

Diagraphies et géophysique de forage

par **Richard LAGABRIELLE**

Ingénieur Civil des Mines

Docteur ès Sciences

Directeur technique

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

1. Généralités sur les diagraphies.....	C225v2 — 2
2. Diagraphie de radioactivité naturelle (RAN ou γ ray naturel).....	— 3
3. Diagraphie de résistivité.....	— 5
4. Diagraphie microsismique.....	— 6
5. Diagraphies gamma-gamma et neutron-neutron	— 8
6. Géophysique de forage.....	— 9
7. Tomographie sismique.....	— 11
8. Tomographie électromagnétique.....	— 14
9. Radar de forage en mode réflexion.....	— 16
10. Conclusion générale.....	— 17
Références bibliographiques	— 18

Les diagraphies et la géophysique de forage font partie de la panoplie des méthodes auxquelles on a recours pour reconnaître le terrain sur lequel on a des projets de construction d'ouvrage de génie civil. Parmi les techniques géophysiques, elles sont caractérisées par un mode particulier de mise en œuvre puisqu'elles sont employées en forage.

Pour ce qui concerne les principes généraux de la géophysique et les bases des différentes méthodes, nous renvoyons à l'article « Géophysique appliquée au génie civil ». Cependant, nous rappelons ici les définitions de la géophysique de forage et des diagraphies en précisant dans quelles circonstances elles sont plus particulièrement indiquées.

Nota : l'article [C 224] « Géophysique appliquée au génie civil » replace la géophysique dans l'ensemble des méthodes de reconnaissance des sols.

1. Généralités sur les diagraphies

1.1 Définition

Les **diagraphies** sont des **techniques géophysiques** mises en œuvre à l'intérieur d'un forage. Le rayon du volume d'investigation n'est pas beaucoup plus grand que celui du forage.

Elles servent à mesurer *en place* un paramètre physique caractéristique du terrain, avec la meilleure résolution verticale possible. Elles ne permettent pas (contrairement aux techniques géophysiques de forage) d'augmenter le rayon d'investigation du forage ni de porter un jugement sur le caractère représentatif des informations obtenues à partir du forage.

Elles sont complémentaires des techniques géophysiques de surface qui, elles, permettent d'obtenir des informations représentatives d'importants volumes de terrain mais avec une résolution moins fine (on connaît le terrain « en gros » mais on ne distingue pas les détails).

Le résultat d'une diagraphie se présente donc sous la forme d'une courbe dans un système de coordonnées où la profondeur est indiquée sur un axe vertical orienté vers le bas et le résultat de la mesure (résistivité, densité, vitesse d'avancement...) est indiqué sur un axe horizontal (cf. les figures de cet article).

Vocabulaire : le terme « **diagraphie** » est le terme français, qui désigne aussi bien la technique que le résultat de la mesure sous forme d'une courbe.

La diagraphie étant très développée dans le domaine de l'exploration pétrolière où le jargon anglais règne en maître, les termes **logging** (pour les techniques) et **log** pour la courbe (log signifie **enregistrement**) sont peut-être plus souvent employés que le mot diagraphie, dont ils sont synonymes.

1.2 Classification

Nous ne parlerons ici que des diagraphies les plus fréquemment utilisées en génie civil. Cela ne signifie pas que celles qui ne sont pas citées sont sans intérêt. Le code de bonne pratique en géophysique [2] a recensé 24 techniques de diagraphies qui sont appliquées dans tous les domaines de la reconnaissance et de la prospection (pétrole, mine, hydrogéologie, environnement, géologie...). Certaines de ces méthodes, non citées dans cet article, peuvent être employées de manière fructueuse en génie civil, mais elles le sont rarement.

On peut classer les diagraphies en deux premières grandes catégories : les diagraphies instantanées et les diagraphies différées.

1.2.1 Diagraphies instantanées

Elles sont réalisées pendant la foration : durant le processus même du forage, on réalise des mesures dont le résultat est fonction de la profondeur de l'outil de forage. Les diagraphies instantanées sont soit l'enregistrement des paramètres de forage, soit des diagraphies géophysiques.

■ La plus fréquente des diagraphies d'enregistrement des paramètres est la **diagraphie de vitesse d'avancement**. On comprend que plus le terrain est facile à forer, plus le forage peut se réaliser rapidement. La diagraphie de vitesse d'avancement donne donc une infor-

mation sur les propriétés mécaniques du terrain traversé par le forage. Naturellement, cette vitesse dépend aussi du type d'outil, de la machine utilisée pour le forage et de la manière dont le foreur règle sa machine. On constate souvent qu'une machine de forage très performante est peu sensible aux propriétés du terrain et ne donne qu'une diagraphie de vitesse d'avancement peu contrastée, tandis qu'une machine plus traditionnelle donne de meilleurs résultats concernant les variations avec la profondeur des propriétés de terrain.

