophysique, réalisés par SCHLUMBERGER en 1912, les outils ont subi une évolution constante portant surtout sur l'accroissement de la vitesse d'acquisition des données.

Les dispositifs utilisés pour une prospection géophysique sont constitués de quatre électrodes A, B, M, N. Ce sont les quadripôles.

Devant la multitude d'arrangements possibles de ces quatre électrodes, on présente les configurations les plus utilisées :

#### - Configuration Schlumberger

Les électrodes sont alignées et espacées de telle sorte que la distance entre M et N soit très petite devant la distance entre A et B. Les deux dispositifs de mesure et d'injection ont le même centre.



Figure 2-1 : Quadripôle en configuration Schlumberger

Ce dispositif est très souvent utilisé pour les sondages électriques.

#### - Configuration Wenner

Les électrodes A, M, N et B sont alignées dans cet ordre et l'espace entre chacune d'elles est identique.

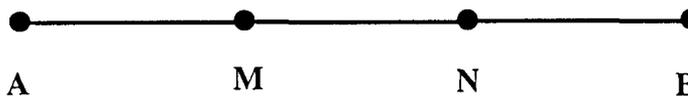


Figure 2-2 : Quadripôle en configuration Wenner

Ce dispositif est utilisé lors des profilages car on peut permuter les électrodes.

- Configuration de Lee

C'est un dispositif Wenner auquel on rajoute une électrode de potentiel P au centre du dispositif d'injection.

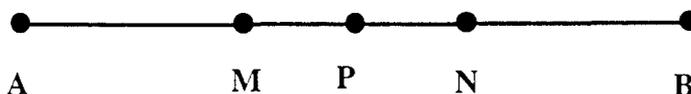


Figure 2-3 : Quadripôle en configuration de Lee

- Configuration dipôle-dipôle

Cette configuration fait intervenir deux groupes de deux électrodes : A et B, d'une part, et M et N, d'autre part.

- Arrangement en ligne

Les deux dipôles sont de même dimension et sont disposés sur la même ligne.



Figure 2-4 : Configuration dipôle-dipôle en ligne

- Arrangement en parallèle :

Les deux dipôles ont la même dimension **a**. Ils sont parallèles l'un à l'autre et espacés d'une distance **d**.

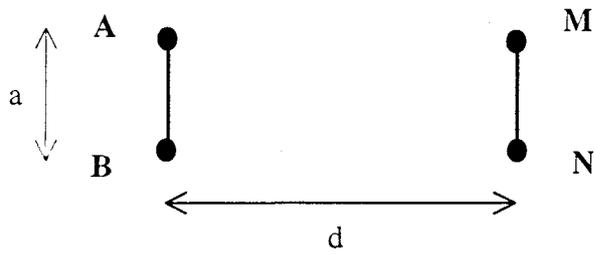


Figure 2-5 : Configuration dipôle-dipôle en parallèle

- Arrangement en carré :

C'est le même principe que précédemment avec la distance  $d$  égale à  $a$ , c'est à dire à l'écartement entre les électrodes des dipôles.

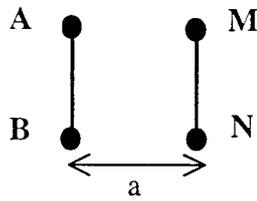


Figure 2-6 : Configuration dipôle-dipôle en carré

- Configuration pôle-dipôle

Une des électrodes d'injection de courant est placée à l'infini.



Figure 2-7 : Configuration pôle-dipôle

- Configuration pôle-pôle

Une électrode de courant et une électrode de potentiel sont placées à l'infini (infini "différent" pour chacune des électrodes).

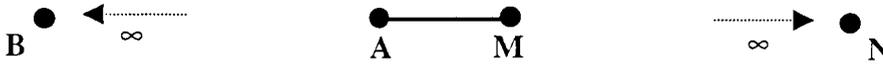


Figure 2-8 : Configuration pôle-pôle

Toutes ces configurations ont l'avantage de donner au facteur géométrique  $k$  du dispositif de reconnaissance, une forme mathématique simple.

### 2.4.2. Distribution du courant continu dans un milieu homogène et isotrope

L'allure des filets de courant qui relient deux électrodes d'émission, A positive et B négative, placées à la surface d'un espace semi-infini homogène est illustrée par la figure 2.9.

Pour une seule électrode A, les lignes de courant suivent, pour des raisons de symétrie, les rayons des sphères centrées en A. Ce sont les équipotentielles.

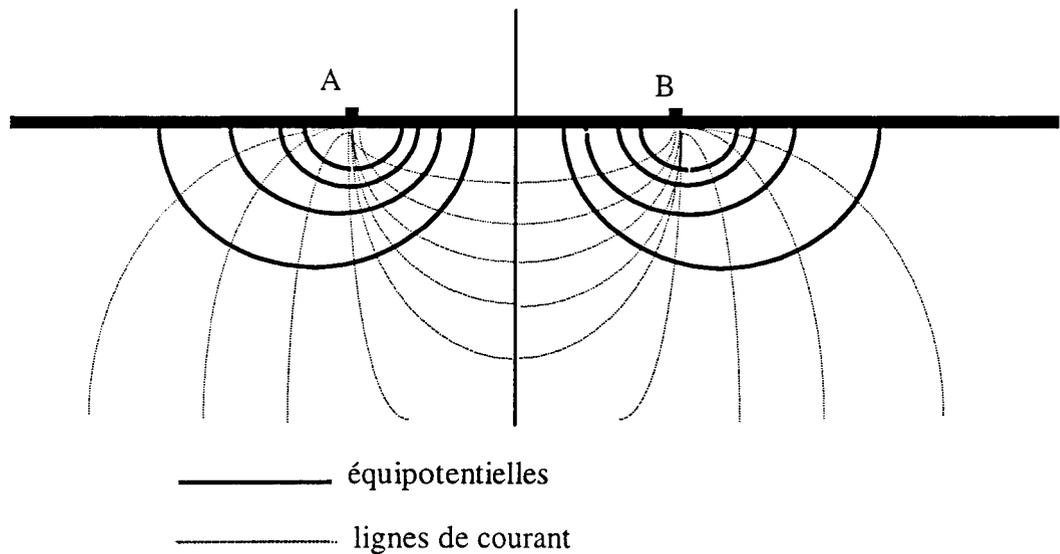


Figure 2-9: Equipotentielles et lignes de courant dans un sol homogène.

La densité de courant  $J$  en un point M situé à une distance  $r$  du point d'injection A est :

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{I}}{2\pi r^2} \quad (2.17)$$

En appliquant la loi d'Ohm ( $\mathbf{E} = \rho\mathbf{J}$ ), on obtient :

$$\mathbf{E} = \frac{\rho\mathbf{I}}{2\pi r^2} = -\text{grad}V \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{\rho\mathbf{I}}{2\pi r^2} \quad (2.19)$$

$$V = \frac{\rho\mathbf{I}}{2\pi r} + \text{cte} \quad (2.20)$$

De plus  $V_{(r \rightarrow \infty)} = 0 \Rightarrow \text{cte} = 0$

Le potentiel mesuré en M dû à l'électrode d'injection positive A est :

$$V = \frac{\rho\mathbf{I}}{2\pi d_{AM}} \quad (2.21)$$

$d_{AM}$  : distance séparant A de M

De l'équation (2.21), on détermine la différence de potentiel mesurée entre deux électrodes M et N placées à la surface d'un demi-espace, comme étant la différence entre le potentiel mesuré en M et celui mesuré en N. Chacun de ces potentiels est la somme du potentiel engendré par la source positive A et par la source négative B, respectivement en M et en N.

On obtient alors :

$$\rho = k (\Delta V/I) \quad (2.22)$$

$\rho$  est la résistivité du milieu homogène isotrope

$k$  est le facteur géométrique propre à chaque dispositif.

$$k = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{MA} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{NA} + \frac{1}{NB} \right)}$$

MA, MB, NA, NB sont respectivement les distances séparant M de A, M de B, N de A et N de B.

### 2.4.3. Notion de résistivité apparente

Les relations du paragraphe précédent ne sont valables que dans l'hypothèse d'un terrain homogène et isotrope, de résistivité  $\rho$ . L'équation de la résistivité (2.22) change quand il s'agit d'un milieu hétérogène pour lequel il convient de définir un autre paramètre : la résistivité apparente  $\rho_a$ . Les hétérogénéités du milieu traversé font que les surfaces équipotentielles ne sont plus des hémisphères : elles sont déformées. La résistivité apparente correspond à la résistivité d'un milieu homogène et isotrope fictif dans lequel, pour une même répartition des électrodes et pour une même intensité de courant, la différence de potentiel serait égale à la différence de potentiel dans le milieu non homogène.

On a donc :

$$\rho_a = k (\Delta V/I)$$

### 2.4.4. Perturbation du potentiel en courant continu

Selon la constitution du terrain, on observe des perturbations plus ou moins importantes des lignes de potentiel.

S'il existe une hétérogénéité conductrice, les lignes de courant ont tendance à se resserrer et donc à modifier leur parcours initial. Inversement, pour une hétérogénéité résistante, les lignes de courant ont tendance à s'écarter autour de l'anomalie. Une cavité est un corps résistant : les lignes de courant auront tendance à s'en écarter. En présence d'un terrain résistant, les lignes de courant ont tendance à plonger dans ce terrain, contrairement à un terrain conducteur où elles circulent parallèlement à sa surface.

### 2.4.5. Profondeur d'investigation

Le volume de terrain concerné par le passage du courant s'étend non seulement en profondeur entre les deux électrodes d'émission, mais aussi latéralement. En raison de la disposition particulière des électrodes dans un sondage électrique, on arrive à saisir, à la verticale d'un lieu donné, les propriétés électriques du terrain, de plus en plus profondément.

La densité horizontale **du** courant en un point P situé à une profondeur z dans le sol est :

$$J_x = -\rho^{-1} \frac{\partial V}{\partial x} \quad (2.23)$$

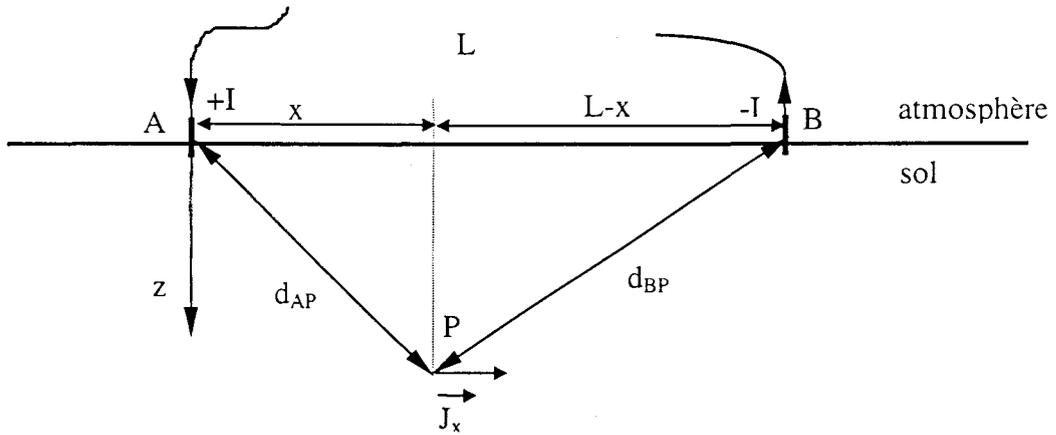


Figure 2- 10: Densité de courant en un point P du sol.

De (2.21) on déduit :

$$\mathbf{J}_x = \frac{I}{2\pi} \left( \frac{x}{d_{AP}^3} - \frac{(x-L)}{d_{BP}^3} \right) \quad (2.24)$$

Si  $x = \frac{1}{2}L$ , alors

$$\mathbf{J}_x = \frac{I}{2\pi} \left( \frac{L}{z^2 + \frac{L^2}{4}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.25)$$

On remarque que :

- quand la profondeur  $z$  augmente, la densité de courant diminue,
- quand la distance  $L$  entre les électrodes d'injection augmente, la densité de courant pour une profondeur  $z$  donnée peut varier et passe par un maximum.

Autrement dit, en augmentant la distance entre les électrodes d'émission A et B, la fraction du courant qui pénètre à une certaine profondeur augmente aussi.

La profondeur d'investigation dépend non seulement de la configuration du dispositif employé, c'est à dire de l'écartement entre les électrodes A, B, M et N, de la sensibilité et de la précision des appareils de mesure, mais aussi de la nature même du sous-sol.

## 2.5. DETERMINATION DES RESISTIVITES : PROBLEME INVERSE

La résolution du problème inverse consiste à déterminer les paramètres intervenant dans le problème à partir des mesures globales. En prospection électrique, l'inversion doit permettre d'estimer la répartition de la résistivité vraie dans le sol, la résistivité vraie des structures et leur forme réelle. Il est donc nécessaire pour cela de discrétiser le volume concerné par la prospection sous la forme d'une grille en 3-D, constitué d'un ensemble de cellules élémentaires parallélépipédiques.

Le problème électrique inverse est complexe, du fait de sa non-linéarité (SENA, 1990 ; PANISSOD, 1997) : les résistivités apparentes mesurées ne dépendent pas linéairement des résistivités vraies des cellules de calculs. Il est alors nécessaire d'effectuer une étude paramétrique afin de déterminer les paramètres qui ont un poids significatif dans la mesure.

Les algorithmes d'inversion, basés sur la méthode des moindres carrées, sont les plus utilisés. Le schéma d'inversion par les moindres carrés est un concept classique mais commode pour l'inversion des résistivités en 3-D.

Avec une quantité suffisante de données, la reconstitution de la répartition de la vraie résistivité est possible.

## 2.6. CONCLUSION

L'utilisation de la méthode électrique pour la reconnaissance du sous-sol présente un grand intérêt du fait de la grande variabilité de la résistivité des composants du sous-sol et de sa facilité de mise en œuvre.

Cette méthode nécessite l'emploi d'un dispositif composé de quatre électrodes. Chaque arrangement des électrodes permet d'obtenir un quadripôle particulier adapté aux objectifs de la reconnaissance.

L'arrangement que nous avons choisi est du type pôle-pôle : une électrode de courant et une électrode de potentiel sont rejetées à l'infini. Cette configuration permet de simplifier le calcul de la résistivité apparente et d'avoir une profondeur de reconnaissance, approximativement égale à la distance séparant les deux électrodes restantes.

La difficulté de reconnaissance des terrains par une méthode électrique réside dans l'interprétation des valeurs de la résistivité apparente. Cette interprétation requiert la résolution d'un problème inverse complexe. Dans ce cas, l'interprétation n'est pas simple, du fait de la non linéarité de la résistivité apparente en fonction des résistivités vraies, ce qui nécessite une étude paramétrique préalable afin de déterminer l'importance de la variation de chaque paramètre dans la mesure de la résistivité apparente.

**CHAPITRE III : ADAPTATION DU DISPOSITIF DE  
RECONNAISSANCE ELECTRIQUE SUR UN TUNNELIER**

### 3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'adaptation d'un dispositif de mesure sur le tunnelier du métro de Rennes, en présentant tout d'abord la géologie du tracé de ce métro. Sa grande diversité est un facteur important pour démontrer le bien fondé de notre système de prospection. Nous aborderons ensuite la réalisation technique de l'instrumentation sur le tunnelier. Elle reprend les modifications qui se sont avérées nécessaires.

Enfin nous interpréterons des mesures qui ont été faites en surface, à l'aide d'un dispositif pôle-pôle en présence d'une pièce métallique extraite d'un tunnelier. Cette expérience nous permet d'estimer l'influence du tunnelier sur la mesure de la résistivité apparente.

### 3.2. QUALIFICATION DES TERRAINS RENCONTRES

A l'issue des nombreuses campagnes de reconnaissances réalisées (sondages carottés et destructifs, essais pénétrométriques, SPT, essais pressiométriques, puits et galeries de reconnaissance, essais in situ et en laboratoire), il apparaît que les ouvrages souterrains du tronçon central de la ligne 1 sont situés dans l'assise Briovérienne schisto-gréseuse, avec néanmoins des passages à proximité et/ou au travers de poches d'altérites et de niveaux quaternaires reconnus. Les points suivants peuvent avoir une incidence sur le déroulement des travaux :

- Variation rapide de la lithologie du Briovérien induisant une grande hétérogénéité des terrains : passage rapide d'un faciès schisteux à un grès ou à une altérite, filonnets de quartz, infiltrations sableuses, présence de vides.
- Variation rapide, voire brutale, de l'état d'altération des différentes roches du substratum pouvant entraîner un comportement variable du massif.
- Caractéristiques médiocres et hétérogènes des terrains de couverture situés parfois relativement près du tunnel (Pont aux Foulons, par exemple). Il n'est pas exclu de rencontrer localement des approfondissements du contact : terrain superficiel quaternaire, substratum.
- Présence locale de minéraux gonflants au sein des altérites et dans une moindre mesure, au sein des schistes altérés.
- Importance de la tectonique du substratum (mouvements importants très récents) entraînant une fracturation plus ou moins marquée qui se superpose à la stratification et à la schistosité.

- L'hydrogéologie du site, où il faut distinguer celle du substratum et celle des formations superficielles. Dans le substratum, les perméabilités globales enregistrées sont généralement faibles, mais il n'est pas exclu, en revanche, de rencontrer localement des zones très fracturées ou ouvertes, constituant des drains pour la nappe du Briovérien. Dans les formations superficielles, les perméabilités sont généralement plus importantes, en particulier sous les cours d'eau. Par conséquent les travaux, à proximité ou dans ces formations superficielles, nécessiteront des précautions spécifiques.

### **3.3. CAHIER DES CHARGES**

Sur le plan technique, le dispositif installé sur la machine ne doit en aucun cas perturber le déroulement normal de la foration.

- Le dispositif ne doit pas impliquer la modification d'une seule fonction du tunnelier.
- Aucune pièce du dispositif ne doit être saillante afin d'éviter son arrachement qui entraînerait l'endommagement des outils ou du système d'évacuation (vis).
- Son encombrement doit être minimum.
- Le système doit être autonome et nécessiter une intervention minimale du personnel présent sur le chantier.

Sur le plan de la reconnaissance, le dispositif doit permettre de reconnaître une hétérogénéité d'un volume cubique, de côté égal au quart du diamètre du tunnelier, dans un volume de terrain sphérique, de rayon égal au diamètre du tunnelier, et dont le centre est le même que celui du disque de coupe (figure 3.1). Les résultats de la reconnaissance doivent être donnés dans un minimum de temps et être compréhensibles par n'importe quel intervenant.

### **3.4. INSTRUMENTATION DU TUNNELIER**

#### **3.4.1. Réalisation technique**

##### *Disposition des électrodes.*

Le dispositif de reconnaissance choisi est du type pôle-pôle. Le principe de ce dispositif est illustré par la figure 3-1. En utilisant un dispositif pôle-pôle, on estime que la reconnaissance du terrain se fait à une profondeur voisine de la distance séparant l'électrode de courant de l'électrode de potentiel (avec des fluctuations suivant la géologie du terrain). L'écartement important entre les électrodes d'injection impose au courant issu de A de pénétrer au maximum dans le terrain pour «rejoindre » l'électrode B, et ainsi fermer le circuit

électrique. Le potentiel mesuré en M (le potentiel en N étant nul) est alors fonction d'un courant, lui-même fonction de la nature d'un grand volume de terrain.

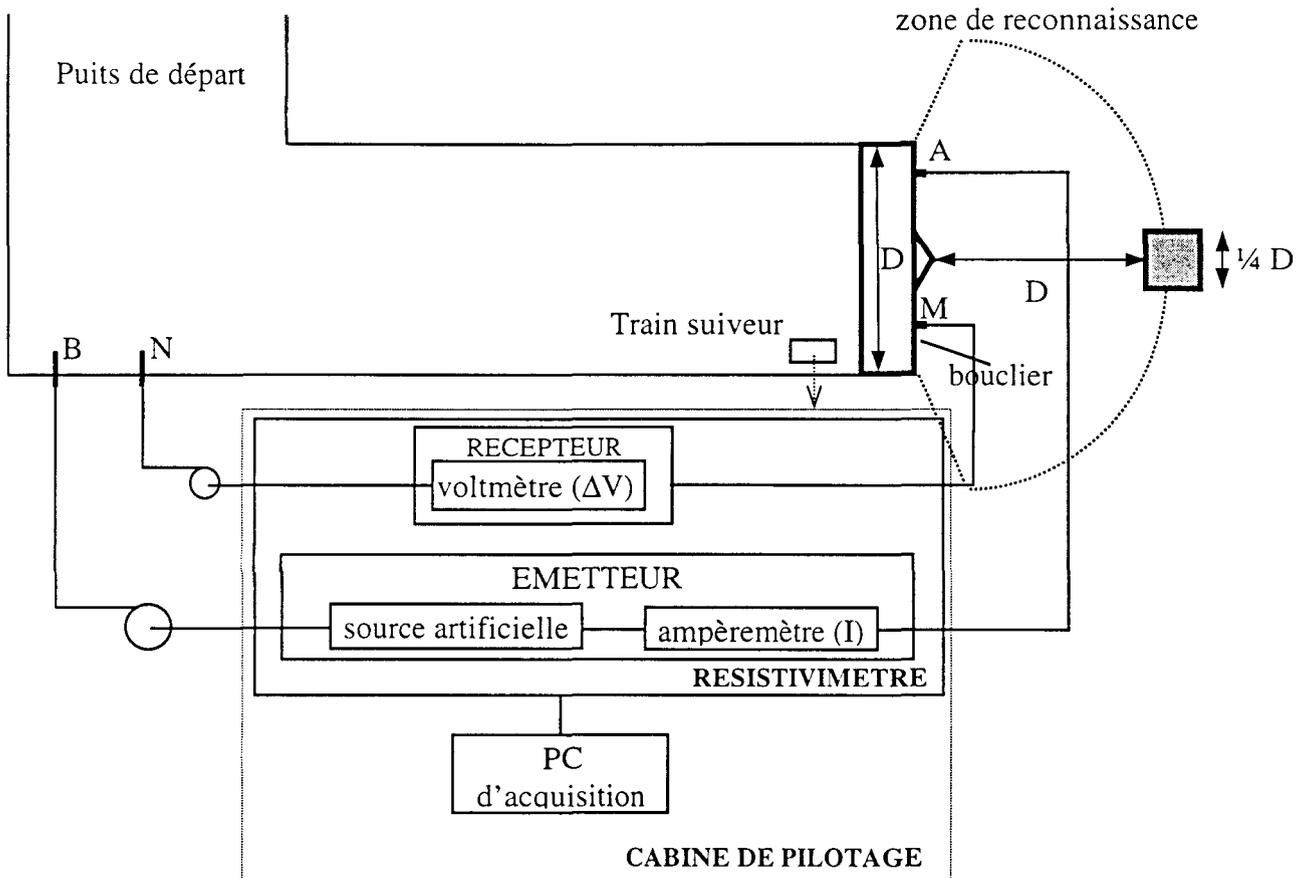


Figure 3- 1 : Principe du dispositif de reconnaissance.

