



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

L.39

(05/2000)

SÉRIE L: CONSTRUCTION, INSTALLATION ET
PROTECTION DES CÂBLES ET AUTRES ÉLÉMENTS
DES INSTALLATIONS EXTÉRIEURES

**Etude des sols avant l'utilisation des techniques
de tunnelage**

Recommandation UIT-T L.39

(Antérieurement Recommandation du CCITT)

Recommandation UIT-T L.39

Etude des sols avant l'utilisation des techniques de tunnelage

Résumé

La présente Recommandation décrit les principales techniques permettant d'effectuer une étude des sols afin d'obtenir des informations sur la position des objets enterrés et la nature du terrain. Ces données sont nécessaires pour planifier l'exécution de travaux utilisant des techniques sans tranchée et pour optimiser le trajet de forage, afin d'éviter d'endommager à la fois les infrastructures existantes et les équipements de forage et d'empêcher ainsi tout échec de forage dû à des obstacles ou aux caractéristiques du terrain.

La présente Recommandation donne des lignes directrices relatives aux exigences générales des trois phases des travaux de reconnaissance: opérations préliminaires, études sur site et édition de cartes d'usage général.

Source

La Recommandation L.39 de l'UIT-T, élaborée par la Commission d'études 6 (1997-2000) de l'UIT-T, a été approuvée le 12 mai 2000 selon la procédure définie dans la Résolution 1 de la CMNT.

AVANT-PROPOS

L'UIT (Union internationale des télécommunications) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications. L'UIT-T (Secteur de la normalisation des télécommunications) est un organe permanent de l'UIT. Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

La Conférence mondiale de normalisation des télécommunications (CMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'étude à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

L'approbation des Recommandations par les Membres de l'UIT-T s'effectue selon la procédure définie dans la Résolution 1 de la CMNT.

Dans certains secteurs des technologies de l'information qui correspondent à la sphère de compétence de l'UIT-T, les normes nécessaires se préparent en collaboration avec l'ISO et la CEI.

NOTE

Dans la présente Recommandation, l'expression "Administration" est utilisée pour désigner de façon abrégée aussi bien une administration de télécommunications qu'une exploitation reconnue.

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un Membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

A la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT n'avait pas été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux responsables de la mise en œuvre de consulter la base de données des brevets du TSB.

© UIT 2001

Droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'UIT.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1	Domaine d'application 1
2	Opérations préliminaires 1
3	Etude sur site 1
3.1	Détection d'objets enterrés 2
3.2	Etude du sol 3
4	Edition de cartes de réseaux de services publics 7
	Appendice I – Méthodes d'étude des sols actuellement disponibles 8
I.1	Méthodes par forage 8
I.2	Sondages et forages 9
I.3	Méthodes d'excavation pour exploration des sols 10
I.4	Explorations géophysiques 10

Recommandation UIT-T L.39

Etude des sols avant l'utilisation des techniques de tunnelage

1 Domaine d'application

La présente Recommandation:

- décrit les opérations préliminaires qui sont nécessaires avant d'exécuter une étude directe sur le terrain;
- décrit les principales méthodes et techniques qui peuvent être utilisées pour étudier les sols et donne des instructions relatives à certaines procédures opérationnelles;
- fournit des conseils sur la manière de produire la carte finale de la zone étudiée.

2 Opérations préliminaires

Dès la première étape de la conception, il est essentiel d'obtenir toutes les informations disponibles concernant les réseaux de services publics existants et la nature du sol sur le site. Ces informations sont de nature:

- statutaire/administrative;
- technologique (par exemple présence de réseaux d'utilité publique ou d'obstacles);
- géolithologique, hydrogéologique ou géotechnique.

Les mesures suivantes sont par conséquent recommandées:

- consulter la documentation existante disponible sur les éventuels travaux réalisés dans la zone (par exemple, la mise en place de réseaux de services publics);
- rassembler toutes les informations administratives détaillées relatives aux autorisations, au suivi et aux essais des réseaux d'utilité publique existants;
- contacter les services techniques des autorités locales afin d'obtenir des comptes rendus géologiques et géotechniques sur les travaux réalisés dans la zone;
- recueillir, auprès des conseils des arts locaux ou des musées, des informations archéologiques et historiques relatives au site d'intervention;
- contacter les entreprises qui ont auparavant travaillé sur site afin d'obtenir des informations plus précises, notamment dans le cas de réseaux de services publics potentiellement dangereux (par exemple: conduites de gaz) ou d'utilité publique (par exemple: câbles d'alimentation et câbles téléphoniques des hôpitaux).

3 Etude sur site

Afin de réduire au minimum les risques d'erreur dus à l'utilisation de cartes obsolètes ou aux éventuelles différences entre plans "d'étude" et plans "d'exécution", une étude directe du site doit être effectuée.

Des techniques disponibles pour détecter les objets enterrés et effectuer une étude des sols sont décrites ci-après.

3.1 Détection d'objets enterrés

3.1.1 Géoradar (GPR, *ground penetrating radar*)

Outre son utilisation normale, pour localiser des objets en l'air, le radar peut également détecter des discontinuités sous la surface du sol. Une antenne plane transmet une onde électromagnétique dans le sol et le rayonnement rétrodiffusé est reçu par une autre antenne puis traité afin d'extraire les informations concernant les objets enterrés. En général, toute discontinuité des caractéristiques électromagnétiques du sol (constante diélectrique et conductivité) est détectée. Les objets peuvent être classés en fonction de leur géométrie: surfaces planes, objets longs et minces (câbles et canalisations), objets localisés.

Les systèmes de radar à impulsion temporelle à large bande disponibles dans le commerce sont généralement proposés avec une large gamme d'antennes permettant de répondre aux différents types d'exploitation requis.

La profondeur de pénétration dans le sol est limitée par l'affaiblissement du signal: la pénétration augmente aux grandes longueurs d'ondes mais la résolution est plus élevée aux longueurs d'ondes plus courtes, de sorte que le choix de la fréquence est en général un compromis entre les deux. Par ailleurs, la profondeur de reconnaissance est strictement liée à la nature du terrain: les géoradars fonctionnent mieux dans les sols secs et granulaires et il est possible qu'ils ne puissent pas "voir" loin dans des sols gorgés d'eau ou dans de l'argile dense.

Dans des conditions ambiantes moyennes, on utilisera des antennes de moyenne fréquence (400-600 MHz) pour atteindre une profondeur de reconnaissance allant jusqu'à 2 mètres et des antennes basse fréquence (100-200 MHz) pour atteindre des profondeurs de reconnaissance allant jusqu'à 3 mètres.