Le circuit d'émission comporte la source artificielle et deux électrodes appelées A et B, en bon contact avec le sol et reliées à la source par des câbles électriques isolés. A l'aide d'un ampèremètre branché sur ce circuit, on mesure l'intensité  $I$  du courant qui passe quand on ferme le circuit. Le circuit de mesure comporte un voltmètre et deux électrodes de mesure M et N. Il permet de mesurer les différences de potentiel  $\Delta V$  dues au passage du courant dans le circuit d'émission.

Le premier contact avec le terrain se fait par les outils placés sur la face avant du disque de coupe. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, ce sont d'abord les molettes qui rentrent en action, puis les scarificateurs et pour finir les outils de coupe ou couteaux.

Pour avoir des résultats les plus représentatifs du terrain en avant du front de taille, il faut effectuer les mesures dans un terrain le plus sain possible, c'est à dire ayant ses caractéristiques d'origine et pas encore perturbé. Il aurait été préférable d'instrumenter les

molettes, mais leur isolement étant difficilement réalisable, nous avons opté pour les scarificateurs boulonnés. Six de ces outils sont instrumentés (figure 3.2). A l'aide d'une boîte de commutation, on peut définir et faire varier en permanence le rôle de chacune des électrodes. On peut injecter le courant par une électrode et mesurer la différence de potentiel à l'aide des cinq autres.

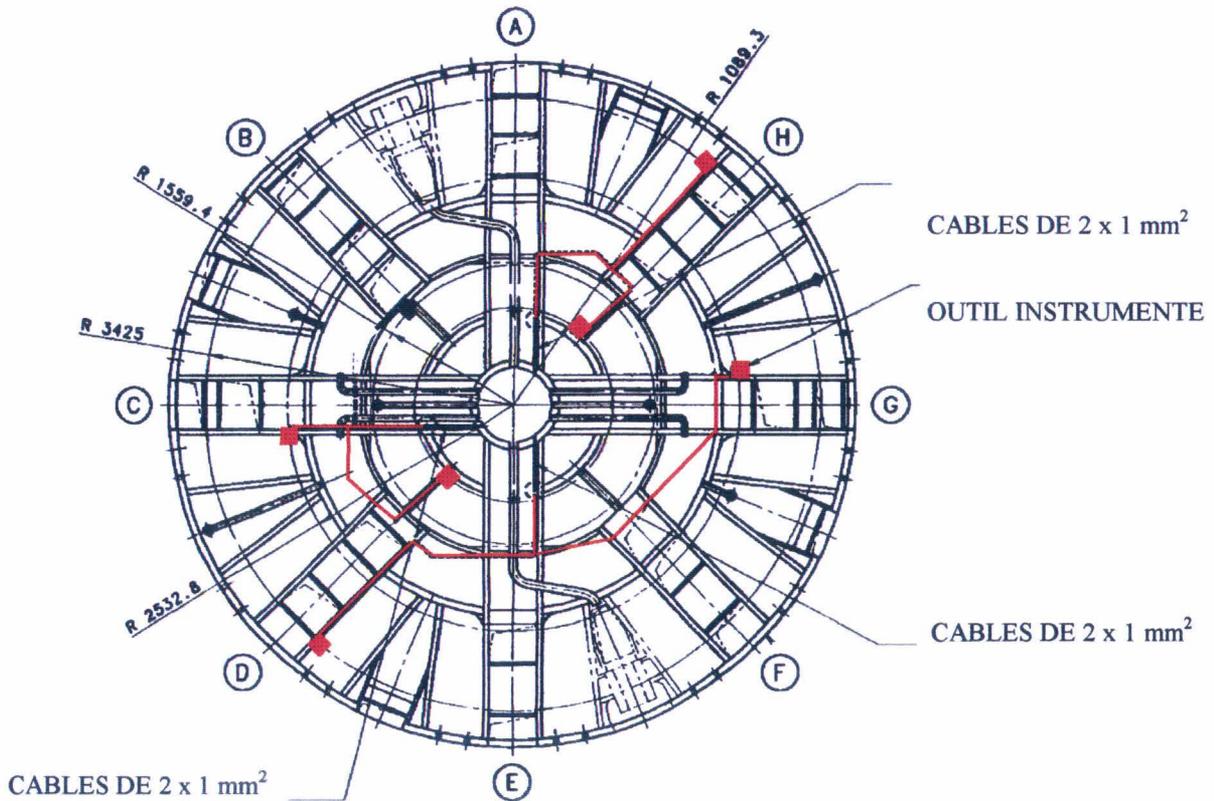
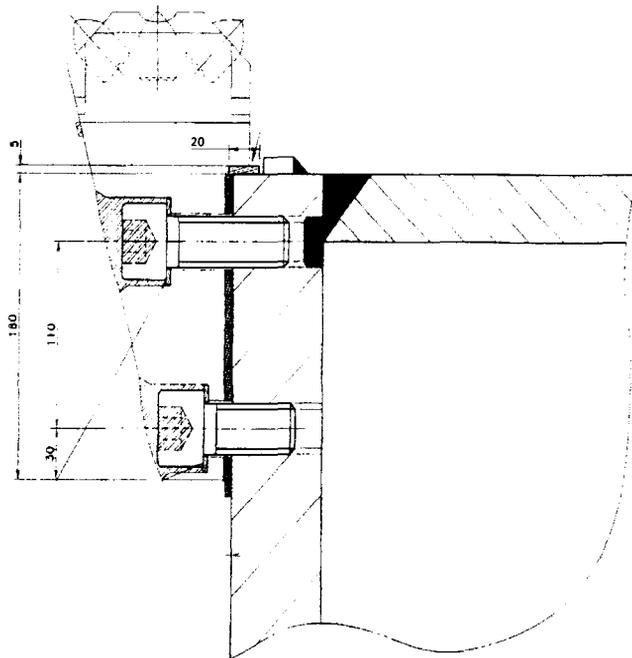


Figure 3- 2 : Positionnement sur le disque de coupe des outils pris comme électrode

Afin que le contact soit ponctuel entre l'électrode et le terrain, il est nécessaire d'isoler l'outil du tunnelier. Cette isolation est réalisée par un isolant de bonne qualité, en fonction de l'intensité et de la tension du courant à injecter.



**Figure 3-3 :** Outil scarificateur boulonné.

La connexion des outils aux câbles électriques se fait par deux plaques en inox pour éviter les problèmes de rouille qui occasionneraient une perte de conductivité nuisible pour le projet. L'outil de coupe est usiné sur une profondeur de 5 mm pour y placer la première plaque. Cette première plaque est comparable à un ressort. Elle est fixée par son extrémité supérieure, son extrémité inférieure restant libre pour lui permettre de s'allonger lors des contacts avec la seconde plaque. La seconde plaque est fixée sur le porte-outil, son extrémité se termine par une languette, sur laquelle vient se connecter le câble électrique souple, par l'intermédiaire d'une cosse type Faston. Le câble électrique est blindé pour minimiser les pertes d'information et les interférences.

#### Raccordement des électrodes au résistivimètre

A la sortie de l'outil, le câble cheminera dans des goulottes d'acier jusqu'au niveau du nez du disque de coupe. Ces goulottes sont soudées sur l'arrière des bras du disque de coupe, et sont ainsi mieux protégées des agressions du terrain, donc des risques d'arrachement paralysants pour le système de reconnaissance.

Ces goulottes débouchent au niveau du répartiteur. A ce niveau, les six câbles qui alimentent chacun un outil, sont connectés à un multi-conducteur à l'intérieur d'une boîte plexo. Les câbles sont maintenus fixes dans la boîte plexo, par des presse-étoupes. A la sortie

de cette boîte, un seul câble blindé pénètre à l'intérieur du joint tournant, par un orifice de 15 mm de diamètre spécialement foré pour son passage.

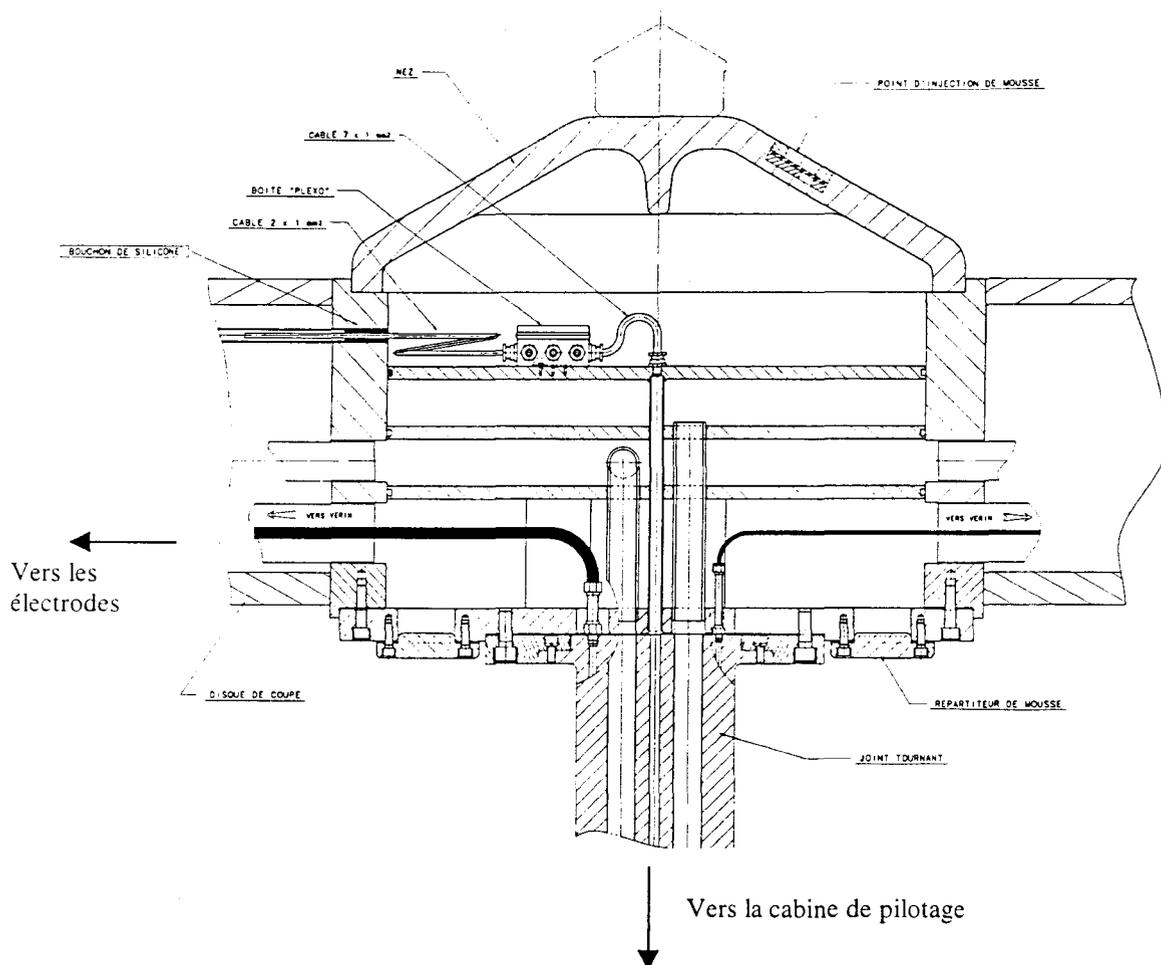


Figure 3- 4 : Installation au niveau du nez du disque de coupe.

A la sortie du joint tournant, la connexion entre la partie rotative du disque de coupe et la partie fixe du corps avant se fait par l'intermédiaire d'un collecteur électrique. La pose de ce collecteur a nécessité quelques modifications, notamment la mise en place de deux pièces permettant ainsi le passage du câble. L'une des pièces est fixe et placée sur le corps, l'autre est en rotation et fixée sur le joint tournant. Le raccord entre le joint tournant et le collecteur électrique se fait par l'intermédiaire d'un accouplement élastique «tschan.s». Cet accouplement permet de transmettre un mouvement de rotation d'un élément vers un autre élément n'ayant pas obligatoirement son centre de rotation aligné dans le même axe. Ils peuvent aussi être décalés et/ou former un angle l'un par rapport à l'autre.

L'accouplement permet de rectifier ces différences.

En partant du collecteur, le câble rejoint le résistivimètre placé dans la cabine de pilotage. Le résistivimètre est de modèle standard. Il est alimenté par une batterie externe. On dispose aussi d'un système de commutation externe qui permet la sélection d'une électrode d'injection parmi les quatre électrodes, et d'une électrode de mesure parmi huit électrodes (électrode d'injection exceptée). Un module logiciel permet l'acquisition de la tension représentative de la résistance mesurée et du calibre utilisé. Il transmet au programme d'interprétation la valeur de la résistance (à pondérer par le coefficient du quadripôle particulier afin d'obtenir la résistivité apparente).

Ce résistivimètre est branché aux différents appareils de traitement informatique et de transmission de l'information.

Deux autres câbles partent de ce résistivimètre, en direction du puits de départ. Ils sont connectés à deux électrodes qui sont les électrodes B et N placées à l'infini. Les points de position de B et N ne doivent pas être les mêmes et il est préférable de les espacer d'une centaine de mètres afin de pouvoir appliquer les simplifications de calcul dues à l'utilisation d'un pôle-pôle. Un enrouleur de câbles, placé dans le train suiveur, permet de relier le résistivimètre aux deux électrodes situées dans le puits de départ. Afin de protéger les câbles, ils seront fixés en hauteur en même temps que ceux de la liaison téléphonique.

### 3.4.2. Caractéristiques du courant injecté

Pour éviter la polarisation des électrodes et s'affranchir de la polarisation spontanée (P.S.), il est exclu d'injecter du courant continu. On emploie donc un courant alternatif sinusoïdal, de fréquence suffisamment basse pour que l'approximation du courant continu s'applique.

On peut aussi envisager d'utiliser un courant continu alternativement positif et négatif en créneaux. La demi-somme des mesures obtenues à la fin de chaque alternance représentera alors la valeur de la polarisation spontanée (P.S.), et la demi-différence représentera la différence de potentiel recherchée (ddp).

Pour ce projet, il faut injecter un courant de faible intensité (10 mA) et de tension 24V. La tension est fixée par les normes de sécurité et ne peut en aucun cas dépasser 24V.

### 3.4.3. Profondeur de reconnaissance

La profondeur de reconnaissance est fonction de l'écartement des électrodes ; elle est de l'ordre de grandeur de la plus petite distance entre l'une des électrodes d'injection et l'une des électrodes de mesure.

Pour disposer de plusieurs écartements et positions d'électrodes, on multiplie leur nombre. On a choisi d'instrumenter six outils du disque comme électrode. Chacune des électrodes peut être utilisée soit comme électrode de courant, soit comme électrode de potentiel, ce qui permet d'effectuer, pour une position fixe du disque de coupe, au moins 30 mesures différentes.

Les mesures sont rapides et s'effectuent durant la foration sans provoquer ni ralentissement ni arrêt.

Dans un premier temps, on divise les six outils instrumentés en trois paires. L'électrode de courant et l'électrode de potentiel formant une paire seront diamétralement opposées sur le disque de coupe. Cette disposition permet, tous les demi-tours, de retrouver des mesures presque identiques en terrain homogène. Par cette disposition on obtient trois rayons de reconnaissance donc trois profondeurs d'investigation. Dans le cas du métro de Rennes, les trois profondeurs sont de 7 m, 6 m et 2.50 m par rapport au centre de la face externe du bouclier.

A partir d'un tel dispositif, on envisage de repérer une anomalie d'une dimension égale au quart du diamètre, à une profondeur égale au diamètre du tunnelier et dans n'importe quel azimut (figure 3-1).

### **3.5. PROBLEMES LIES A LA PRESENCE DU TUNNELIER**

La mise en place du dispositif sur le tunnelier peut être effectuée par le biais de quelques modifications qui ne perturbent pas le bon fonctionnement de la machine d'excavation, mais il est possible que la présence du tunnelier influence les mesures.

En effet, le tunnelier peut être considéré comme un corps conducteur présent dans le terrain. Les électrodes se trouvant à proximité de ce corps, il se peut que le courant qu'elles émettent soit court-circuité par la masse métallique. Afin d'établir l'influence de la présence du tunnelier sur les mesures nous avons effectué un travail expérimental et numérique.

#### **3.5.1. Etude expérimentale**

Pour connaître l'influence du tunnelier sur les mesures de résistivité, nous avons effectué un test dans un terrain sur lequel nous avons disposé un morceau de métal extrait de la jupe d'un tunnelier. Pour se rapprocher des conditions réelles de foration, la pièce a été entourée d'une quantité maximale de terrain. Le sol a été creusé sur une profondeur de 20 cm et sur une surface égale à celle de la pièce (figure 3-5).

La pièce métallique est représentée par la figure 3-5. Sa dimension est d'environ 1,60 m par 1,20 m. Elle est légèrement bombée dans le sens de la largeur et seule la surface hachurée est en contact avec le sol. Par la suite, on appellera génératrice de contact, la zone en contact avec le sol.

Deux orifices apparaissent dans le milieu de la pièce et sont espacés d'environ 0,83 m. Ils permettent de placer les électrodes dans le terrain tout en les maintenant isolées de la pièce métallique.

La pièce est totalement nettoyée. Aucune trace de rouille n'apparaît, ce qui lui permet de conserver toutes ses qualités de conducteur.

Le dispositif de mesure est un pôle-pôle. L'électrode A est placée dans l'un des deux orifices de la pièce, l'électrode B est plantée dans le terrain à une vingtaine de mètres de A.

L'électrode de potentiel M est placée dans le second orifice et l'électrode N est plantée dans le terrain à une vingtaine de mètres de M, à l'opposé de B.

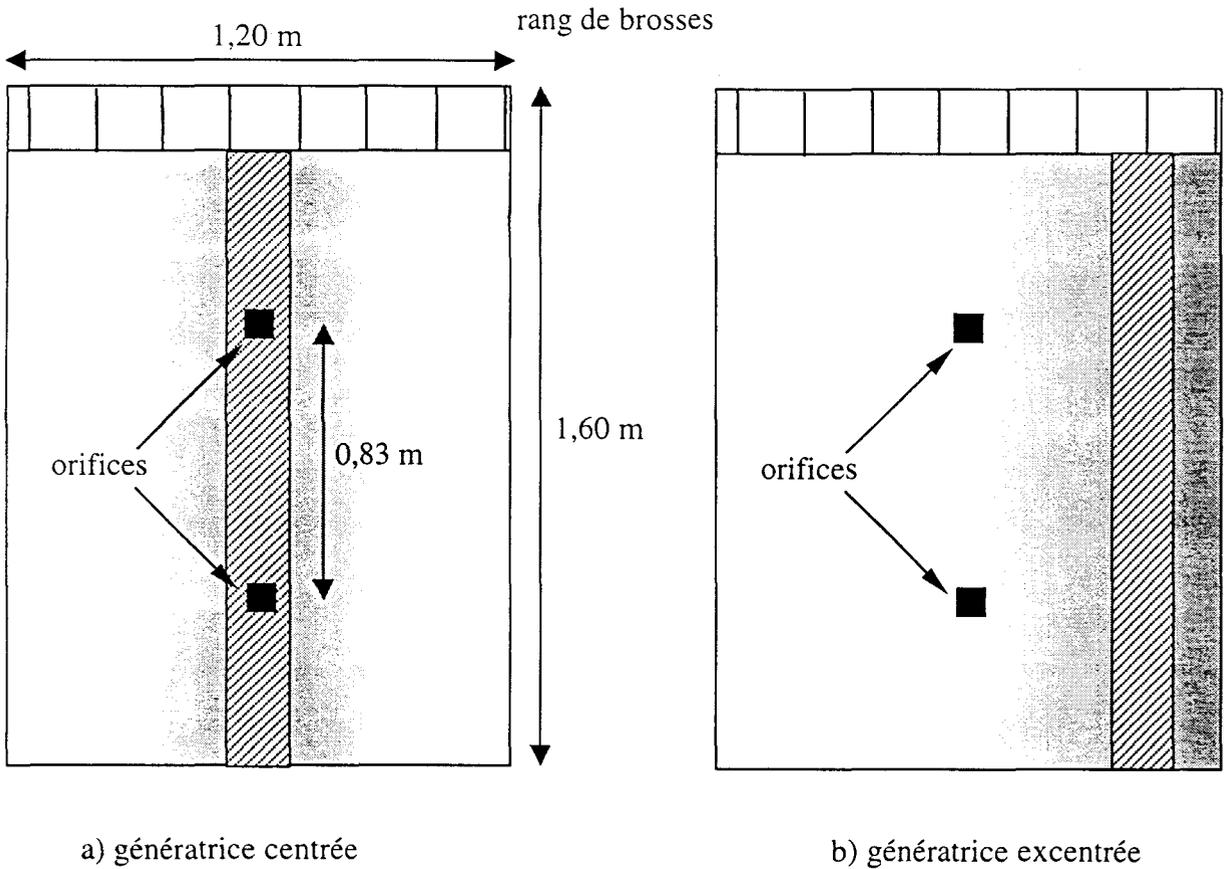


Figure 3- 5 : Pièce métallique de tunnelier.

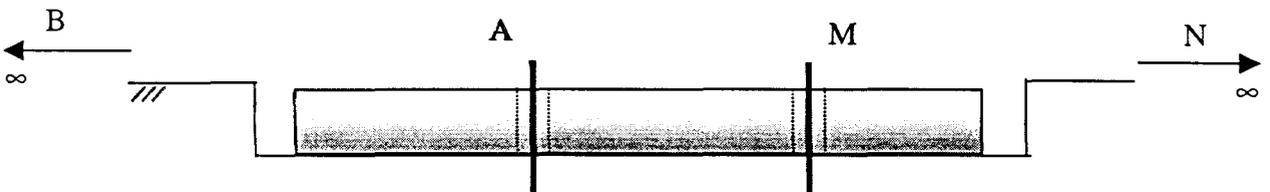


Figure 3- 6 : Pièce métallique de tunnelier. Dispositif de mesure.

Le terrain est humidifié jusqu'à ce que la valeur de la résistivité apparente se stabilise. On note la résistivité du terrain nu et humide.

Nous avons effectué différents types de mesure .

- La pièce métallique est absente. A l'aide du dispositif pôle-pôle on mesure la résistivité de terrain nu et humide.
- On place la pièce métallique dans le sol, la génératrice de contact est sur l'axe des deux électrodes A et M (figure 3-5a et 3-6). On mesure la résistivité.
- En faisant pression sur une des extrémités de la pièce métallique, on déplace et on modifie la génératrice de contact (figure 3-5b). On mesure la résistivité.

Les résultats des mesures sont donnés dans le tableau 3-1.

Ecartement des électrodes 0,83 m	Terrain nu et humide (50l d'eau)	Pièce métallique Génératrice de contact centrée	Pièce métallique Génératrice de contact décentrée
$\Delta V/I$	2,78 $\Omega$	6,01 $\Omega$	4,80 $\Omega$
$\rho_a$	14,49 $\Omega m$	31,32 $\Omega m$	25,02 $\Omega m$

Tableau 3-1 : Résultats des mesures de résistivité effectuées pour différentes configurations.

Le terrain encaissant préalablement humidifié est un terrain argileux de résistivité proche de 20  $\Omega m$ .

En présence de la pièce métallique, on constate que le courant pénètre dans le sol et qu'il est possible de mesurer une différence de potentiel dont les caractéristiques sont les suivantes :

- lorsque la pièce métallique est en contact avec le sol, la résistivité apparente augmente par rapport à celle du terrain nu.

- il apparaît que suivant la position de la génératrice de contact par rapport à l'axe des électrodes de mesure, la résistivité mesurée varie. En l'absence de contact, on retrouve les valeurs des mesures effectuées en terrain nu. La pièce métallique n'a aucun effet.

Après stabilisation de l'eau dans le terrain, on mesure un  $\Delta V/I = 2,78 \Omega$ , pour un écartement de 0,83 mètre entre les électrodes de courant et d'injection. Soit en dispositif pôle-pôle une résistivité apparente de 14,5  $\Omega m$ , ce qui suggère un terrain nettement argileux. Avec la pièce de tunnelier, lorsque la "génératrice" en contact avec le terrain est éloignée des électrodes, on tend vers cette valeur, mais lorsque la génératrice est proche des électrodes, la lecture augmente pour atteindre un maximum de  $\Delta V/I = 6,0 \Omega$ , soit  $\rho_a = 31,3 \Omega m$ .

Nous avons vérifié que la surface du tunnelier était bien conductrice ( aucune trace de rouille). Le poids de la pièce garanti par ailleurs un bon contact.

Il est à noter que ce fait expérimental est contraire à toute interprétation intuitive, pour laquelle l'ajout d'un conducteur doit logiquement faire baisser la résistivité apparente.

### 3.5.2. Etude numérique

Nous avons confronté ces expériences à un modèle théorique, c'est à dire à la conclusion logique que l'on peut tirer de l'ensemble des expériences déjà réalisées en électricité ( et dont le bilan se trouve rassemblé dans les équations utilisées).

Nous avons retenu le modèle suivant : une plaque métallique à deux trous, placée dans le sol immédiatement à sa surface de résistivité  $\rho_1 = 0,0001 \Omega m$ , le sol encaissant étant de résistivité  $\rho_0 = 20 \Omega m$ .

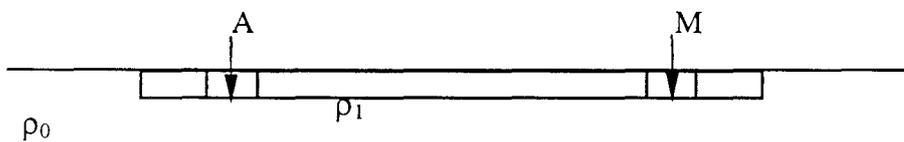


Figure 3- 7 :Vue de coupe.

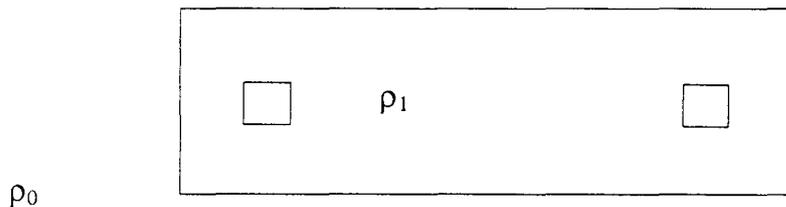


Figure 3- 8 :Vue du dessus.

Nous avons divisé la pièce en 5 corps.

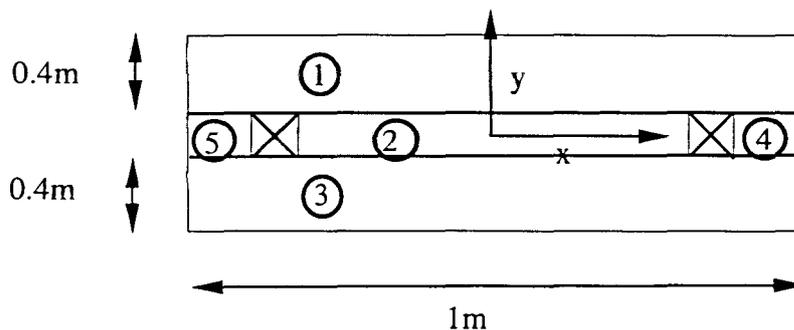


Figure 3- 9 : Modèle informatique de la pièce.

Nous avons effectué plusieurs simulations à l'aide du programme EL3DQUCF, mis au point dans le laboratoire du CNRS de Garchy (Nièvre).

Nous avons fait varier les dimensions de la pièce métallique et calculé le potentiel et la résistivité apparente pour quatre dimensions différentes. Nous avons introduit dans le modèle informatique les différentes positions et résistivités des corps, ainsi que la position des électrodes du dispositif de mesures. Les dimensions sont données en mètres, la résistivité de tous les corps est de  $0,0001 \Omega\text{m}$ .

	1 <sup>er</sup> cas	2 <sup>ème</sup> cas	3 <sup>ème</sup> cas	4 <sup>ème</sup> cas
dim. du corps 1	1 x 0,4	1 x 0,1	1 x 0,05	0,6 x 0,1
dim. du corps 2	0,6 x 0,1	0,6 x 0,1	0,8 x 0,05	
dim. du corps 3	1 x 0,4	1 x 0,1	1 x 0,05	
dim. du corps 4	0,1 x 0,1	0,1 x 0,1	0,05 x 0,05	
dim. du corps 5	0,1 x 0,1	0,1 x 0,1	0,05 x 0,05	
position $X_A$ de l'électrode A	0,35	0,35	0,475	0,325
position $X_M$ de l'électrode M	-0,35	-0,35	-0,475	-0,325
$\Delta V/I$ ( $\Omega$ )	<b>6,507</b>	<b>7,652</b>	<b>6,629</b>	<b>10,137</b>
$\rho_a$ ( $\Omega\text{m}$ )	<b>28,623</b>	<b>33,658</b>	<b>37,487</b>	<b>41,4</b>

- Premier cas:

La dimension de la pièce modélisée est de 1 m x 0,9 m.

La résistivité lue au-dessus du terrain sur lequel est posé le conducteur augmente par rapport à la résistivité du terrain nu, ce qui concorde avec ce qui a été observé lors de l'expérience.

- Second cas.

On diminue la largeur totale du matériau conducteur, en réduisant la largeur des corps 1 et 3. La dimension de la pièce est alors de 1 m x 0,30 m.

La résistivité continue d'augmenter.

### - Troisième cas

On continue à diminuer la taille de la pièce dont les dimensions sont ici de 1m x 0.15 m. C'est approximativement la surface de contact réelle que nous avons observée lors de l'expérimentation.

On note que les résultats des modélisations concordent avec les mesures expérimentales.

Ceci confirme donc qu'un corps conducteur allongé, placé entre deux électrodes, augmente considérablement  $\rho_a$ . Pour un corps simple de 0,60 m sur 0,10 m, avec les électrodes écartées de 0,65 m on trouve  $\rho_a = 41,4 \Omega\text{m}$ , au-dessus d'un sol de résistivité  $\rho_0 = 20 \Omega\text{m}$ .

L'accord qualitatif et quantitatif est satisfaisant.

### 3.5.3. Conséquence sur le tunnelier

A partir de ce test, nous avons pu montrer que la présence d'une pièce métallique n'empêche pas de reconnaître un terrain. C'est à dire que le courant pénètre dans le sol et engendre, en retour, une différence de potentiel mesurable. En revanche, selon le contact qui existe entre la pièce métallique et le sol, les réponses diffèrent. Cette situation est plus que probable en configuration réelle. Les outils, normalement en bon contact avec le terrain dans une géologie homogène, peuvent se décoller du front dans des endroits où la géologie est plus hétérogène (présence de cavité par exemple), d'où la nécessité de multiplier les mesures pour pouvoir disposer d'un maximum d'informations après avoir éliminé les mesures présentant des incohérences.

## 3.6. CONCLUSION

La géologie de Rennes est très complexe. Le risque d'accidents géologiques ponctuels et brutaux est très élevé. Ces caractéristiques font que la présence sur la machine de foration d'un système de reconnaissance à l'avancement est tout à fait conseillée.

L'installation de ce système ne nécessite pas de grandes modifications sur la machine. Aucune de ses fonctions n'est modifiée. Il est discret et ne peut que faciliter le bon déroulement de ce type de chantier. Le dispositif de reconnaissance est du type pôle-pôle. Il permet d'obtenir une profondeur de reconnaissance maximum.

Un test de mesure de résistivité a permis de montrer que la présence d'une pièce métallique à proximité des électrodes formant le pôle-pôle n'empêchait pas la mesure de la résistivité. Toutefois, l'influence du tunnelier n'est pas négligeable. On note une augmentation contraire à l'intuition de la résistivité apparente du terrain lorsque l'on est en présence du tunnelier.

Un tel dispositif reste cependant tout à fait concevable pour la reconnaissance des sols à l'avant d'un tunnelier.

**CHAPITRE IV : MODELISATION NUMERIQUE D'UNE  
RECONNAISSANCE ELECTRIQUE A PARTIR D'UN  
TUNNELIER**

## **4.1. INTRODUCTION**

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit l'instrumentation du tunnelier. Dans ce chapitre nous proposons d'étudier, à l'aide d'une modélisation numérique, le fonctionnement de cette instrumentation et sa capacité à détecter la présence des corps hétérogènes dans le sol.

Après une description du programme de calcul EL3DTUN, nous allons présenter une étude paramétrique portant sur l'influence des caractéristique du corps hétérogène sur la résistivité apparente.

Ce chapitre s'achèvera par une application à la résolution des problèmes de mesures par le dispositif décrit dans la chapitre précédent.

## **4.2. LE PROGRAMME DE CALCUL**

Les simulations numériques ont été effectuées à l'aide du programme EL3DQUG qui a été élaboré par A. Tabbagh au Centre de Recherches Géophysiques (CNRS) de Garchy (Nièvre). Il permet de modéliser un sondage électrique en profondeur et dans un terrain tabulaire. Il est fondé sur la méthode des moments (DABAS et al., 1994).

La méthode des moments constitue une bonne solution pour le problème direct en 3D. Elle consiste à remplacer les corps à l'origine des anomalies par une distribution équivalente de sources de courant. Elle présente l'intérêt de limiter le maillage au volume des corps placés dans le terrain. Cette particularité permet de diminuer les temps de calculs par rapport à un calcul par éléments finis (voir annexe). Les corps sont de forme quelconque, ils sont construits à partir de parallélépipèdes.

## **4.3. UTILISATION DU PROGRAMME**

La version initiale de EL3DQUG a été modifié pour l'adapter à la reconnaissance à partir d'un tunnelier et permettre de simuler des mesures selon un mouvement de rotation. Cette nouvelle version mise au point par A. Tabbagh est appelée EL3DTUN.

### **4.3.1. Modélisation des éléments**

Avant de commencer les calculs, nous avons défini les différents éléments du modèle dans lequel on désire calculer la résistivité apparente. Nous avons pris tout d'abord en compte les caractéristiques du terrain tabulaire et puis celles des hétérogénéités.

### Modélisation du terrain

Le nombre de couches du terrain est égal à deux (figure 4-1). L'épaisseur de la première couche est définie, l'épaisseur de la seconde couche étant supposée infinie. Nous avons déterminé la résistivité de chacune des couches. La valeur de la résistivité apparente pour ce terrain tabulaire, au niveau du dispositif de reconnaissance, est notée par la valeur  $\rho_{a0}$  dans le fichier de résultats.

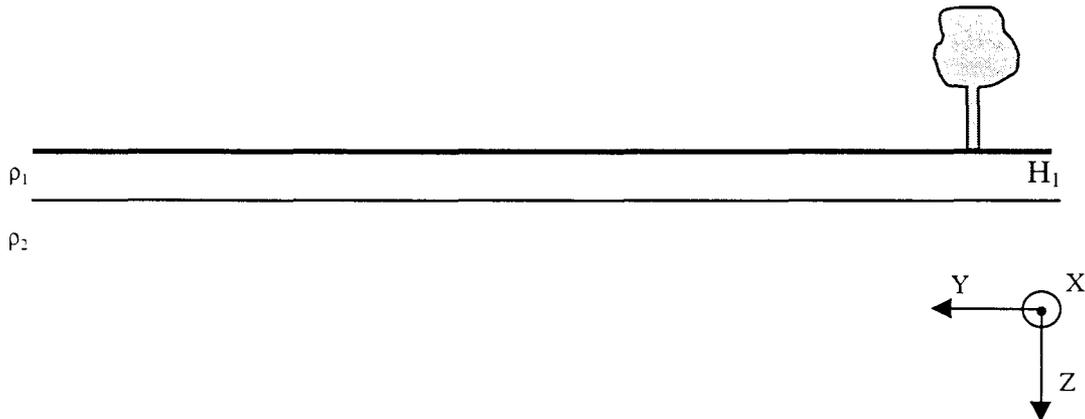


Figure 4-1 : Modélisation du terrain.

### Modélisation du tunnelier et de l'hétérogénéité

Dans ce terrain un nombre fini de corps sont introduits, dont la position du centre, les dimensions dans les trois directions et la résistivité sont précisées.

Le tunnelier est modélisé comme un ensemble de corps conducteurs. Dans ce programme les corps sont des parallélépipèdes et le tunnelier étant circulaire, nous avons utilisé plusieurs corps pour le modéliser (figure 4-2) de façon à se rapprocher de sa géométrie réelle. Le train suiveur est représenté par un seul corps dont la surface de contact avec le terrain est égale à la surface réelle.

Le bouclier est divisé en 9 corps.

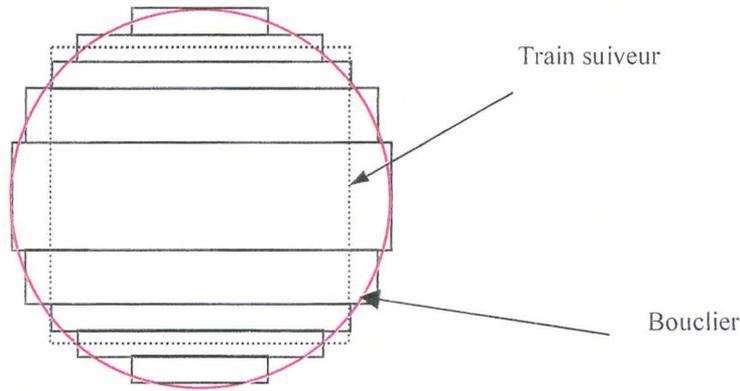


Figure 4-2 : Représentation du disque de coupe dans le programme de modélisation

Lors de la modélisation informatique du test préliminaire, la valeur de la résistivité de la pièce du tunnelier a été évaluée à  $0,0001 \Omega\text{m}$ .

La mise au point du système de reconnaissance par cylindre électrique a permis de connaître l'influence des zones métalliques du tunnelier (LANTIER, 1995). La résistivité du tunnelier métallique a été estimée à  $0,1 \Omega\text{m}$  et l'espace vide laissé par l'excavation du tunnel à  $100000 \Omega\text{m}$ . Les lignes de courant sont canalisées par la masse métallique. Avec présence ou absence de tunnelier, l'amplitude de l'anomalie est parfaitement conservée au droit de la cellule de mesure, tout en subissant une légère chute globale de résistivité. Une autre instrumentation (SCHWARZ, 1972) a montré le résultat suivant : la variation maximale des mesures électriques, résultant de la présence de la machine, est d'environ 15%, ce qui n'est pas considéré comme significatif.

Nous prendrons en compte, pour notre modélisation, ces dernières valeurs, qui sont vraisemblablement les plus représentatives (figure 4-3).

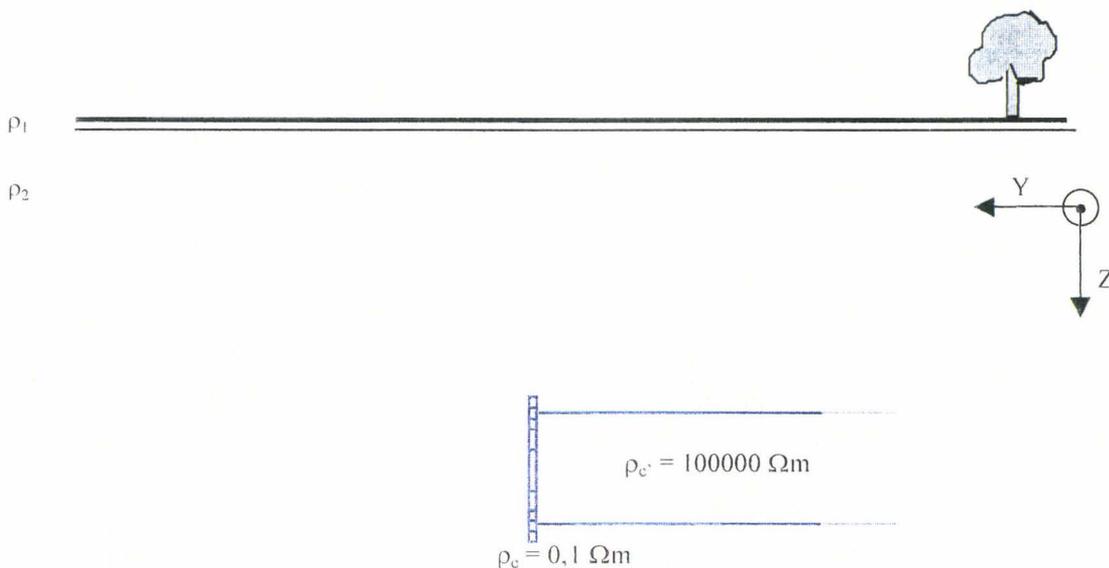


Figure 4-3 : Représentation de la modélisation du tunnelier dans le terrain.

Chaque corps est divisé en un nombre de maille qui varie selon l'influence qu'il peut avoir sur la mesure, donc selon sa position par rapport aux électrodes et selon son volume. Les corps composant le disque de coupe sont divisés selon une maille de  $0,55 \times 0,40 \times 0,55$  (figure 4-4). Le corps arrière est formé d'un seul corps avec une maille unique. Cette représentation sert à privilégier le disque de coupe par rapport au corps arrière (train suiveur) qui influence moins les mesures.

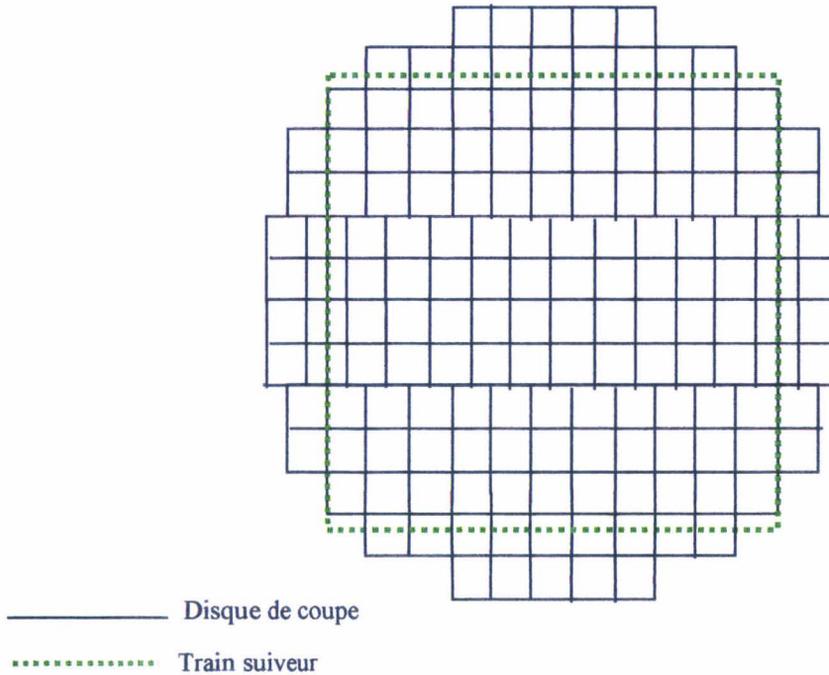


Figure 4-4 : Représentation du maillage du tunnelier

Les hétérogénéités que l'on cherchera à reconnaître seront représentées dans la majorité des cas par un seul corps parallélépipédique.

### 4.3.2. Calcul des résistivités

La modification apportée au programme initial permet de rentrer une seule fois les coordonnées des outils instrumentés tels qu'ils sont positionnés sur les plans du disque de coupe. L'opérateur choisit le nombre de mesures qu'il veut effectuer par rotation. EL3DTUN calcule pour chaque fraction de tour, les nouvelles coordonnées des électrodes d'injection et de mesure.

Le principe du dispositif d'investigation électrique est celui d'un dipôle-dipôle (A B M N) pour lequel on précise les coordonnées en X, Y et Z de chacune des électrodes le composant. Comme nous travaillons avec un dispositif pôle-pôle, les électrodes B et N sont rejetées à l'infini. Seule la position de départ des électrodes A et M est donnée.

Dans un premier temps, nous avons divisé les six outils instrumentés en trois paires. L'électrode de courant et l'électrode de potentiel formant une paire, elles sont diamétralement opposées sur le disque de coupe. Cette disposition permet de retrouver des mesures presque identiques en terrain homogène tous les demi-tours. On obtient aussi trois écartements différents donc trois profondeurs de reconnaissance.

### 4.3.3. Fichier de résultats

D'après le principe de la méthode des moments, le champ électrique  $E$  est décomposé en deux parties. A partir de ce principe même, on peut aussi écrire que le potentiel en un point de mesure se décompose en deux parties :

- le potentiel mesuré en l'absence de corps,
- le potentiel résultant de la présence des corps à l'origine des anomalies.

Dans le fichier de résultats, les deux premières valeurs calculées par EL3DTUN sont :

- **Vcorps** : potentiel créé par la présence des corps à l'origine des anomalies,
- **Vtotal** : somme de Vcorps et du potentiel mesuré dans le terrain tabulaire en l'absence de corps.

Dans la méthode des résistivités, la propriété physique du matériau estimée à partir de la mesure du potentiel électrique est une résistivité dite apparente. C'est la résistivité d'un milieu homogène et isotrope fictif dans lequel, pour une même répartition des électrodes et pour une même intensité de courant, la différence de potentiel serait égale à la différence de potentiel dans le milieu non homogène.

Dans le fichier de résultats, nous obtenons les valeurs suivantes :

- $\rho_a$  : résistivité apparente mesurée dans le terrain contenant les corps. Elle est calculée à partir de Vtotal.
- $\rho_{ao}$  : résistivité mesurée dans le terrain à deux couches en l'absence de corps.