La plupart des antennes ont des empreintes relativement petites, ce qui signifie que des relevés rapides et couvrant une large zone ne peuvent être réalisés qu'au moyen de systèmes de radar multicanaux. Ces systèmes utilisent plusieurs antennes montées selon un agencement fixe permettant l'acquisition d'une grande quantité d'informations dans une période de temps relativement courte, ce qui facilite ainsi l'interprétation finale des résultats de sondage.

Dans des zones urbaines notamment, il est recommandé d'utiliser des systèmes radar multicanaux, disposant d'un réseau d'antennes, afin d'améliorer la probabilité de détection des réseaux services publics souterrains et de réduire ainsi le temps de recherche global.

Pour interpréter correctement les données radar, une procédure d'étalonnage devrait être effectuée. Etant donné que l'étalonnage manuel sur site peut entraîner une altération des informations, il est recommandé de collecter les données non étalonnées sur site et de les traiter ultérieurement au moyen des algorithmes d'étalonnage automatiques. On évite de cette manière les erreurs d'étalonnage sur site, la procédure d'étalonnage automatique ultérieure pouvant ainsi être relancée lorsque des résultats non satisfaisants sont obtenus.

Le système d'acquisition des équipements de géoradar modernes comprennent un micro-ordinateur relié aux antennes, l'ensemble étant monté sur chariot pour faciliter les manœuvres. L'opérateur a un aperçu immédiat des données obtenues sur le terrain, ce qui peut être utile pour l'interprétation finale des résultats.

L'un des points déterminants des opérations effectuées sur le terrain est la l'établissement d'un système de référence dans l'environnement local auquel les données radar devraient être rapportées avec exactitude afin de produire des cartes précises des réseaux de services publics enterrés.

Il est par conséquent nécessaire de définir sur la zone d'étude une ligne de référence (ligne zéro) de préférence correspondante à une ligne existante (par exemple: un mur, le bord d'un trottoir, etc.) représentant l'un des deux axes du système de coordonnées locales, et une origine des axes (point zéro).

De cette manière, en effectuant des relevés le long des lignes à une distance connue des axes, tous les profils de géoradar, avec la position correspondante de chaque objet détecté, peuvent être automatiquement liés au système de coordonnées locales.

Pour déterminer la position des profils de géoradar par rapport au système de coordonnées locales, on utilisera une roue d'arpentage directement reliée au chariot de géoradar.

3.1.2 Localisateurs de câbles et canalisations

La plupart des localisateurs fonctionnent par détection des signaux électromagnétiques générés autour des câbles "sous tension" et peuvent fonctionner à diverses fréquences pour s'adapter aux lignes électriques et aux réseaux de télécommunication. Un localisateur de canalisations métalliques peut être utilisé comme simple détecteur de métal mais il est nécessaire de l'utiliser conjointement à un émetteur induisant un signal dans la canalisation un signal, qui peut être recueilli par un récepteur.

Certains systèmes disponibles peuvent suivre le trajet de canalisations en fonte et autres métaux à des profondeurs allant jusqu'à 10 m.

La localisation de canalisations non métalliques est plus difficile et ne peut être réalisée que s'il est possible de faire rouler ou de tirer un petit émetteur dans la canalisation tout en suivant le signal au moyen d'un récepteur à la surface. Pour suivre des canalisations de gaz ou d'eau non métalliques, on utilisera les localisateurs conjointement à un émetteur normalisé relié à un bloc de connexion à l'extrémité d'un fil semi-rigide enrobé introduit dans la canalisation.

3.2 Etude du sol

Une étude géologique, du fait de son étendue et par conséquent de ses coûts, devrait se fonder sur des informations bibliographiques disponibles de la zone ainsi que sur des informations recueillies à partir d'une étude sur site.

Les techniques de reconnaissance utilisées peuvent être réparties en deux classes: les méthodes directes et les méthodes géophysiques.

Les techniques de reconnaissance directes comprennent principalement des méthodes de forage et d'excavation ainsi que des sondages mécaniques. Toutes ces méthodes sont fondées sur l'observation directe d'échantillons du sol et sur le résultat d'essais mécaniques qui donnent ainsi des informations stables sur la nature du sol dans les zones proches des points étudiés.

En matière d'exploration géophysique, certains paramètres physiques tels que la résistance électrique, le magnétisme ou la vitesse de propagation des ondes peuvent être mesurés par des capteurs permettant d'interpréter les caractéristiques du terrain. Ces techniques permettent d'effectuer des études non destructives et certaines d'entre elles permettent également des études continues sur de larges zones.

De tels systèmes d'exploration géophysiques fournissent des informations sur le profilage des couches rocheuses, définissent les limites des zones de sol granulaire et de dépôts organiques importants. Ils permettent une définition générale des conditions subsurfaciques, y compris la profondeur des eaux souterraines.

Cependant, il existe des limites aux informations obtenues par ces méthodes et il est recommandé de ne pas s'attendre à ce qu'elles donnent des résultats fiables ou utiles pour toutes les conditions souterraines.

En règle générale, pour parvenir à un compromis adéquat entre le temps et le coût de l'étude, la fiabilité des résultats obtenus et l'impact sur le site d'intervention, les mesures suivantes doivent être prises:

- exécuter des sondages mécaniques ou recueillir des échantillons du sol en effectuant des forages en un nombre limité de points le long de la ligne objet de l'étude et extrapoler les données en utilisant les résultats obtenus en continu au moyen d'une méthode géophysique appropriée;
- consulter, pour s'assurer d'une utilisation optimale de ces techniques de reconnaissance, des géologues ou des techniciens expérimentés tant en matière de sol qu'en matière de théorie géophysique, afin de déterminer l'applicabilité des procédures géophysiques à la zone objet de l'étude.

3.2.1 Méthodes de reconnaissance directe

Les sondages ont généralement l'avantage d'être rapides et peu coûteux comparés aux forages. Pour obtenir un grand nombre d'informations, il est possible d'utiliser plusieurs sondages au lieu d'un seul sondage. En outre, les sondages peuvent être utilisés pour obtenir des renseignements supplémentaires entre forages, à moindre coût, une fois qu'il a été vérifié que les conditions varient entre les forages. Les sondages sont particulièrement utiles lorsqu'ils sont réalisés pour obtenir des informations sur la stratification, informations qui normalement ne seraient disponibles qu'après avoir réalisé des forages supplémentaires à un stade ultérieur de l'exploration.