## 4.4. ETUDE DE L'EVOLUTION D'UNE ANOMALIE CREEE PAR DIFFERENTS PARAMETRES SUR UN TOUR DU BOUCLIER

En pratique, les différences de potentiel sont mesurées pendant la foration, ce qui signifie que le dispositif est en rotation et que l'on peut effectuer des séries de mesures dans n'importe quelle direction.

Pour disposer d'un maximum d'informations, on effectuera 36 calculs par rotation, soit un tous les 10 degrés.

Ces calculs permettent d'évaluer l'influence des paramètres suivants :

- Résistivité de la couche superficielle
- Rapport de résistivité entre le terrain et le tunnelier
- Rapport de résistivité entre le terrain et l'hétérogénéité
- Position de l'hétérogénéité
- Etendue de l'hétérogénéité

Pour chaque cas on recherche l'intervalle dans lequel le paramètre étudié provoque une variation intéressante des résultats de calcul.

#### 4.4.1. Assignation de la mesure

La mesure des résistivités se fait par deux électrodes. Une électrode d'injection A et une électrode de mesure M. Ces deux électrodes forment le dispositif de prospection. Dans les calculs classiques (profils ou sondages), la résistivité est généralement donnée comme étant la résistivité mesurée au point P. Le point P est à la verticale du milieu de AM et à une profondeur égale à l'écartement entre A et M (figure 4- 5).

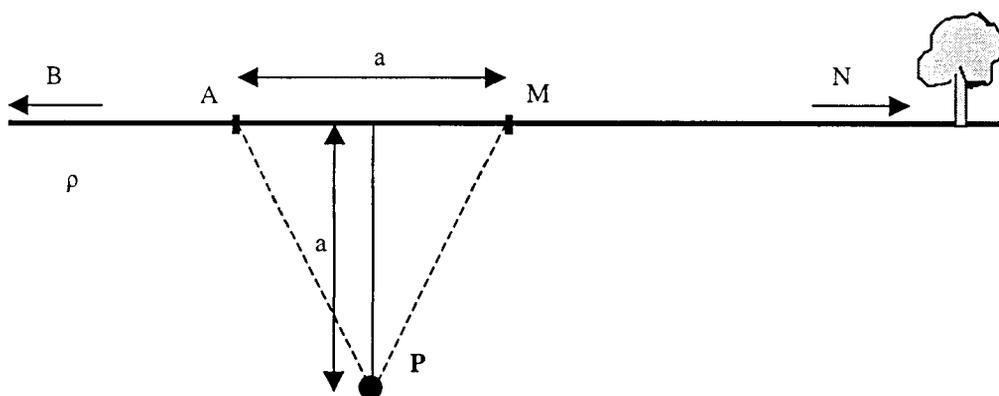


Figure 4- 5 : Représentation du point d'assignation de la valeur de la résistivité.

Quelque soit la position de notre dispositif de reconnaissance (AM), son centre reste le même. Il n'est pas possible de représenter la résistivité apparente selon le principe de la figure 4-5, car toutes les valeurs des calculs seraient sur le même point.

Nous avons donc cherché à quel point, en X et Z, peut correspondre le calcul d'une résistivité  $\rho_a$  pour une position (AM) du dispositif de reconnaissance. La profondeur en Y sera étudiée par la suite.

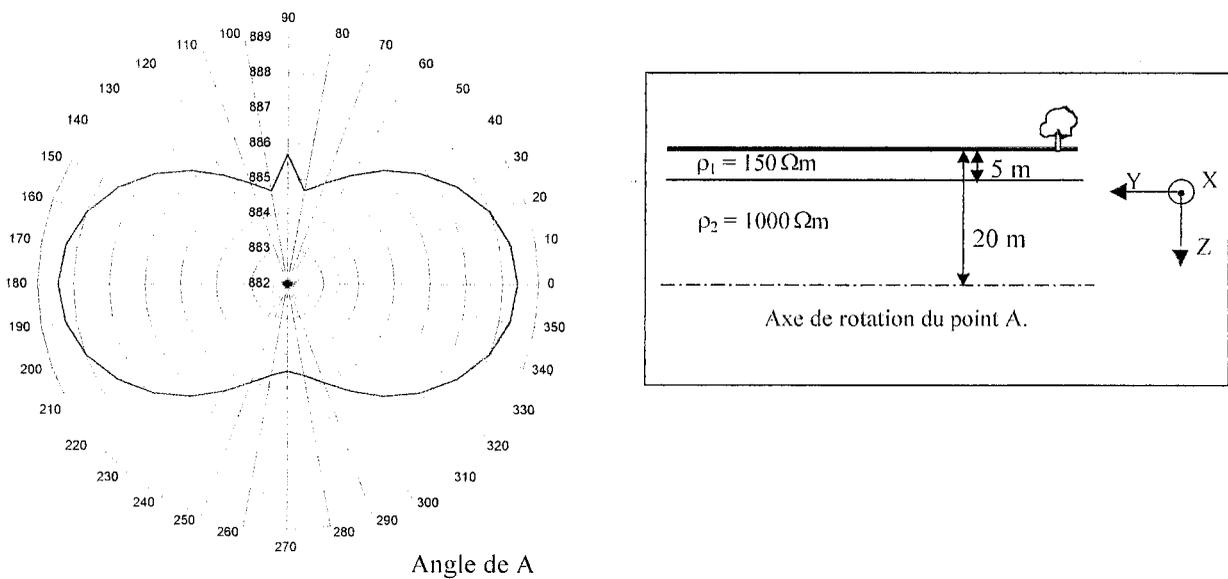
Nous avons pris un modèle tabulaire selon le modèle de la figure 4-3. Nous avons étudié deux cas de figure. Le premier est un terrain plus conducteur de 5m d'épaisseur surmontant un terrain résistant ( $\rho_1 = 150 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ) et le second est un terrain plus résistant de 5m d'épaisseur surmontant un terrain conducteur ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_2 = 150 \Omega\text{m}$ ). Nous avons choisi une épaisseur de couche importante pour influencer de façon significative les calculs de résistivité apparente.

Les variations de  $\rho_{a0}$  en fonction de la position angulaire de (AM) ont été étudiées ;  $\rho_{a0}$  est la résistivité apparente du terrain tabulaire, calculée en l'absence du tunnelier.

Nous avons cherché à orienter la courbe de sorte qu'elle soit la plus représentative du terrain à reconnaître.

Dans un premier temps, nous avons représenté les variations de la résistivité comme elles sont données dans le fichier de résultats, c'est à dire en fonction de l'angle de position de l'électrode d'injection A.

- Premier cas de figure :  $\rho_1 = 150 \Omega\text{m}$ ,  $H_1$ ,  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ .



**Figure 4-6 :** Représentation de la résistivité apparente, en fonction de l'angle du point d'injection A, d'un terrain conducteur d'épaisseur 5m, sur un terrain plus résistant.

On note que la valeur des résistivités calculées est symétrique par rapport à l'axe  $90^\circ - 270^\circ$  et quasiment symétrique par rapport à l'axe  $0^\circ - 180^\circ$ . On peut donc dire, dans le cas d'un modèle symétrique, que la résistivité calculée est fonction de AM et non pas des positions de A ou M dissociées. On peut donc choisir de représenter indifféremment les résistivités sur l'angle de position de l'électrode d'injection ou sur l'angle de position de l'électrode de mesure

- Second cas de figure :  $\rho_1 = 1000 \Omega m$ ,  $\rho_2 = 150 \Omega m$

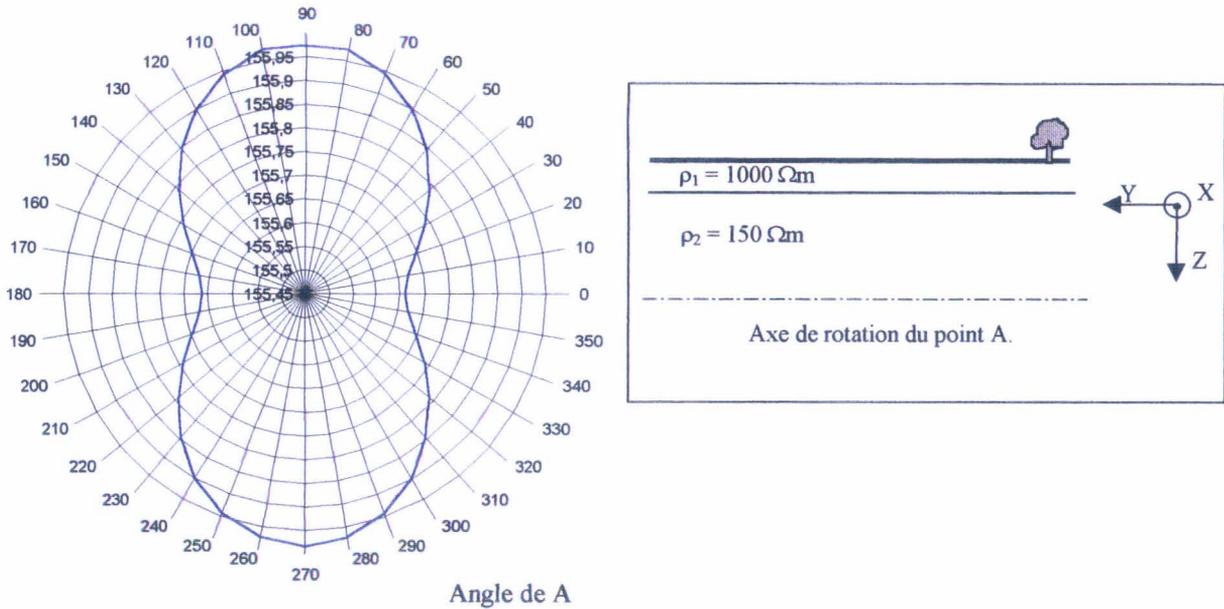


Figure 4-7 : Représentation de la résistivité apparente en fonction de l'angle du point d'injection A, d'un terrain résistant d'épaisseur 5m, sur un terrain plus conducteur.

Nous avons fait les mêmes remarques que pour le cas précédent. Toutefois, à rapport égal entre la résistivité du terrain conducteur et celle du terrain résistant, nous avons noté une variation plus faible de la résistivité apparente quand la couche superficielle est plus résistante. On remarque que dans ce cas les variations de l'influence de la couche superficielle sont quasiment nulles quelle que soit la position de AM.

Cette étude montre que l'on obtient une bonne symétrie de la résistivité apparente suivant les axes  $0^\circ-180^\circ$  et  $90^\circ-270^\circ$ . Sa représentation en fonction des coordonnées de A est satisfaisante et donne un bon aperçu de la constitution du terrain. La courbe a tendance à s'étirer logiquement vers les résistivités les plus fortes et à se rétracter en présence d'une couche conductrice.

#### 4.4.2. Influence de la résistivité de la couche superficielle

Nous avons cherché à connaître l'influence de la résistivité de la couche superficielle d'épaisseur 0,40 m sur les calculs de la résistivité apparente effectués à 20 mètres de profondeur.

L'épaisseur reste constante et égale à 0,40 m.

Pour le modèle de terrain, les valeurs suivantes de  $\rho_1$  ont été prises : [0,1 ; 1 ; 10 ; 150 ; 500 ; 1000 ; 10000  $\Omega\text{m}$ ],  $\rho_2$  reste constante et égale à 100  $\Omega\text{m}$ , valeur qui correspond au terrain schisteux de Rennes.

Nous avons effectué les calculs sur le grand dispositif de reconnaissance ( $d = 7\text{m}$ ), dont la portée de mesure est la plus importante.

Nous avons étudié les variations de  $\rho_{a0}$  pour ne prendre en compte que l'influence de la couche superficielle sur les lectures de  $\rho_a$ .

Quelle que soit la résistivité de la couche superficielle, les calculs de la résistivité apparente en profondeur sont homogènes sur un tour du disque de coupe (figure 4-8).

Pour  $\rho_1$  supérieure ou égale à  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ , les valeurs de la résistivité apparente calculée restent voisines de  $\rho_2$ . Seules les couches superficielles de plus faible résistivité (inférieure à 1  $\Omega\text{m}$ ) provoquent une variation de la résistivité apparente. Pour  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_a$  se stabilise à 70  $\Omega\text{m}$  quand le rapport  $\rho_1/\rho_2$  diminue.

L'influence de la résistivité de la couche superficielle ne paraît pas jouer un rôle prépondérant sur le calcul des résistivités apparentes en profondeur. Elle ne présente aucune anomalie caractéristique, exceptée une chute globale de la résistivité apparente dans les cas où  $\rho_1/\rho_2$  est très faible.

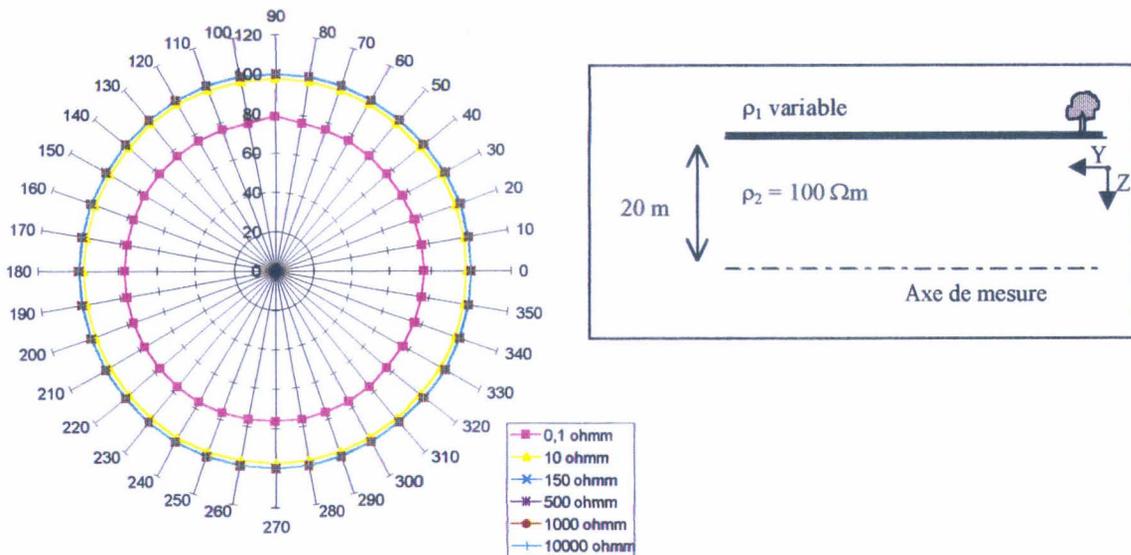


Figure 4-8 : Représentation radiale des variations de la résistivité apparente en fonction de la résistivité de la couche superficielle.

### 4.4.3. Influence du rapport de résistivité entre le terrain et le tunnelier

Nous avons étudié l'influence sur l'amplitude de l'anomalie, du rapport de résistivité entre un terrain tabulaire à deux couches et le tunnelier à partir du modèle de la figure 4-3. La résistivité du tunnelier est constante, seule la résistivité  $\rho_2$  du second terrain varie. Cette étude permet de connaître l'anomalie créée par le tunnelier en fonction de la résistivité du terrain.

L'épaisseur de la première couche est de 0,4 m et sa résistivité est de  $150 \Omega\text{m}$ . La résistivité de la seconde couche  $\rho_2$  prend les valeurs suivantes [0,1 ; 1 ; 10 ; 100 ; 1000 ; 10000 ; 100000  $\Omega\text{m}$ ].

Le tunnelier est placé dans le terrain. Le centre du disque est à 20 mètres de profondeur. Sa résistivité  $\rho_c$  reste constante et égale à  $0,1 \Omega\text{m}$  pour le disque de coupe, et  $\rho_{c'}$  est égale à  $100000 \Omega\text{m}$  pour le train suiveur.

Nous avons essayé de décrire l'influence du tunnelier par le rapport de potentiel :

$$\text{ANOTUN} = \frac{V_{\text{tunnelier seul}}}{V_{\text{total}}} \times 100 \quad (4.1)$$

C'est le pourcentage de potentiel créé par le tunnelier dans la mesure du potentiel total. C'est aussi l'anomalie due au tunnelier.

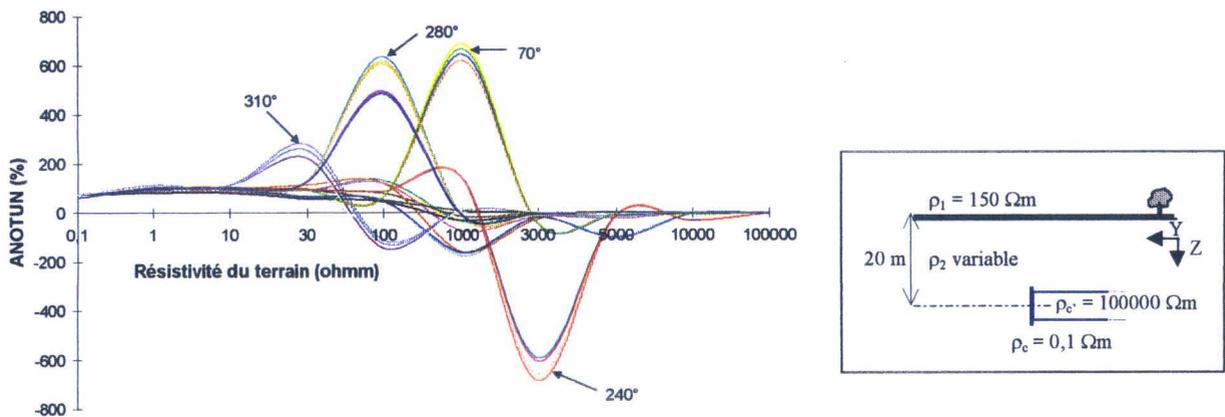


Figure 4- 9 : Représentation de ANOTUN pour tous les angles de mesure et pour différentes résistivités  $\rho_2$  du terrain

Nous avons représenté sur la figure 4-9 la variation de ANOTUN pour chaque angle de mesure, sur le plus grand dispositif de reconnaissance. Pour connaître le domaine d'influence du tunnelier, nous avons ajouté des points intermédiaires : 30, 3000 et 5000  $\Omega\text{m}$ .

On note que l'anomalie n'est pas toujours la même pour deux angles de mesure différents. Elle diffère en forme et en amplitude. L'influence du tunnelier dépend donc de l'angle sur lequel on fait le calcul. Cela est vraisemblablement dû à la dissymétrie de maillage sur certains angles que l'on peut remarquer sur la figure 4-4.

A partir de la figure 4-9, on peut remarquer les faits suivants :

- En dessous d'une résistivité du terrain encaissant de 10 Ωm le rapport de potentiel reste voisin de 100%.

Ceci implique :

$$\frac{V_{\text{corps}}}{V_{\text{total}}} \approx 1 \quad \Rightarrow \quad V_{\text{corps}} \approx V_{\text{total}} = V_{\text{corps}} + V_{\text{terrain}} \quad \Rightarrow \quad V_{\text{terrain}} \ll V_{\text{corps}}$$

En dessous d'une résistivité voisine de 10 Ωm, la résistivité du terrain encaissant n'influence donc pas l'amplitude de l'anomalie. L'influence de la résistivité  $\rho_c$  du tunnelier est prédominante.

On le vérifie sur la figure 4-10, pour l'angle de mesure 270°. En dessous d'une résistivité de 10 Ωm le potentiel créé par le terrain est nul.

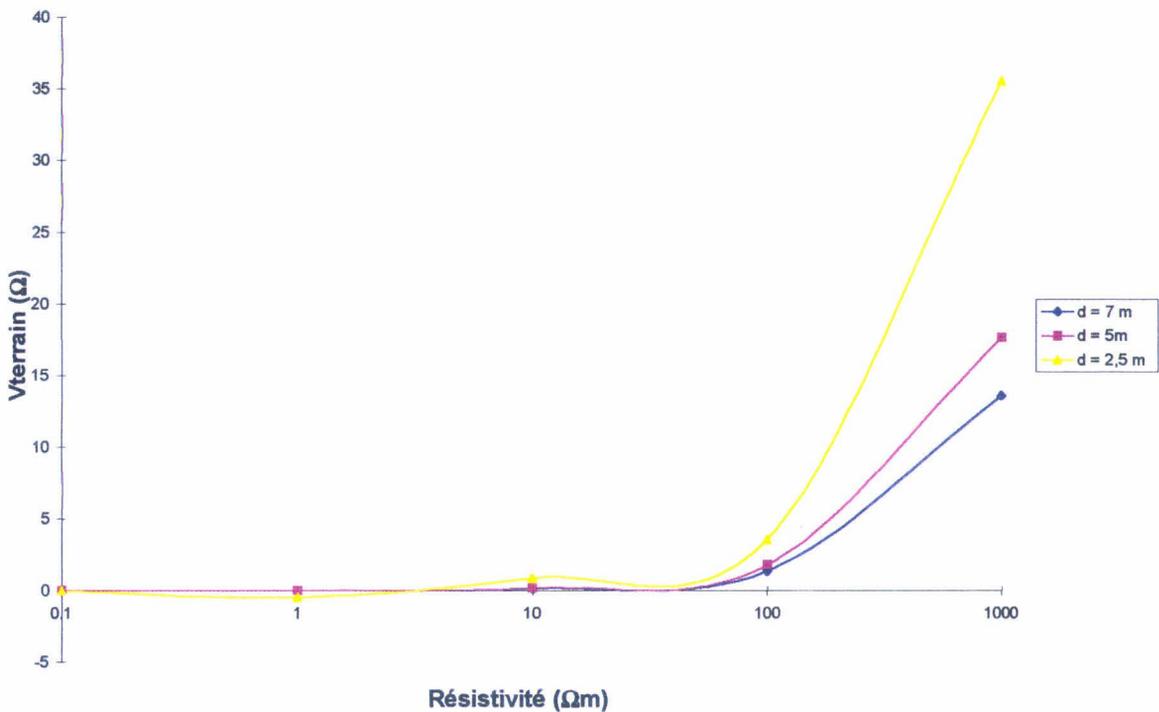


Figure 4-10 : Variation du potentiel créé par le terrain suivant sa résistivité.

- A partir d'une résistivité du terrain encaissant de 5000 Ωm, ANOTUN est, dans la majorité des cas, voisin de 0%.