Des excavations suffisamment larges pour permettre la présence d'une ou de plusieurs personnes constituent l'un des moyens d'exploration les plus valables et les plus sûrs dans la mesure où elles permettent un examen détaillé des matériaux souterrains sur le site.

Il est recommandé:

- d'utiliser des sondages pour réaliser des cartes pédologiques dès les premiers stades de l'exploration, lorsque le nombre de forages qui peuvent être réalisés est en général limité;
- d'intégrer les résultats obtenus par sondage à d'autres données afin d'éviter les résultats fallacieux dus à la présence d'obstacles localisés (gravier, rochers, bouts de bois, etc.);
- de limiter l'utilisation des méthodes d'excavation au creusage des puits nécessaires au tunnelage, afin de réduire les obstacles au trafic et aux piétons sur le site.

3.2.2 Méthodes géophysiques

3.2.2.1 Méthode par résistivité électrique

Les explorations souterraines utilisent deux types de reconnaissance par résistivité, à savoir le profilage électrique horizontal et le profilage électrique vertical.

Le profilage électrique horizontal est réalisé en maintenant un espacement constant entre les électrodes au fur et à mesure qu'elles sont déplacées sur une zone donnée et une mesure de la résistivité est effectuée pour chaque nouvel emplacement des électrodes. Les données obtenues d'une série de ces cheminements graphiques sur une zone particulière peuvent être représentées sous la forme d'un ensemble de contours de résistivité égale. Le profilage horizontal électrique peut être utilisé pour délimiter une zone de dépôt de sol perméable, pour localiser des plans défectueux et des surfaces de contact à très fort pendage entre différents matériaux.

Les sondages électriques verticaux sont réalisés en maintenant le centre des jeux d'électrode en un emplacement donné et en effectuant une série de mesures de résistivité au fur et à mesure que l'espacement entre les électrodes augmente. Lorsque l'espacement entre les électrodes augmente, la

profondeur du matériau, qui influe sur la résistivité, augmente également et toute modification de matériau est reflétée par les valeurs de résistivité obtenues. Le sondage électrique vertical est utilisé pour estimer la profondeur jusqu'à la roche, jusqu'au sable et au gravier, les couches aquifères ainsi que pour estimer l'épaisseur de ces couches.

Il est par conséquent recommandé de prendre les mesures suivantes:

- utiliser le profilage électrique horizontal pour fournir des informations relatives aux variations latérales des matériaux subsurfaciques;
- utiliser le sondage électrique vertical pour fournir des informations sur la variation des matériaux subsurfaciques en fonction de la profondeur.

Une technologie récente fait appel à la méthode de la résistivité électrique en utilisant des réseaux électriques constitués de dizaines ou de centaines d'électrodes qui sont quelquefois espacées de moins d'un mètre, disposées le long des profils et des surfaces. Le réseau fournit des images électriques du sol à la fois en coupe 2-D et en plans, à diverses profondeurs pour donner finalement des images tridimensionnelles. La propriété physique est fondée sur la mesure de la résistivité électrique en courant continu ou pulsé au moyen de quadripôles ou de bipôles dont l'espacement géométrique augmente en fonction de la profondeur.

Pour améliorer la qualité des mesures de résistivité, il est nécessaire:

- d'utiliser du courant alternatif à très faible fréquence afin d'éliminer les effets de la polarisation et d'atteindre des profondeurs plus importantes;
- d'utiliser la couverture multiple des points de mesure pour améliorer le rapport signal/bruit;
- d'utiliser des logiciels du commerce permettant un bon traitement des données brutes.

Les principaux inconvénients de la méthode sont:

- la nécessité d'implanter un grand nombre d'électrodes dans le sol;
- le nombre important d'opérateurs nécessaires pour une exploitation rapide sur le terrain.

En conséquence, il est préférable d'utiliser cette méthode dans les zones rurales et de limiter son utilisation dans les zones urbaines et suburbaines.

En outre, en règle générale, pour obtenir des données fiables, on emploiera les méthodes de résistivité électrique en association aux méthodes de reconnaissance par forage.

3.2.2.2 Systèmes électromagnétiques

Ces systèmes consistent à mesurer la tension induite produite entre les électrodes d'un système à sondes multiples lorsqu'un courant d'induction est injecté dans le sol.

Les méthodes d'induction étant appliquées, ces systèmes ne nécessitent pas d'électrodes placées dans le sol, de sorte que plusieurs kilomètres de profil de reconnaissance par jour peuvent être réalisés; on utilisera ces méthodes lorsqu'une réponse rapide est nécessaire pour créer des cartes ou des profils dans lesquels les variations de résistivité électriques sont attribuées à des variations lithologiques, présence d'eau, etc., tant dans le sens vertical qu'horizontal.

3.2.2.3 Sismique-réflexion superficielle haute résolution

L'exploration par sismique-réflexion est une technique utilisée pour détecter les frontières de couches souterraines continues. Des ondes sismiques sont générées artificiellement au-dessus du sol et les ondes réfléchies, induites par les modifications de l'impédance acoustique (par exemple les limites de couches), sont mesurées par de multiples capteurs géophoniques (géophones) placés sur le sol et finalement traitées.

L'exploration par sismique-réflexion est une technique développée dans le domaine de l'exploration de ressources telles que le pétrole et le charbon; elle permet de réaliser des études de sol allant jusqu'à mille mètres de profondeur. Pour effectuer les études de sol à des profondeurs moindres (jusqu'à 10 m) avant d'utiliser des techniques sans tranchée, il est nécessaire d'utiliser un équipement spécial ainsi que des techniques de traitement de données. Par ailleurs, notamment en environnement urbain, il est nécessaire de réduire les dimensions générales de l'équipement afin de limiter les obstacles à la circulation sur le site.

Il est recommandé:

- d'utiliser des ondes longitudinales (au lieu d'ondes transversales), qui sont plus efficaces en matière d'exploration à faible profondeur car elles se déplacent plus lentement dans le sol que les ondes transversales. De cette manière, elles ont, à la même fréquence, une longueur d'onde plus courte et les signaux réfléchis ont par conséquent une meilleure résolution;
- d'utiliser des machines de source sismique capables de générer, de manière répétée, les ondes longitudinales stables.

En outre, en environnement urbain, il convient d'utiliser des capteurs géophoniques montés sur un socle mécanique qui peut être déplacé simultanément pour éviter la pose de géophones dans le revêtement de la chaussée et ainsi réduire le temps d'intervention.

3.2.2.4 Géoradar

Outre leur utilité pour localiser des discontinuités dans le sol, les géoradars peuvent également révéler les caractéristiques du terrain. La rétrodiffusion électromagnétique du sol est traitée afin d'en extraire les informations relatives aux propriétés du sol: conductivité du sol, teneur en eau et granulométrie.

Les propriétés du sol peuvent être déduites en analysant la signature électromagnétique de la réponse du terrain. L'efficacité de cette analyse est améliorée par l'utilisation de radars à multifréquence et multipolarisation.

Il est par conséquent nécessaire d'effectuer des études multifréquences au moyen d'antennes à fréquences moyennes (400-600 MHz) et à fréquences basses (100-200 MHz), et de réaliser des études en multipolarisation par acquisition de données radar copolarisées et contrapolarisées.

Les deux types de données, en multifréquence et en multipolarisation, devraient être utilisés pour l'extraction des caractéristiques du sol; en conséquence, toutes les données devraient être obtenues simultanément afin de s'assurer qu'elles correspondent aux mêmes volumes de terrain.

On utilisera un système radar multivoies comprenant un réseau d'antennes pour permettre l'acquisition simultanée de données en multifréquence et en multipolarisation et ainsi réduire la durée globale de l'étude.

Les études par radar multifréquence et multipolarisation peuvent permettre de produire des profils continus des caractéristiques du sol. L'étalonnage de ces informations au moyen de carottes échantillons améliore la qualité des résultats.

Il est par conséquent recommandé:

- d'étalonner les données radar au moyen de carottes échantillons afin d'améliorer la fiabilité des résultats de l'étude.

3.2.2.5 Etude des eaux souterraines

Il existe deux types d'étude des eaux souterraines: celui qui est utilisé pour déterminer les niveaux et pressions d'eaux souterraines et celui qui est utilisé pour déterminer la perméabilité des matériaux subsurfaciques. Le premier type comprend des mesures permettant de déterminer la cote de la surface des eaux souterraines (la nappe phréatique) et ses variations en fonction de la saison, de l'emplacement des nappes phréatiques et des aquifères et de la présence de pressions artésiennes. Les niveaux d'eau peuvent être mesurés dans les puits existants, dans les trous de forage ainsi que dans les puits d'observation spécialement installés à cet effet.

Il convient d'effectuer une étude permettant de déterminer la profondeur de la nappe phréatique, notamment lorsque, sur la base de la documentation existante ou des sondages précédents, il est possible de considérer que la trajectoire de forage pourrait être plus profonde que la nappe phréatique.

4 Edition de cartes de réseaux de services publics

L'un des principaux aspects des études de sol pour la détection de réseaux de services publics souterrains est l'élaboration de cartes pouvant être facilement utilisées par les opérateurs lors des travaux d'installation ou de maintenance sur le site.

Le rapport final donnera le détail des caractéristiques particulières du sol selon les prescriptions de l'utilisateur.

Il convient de tracer la carte finale montrant la position des réseaux de services publics détectés selon le même système de coordonnées que celui adopté sur le terrain de manière à faciliter la corrélation entre la carte et l'environnement local.

Il est également nécessaire d'indiquer sur la carte tous les réseaux de services publics potentiellement dangereux (par exemple, les canalisations de gaz) ou importants pour le public (par exemple, les lignes d'alimentation et les lignes téléphoniques des hôpitaux).

Le logiciel de post-traitement de certains systèmes GPR modernes disposent d'une liaison avec un poste CAD permettant de transférer directement sur une carte numérique les informations relatives à la position et à la profondeur des réseaux de services publics souterrains détectés.

Lorsqu'une cartographie numérique existante de la zone étudiée est disponible, il convient d'intégrer les informations relatives à la position des réseaux de services publics détectés à la cartographie existante, en mettant directement à jour cette dernière.

Ceci est extrêmement important, notamment dans des environnements urbains où le sous-sol est quelquefois encombré par la présence de nombreux réseaux de services publics différents.

Dans certains cas, du fait des obstacles ou des conditions de circulation, une ou plusieurs parties du site ne peuvent être étudiées. Pour éviter tout risque, l'utilisateur final de la carte de réseau de services publics devra en être informé.

Par conséquent, il est nécessaire de représenter les zones non étudiées sur la carte du site en question. Ces informations peuvent être obtenues directement à partir des données radar lorsque le géoradar est directement relié au poste CAD.

Méthodes d'étude des sols actuellement disponibles

I.1 Méthodes par forage

Un forage peut être défini comme un trou vertical, incliné ou horizontal percé dans le sol et dont l'objet principal est d'obtenir des échantillons des morts-terrains ou des matériaux rocheux présents, ce qui permet de déterminer la stratigraphie et/ou les caractéristiques techniques de ces matériaux. En outre, le trou foré peut être utilisé pour la détermination sur place de caractéristiques techniques telles que la perméabilité et la résistance au cisaillement, la détermination de la pression latérale des terres, l'observation des fluctuations dans le niveau des eaux souterraines, la détermination des pressions d'eau interstitielles au moyen de piézomètres introduits dans les trous de forage et la mesure des déformations en installant des dispositifs tels que des extensomètres.

La procédure utilisée pour les sondages de reconnaissance peut être divisée en deux opérations principales:

- 1) creuser le trou à une profondeur permettant d'obtenir des échantillons;
- 2) effectuer un échantillonnage du sol ou de la roche.

La diversité des matériaux rencontrés ainsi que la nécessité d'obtenir des échantillons destinés à des fins différentes ont donné lieu au développement de nombreuses techniques et types d'équipement. Les méthodes d'avancement du forage sont classées selon la manière dont les matériaux sont enlevés. Parmi les techniques couramment utilisées, citons le déplacement, l'échantillonnage contenu, le forage à la tarière, le forage à injection, le forage percutant, le forage par rotation (rotary) et le forage par perforation. Les techniques d'échantillonnage des sols sont généralement classées en fonction de la configuration mécanique de la sonde pédologique et/ou le nom de son concepteur. Les types couramment utilisés sont les échantillonneurs hélicoïdaux, les échantillonneurs à godets et les tarières à tige creuse, les carottiers pleins et en deux demi-coquilles, les carottiers Shelby à tube, les carottiers d'échantillons rocheux à simple et double paroi avec trépan au diamant ou au carbure, sondeuse à grenaille, et autres.