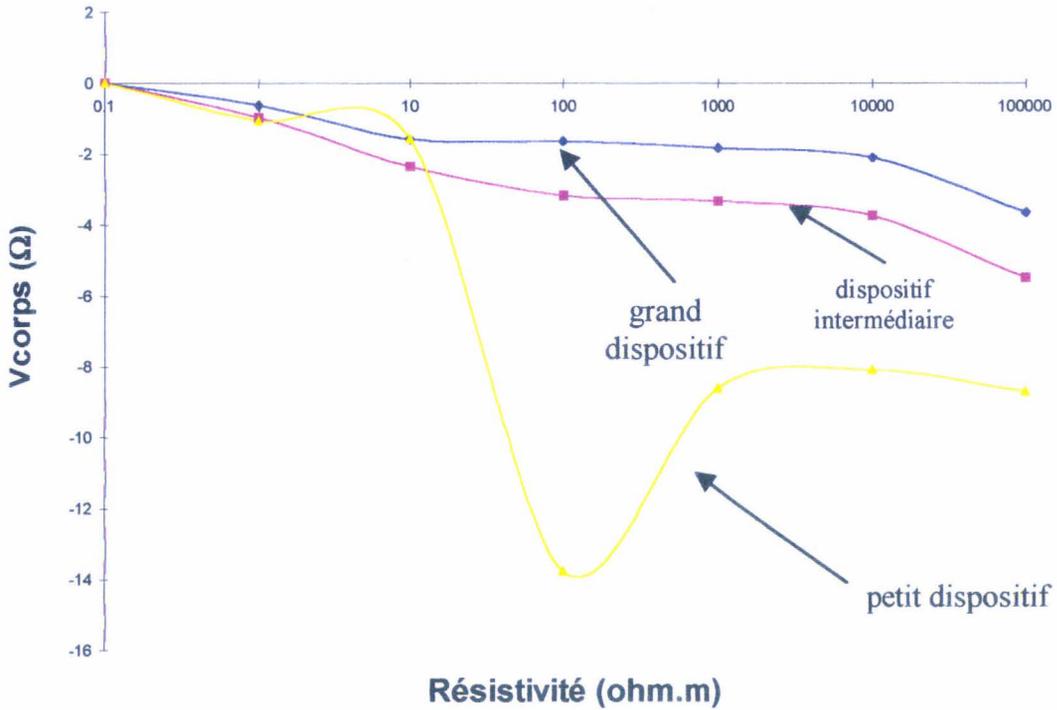


Figure 4-11 : Variation du potentiel créé par le tunnelier suivant la résistivité du terrain encaissant.

La figure 4-11 montre que l'anomalie due au tunnelier reste stable, quelle que soit la résistivité du terrain encaissant. On remarque que la valeur du potentiel créé par le tunnelier est constante pour  $d = 7$  m et  $d = 5$  m. Elle varie plus pour  $d = 2,5$  m, ceci peut être dû au fait que les électrodes de courant et de potentiel sont entourées d'une quantité de surface métallique importante par rapport à leur écartement. Le bouclier influence donc beaucoup plus la mesure.

Comme la réponse due au terrain (figure 4-10) croît rapidement à partir d'une résistivité de 1000 Ωm, au-dessus de 5000 Ωm, la réponse due à la résistivité du terrain domine totalement l'anomalie due au tunnelier. Donc  $V_{\text{terrain}} \gg V_{\text{corps}}$ .

On note que pour n'importe quelle résistivité du terrain, le potentiel dû au tunnelier est constant sur une grande plage de résistivité. En revanche, la valeur de ANOTUN varie de façon aléatoire suivant l'angle de calcul et en fonction du rapport de  $\rho_c / \rho_2$ . Entre les deux valeurs de résistivité  $\rho_2$  du terrain, 10 et 5000 Ωm, on observe des fluctuations importantes de l'anomalie.

#### 4.4.4. Influence du rapport de résistivité entre le terrain et l'hétérogénéité

Nous avons conservé le modèle de calcul initial ( $\rho_1 = 150 \text{ } \Omega\text{m}$  et  $\rho_2 = 100 \text{ } \Omega\text{m}$ ) représentatif de la géologie de Rennes. Le tunnelier est placé dans le terrain à 20 m de profondeur. Nous y avons également introduit une hétérogénéité.

Nous avons étudié l'influence de la résistivité de cette hétérogénéité sur l'amplitude de l'anomalie. Tous les autres paramètres de l'hétérogénéité restent constants (position, volume, maille).

Nous avons cherché à définir l'intervalle de résistivité dans lequel l'hétérogénéité est décelable et se différencie d'une autre hétérogénéité de résistivité différente.

Le rapport entre la résistivité du terrain et la résistivité de l'hétérogénéité,  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$ , prend différentes valeurs dans l'intervalle  $[1.10^{-5} ; 1000]$ .

Pour étudier ces différents cas, nous nous sommes intéressés à la variation de **DIFFHET**.

$$\text{DIFFHET} = \frac{V_{\text{corps}}(\text{Tunnelier} + \text{Hétérogénéité})}{V_{\text{total}}} - \frac{V_{\text{corps}}(\text{Tunnelier seul})}{V_{\text{total}}} \quad (4.4)$$

**DIFFHET** est la différence du pourcentage d'anomalie engendré par le tunnelier et l'hétérogénéité dans le terrain, moins celui engendré par le tunnelier seul. **DIFFHET** est une représentation du pourcentage d'anomalie engendré par l'hétérogénéité seule.

Par cette soustraction, on élimine les problèmes de formes différentes de l'anomalie suivant l'angle de mesure, dus aux dissymétries de maillage. L'allure de la courbe représentant l'anomalie est identique sur chaque angle (figure 4-12).

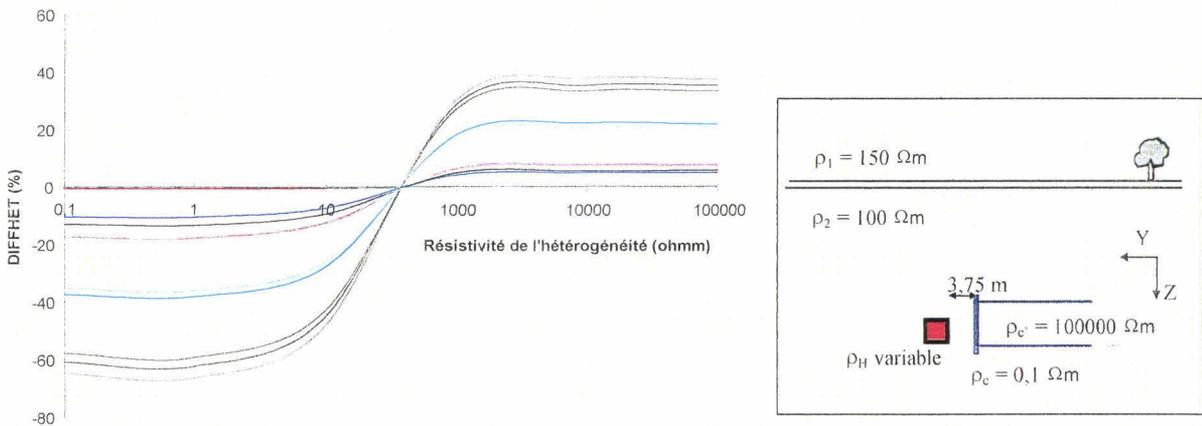


Figure 4-12 : Représentation de l'anomalie due à une hétérogénéité pour différentes valeurs de sa résistivité et pour différents angles de calcul.

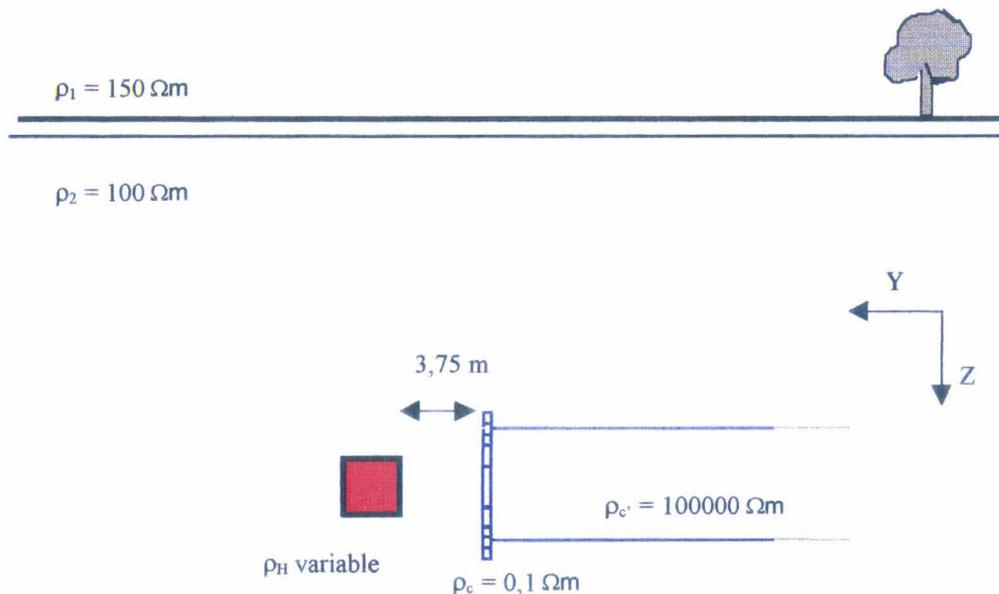
Nous avons représenté sur cette figure l'anomalie créée pour chacune des résistivités de l'hétérogénéité et pour chaque angle de mesure. On remarque que la forme de l'anomalie est la même pour tous les angles de mesures et que seule son amplitude varie. Ceci montre que l'étude de la moyenne de l'anomalie **DIFFHET** est cohérente.

Nous avons étudié deux cas : le cas d'une hétérogénéité ramassée (cube) et le cas d'une hétérogénéité plane.

- Cas d'une structure ramassée

Une hétérogénéité cubique de 3m de côté est disposée dans le terrain (figure 4- 13). La face la plus proche du disque de coupe est à 3,75 m.

L'hétérogénéité est centrée sur l'axe du tunnelier. La maille de l'hétérogénéité est de 1 m.



**Figure 4-13 :** Représentation du modèle d'étude de la résistivité d'une hétérogénéité cubique en avant du tunnelier

Nous avons représenté l'évolution de **DIFFHET** en fonction de la résistivité de l'hétérogénéité (figure 4-14). On fait les remarques suivantes :

- L'amplitude du pourcentage d'anomalie due à l'hétérogénéité sur le petit dispositif de reconnaissance est très faible (1%). Ceci est dû au faible écartement de 2,50 m entre les électrodes du pôle-pôle, donc à une profondeur de reconnaissance limitée.

En revanche, elle est quasiment identique sur les deux plus grands dispositifs de reconnaissance ( $d = 7\text{ m}$  et  $d = 5\text{ m}$ ).

- Les anomalies créées par les hétérogénéités conductrices sont deux fois plus fortes que les anomalies créées par les hétérogénéités résistantes. Ceci à rapport égal entre la résistivité ou la conductivité du terrain et celle de l'hétérogénéité.
- Au-delà de la valeur de  $\frac{\rho_H}{\rho_2} = 30$ , le pourcentage d'anomalie reste constant, de même que pour  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$  inférieure à 0,003. Pour une hétérogénéité de  $27\text{m}^3$ , l'anomalie varie entre 6% (pour  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$  supérieur à 30) et -10% (pour  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$  inférieur à 0,003).

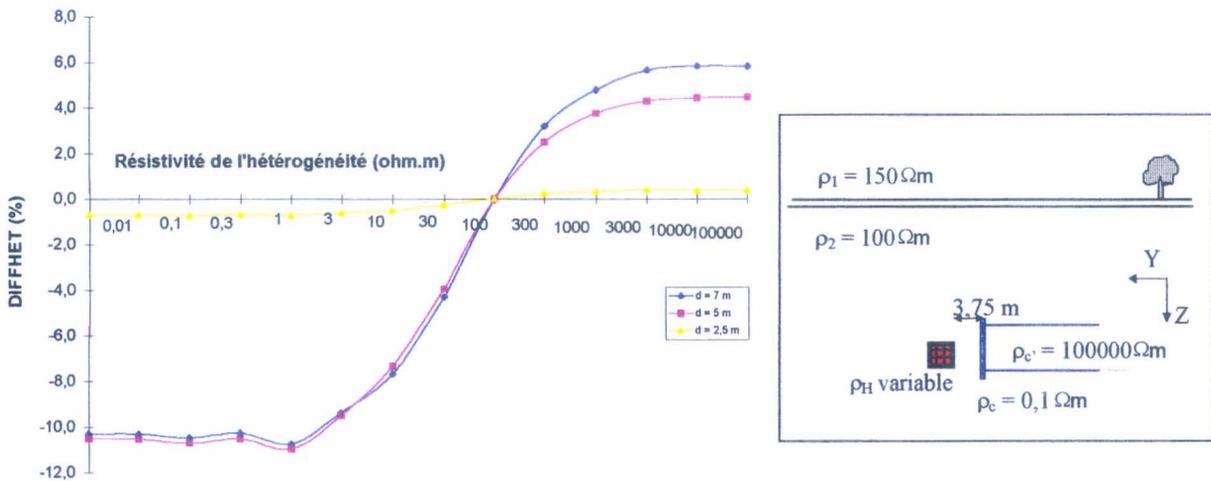


Figure 4-14 : Représentation de la moyenne sur un tour du disque de coupe, de l'anomalie créée par une hétérogénéité cubique pour différentes valeurs de sa résistivité.

- Cas d'une structure plane

Le terrain tabulaire de résistivité  $\rho_1 = 150 \Omega\text{m}$  et  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$  est conservé. Nous avons placé dans ce terrain une hétérogénéité plane de 15 m sur 6 m et de 1 m d'épaisseur (figure 4-15 et 4-16).

Le côté le plus proche de la face du tunnelier est à 3.75 m.

L'hétérogénéité est centrée sur l'axe de progression du disque de coupe.

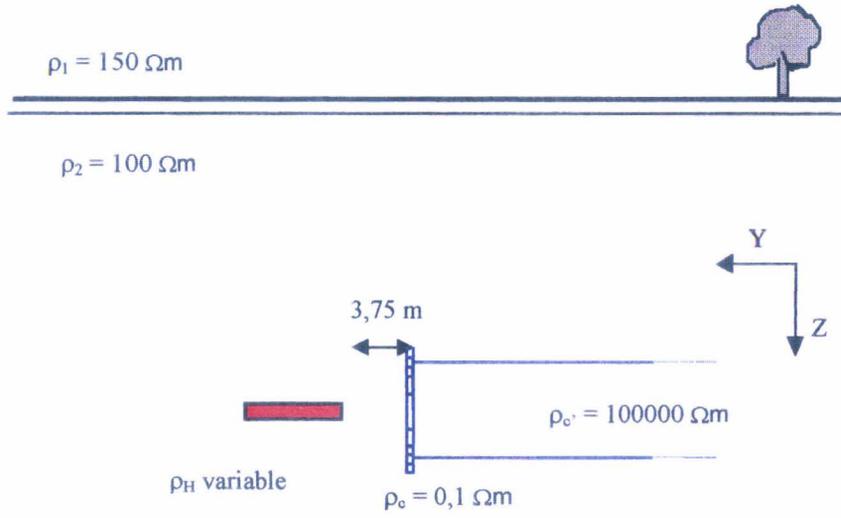


Figure 4-15 : Disposition d'une hétérogénéité plane dans un terrain de 100 Ωm.

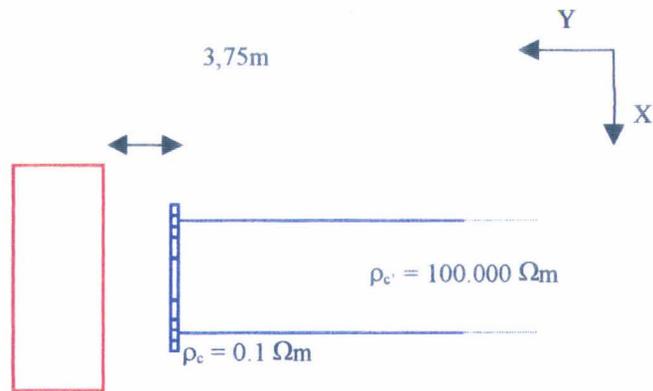


Figure 4-16 : Vue du dessus. Position et maillage de l'hétérogénéité plane.

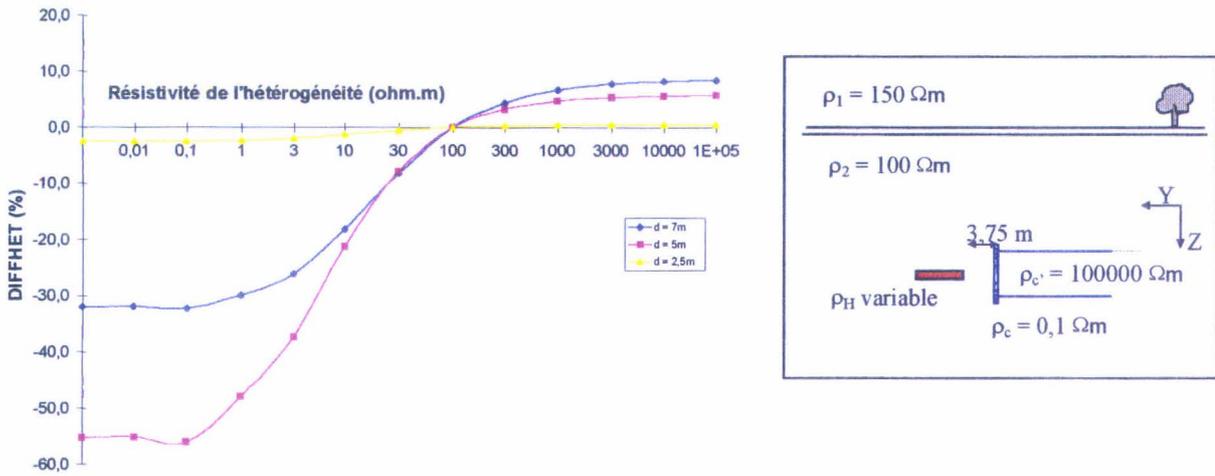


Figure 4-17 : Représentation de la moyenne sur un tour du disque de coupe, de l’anomalie créée par une hétérogénéité plane pour différentes valeurs de sa résistivité.

Nous avons représenté sur la figure 4-17 les variations de **DIFFHET** pour les trois dispositifs de reconnaissance et pour différentes résistivités de l’hétérogénéité.

A partir de cette figure, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- L’amplitude du pourcentage d’anomalie due à l’hétérogénéité sur le petit dispositif de reconnaissance reste très faible (2%). Elle est supérieure sur le plus grand dispositif de reconnaissance ( $d = 7m$ ) quand  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$  est supérieur à 1, et elle est supérieure sur le dispositif intermédiaire ( $d = 5m$ ) quand  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$  est inférieur à 1. La différence d’amplitude de l’anomalie entre les deux dispositifs de reconnaissance est plus marquée pour  $\frac{\rho_H}{\rho_2} < 1$ .
- Au-delà de  $\frac{\rho_H}{\rho_2} = 30$ , le pourcentage d’anomalie reste constant. De même que pour  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$  inférieur à  $10^{-3}$ . L’anomalie varie entre 8% sur le grand dispositif de reconnaissance ( $d = 7m$ ) quand  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$  tend vers 30, et  $-55\%$  sur le dispositif intermédiaire de reconnaissance ( $d = 5m$ ) quand  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$  tend vers  $10^{-3}$ .

Cette étude montre qu’il est possible de mettre en évidence des hétérogénéités de résistivité différente grâce à la variation de l’amplitude de l’anomalie calculée.

Pour  $\frac{\rho_H}{\rho_2} > 1$ , l'anomalie est positive, et pour  $\frac{\rho_H}{\rho_2} < 1$ , l'anomalie est négative. Cette caractéristique nous permet de différencier une hétérogénéité dont la résistivité est plus résistante ou plus conductrice que le terrain encaissant.

Si elle est cubique ou plane, l'hétérogénéité sera différenciée d'une autre hétérogénéité si  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$  est compris dans l'intervalle  $[10^{-3} ; 30]$ . En dehors de cet intervalle l'anomalie sera identique à celle créée par l'hétérogénéité la plus proche comprise dans l'intervalle.

On note également que les hétérogénéités conductrices sont beaucoup mieux différenciées les unes des autres par rapport aux hétérogénéités résistantes. La variation de l'anomalie entre une hétérogénéité cubique de  $27 \text{ m}^3$  et une hétérogénéité plane de  $90 \text{ m}^3$ , est de 45% pour  $\frac{\rho_H}{\rho_2} < 1$  et de quelques pour-cent pour  $\frac{\rho_H}{\rho_2} > 1$

#### 4.4.5. Influence de la position de l'hétérogénéité par rapport au disque de coupe

Nous avons disposé dans le terrain une hétérogénéité cubique ou plane de résistivité  $1 \Omega\text{m}$ .

Nous avons fait varier une seule des trois coordonnées de son centre, les deux autres restant fixes. Ainsi, l'hétérogénéité se déplace tour à tour suivant ses trois axes X, Y, Z.

Pour chacun de ces cas, nous avons étudié l'évolution de l'anomalie **DIFFHET**, suivant la formule (4-4), pour chaque position du centre de l'hétérogénéité par rapport au dispositif de prospection placé sur la face avant du bouclier.

Dans le cas de l'hétérogénéité plane, on étudiera son influence en fonction de la position de son centre sur l'axe de progression du tunnelier (axe Y), en profondeur (axe Z), et suivant son inclinaison par rapport au plan (XY).

##### - Cas d'une structure ramassée

Nous avons conservé l'hétérogénéité cubique de  $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$  avec un rapport  $\frac{\rho_H}{\rho_2} = 0,01$ .

Variation suivant X : le centre de l'hétérogénéité varie de  $-10 \text{ m}$  à  $10 \text{ m}$  par pas de deux ( $Z_c = 20\text{m}$ ,  $Y_c = 4\text{m}$ ). La face la plus proche du tunnelier est à  $2,50 \text{ m}$  de l'hétérogénéité. La figure 4-18 montre les résultats obtenus. On note que cette hétérogénéité, placée à une distance de  $2,50 \text{ m}$  du disque de coupe, provoque une anomalie dont le maximum est de 37% (figure 4-18). Elle l'est de façon plus importante pour le dispositif intermédiaire d'écartement  $d = 5 \text{ m}$ , dans l'intervalle  $[-6 \text{ m} ; 6 \text{ m}]$ . En-dehors, l'amplitude sera légèrement supérieure pour  $d = 7 \text{ m}$ .

Si l'hétérogénéité est sur le parcours du tunnelier, l'amplitude de l'anomalie due à l'hétérogénéité est comprise entre 20% et 25% pour  $d = 7$  m, et entre 35% et 40% pour  $d = 5$  m. Sur le plus petit dispositif,  $d = 2,5$  m, on ne lit aucune anomalie significative.

Si on effectue un calcul supplémentaire avec  $\frac{\rho_H}{\rho_2} = 1000$  et  $X_c = 0$ , on obtient un maximum d'anomalie égal à 10%. C'est à dire trois fois moins que dans le cas d'une hétérogénéité conductrice. On retrouve les conclusions de l'étude sur l'influence de la résistivité de l'hétérogénéité.