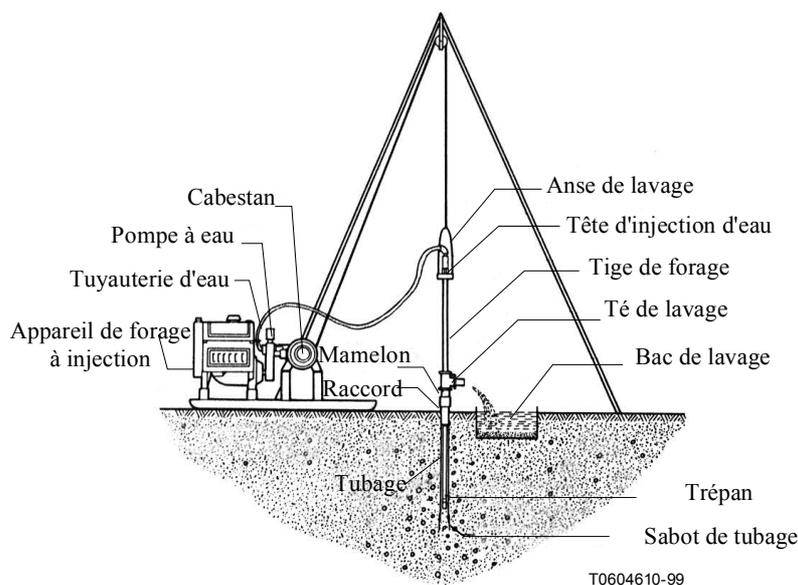


Figure I.1/L.39 – Schéma de méthode de forage (Forage à injection)

La machine utilisée pour avancer le trou et prélever des échantillons (voir Figure I.1), communément appelée appareil de forage, constituée en général d'un moteur, d'une pompe à eau ou d'un compresseur d'air, d'un treuil et d'un trépied, d'un mât à quatre montants ou tour de forage. Un moteur fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement d'un marteau du tubage et d'un treuil pour lever et descendre les équipements de forage et de carottage. Ce moteur fournit également le mouvement nécessaire à la rotation des tarières ou des équipements de carottage ainsi que la pression vers le bas pour enfoncer les sondeurs dans le sol. Une pompe à eau ou un compresseur d'air fourni l'eau ou l'air sous pression pour l'enlèvement des débris du trou de forage et pour le refroidissement et fleurets rotatifs. Un treuil est utilisé pour lever ou descendre les outils de forage et le tubage.

L'ensemble sélectionné dépend de la disponibilité des appareils de forage spécifiques, de l'emplacement du site, des matériaux à pénétrer, du type de prélèvement, de la taille et de la profondeur du trou et de la méthode de pénétration.

I.2 Sondages et forages

Les termes sondage et forage sont utilisés indifféremment pour décrire la méthode d'exploration qui utilise une tige pour pénétrer les terrains de couverture au moyen d'une charge dynamique et statique; un enregistrement continu ou semi-continu de la résistance à la pénétration est ainsi obtenu. La résistance à la pénétration est utilisée pour délimiter les changements de matériaux et pour mettre en corrélation la résistance à la pénétration et les diverses caractéristiques du sol.

Dans sa forme la plus simple, l'appareillage utilisé pour effectuer les sondages est constitué d'une pointe conique fixée à une tige en acier appelée pénétromètre conique (voir Figure I.2). Les sondages consistent à pousser ou à entraîner la pointe dans le sol et à enregistrer la pression nécessaire pour réaliser une pénétration spécifiée ou le nombre de frappes requis pour le battage de la pointe, avec un poids et une chute spécifiques du marteau.

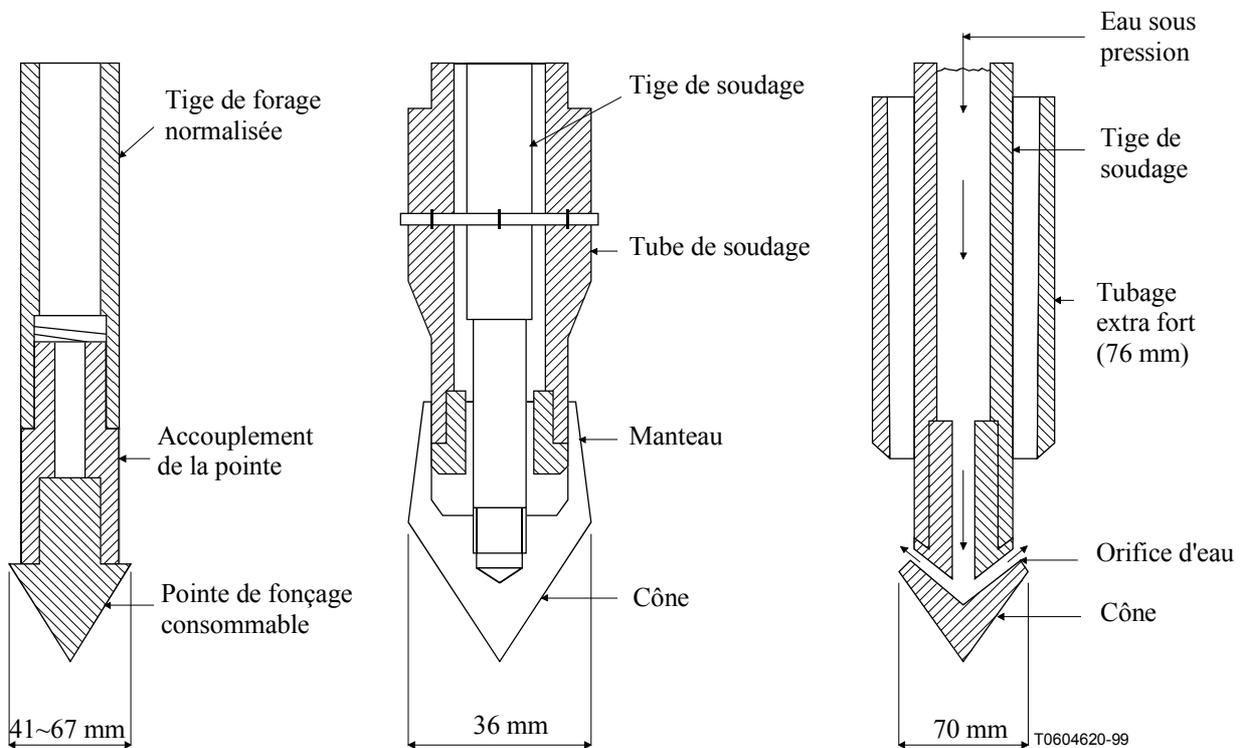


Figure I.2/L.39 – Exemples de pénétromètres à pointe conique

Les sondages sont principalement utiles pour réaliser des cartes pédologiques dès les premiers stades de l'exploration, lorsque le nombre de forages qui peuvent être réalisés est en général limité; Les sondages sont généralement plus rapides à réaliser et moins onéreux que les forages. Pour obtenir plus d'informations, il est possible d'utiliser plusieurs sondages au lieu d'un seul forage. En outre, les sondages peuvent être utilisés pour obtenir à moindre coût des informations supplémentaires entre les forages une fois que l'on s'est assuré que les conditions du sol, entre forages, sont variables. Les sondages sont particulièrement utiles lorsqu'ils sont réalisés pour obtenir des informations sur la stratification qui ne serait normalement disponible que si des forages supplémentaires sont réalisés à une étape ultérieure de l'exploration.

Cependant, les sondages ne permettent pas d'obtenir des échantillons ou ne fournissent que des échantillons de lavage et par conséquent, il n'est pas possible d'identifier définitivement les couches par sondage uniquement. En outre, il faut tenir compte de l'éventualité de résultats fallacieux dus à la présence de gravier ou de rochers ou encore de bois dans les couches du sol. L'interprétation des résultats obtenus à partir des sondages nécessite par conséquent une expérience considérable, notamment dans les cas où la corrélation entre résistance à la pénétration et caractéristiques techniques des sols n'est pas encore élaborée.

I.3 Méthodes d'excavation pour exploration des sols

Les excavations qui sont suffisamment larges pour permettre l'entrée d'une ou de plusieurs personnes constituent le moyen d'exploration le plus valable et le plus sûr étant donné qu'il permet d'examiner en détail les matériaux subsurfaciques sur le site. Ils constituent également un moyen d'obtenir des prélèvements de grande taille des matériaux rencontrés.

Les puits et tranchées d'essai peuvent être creusés manuellement ou au moyen d'équipements motorisés tels qu'excavatrices, rétrocaveuses, bouteurs, et autres types d'engins de construction. Il est également admis d'utiliser des appareils de forage spécialement conçus à cet effet tels que les tarières à godets de grande taille. Les équipements motorisés sont limités par le fait qu'il n'est pas recommandé de les utiliser en des lieux où les échantillons à prélever doivent rester intacts.

La taille de l'excavation dépendra principalement de l'espace nécessaire à une fouille efficace et est limitée par des considérations d'ordre économique. Les puits d'essai ont normalement une section carrée ou un diamètre de 1 à 3 m. Les tranchées d'essai ont d'habitude une largeur de 1 à 2 m et peuvent être étendues à toute longueur nécessaire pour étudier le terrain le long d'une ligne spécifique. En général, les tranchées d'essai sont relativement peu profondes tandis que les puits d'essai peuvent être profonds. Cependant, du fait de leur coût, il est d'usage de limiter la profondeur des puits d'essai au minimum.

I.4 Explorations géophysiques

I.4.1 Méthodes sismiques

Les méthodes sismiques sont fondées sur le fait que les ondes de choc se déplacent à des vitesses différentes dans les différents types de matériaux. Étant donné que la vitesse de propagation de l'onde dépend de nombreux facteurs tels que la densité, l'humidité, la texture, le vide et les constantes élastiques, il est possible de déterminer la nature et la stratification des matériaux subsurfaciques. Cependant, la plupart des matériaux subsurfaciques ne sont pas homogènes et ont des caractéristiques anisotropiques, ce qui complique quelque peu l'analyse des données d'exploration sismiques.

En matière d'exploration sismique, les impulsions artificielles sont produites par des explosions, des vibrations, des perturbations mécaniques ou autres perturbations à la surface du sol ou à faible profondeur dans un trou donné. Ces chocs artificiels génèrent trois types d'ondes, notamment des ondes de compression, des ondes de cisaillement et des ondes de surface; en général, seules les ondes de compression sont observées. Celles-ci sont placées en ondes directes réfléchies ou réfractées. Les ondes directes ont des trajectoires approximativement droites de la source d'impulsion à la surface. Les ondes réfléchies ou réfractées subissent un changement dans le sens de la propagation lorsqu'ils rencontrent une frontière séparant des milieux ayant des vitesses sismiques différentes. Des ondes qui sont renvoyées lorsqu'elles rencontrent une telle frontière sont appelées ondes réfléchies et celles qui subissent un changement ou une inflexion du sens de propagation sont dites réfractées. En matière d'exploration technique, on utilise principalement les méthodes sismiques de réfraction et de réflexion pour établir des profils subsurfaciques. La méthode de réfraction est celle qui est le plus souvent utilisée dans le domaine du génie civil car les méthodes de réflexion se limitent à fournir des informations sur les matériaux subsurfaciques à des profondeurs supérieures à quelque 150 mètres sous la surface du sol.

Lorsqu'il s'agit d'explorer des couches de sols très peu profondes (jusqu'à 10 mètres) dans des zones urbaines, il est nécessaire de tenir compte des problèmes liés aux interférences entre les ondes réfléchies et la surface ainsi que les ondes directes qui rendent plus difficiles le traitement des données acquises.

Des techniques spéciales ont été élaborées pour détecter les frontières de couches peu profondes sur la base de la réflexion des ondes longitudinales. Les ondes longitudinales ont une longueur d'onde plus courte que celle des ondes transversales de la même fréquence, ce qui permet une meilleure résolution. En outre, et tandis que l'eau souterraine affecte les ondes transversales qui présentent donc un contraste de vitesse plus faible dans les couches sous la surface des eaux souterraines, les ondes longitudinales ne sont pas influencées par les nappes phréatiques.

Les sources sismiques qui génèrent les ondes longitudinales utilisent généralement la méthode qui consiste à taper sur une planche. Un poids est placé sur une planche et on applique manuellement une force de frappe sur le côté de la planche pour générer des ondes longitudinales à partir de la force de frottement qui en résulte. Cependant, la personne doit frapper directement la planche, ce qui signifie que cette méthode nécessite une grande quantité de main-d'œuvre et ne peut produire des ondes stables de manière répétée. En outre, le fait de frapper la planche constitue une source de nuisance sonore importante, ce qui rend cette méthode inadéquate pour les zones urbaines.