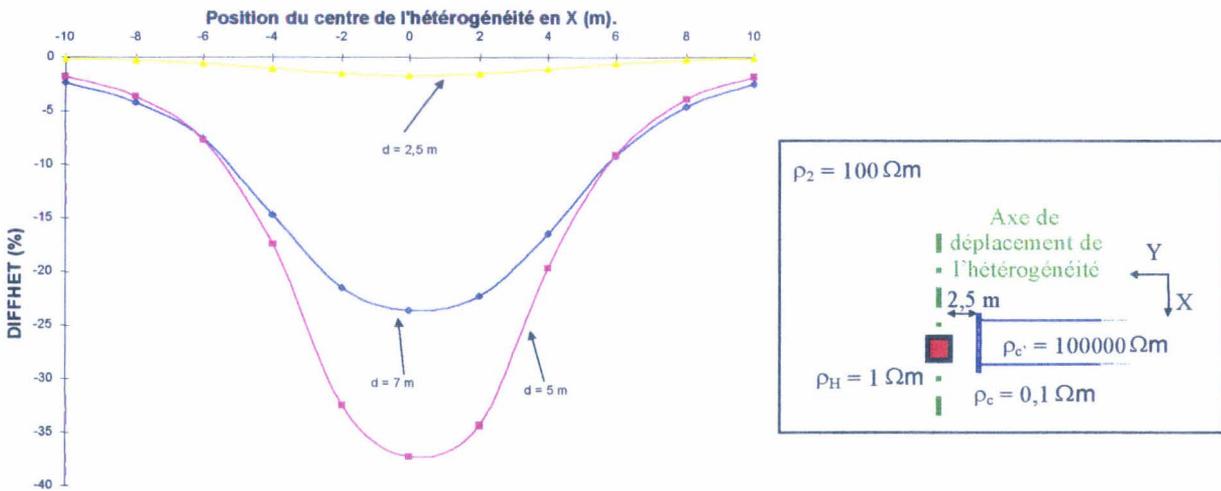


Figure 4-18 : Amplitude de l'anomalie en fonction de la coordonnée du centre  $X_c$  de l'hétérogénéité cubique, ( $Y_c = 4$  m,  $Z_c = 20$  m).

Variation suivant Z: le centre de l'hétérogénéité varie de 10 m à 30 m par pas de deux ( $X_c = 0$  m,  $Y_c = 4$  m). La face la plus proche du tunnelier est à 2,50 m de celui-ci. La figure 4-19 montre les résultats obtenus.

On note que cette hétérogénéité, placée à une distance de 2,50 m du disque de coupe, provoque une anomalie dont le maximum est de 37%.

L'amplitude sera supérieure pour le grand dispositif ( $d = 7$  m) entre 15,5 m et 18 m, puis sur le dispositif intermédiaire ( $d = 5$  m) entre 18 et 24 m.

On note le même pourcentage d'anomalie que pour l'étude précédente quand le centre de l'hétérogénéité cubique se trouve sur le parcours du tunnelier.

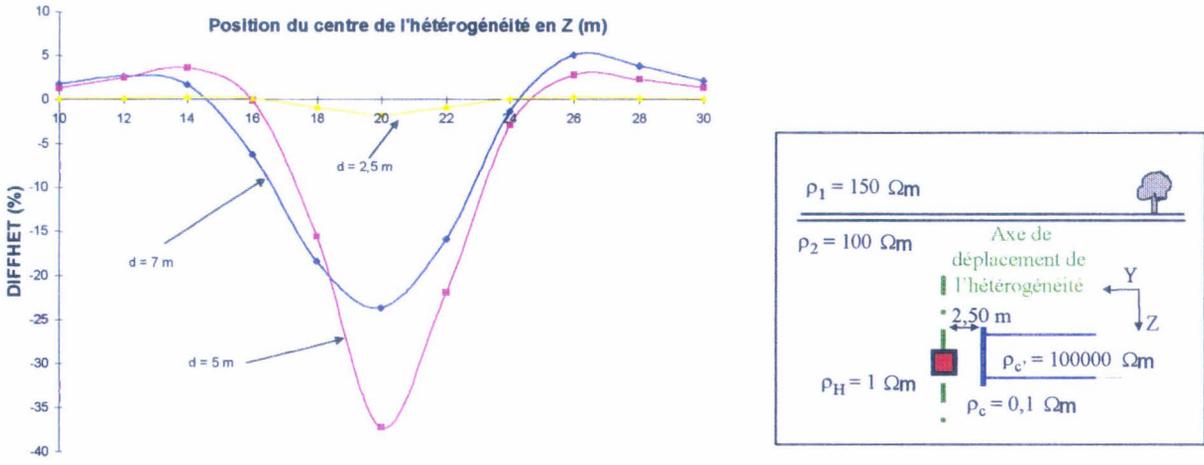


Figure 4-19 : Amplitude de l’anomalie en fonction de la coordonnée du centre  $Z_c$  de l’hétérogénéité cubique, ( $Y_c = 4\text{ m}$ ,  $X_c = 0\text{ m}$ ).

Variation suivant Y : la distance séparant la face externe du bouclier de la face de l’hétérogénéité varie de  $Y = 2\text{ m}$  à  $Y = 14\text{ m}$  par pas de deux, ( $Z_c = 20\text{ m}$ ,  $X_c = 0\text{ m}$ ). La figure 4-20 montre les résultats obtenus. L’amplitude de l’anomalie croît rapidement à partir du moment où la distance séparant l’hétérogénéité de la face externe du bouclier est inférieure à 4m. elle double entre 6 m et 4 m et triple entre 4 m et 3 m pour atteindre 37%. A 2 m, elle est de 66% L’amplitude maximum est observable sur le dispositif intermédiaire ( $d = 5\text{ m}$ ) si la distance n’excède pas 4 m, et elle l’est sur le plus grand dispositif au-delà de 4 m.

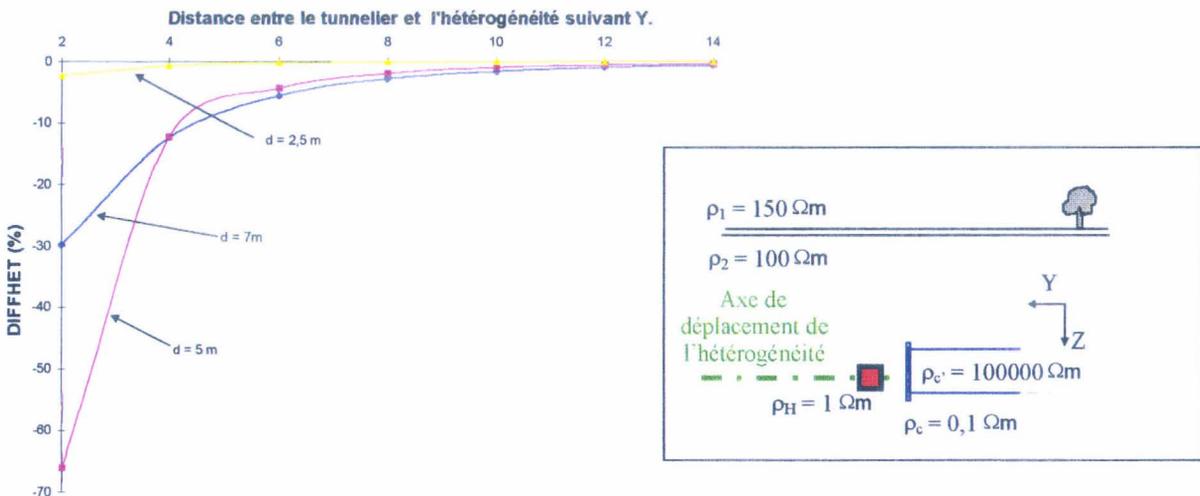


Figure 4-20 : Amplitude de l’anomalie en fonction de la distance  $Y$  entre le tunnelier et l’hétérogénéité cubique, ( $Z_c = 20\text{ m}$ ,  $X_c = 0\text{ m}$ ).

- Cas d'une structure plane

Nous avons disposé dans le terrain une hétérogénéité plane de 15m x 6m x 0,75m avec un rapport  $\frac{\rho_H}{\rho_2} = 0,01$ .

Variation suivant Z : le centre de l'hétérogénéité varie de  $Z = 10$  m à  $Z = 30$  m par pas de deux, ( $X_c = 0$  m,  $Y_c = 5,5$  m). La face la plus proche du tunnelier est à 2,50 m de celui-ci.

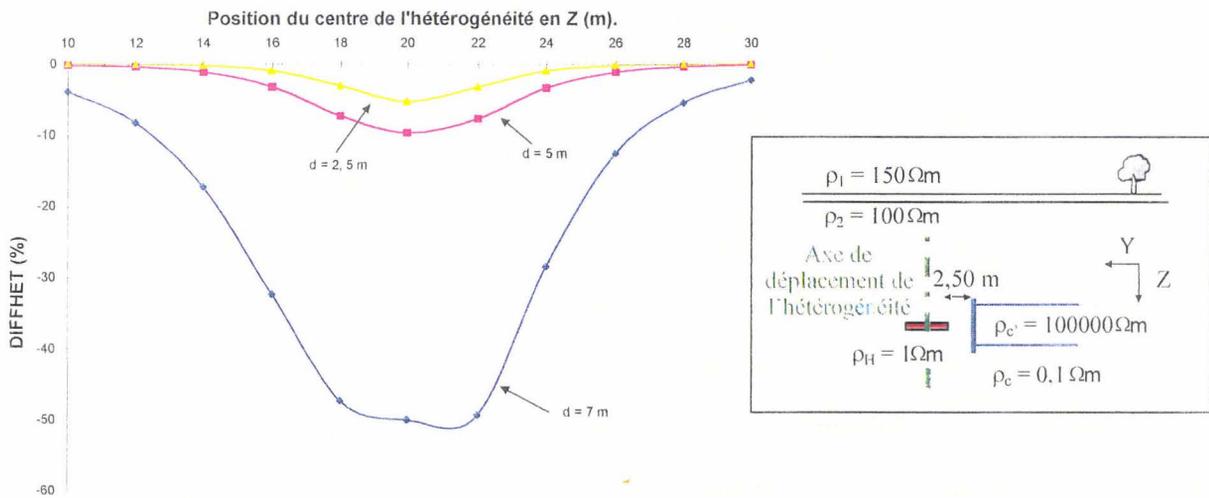


Figure 4-21 : Amplitude de la moyenne de l'anomalie en fonction de la coordonnée du centre  $Z_c$  de l'hétérogénéité plane, ( $Y_c = 5,5$  m,  $X_c = 0$  m)

On note que cette hétérogénéité, placée à une distance de 2,50 m du disque de coupe provoque une anomalie dont le maximum est de 50% (figure 4-21).

L'amplitude est supérieure pour le grand dispositif ( $d = 7$  m).

Si le centre de l'hétérogénéité est sur le parcours du tunnelier, l'amplitude de l'anomalie due à l'hétérogénéité est comprise entre 35% et 45% pour  $d = 7$  m et entre 5% et 10% pour  $d = 5$  m.

Variation suivant Y : la distance séparant la face du tunnelier et la face de l'hétérogénéité varie de  $Y = 2$  m à  $Y = 14$  m par pas de deux, ( $Z_c = 20$  m,  $X_c = 0$  m). Quand la distance qui sépare l'hétérogénéité de la face externe du bouclier est de 6 m, l'anomalie est de 17%. Puis elle double chaque fois que l'on progresse de deux mètres, pour atteindre 60% quand  $Y = 2$  m (figure 4-22).

L'amplitude est maximum sur le plus grand dispositif et varie de 60% à 5% quand la distance entre le bouclier et l'hétérogénéité varie de 2 à 11 m. Sur le rayon intermédiaire, l'anomalie reste inférieure à 13% et elle est inférieure à 5% quand la distance excède 4 m.

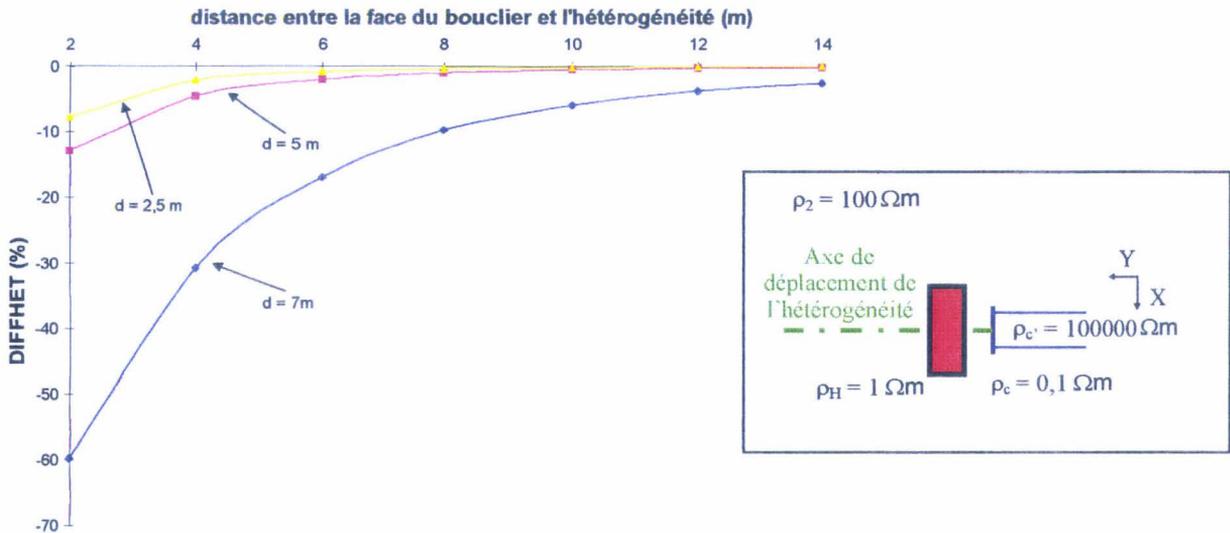


Figure 4-22 : Amplitude de la moyenne de l'anomalie en fonction de la distance Y entre le tunnelier et l'hétérogénéité cubique, ( $Z_c = 20\text{m}$ ,  $X_c = 0\text{m}$ ).

**Inclinaison** : nous avons fait varier l'inclinaison de l'hétérogénéité plane. On la découpe en bande de  $15\text{ m} \times 0,75\text{ m} \times 0,75\text{ m}$ . Les centres de chaque bande sont alignés sur l'angle tête choisi ;  $Y_c$  reste constante pour chaque élément quelle que soit l'inclinaison, sauf à  $90^\circ$  où  $Y_c = 5,5\text{ m}$  pour tous les éléments.

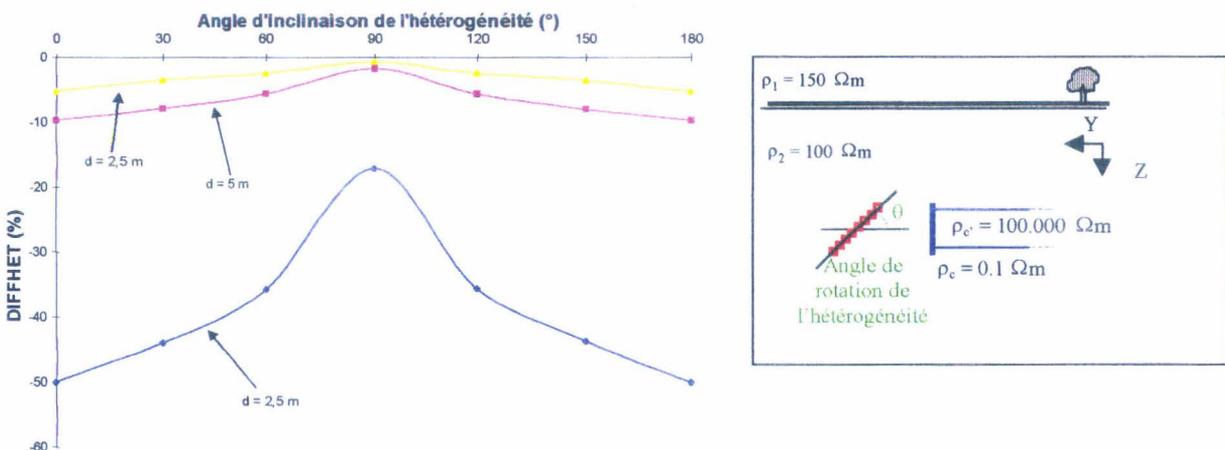


Figure 4-23 : Amplitude de la moyenne de l'anomalie en fonction de l'inclinaison  $\theta$  de l'hétérogénéité par rapport au tunnelier, ( $X_c = 0\text{ m}$ ).

L'élément le plus proche est à 2,50 m. Le minimum d'amplitude est noté pour une inclinaison de 90°, tous les éléments sont à  $Y = 5,5$  m. Il est d'environ 20% (figure 4-23). Ce pourcentage correspond à celui obtenu quand l'hétérogénéité se déplace dans le plan Y et que la distance la séparant du bouclier est de 5,5 m. Quand l'angle d'inclinaison de l'hétérogénéité est de 0° ou 180°, on retrouve le pourcentage d'anomalie provoquée par une hétérogénéité plane placée à 2,50 m de la face du bouclier.

#### 4.4.6. Influence de l'étendue de l'hétérogénéité.

Nous avons étudié l'influence de la dimension de l'hétérogénéité sur la valeur de l'anomalie.

La distance qui sépare le bouclier de la face de l'hétérogénéité reste fixe et égale à 4 m.

La taille des cellules de la maille est la même que dans l'étude précédente, elle est de 0,75 m dans les trois directions.

On étudie deux cas, celui d'une hétérogénéité cubique est celui d'une hétérogénéité plane.

##### - Cas d'une structure cubique

La dimension des côtés de l'hétérogénéité cubique varie de 0,75 m à 6 m par pas de 0,75 m. Les coordonnées de son centre sont sur l'axe du tunnelier. La figure 4-24 montre les résultats obtenus.

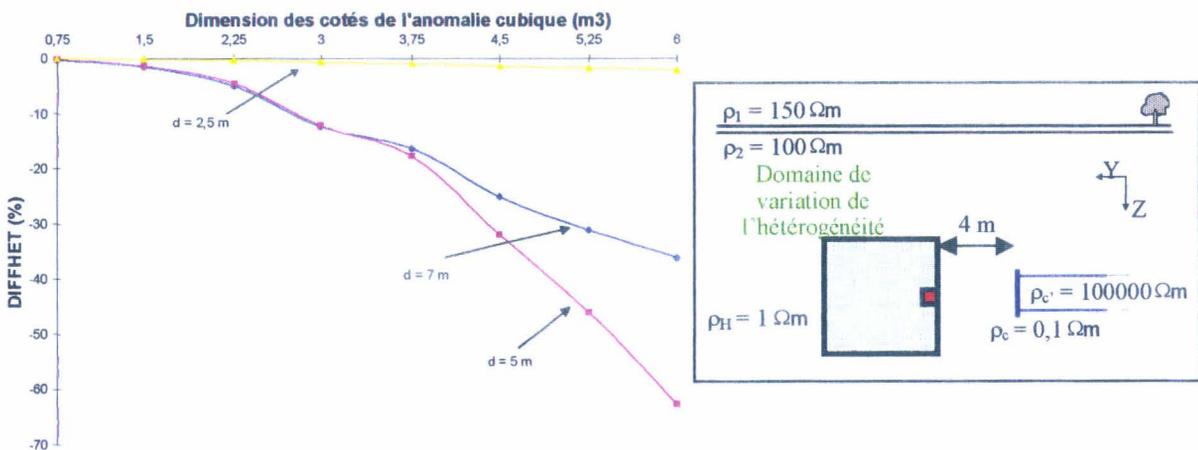


Figure 4-24 : Etude de la variation de la moyenne de l'anomalie en fonction de la dimension de l'hétérogénéité cubique.

Les maxima d'anomalie sont notés sur le dispositif intermédiaire ( $d = 5$  m).

Pour une hétérogénéité cubique, placée à 4 m du bouclier, on note une anomalie supérieure à 5% quand sa dimension est au moins égale à 2,25 m. Dans les mêmes conditions, on note une anomalie supérieure à 20% quand la taille de l'hétérogénéité est d'environ 4 m.

On remarque aussi que pour une dimension de l'hétérogénéité supérieure à 3,75 m, l'anomalie croît de façon importante, pour atteindre 60% pour une hétérogénéité de 6 m de côté.

- Cas d'une structure plane

L'épaisseur de l'hétérogénéité plane reste constante et égale à 0,75 m.

Le rapport entre la dimension selon X et la dimension selon Y est de trois.

Les dimensions de l'hétérogénéité plane ont été choisies de telle sorte que les volumes correspondent deux à deux à ceux de l'hétérogénéité cubique. La figure 4-25 montre les résultats obtenus.

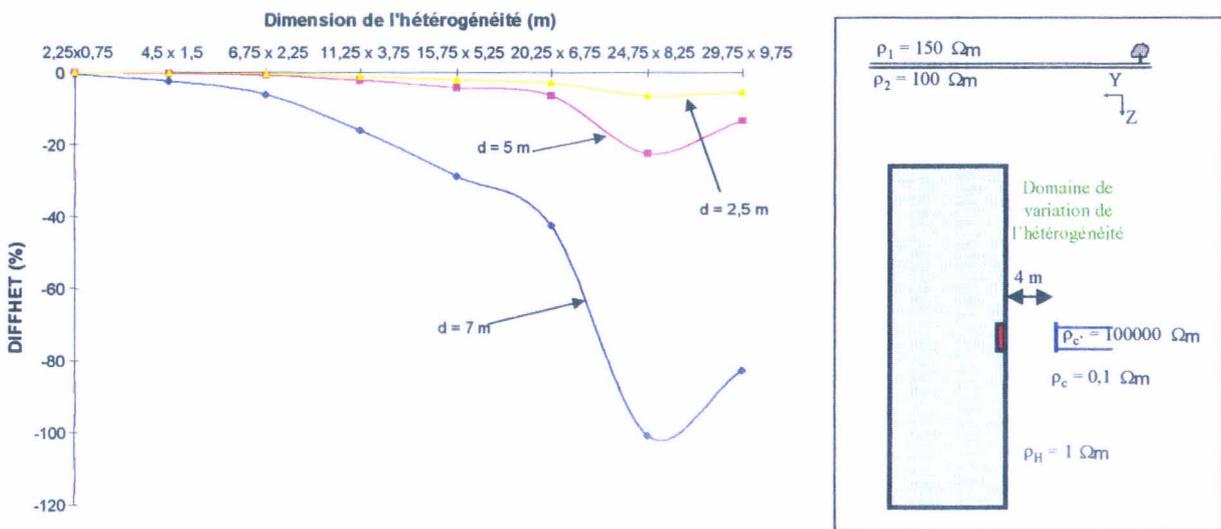


Figure 4-25 : Etude de la variation de la moyenne de l'anomalie en fonction de la dimension de l'hétérogénéité plane.

Les maximums d'anomalie sont notés sur le grand dispositif (d = 7 m).

Pour une hétérogénéité plane, placée à 4 m du bouclier, on note une anomalie supérieure à 5% quand sa dimension est au moins égale à 6,75 m x 2,25 m. Cette dimension donne le même volume que celui d'une hétérogénéité cubique de 2,25 m<sup>3</sup>.