Les machines de sources sismiques conçues pour être utilisées dans les environnements urbains ont été récemment élaborées. Ces sources génèrent des ondes longitudinales en soulevant un marteau au moyen d'un vérin puis en laissant tomber le marteau librement sur la planche. Le principe est le même que la méthode générale d'impact sur la planche, mais elle permet des frappes répétées ayant la même énergie. Cette source sismique peut générer des ondes longitudinales capables d'explorer des profondeurs d'environ 15 mètres.

Précédemment, les mesures étaient effectuées en insérant dans le sol les tiges auxquelles sont directement fixés des géophones; cette méthode n'était réalisable que sur des sites nus tels que les montagnes et les plaines. Les zones pavées des villes où des tiges doivent être insérées sont limitées, de sorte que de nouveaux systèmes ont été élaborés. On a donc conçu des socles en aluminium qui pouvaient être facilement installés à la surface du sol et facilement déplacés: le poids du socle génère des forces de frottement à la surface du sol, ce qui permet de recevoir des vibrations souterraines.

Les méthodes sismiques peuvent être utilisées en mode surface, fond de trou ou transversal. Dans le système fond de trou (en puits), l'émetteur et le récepteur sont montés dans la même sonde, verticalement séparés par une distance connue. En mode transversal, le récepteur est placé dans un trou de forage alors que l'émetteur est placé dans un autre trou acoustiquement "perceptible" à partir du trou du récepteur.

Outre l'établissement de profils subsurfaciques, les méthodes sismiques peuvent également être utilisées pour déterminer les caractéristiques techniques du sol et des roches, en calculant localement la vitesse des ondes de compression et parfois les ondes de cisaillement.

I.4.2 Méthode par résistivité électrique

La méthode par résistivité électrique en exploration subsurfacique est fondée sur le fait que différents matériaux offrent différentes résistances au passage d'un courant électrique. Ainsi, en déterminant les variations de résistance verticales et latérales, il est possible d'induire la stratification et l'extension latérale des dépôts subsurfaciques. Cette méthode permet de déterminer la résistance au passage du courant en mesurant la résistance spécifique des matériaux qui est définie comme étant la résistance en ohms entre les faces opposées d'un cube unité de matériaux (voir Figure I.3). La résistivité des particules est élevée dans les sols; de la même manière, la résistivité des eaux souterraines, si elles sont pures, est également élevée. Par conséquent, tout passage de courant dans une masse de sol donnée, du fait de la présence de sels dissous dans les eaux souterraines, s'effectuera presque exclusivement par action électrolytique. En conséquence, la résistivité d'un sol dépend principalement de sa teneur en humidité et de la concentration de ces sels dissous. Elle est également influencée à des degrés divers par le rapport de vide, la taille des particules, la stratification, et la température. De la même manière, dans des roches autres que des dépôts minéralisés, la résistivité dépend principalement de la teneur en humidité et de la concentration des sels dissous dans les eaux souterraines. Elle est également affectée par la porosité, le pendage, la direction, la solidité et la température.

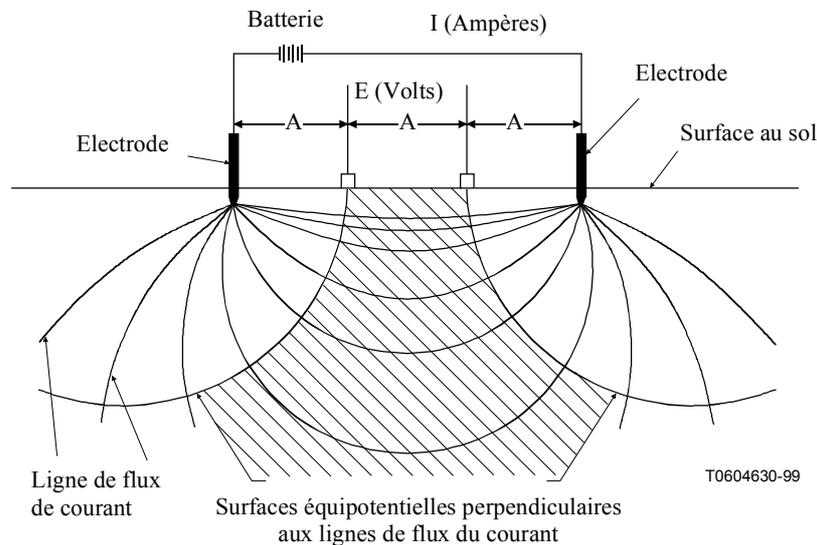


Figure I.3/L.39 – Méthode par résistivité électrique

La méthode d'exploration par résistivité électrique doit être utilisée conjointement aux forages s'il est nécessaire d'obtenir des données fiables. En général, elle n'est pas aussi précise ou fiable que la méthode sismique. Cependant, elle constitue un moyen d'exploration plus rapide et plus économique. Les équipements nécessaires ont un coût initial plus faible et sont entièrement portables.

I.4.3 Géoradar

Les explorations des conditions subsurfaciques au moyen de systèmes de radars à impulsions appelés radars de sondage du sol (GPR: géoradar) ou encore systèmes électromagnétiques de détermination du profil subsurfacique (ESP, *electromagnetic subsurface profiling*) ou radars d'interface subsurfacique (SIR, *subsurface interface radar*) ont été utilisées avec succès dans le domaine du génie civil. Ces méthodes ont été utilisées dans de nombreuses applications parmi lesquelles la détermination continue du profil de couche entre forages, la détermination de profil de la surface de couche rocheuse et de nappe phréatique, la détection de vides dans les sols et les rochers, la détection de vides dans et sous les revêtements de chaussées, la localisation de réseaux de services publics et objets enterrés, la détection de trous dans les sous-couches d'argile et la localisation de barres d'armatures dans les revêtements des chaussées. Comme pour les autres méthodes d'exploration géophysiques, il est nécessaire de réaliser des forages de corrélation et d'étalonnage lorsque la technique est utilisée pour délimiter les conditions subsurfaciques. Par ailleurs, ces méthodes nécessitent l'assistance d'un spécialiste capable d'interpréter les données géophysiques en termes techniques.

Ces méthodes consistent à émettre dans le sol des rayonnements d'impulsions électromagnétiques répétitives à partir de la surface et d'enregistrer la durée de la trajectoire des impulsions réfléchies de la surface du sol et des discontinuités du profil subsurfacique. La durée de trajectoire des impulsions réfléchies est utilisée pour déterminer la profondeur jusqu'aux discontinuités et pour délimiter ces discontinuités. La réflexion des signaux radar est due à des différences de conductivité des matériaux traversés par le signal et aux constantes diélectriques correspondantes des matériaux pénétrés.