On remarque, comme pour l'hétérogénéité cubique, que l'anomalie croît de façon importante à partir d'une dimension de l'hétérogénéité supérieure à 15,75 m x 5,25 m (soit 3,90 m<sup>3</sup>).

#### **4.5. UTILISATION DES MESURES EN CONTINU DURANT L'EXCAVATION, POUR LA LOCALISATION DE L'HETEROGENEITE.**

Si la méthode de prospection électrique est simple d'utilisation, il n'en est pas de même de son interprétation.

Nous avons cherché à définir une méthode d'interprétation des mesures qui soit fiable et rapide. La méthode doit nécessiter au minimum l'intervention du personnel présent dans la cabine de pilotage. Elle doit donc être informatisée au maximum. Il faut que les résultats obtenus soient clairs et compréhensibles. Le temps d'interprétation doit permettre d'adapter le fonctionnement de la machine au terrain.

Notre dispositif de reconnaissance a la particularité de "s'enfoncer" dans le terrain. Ainsi les électrodes se rapprochent des hétérogénéités, au fur et à mesure de la progression du tunnelier.

La méthode d'interprétation que nous présentons utilise cet avantage. Nous avons envisagé la comparaison des mesures obtenues pour différentes positions du tunnelier, et par différence, la mise en évidence des hétérogénéités.

Nous avons conservé les deux dispositifs de plus grand écartement, auxquels nous avons ajouté un autre dispositif obtenu par commutation d'une des électrodes de chaque dispositif.

L'écartement de ce troisième dispositif de reconnaissance est de 5,5 m ; il se trouve décentré par rapport à l'axe du tunnelier.

Les deux premiers dispositifs informent sur les points suivants :

- la présence d'une hétérogénéité, par la variation de l'anomalie
- la nature résistive ou conductrice de l'hétérogénéité, par le signe de l'anomalie
- la proximité de l'hétérogénéité, par l'augmentation brutale de la valeur de l'anomalie

Le troisième dispositif est utilisé pour déterminer la direction approximative dans laquelle se situe l'hétérogénéité. Le décentrement du dispositif fait que les résultats ne sont pas symétriques suivant les axes  $0^\circ - 180^\circ$  et  $270^\circ - 360^\circ$ . Cette dissymétrie nous permet de délimiter des zones de terrain pour lesquelles la valeur de l'anomalie est forte. On note, dans le cas d'un dispositif décentré, que nous obtenons le maximum d'anomalie quand l'électrode de potentiel M est située à l'horizontale de l'hétérogénéité. Nous avons donc représenté l'anomalie en fonction des coordonnées de l'électrode M.

Nous avons limité l'interprétation à la détermination du quart dans lequel se situe l'hétérogénéité.

Nous avons étudié deux cas, celui d'une hétérogénéité cubique est celui d'une hétérogénéité plane.

Nous avons étudié les variations de l'amplitude de ANOMALIE.

$$ANOMALIE = \frac{V_{corps}}{V_{total}}(Tunnelier + Hétérogénéité) - \frac{V_{corps}}{V_{total}}(Tunnelier\ seul)$$

Nous avons calculé la moyenne des valeurs de ANOMALIE, pour l'angle de position de l'électrode M compris entre 0° - 90°, 90° - 180°, 180° - 270°, 270° - 360°.

- Cas d'une structure cubique

Nous avons considéré une hétérogénéité cubique de résistivité 1 Ωm. La dimension de ses côtés est de 2,25 m.

Nous avons étudié le cas où l'hétérogénéité est sur le parcours du tunnelier (figure 4-26), et le cas où l'hétérogénéité est à l'extérieur du parcours du tunnelier (figure 4-27).

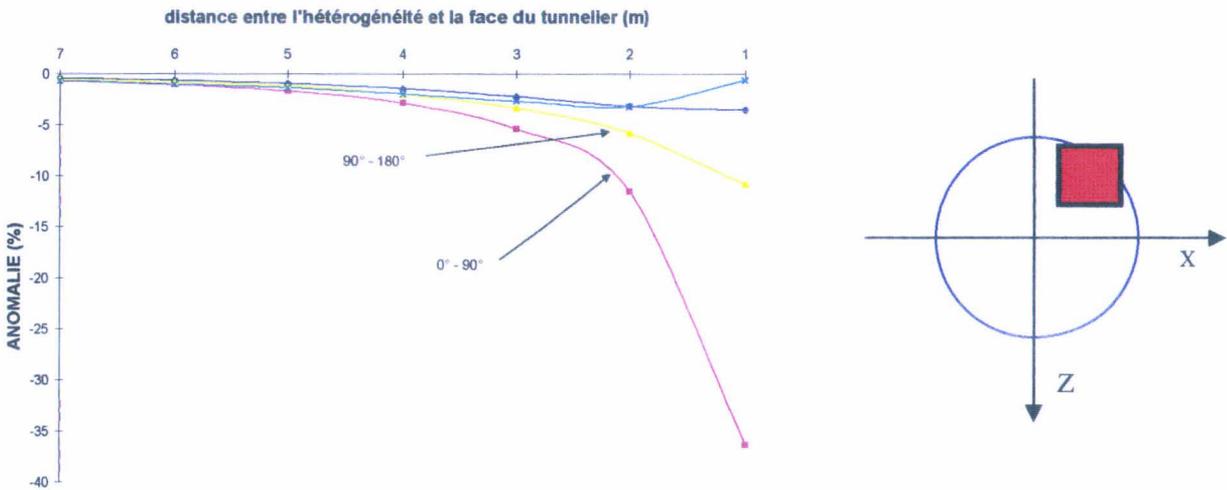
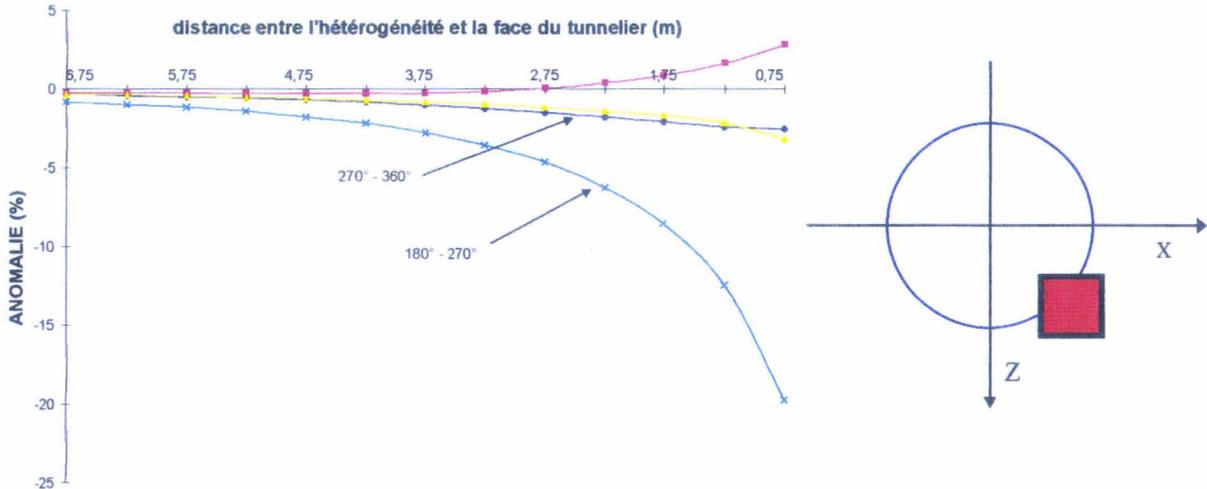


Figure 4- 26 : Etude de la variation de l'anomalie créée par une hétérogénéité cubique placée sur le parcours du tunnelier.

Dans le premier cas, l'hétérogénéité est placée sur le parcours du tunnelier. Le maximum d'anomalie est observable dans le secteur 0° - 90° où se trouve l'hétérogénéité. La valeur de l'anomalie devient intéressante pour une distance de 3 m entre l'hétérogénéité et le tunnelier.



**Figure 4- 27 :** Etude de la variation de l'anomalie créée par une hétérogénéité cubique placée en dehors du parcours du tunnelier.

Dans le second cas, l'hétérogénéité est placée en dehors du parcours du tunnelier. La détermination de la position est moins bonne que dans le cas précédent. L'amplitude maximum est observable sur un secteur voisin à celui contenant l'hétérogénéité. Ce phénomène est vraisemblablement dû au retrait de la valeur de l'anomalie de l'angle de calcul  $280^\circ$ . C'est pourquoi, l'amplitude du secteur concerné n'arrive qu'en seconde position avec une amplitude affaiblie.

- Cas d'une structure plane

Nous avons disposé dans le terrain une hétérogénéité plane de 15 m x 6 m, et d'épaisseur 0,75 m. Sa résistivité est de 1  $\Omega$ m.

Nous avons étudié le cas où l'hétérogénéité est sur le parcours du tunnelier (figure 4-28), et le cas où l'hétérogénéité est à l'extérieur du parcours du tunnelier (figure 4-29).

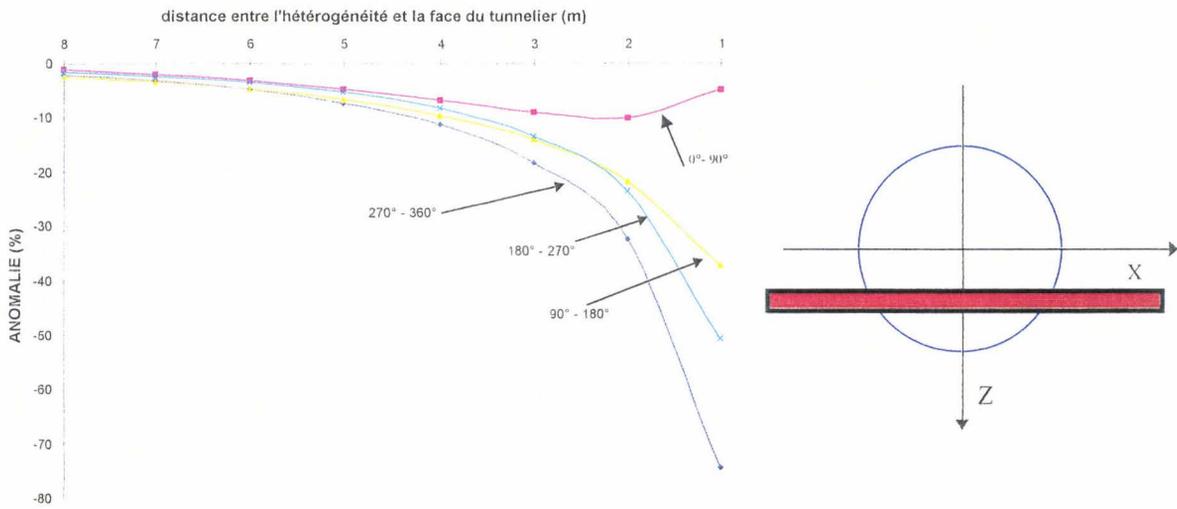


Figure 4- 28 : : Etude de la variation de l'anomalie créée par une hétérogénéité plane placée sur le parcours du tunnelier.

Dans le cas où l'hétérogénéité est placée sur le parcours du tunnelier (figure 4-28), le maximum d'anomalie est observable dans le secteur 270° - 360° où se trouve une partie de l'hétérogénéité. Dans le secteur 180° - 270° aussi concerné par l'hétérogénéité, on observe une anomalie d'amplitude voisine de celle du secteur précédent, mais cette amplitude est aussi observée dans le secteur 90° - 180° qui ne contient pas l'hétérogénéité. Ce phénomène est peut être dû à la suppression de la valeur de l'anomalie sur l'angle de mesure 100°.

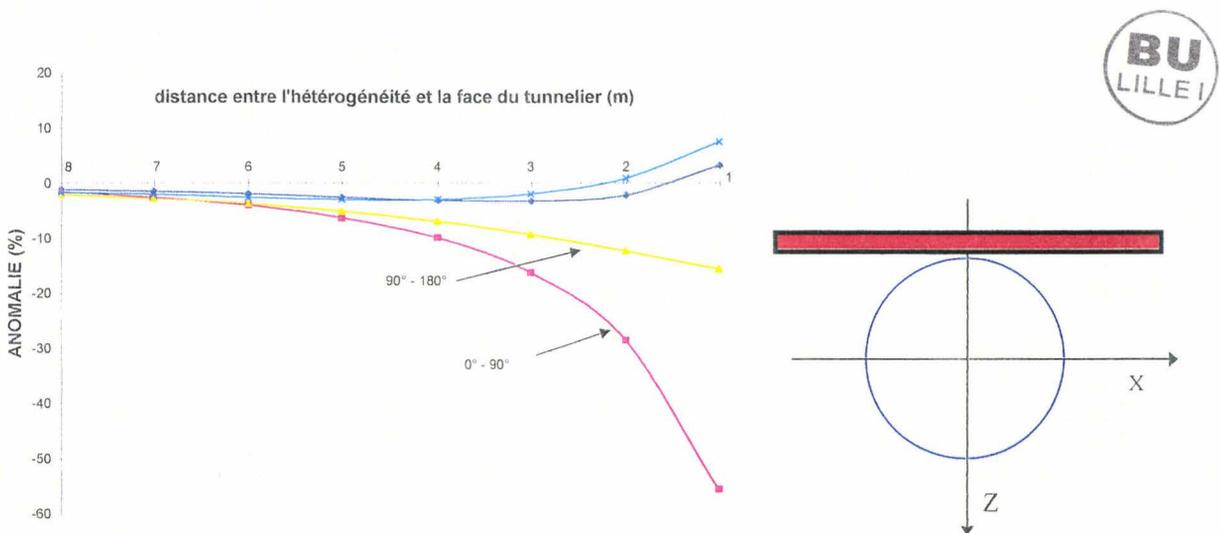


Figure 4- 29 : Etude de la variation de l'anomalie créée par une hétérogénéité cubique placée en dehors du parcours du tunnelier.

Dans le cas où l'hétérogénéité est placée en dehors du parcours du tunnelier (figure 4-29), la détermination de la position est meilleure que dans le cas précédent. L'amplitude

maximale est observable sur les deux secteurs  $0^\circ - 90^\circ$  et  $90^\circ - 180^\circ$ , qui correspondent aux secteurs voisins de l'hétérogénéité.

#### 4.6. CONCLUSION

A l'aide d'un programme de calcul EL3DTUN, basé sur la méthode des moments, Nous avons effectué une étude paramétrique.

Les objectifs de la reconnaissance étaient de reconnaître une hétérogénéité d'une dimension égale au quart du diamètre du tunnelier (environ  $D = 8$  m), à une distance égale au diamètre du tunnelier, et dans n'importe quel azimut.

Cette étude paramétrique a montré que même si les objectifs ne sont pas tout à fait atteints, il est assurément possible de détecter une hétérogénéité 100 fois plus conductrice que le terrain encaissant, d'une dimension égale au quart du diamètre du tunnelier, et placée sur son parcours à une distance de 4 m ( $D/2$ ). Pour une telle configuration, la valeur de l'anomalie est au moins égale à 20%.

L'étude de l'anomalie due à une hétérogénéité cubique ou et à une hétérogénéité plane de même volume, nous a permis de constater qu'il n'est pas facile de différencier, par la forme des courbes, une anomalie provoquée par une hétérogénéité cubique d'une anomalie provoquée par une hétérogénéité plane. Alors, l'amplitude de l'anomalie ne dépend pas essentiellement de sa répartition dans le terrain, mais plutôt de son volume.

Plus l'écartement du dispositif est important, plus le dispositif est sensible aux hétérogénéités de grand volume, et inversement. Ce qui permet donc d'évaluer grossièrement le volume de l'hétérogénéité.

Il est important de souligner que tous les paramètres sont étroitement liés et qu'il est difficile de définir précisément l'influence d'un paramètre, sans tenir compte des autres. Cette étude a essentiellement servi à donner un ordre de grandeur de l'influence de chaque paramètre. On peut également ajouter que toute hétérogénéité dont le rapport  $\frac{\rho_H}{\rho_2}$  est

supérieur à 0,01, le volume supérieur à  $27 \text{ m}^3$  ( $\approx (D/3)^3$ ), et la distance la séparant du bouclier inférieure à 4 m ( $D/2$ ), sera vraisemblablement détectée.

A partir de l'étude de la variation de l'amplitude, nous avons montré qu'il est possible de localiser une hétérogénéité. **Cette interprétation** est basée sur le fait que le tunnelier progresse dans le terrain en se rapprochant progressivement des hétérogénéités. L'étude de l'évolution de la différence de l'anomalie entre deux positions du tunnelier renseigne sur la présence et la position approximative d'une hétérogénéité.

**CONCLUSION**

L'objectif de ce travail a été de concevoir et de mettre au point un dispositif de reconnaissance des terrains à l'avant d'un tunnelier.

Trois types de problèmes se sont alors présentés :

- le choix d'une méthode de reconnaissance
- l'installation de ce dispositif sur un tunnelier
- la détermination d'une interprétation fiable des mesures de résistivité apparente

Le choix de la méthode de reconnaissance s'est porté sur la méthode de la résistivité électrique. La résistivité électrique est, de loin, la propriété physique qui présente la plus grande variabilité dans les roches, ce qui permet une bonne reconnaissance des terrains. De plus, le temps nécessaire à l'acquisition des mesures est court et le dispositif de reconnaissance ne nécessite que très peu de matériel.

Il existe de nombreux types de dispositif en prospection électrique, qui diffèrent les uns des autres par le nombre d'électrodes dont ils disposent et par leur arrangement. Chaque dispositif comprend au moins deux électrodes d'injection de courant, et deux électrodes de mesure de potentiel. A chaque type d'arrangement correspond un objectif de reconnaissance.

Pour ce projet, nous avons choisi un dispositif pôle-pôle, c'est à dire qu'une des électrodes d'injection et une des électrodes de mesure sont rejetées à l'infini. Cet arrangement permet d'élargir le diamètre de reconnaissance.

Techniquement, l'installation sur un tunnelier, d'un dispositif de reconnaissance, par une méthode électrique nécessite des modifications qui ne perturbent pas les fonctions principales du tunnelier. Des difficultés ont dû être résolues, telles que l'isolation et la connexion des outils utilisés comme électrodes, ainsi que la transmission des informations à partir des électrodes placées sur le bouclier (partie tournante) vers le résistivimètre placé dans la cabine de pilotage (partie fixe).

Pour l'interprétation des mesures, nous avons été confrontés aux problèmes de non-linéarité entre la résistivité apparente mesurée et la résistivité vraie du terrain. Cette interprétation nécessite la résolution d'un problème inverse complexe. En effet, la résistivité apparente dépend de nombreux paramètres : taille, position, résistivité de l'hétérogénéité, résistivité du terrain encaissant, profondeur du tunnel, qualité du contact entre les outils et le terrain.

L'analyse numérique du rôle des différents paramètres a permis de délimiter les intervalles dans lesquels chaque paramètre influence significativement l'anomalie créée par la

présence d'une hétérogénéité. Les paramètres qui ont été étudiés sont la résistivité de l'hétérogénéité, sa position par rapport au bouclier, son volume, sa forme. Si l'anomalie créée par la variation de la résistivité de l'hétérogénéité est de faible amplitude, il n'en reste pas moins possible de déterminer, grâce à son signe, la nature résistante ou conductrice de l'hétérogénéité, par rapport au terrain encaissant.

L'étude des autres paramètres, qui sont le volume et la proximité de l'hétérogénéité, a montré que l'amplitude de l'anomalie a une valeur intéressante si l'hétérogénéité se trouve sur le trajet du tunnelier, à une distance inférieure à 4 m (50% du diamètre du tunnelier).

Il semble difficile de définir précisément les caractéristiques d'une hétérogénéité à l'aide de ce dispositif, mais il semble tout à fait concevable de déceler un changement dans la nature du terrain, situé à proximité du trajet du tunnelier. La particularité de ce dispositif étant de s'enfoncer dans le terrain, l'évolution de l'anomalie devient un bon témoin des variations de la géologie.

**BIBLIOGRAPHIE**

- A.F.T.E.S. , (1992a), *Franchissement d'une zone karstique*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 110, p. 122-128.
- A.F.T.E.S. , (1992b), *Présentation et interprétation des mesures réalisées dans le tunnel*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 110, p. 99-107.
- A.F.T.E.S., (1992c), *S.A.T.A.N. suivi automatique des tunnels autoroutiers de nice*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 110, p. 91-96.
- ARISTAGHES P., BERBET F., MICHELON P., (1995), *La prévention des fontis dans les travaux au tunnelier : des études en temps réel*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 128, p. 123-128.
- ATKINSON D., (1996), *Preparing to deal with changed ground conditions and disputes*. Tunnels & tunnelling, n°: 9, p. 30-32.
- BALAN A., LAPLACE G., (1991), *EOLE*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 107, p.219-225.
- BARTEL DC., BECKER A., (1990), *Spectral analysis in airborne electromagnetics*. Geophysics, vol. 55, n° 10, p. 1338-1346.
- BAUM P., CRIGHTON G.S., MAGNAS J-P., NORIE E.H., (1987), *An initial review of the tunnel design*. Tunnels & tunnelling, n° 9, p. 19-23.
- BEITNES A., BLINDHEIM O. T., (1987), *Investigation strategy for sub- sea rock tunnels*. Tunnels & tunnelling, n°: 9, p. 35-39.
- BOIVIN D., (1990), *Undeground space use and planning in the Québec City Area*. Tunnelling and underground space technology - vol. 5, n° 1/2, p. 69-83.
- BOUVARD A., HUGONIN J., SCHNEIDER B., (1994), « SCARABEE » *Méthode de reconnaissance des massifs rocheux. Application aux ouvrages souterrains*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 123, p.158-161.
- BOUYAT C., (1990), *Les techniques de construction. La reconnaissance du sous-sol*. Journal de l'AFTES : Les travaux souterrains en France.
- BRIGLIA P., BURLET D., PIRAUD J., (1994), *La mesure des contraintes naturelles appliquée au Génie Civil*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 123, p. 149-152.
- BRULARD J., TAILLE J-Y., (1995), *Querung der Alpen im Zuge der neuen Bahnverbindung Lyon- Turin*. Tunnel - n° 1, p.50-58.
- CAMBEFORT H., (1971), *Géotechnique de l'ingénieur et reconnaissance des sols*. Eyrolles (ed.), p. 2-38.

- CHANDRASEKHARAN H., YADAV BR., TOMAR SPS., SARMA PBS, (1994), *Studies on salinity and water content of soils. - Geoelectrical approach*. Journal of the Indian Society of Soil Science - vol. 42, n° 3, p. 430-436.
- CHAPEAU C., (1991), *Auscultation du sol pendant le creusement*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 107, p. 235-240.
- CHEZE J, (1995), *Les méthodes de diagnostic pour les tunnels revêtus*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 131, p. 287-306.
- CLARK B. & al., (1992), *Methods and apparatus for investigating earth formations*. Brevet européen, n° 0 540 425 A2.
- COLOMBET G., PICAUT J., DESCHAMPS J.M., DUBUIS S.; (1993), *Le tunnel de Saint - Laurent. Principales caractéristiques d'exécution*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 115, p.35-39.
- COOK, (1975), *Radar transparencies of mine and tunnel rocks*. Geophysics - vol.40, n° 5.
- CORBETTA F., DEMILECAMPS L., (1994), *Accidents géologiques en travaux souterrains*. Travaux, n°698, p; 20-27.
- CORBETTA F., LANTIER F., (1994), *Reconnaissance à l'avancement d'un tunnelier par géophysique. Le cylindre électrique Techsol sur le chantier de Devèze à Bordeaux*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 125, p. 269-274.
- CORDING E.J., (1991), *Design philosophies for tunnels in soil*. Developments in geotechnical engineering - vol. : 59B, p. 56-79.
- COURTOT P., PERAGALLO J., (1988), *Méthodes géophysiques appliquées à l'auscultation des réseaux enterrés*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 86, p. 85-91.
- CRUZ E., (1992), *Manholes and microtunneling*. Civil Engineering ISSN 0360-0556- n° 12, p. 52-55
- DABAS M., TABBAGH A., TABBAGH J., (1994), *3-D inversion in subsurface electrical surveying - Theory*. Geophys. Jour. Int., n° 119, p. 975-990.
- DARCY J., PERA J., (1990), *Reconnaissance pour les longs tunnels : le point de vue de l'ingénieur*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 100, p.177-180.
- DARLING P.,(1994), *Pumped storage scheme in the emperors'graveyard*. Tunnels & tunnelling, n° 3, p. 14-18.
- DELAITRE E., (1993), *Etude des latérites du SUD - MALI par la méthode du sondage électrique*. Thèse de l'Université Louis Pasteur de Stasbourg.

- DEVILLE E., MASSEGLIA M., ROBERT A., SIRIEYS P., (1993), *Le tunnel du Siaix : exemple d'analyse géotectonique appliquée aux travaux souterrains*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 115, p. 28-33.
- DILL R., DOBBELS D., PARKER H.,A.&J., BERGER L., (1995), *Ground characterisation for the providence CSO storage tunnels*. Tunnels & tunnelling, n° 5, p. 23-36.
- DUBUS J.-P., (1968), *Recherche théorique et expérimentale des possibilités d'adaptation de certaines méthodes de prospection électromagnétique à la détection des cavités souterraines*. Thèse d'état de l'Université de Lille I.
- DUBUS J.-P., (1974), *Théorie et mise en application d'une méthode de sondage électromagnétique utilisable en prospection géophysique à faible profondeur*. Thèse d'état de l'Université de Lille I.
- DUDDECK H., (1989), *Guidelines for tunnel design*. Tunnels & tunnelling, n° 12, p. 42--44.
- EFREMIDIS Ch., (1996), *Tunneling problems delay Athens metro.*, Tunnels & tunnelling, n° 11, p. 59-63.
- EINSTEIN H.H., (1991), *Strategies for subsurface investigation*. Developments in geotechnical engineering - vol. : 59B, p. 80-91.
- FOILLARD R., GEORGE B., (1995), *Les applications de l'auscultation par méthode du radar géologique pour les investigations du sous-sol avant les travaux d'excavation souterrains*. GEOSCAN, De la Géologie au Calcul des Ouvrages. Reconnaissance des Propriétés Mécaniques des Terrains, séminaire novembre 95, Grenoble.
- FONTAINE J., (1969), *Contribution à la théorie du rayonnement des dipôles électriques enterrés et au développement de méthodes d'optimisation des liaisons électromagnétique entre terminaux souterrains*. Thèse de l'Université de Lille I.
- FORTIER R., ALLARD M., SEGUIN M.K., (1994), *Effect of physical properties of frozen ground on electrical resistivity logging*. Cold regions science and technology - vol. 22, n° 4, p. 361-384.
- FRADIN B., ROBERT J, (1988), *Prolongements de la deuxième ligne du métro de Marseille. Reconnaissance géotechnique pour l'avant projet sommaire*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 85, p. 13-29.
- GALAN-MALAGA H., (1989), *Diffraction electromagnetique en puits de forage : approximations dipolaires et application au problème inverse*. Thèse de l'université de Paris VI
- GLYNN M., WALTHALL S., SMITH S.,(1989), *Machine tunneling expertise pooled at north west water*. Tunnels & tunnelling, n° 10, p. 41-43.

- GOËL R.K., JETHWA J.L., PAITHANKAR A.G., (1995), *Tunneling in the Himalayas : Problems and solutions*. Tunnels & tunnelling, n° 5, p. 58-59
- GOUVENOT D., HAMELIN JP., (1996), *Informatique et travaux souterrains : De la reconnaissance des sols à la supervision du tunnelier*. Association française des travaux en souterrain. Journées d'études internationales/ Chambéry, 21-24 octobre 1996.
- GREENFIELD R.J., WU S.T., (1991), *Electromagnetic wave propagation in disrupted coal seams*. Geophysics – vol. 56, n° 10, p. 1571-1577.
- GRIMALDI P., SOUHAITE T., (1987), *Procédé et appareillage de détection continue des variations du type ou de l'état des roches avoisinant un tunnelier par une méthode électrique*. Brevet national n° 87 00977.
- GUICHARD T., CHAMPETIER DE RIBES F., (1993), *Creusement des tunnels en terrain karstique*. Infrastructures souterraines de transport, éditions Reith.
- GUILLAUME J., (1994), *Le choix des paramètres et essais géotechniques utiles à la conception, au dimensionnement et à l'exécution des ouvrages creusés en souterrain*. Tunnels et ouvrages souterrains – n° 123, p. 129-148.
- HAEGEMAN W., (1997), *The prediction of settlement due to tunnelling*. Expérimentation et calcul en génie civil – EC'97., Marcq en Baroeul.
- HANSEN A., BERGDAHL U., HANSEN PB., (1993), *Ground conditions for the oresund link*. Tunnels & tunnelling, vol. : 25, p. 13-14.
- HAWKINS A.B., (1988), *Unpredictable to the core*. Tunnels & tunnelling, n° 1, p. 48-49.
- HERVET J., (1993), *Tunnels urbains au tunnelier*. Tunnels et ouvrages souterrains – n° 119, p. 253-257.
- HINDLE D.J., (1995), *Geotechnical appraisal*. World tunneling, november, p. 371-373.
- HUANG J., (1995), *Exploratory adit for Niagara River hydroelectric development*. Tunnels & tunnelling, n° 5, p. 32-33.
- HUSE J., (1992), *Control of tunnelling contracts*. Tunnels & tunnelling, n° 9, p. 47-49.
- ITO T., MURAKAWA T., *Système de détection des obstacles dans les terrains par ondes électromagnétiques. Son développement et sa mise en pratique*. Résumé de la conférence annuelle de l'association de Génie-Civil.
- JOHANNESSON P., SCHLEISS A., KORBIN G., (1988), *Calaveras project high head pressure tunnel*. Water Power & Dam Construction - n° 11, p. 43-48.
- JOLLEY D., (1994), *What is happening at the sharp end ?*. Tunnels & tunnelling, n° 3, p. 45-46.

- KALINSKI R.J., KELLY W.E., (1993), *Estimating water content of soils from electrical resistivity*. ASTM Geotechnical Testing Journal - vol 16, n° 3, p. 323-329.
- KALINSKI R.J., KELLY W.E., (1994), *Electrical- resistivity measurements for evaluating compacted-soil liners*. J Geotech. Eng., vol. 120, n° 2, p.451-457.
- KANEMITSU Y. & al., (1991), *Method and system for detecting collapse of natural ground in shield driving method*. Brevet européen, n° 0 471 859 A1.
- KNIGHTS M., (1986), *Site investigation examined as a basis of cost- effective tunnelling*. Tunnels & tunnelling, n° 9, p. 30-31.
- KOBEL R., (1995), *Inclined shaft for power station Cleuson - Dixence in the Valais Alps*. Tunnels & tunnelling - vol. 27 special march, p. 26-32..
- LABBE O., (1979), *Contribution à la résolution de problèmes de Génie Civil par la géophysique : Etat de fissuration, détection des cavité, matériaux exploitables*. Thèse de l'Université de Grenoble I.
- LAGABRIELLE R., (1984), *La prospection électrique par courant continu en mer*. Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, Vol 132, p.5-19.
- LAJARTHE M., (1996), *La méthode électrique appliquée à la recherche en archéologie*. Mémoire de fin d'études d'ingénieur de l'université Strasbourg I.
- LANTIER M. (1995), *Nouvelles méthodes de reconnaissance géophysiques à l'avancement des fronts de taille en travaux souterrains : le cylindre électrique horizontal*. De la Géologie au Calcul des Ouvrages. Reconnaissance des Propriétés Mécaniques des Terrains, séminaire de novembre, Grenoble.
- LAOUANI H., (1993), *Développement d'un système expert d'aide a la définition d'un programme de reconnaissance pour les projets de tunnels*. Thèse de l' INPL.
- LASFARGES P., (1957), *Prospection électrique par courant continu*. Ed. Masson et C<sup>ie</sup>, Paris (ed.).
- LATOUR F., DEKEYSER M., ARNOULD R., (1990), *Réalisation de deux tunnels autoroutiers en terrains miniers à Liège*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 101, p.251-260.
- LEES D.,(1995), *Improving ground characteristics*. Tunnels and tunnelling - n° 3, p.33-36.
- MAHIEU B., (1991), *Exemple de suivi en temps réel de l'instabilité d'une falaise rocheuse*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 104, p. 107-111.
- MAILLANT H., (1992), *Les reconnaissances*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 110, p.78-89.

- MARQUART H., SCHULZ G., TROGISCH V., (1995), *Optimierung der geotechnischen durch den Einsatz oberflächengeophysikalischer Messungler*. Tunnel - n° 3, p.42-47.
- MEDKOUR M., (1984), *Prospection électrique par la technique dipôle-dipôle. Interprétation quantitative et application à la géophysique structurale et minière*. Thèse de l' I.N.P.L. 179 pages.
- MELLORS T., (1995), *Referencing ground conditions*. World Tunnelling, November 1995, p. 367-370.
- NARAI M., NAGAI K., *Nouvelles techniques de tunnels au bouclier. Conception et execution*. Résumé de la Conférence Annuelle de l'Association de Génie-Civil.
- NAUROY et al, (1995), *Better correlation between Geophysical and Geotechnical data from improved offshore site investigations*. De la Géologie au Calcul des Ouvrages. Reconnaissance des Propriétés Mécaniques des Terrains, séminaire Grenoble 1995.
- NILSEN B., MAAGE M., DAHLO TS., HARMMER TA., SMERLASS S., (1988), *Undersea tunnels in Norway : a state of the art review*. Tunnels & Tunnelling, vol. 20, n° 9, p. 18-22.
- NORD G., OISSON P., BY T.L., (1992), *Probing ahead of TBMs by geophysical means*. Tunneling and Underground Space Technology - vol. 7, n°3, p. 237-242.
- OLSEN A.B., BLINDHEIM O.T., (1989), *Prevention is better than cure*. Tunnels & tunnelling, n° 3, p. 41-44.
- PANISSOD C., (1997). *Prospection électrique et électrostatique à faible profondeur à l'aide de systèmes multipôles permettant la description directe des structures en 3-D*. Thèse de l'université de Paris VI.
- PAGE M., (1996), *Overcoming unforeseen difficult ground conditions at Bilbao*. Tunnels & tunnelling, n° 7, p. 34-36.
- PELIZZA S., (1991), *Pilot bore excavation with TBM for the design and construction of larger tunnels*. Tunnelling and underground space technology - vol. 6, n° 2, p. 185-189.
- PIERSON D'AUTREY L., GEORGE B., BALAN A., (1995), *Eole : le radar de forage pour la reconnaissance à l'avancement du tunnelier*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 132, p.341-347.
- PRAT JP., (1995), *Le prolongement du collecteur Montmorency- Soisy*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 131, p.333-336.
- PROVOST M., DEVILLERS J.-J., (1988), *Parois moulées dans le sol : contrôle et auscultation*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 87, p.171-187.

- PUECH M., (1995) *Développement du concept de reconnaissance intégrée en géophysique et géotechnique marines*. De la géologie au calcul des ouvrages. Reconnaissance des propriétés mécaniques des terrains, séminaire de Grenoble novembre 1995.
- PURCELL E.M., (1965), *Electricité et magnétisme*. Berkeley : cours de physique, volume 2, 460p.
- RADIODETECTION, (1990), *Principe de la détection des canalisations souterraines*. N°90/010/F/0, p.1-18.
- RICHTER T., LINDNER U., CORIN L., HALLEUX L., (1996), *Borehole radar and seismic techniques. New and efficient geophysical methods for tunnel investigations*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Tunnel Construction and Underground Structures.
- SATTEL G., SANDER B., AMBERG F., KASHIWA T., (1996), *Predicting ahead of the face*. Tunnels & tunnelling, n° 4, p. 24-30.
- SCHMALZ G., (1996), *Alptransit : galerie de reconnaissance du Lötschberg*. Association française des travaux en souterrain. Journées d'études internationales/ Chambéry, 21-24 octobre 1996. p.299-306.
- SCHLUMBERGER C., (1920), *Etude sur la prospection électrique du sous sol*. Gauthier-Villars, Paris (ed.).
- SCHRODER N., BISTRUD T. (1987), *Resistivity at sea : inversion and interpretation of measurements*. Seg, New Orleans expanded abstract, p. 94-95.
- SCHUNNESSON H., (1996), *Probing ahead of the face with percussive drilling*. Tunnels & tunnelling - n° 1, p.22-23.
- SCHWARZ SD., (1972), *Geophysical measurements related to tunnelling*. Proc. Rapid Excavation and Tunnelling Conf. NY : Society of Mining Engineers - vol. 1, chapter 15, p. 195-208.
- SENA A.G., TOKSOZ M.N., (1990), *Simultaneous reconstruction of permittivity and conductivity for crosshole geometries*. Geophysics, vol. 55, n° 10, p. 1302-1311.
- SIMON Ch., (1995), *Etude de la réalisation d'un système de reconnaissance à l'avancement devant un tunnelier*. Thèse de l'université de Lille I.
- TAIK M., SERRANO JM., (1991), *A tunnel project under the straits of Gibraltar*. Tunnelling and underground space technology - vol. 6, n° 3, p.319-323.
- TAKIGAWA T., EZAWA K., (1986), *Dispositif de détection des terrains à proximité d'une machine comprenant un bouclier de protection*. Brevet national n° 86 05461
- TAQUET B., (1988), *Galerie de reconnaissances et d'essais d'Orbassy en terrain difficile*. Tunnels et ouvrages souterrains - n° 85, p. 39-51.

- TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E., KEYS D.A., (1976), *Prospection géophysique*. ERG Editions, vol. 2, 221 p.
- THORGRIMSSON S., LOFTSSON M., JENSSON O., (1991), *Iceland's blanda hydroelectric project : monitoring of deformations, rock support and testing of rock anchors in the powerhouse cavern*. Tunnelling and underground space technology - vol. 6, n° 2, p. 235-239.
- TOLLERUP L., (1995), *Stockholm construit un tunnel « serpent » pour éviter les inondations et améliorer la qualité de l'eau*. Tunnelling and underground space technology - vol. 8, n° 4, p.425-427.
- VANNIERE-FEGER O.,(1992), *Comportement et modelisation des ouvrages du site de Knutange : tunnel du bois des chênes et parois clouées de la tranchée d'accès*. Thèse de l' INPL, Ecole Nationale Supérieure de Nancy - 100 p.
- VAVROSVSKY G., (1995), *NATM : geomechanical principles explained*. Tunnels & tunnelling, n° 10, p. 31-34.
- WEST G., (1987), *An engineering geological and geotechnical overview*. Tunnels & tunnelling, n° 5, p. 47-50.
- WHITELEY R.-J. (1974), *Design and preliminary testing of a continuous offshore resistivity method*. Bull. Aust. Soc. Explor. Geophys., vol. 5, 1, p. 9-14.
- YAMAZAKI H., MINOBE F., KUMAI F., (1984), *Dispositif de mesure d'un dépassement d'excavation installé sur un excavateur de tunnels du type à bouclier*. Brevet nationale n° 84 10823.

**ANNEXE**

Les programmes d'interprétation des données électrique demande des temps importants de résolution ainsi que des moyens informatiques très importants.

De nouveaux outils ont été développés, différentes méthodes d'interprétation des données ont été mises au point, la plus récente est l'algorithme d'inversion 3D.

Le programme utilisé pour effectuer les différentes modélisations de mesure de résistivité électrique est basé sur la méthode des moments.

Les données de résistivité sont acquises à partir de différentes dispositions des électrodes les unes par rapport aux autres ; la reconnaissance du sol est alors envisagée en trois dimensions.

La théorie de base du problème inverse est bien connue, mais très peu d'exemples utilisant l'inversion en 3D sont exposés dans la littérature.

La modélisation en 3D la plus largement utilisée fut développé par Alfano (1959).

Le champ électrique issu d'un certain volume délimité par une surface fermée  $S$  dont la résistivité est différente de ce qui l'entoure, est représenté par une distribution fictive des charges électriques à la frontière de la surface  $S$ . L'application des deux conditions aux limites, à savoir la continuité de la composante normale de la densité de courant  $J$  et la discontinuité de la composante normale du champ électrique, donne une équation intégrale dont la solution est la distribution des charges.

Cette équation se résout en découpant la surface  $S$  par  $N$  petits élément de surface plan, où la densité de charge est constante. Il suffit alors de discrétiser en un système linéaire de  $n$  équations à  $N$  inconnues (si les fonctions continues sont utilisées, la solution devient une intégrale de Fredholm).

Il est intéressant de noter que le problème en 3D se réduit au calcul d'une fonction en 2D.

Cette méthode, qui appartient à la classe des problèmes de valeur aux limites, peut être spécifiquement utilisée pour les problèmes où un petit nombre de corps isolés sont entourés par un milieu uniforme ou tabulaire. Pour des corps plus complexe, où par exemple, la résistivité peut changer complètement, quelques problèmes théoriques ont à s'y heurter et plus d'inconnues doivent être déterminées.

Cette méthode a été écartée pour un schéma général d'inversion, aussi bien parce que cette méthode ne peut pas marcher avec des corps dans lesquels la résistivité n'est pas isotrope et parce que les surfaces de charge sont utilisées à la place des résistivités directe (même si la discontinuité du champ électrique normal donne une relation directe entre la surface de charge et le contraste de résistivité).

On utilise ni les différences finies, ni la méthode des éléments finis, car en trois dimensions, elles conduisent à des systèmes trop longs à résoudre. On préfère utiliser une autre approche dans laquelle les corps anomaux sont remplacés par une distribution équivalente de sources de courant. La théorie est la même que dans le cas de la méthode des moments utilisée en électromagnétique.

Par conséquent, elle peut être utilisée simultanément pour l'inversion des données électriques et électromagnétiques.

Le champ total est divisé en deux parties : la première partie est indépendante des hétérogénéités,  $\mathbf{E}_p$  et la seconde partie résulte de la présence des corps,  $\mathbf{E}_a$ .

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_a \quad \text{et} \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_p + \mathbf{H}_a \quad \text{pour le champ magnétique.}$$

Posons  $\sigma_s$  comme étant la conductivité électrique du corps (inverse de la résistivité  $\rho_s = 1/\sigma_s$ ) et  $\sigma$  la conductivité du milieu encaissant.

On a :

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma_s \mathbf{E} \quad (1) \quad \text{et} \quad \nabla \times \mathbf{H}_p = \sigma \mathbf{E}_p \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (3) \quad \text{et} \quad \nabla \times \mathbf{E}_p = 0 \quad (4)$$

alors

$$\nabla \times \mathbf{H}_a = \sigma \mathbf{E}_a + (\sigma_s + \sigma) \mathbf{E} \quad (5)$$

et

$$\nabla \times \mathbf{E}_a = 0 \quad (6)$$

En conséquence, le champ d'anomalie ( $\mathbf{E}_a$ ,  $\mathbf{H}_a$ ) peut être considéré comme étant à l'origine d'une source fictive

$$\mathbf{j}_s = (\sigma_s - \sigma) \mathbf{E}$$

Ce champ peut être calculé en utilisant un potentiel  $\mathbf{A}$  tel que :

$$\mathbf{H}_a = \nabla \times \mathbf{A} / \mu$$

En utilisant la formule 5, on obtient

$$\mathbf{E}_a = \frac{1}{\sigma\mu} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} - \frac{\mathbf{j}_s}{\sigma}$$

De l'équation 6,  $\mathbf{E}_a$  dérive d'un potentiel  $V$  tel que

$$\mathbf{E}_a = -\nabla V$$

Cela devient alors

$$\nabla V = -\frac{1}{\sigma\mu} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} + \frac{\mathbf{j}_s}{\sigma}$$

En utilisant la jauge de Lorentz,  $V = -\nabla \cdot \mathbf{A} / \sigma\mu$ , on trouve

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{j}_s \quad (7)$$

Si l'on appelle  $\mathcal{A}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  le vecteur potentiel dyadique créé en un point  $\mathbf{r}$ , dans un milieu tabulaire par une source d'intensité unité, en  $\mathbf{r}'$  on obtient, pour le champ à l'intérieur du corps de volume  $\mathcal{V}$ .

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) - \mathbf{E}_p(\mathbf{r}) = \int_{\mathcal{V}} \frac{\mathbf{j}_s(\mathbf{r}')}{\sigma\mu} \nabla \times \nabla \times \mathcal{A}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' - \frac{\sigma_s - \sigma}{\sigma} \mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad (8)$$

Et à l'extérieur du corps on obtient :

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) - \mathbf{E}_p(\mathbf{r}) = \int_{\mathcal{V}} \frac{\mathbf{j}_s(\mathbf{r}')}{\sigma\mu} \nabla \times \nabla \times \mathcal{A}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (9)$$

L'intégration de l'équation 8 par la division du volume  $\mathcal{V}$  en petites cellules permet de calculer le champ total  $\mathbf{E}$  à l'intérieure de chaque cellule, en résolvant un système d'équations linéaires  $\mathbf{T}\mathbf{E} = \mathbf{E}_p$ , où chaque élément de la matrice  $\mathbf{T}$  représente l'effet de chaque cellule sur les autres cellules. La matrice  $\mathbf{T}$  est une matrice pleine non symétrique si la taille des mailles n'est pas uniforme et de dimension  $3N \times 3N$  (3dipôles pour chaque cellule). On remarque que seul l'effet d'une cellule sur elle-même nécessite un calcul d'intégrale analytique puisque l'on se situe alors sur un point singulier ( $\mathbf{r} = \mathbf{r}_s$ ).

Pour  $N$  cellules, on obtient  $3N$  inconnues. Si toutes les cellules ont la même dimension et si  $\sigma_s$  est uniforme à l'intérieur des corps, la matrice  $\mathbf{T}$  est symétrique.