Les équipements utilisés dans le domaine du sondage des sols au radar comprennent un générateur d'impulsions radar, des antennes basses et hautes fréquences qui sont utilisées tant pour transmettre le signal radar appliqué que pour recevoir les signaux réfléchis, un enregistreur graphique ou un ordinateur portable. Les antennes à hautes fréquences (300 à 900 MHz) donnent une résolution de détails supérieure à faible profondeur tandis que les antennes à basse fréquence (80 à 120 MHz) assurent une meilleure pénétration mais avec une résolution moindre. Des objets d'une taille allant jusqu'à 3 cm peuvent être détectés à une profondeur de 1 m au moyen d'antennes de 900 MHz et une pénétration jusqu'à une profondeur de 20 m pour une résolution d'environ 1 m peut être obtenue avec des antennes de 80 à 120 MHz.

Les signaux des géoradars pénètrent dans les tubages en PVC, dans l'huile ou dans l'eau, mais sont notablement atténués par l'acier, les suspensions épaisses de boue bentonitique ou eau salée.

On a récemment développé de nouvelles conceptions de systèmes radar permettant d'améliorer la fiabilité des résultats des études et de réduire le temps nécessaire à la reconnaissance. Les principales caractéristiques de ce système sont:

- réseau multi-antenne et multivoie;
- outils de post-traitement puissants;
- liaison directe avec des systèmes de conception assistée par ordinateur (CAD, *computer aided design*) et système d'information géographique (GIS, *geographical information system*).

Le "réseau radar" est constitué de plusieurs antennes qui fonctionnent simultanément et améliorent de manière significative la probabilité de détection de réseaux publics ou autres cibles souterraines. Ces systèmes peuvent acquérir plusieurs voies radar différentes qui peuvent être monostatiques, bistatiques, copolarisées et transpolarisées, ce qui permet d'adapter la configuration du réseau à différentes exigences applicatives. En outre, l'architecture du réseau d'antennes permet d'obtenir une analyse tridimensionnelle du terrain (voir Figure I.4).

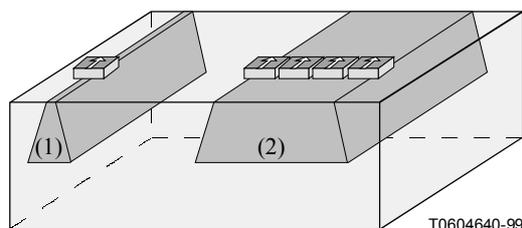


Figure I.4/L.39 – Comparaison entre: (1) – Reconnaissance 2D (une seule antenne) (2) – Reconnaissance 3D (réseau d'antennes)

Le plus souvent, les résultats obtenus sont:

- un ensemble de coupes (verticales) de radar parallèles (voir Figure I.5), où les cibles sont représentées en géométrie déformée;
- des vues (horizontales) de radar planimétriques présentant des tranches du sous-sol (voir Figure I.6), dans lesquelles la géométrie réelle de la cible a été reconstruite.

Ce second type de représentation, utile pour une vue rapide et synthétique du site, est obtenu grâce à l'utilisation d'un réseau d'antennes.

Certains systèmes radar permettent de transférer automatiquement dans un environnement CAO les informations relatives aux réseaux de services publics et autres objets enterrés, produisant ainsi la carte finale du site étudié.

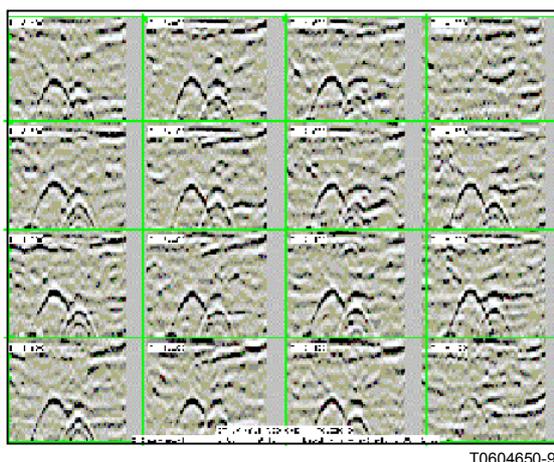


Figure I.5/L.39 – Représentation de sections radar multiples

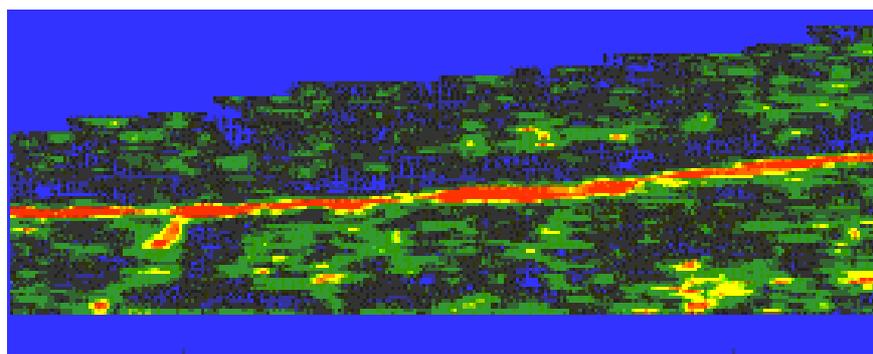


Figure I.6/L.39 – Vue planimétrique d'une canalisation

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série B	Moyens d'expression: définitions, symboles, classification
Série C	Statistiques générales des télécommunications
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
Série G	Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques
Série H	Systèmes audiovisuels et multimédias
Série I	Réseau numérique à intégration de services
Série J	Transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	RGT et maintenance des réseaux: systèmes de transmission, de télégraphie, de télécopie, circuits téléphoniques et circuits loués internationaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Qualité de transmission téléphonique, installations téléphoniques et réseaux locaux
Série Q	Commutation et signalisation
Série R	Transmission télégraphique
Série S	Equipements terminaux de télégraphie
Série T	Terminaux des services télématiques
Série U	Commutation télégraphique
Série V	Communications de données sur le réseau téléphonique
Série X	Réseaux de données et communication entre systèmes ouverts
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information et protocole Internet
Série Z	Langages et aspects informatiques généraux des systèmes de télécommunication