La diagraphie de vitesse d'avancement doit, d'une part, être calibrée en fonction du type de machine utilisée. D'autre part, elle est réalisée en maintenant tous les réglages techniques le plus constants possible (couple de rotation, poussée sur l'outil, pression du fluide, etc.).

Les diagraphies instantanées de ces **autres paramètres de forage** sont donc complémentaires de la diagraphie de vitesse d'avancement.

■ Un autre type de diagraphies instantanées est employé dans le domaine de l'exploration pétrolière et est actuellement en cours de mise au point pour la reconnaissance en génie civil. Il s'agit des « **diagraphies en cours de foration** » connues par les pétroliers sous le nom de « *measurements while drilling* ». Ce sont des diagraphies géophysiques proprement dites (de radioactivité naturelle, de résistivité...), telles que celles que nous allons évoquer plus en détail ci-après, mais où les instruments de mesure se trouvent au voisinage de l'outil de forage pendant la réalisation même du forage.

Les diagraphies instantanées ne sont pas l'objet principal de cet article, mais c'est l'occasion de rappeler leur importance pratique : les diagraphies des paramètres de forage sont d'un faible coût et les renseignements complémentaires qu'elles apportent sont souvent très utiles.

Lorsque l'on réalise un forage, on se prive d'une information riche si l'on n'enregistre pas en même temps ne serait-ce que la vitesse d'avancement instantanée.

■ La figure 1 donne un exemple avec trois diagraphies différentes dans un même forage.

- Dans la couche **calcaire** superficielle, une couche **altérée** (de 0 à 3 m), est caractérisée par une forte vitesse d'avancement, une radioactivité moyenne et une faible résistivité, tandis que le calcaire **sain** (de 3 à 6 m) est plus difficilement foré, il est peu radioactif et électriquement résistant.

- La **couche d'argile** (de 6 à 10 m) est caractérisée par une forte vitesse d'avancement (mais qui décroît en profondeur), une radioactivité forte et une faible résistivité.

- La **couche de schiste** se divise en trois :

- dans la partie la moins profonde (de 10 à 12 m), la vitesse d'avancement est encore relativement forte, la radioactivité faible et la résistivité faible : c'est un schiste **fortement fissuré**, les fissures n'étant pas remplies d'argile (faible radioactivité, faible résistivité) ;

- le schiste **sain** (de 12 à 16 m) est plus radioactif et plus résistant ;

- la couche de schiste **peu altéré** montre une radioactivité moyenne et variable avec une résistivité assez forte ; autour de 18 m, la vitesse d'avancement est plus forte et la radioactivité est localement plus forte ; il s'agit d'une altération argileuse.

- Le substratum de **diorite** (à partir de 26 m) montre une faible vitesse d'avancement, une radioactivité assez forte et une forte résistivité. Entre 31 et 33 m, on remarque une zone à faible radioactivité et faible résistivité, il s'agit d'une **zone fissurée** non argileuse.

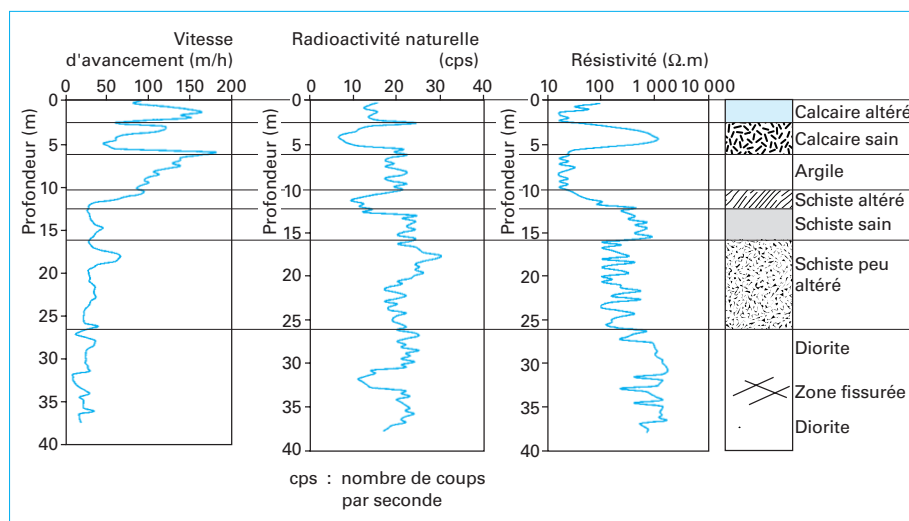


Figure 1 – Trois diagraphies différentes dans un même forage recoupant un recouvrement sédimentaire sur un substratum cristallin

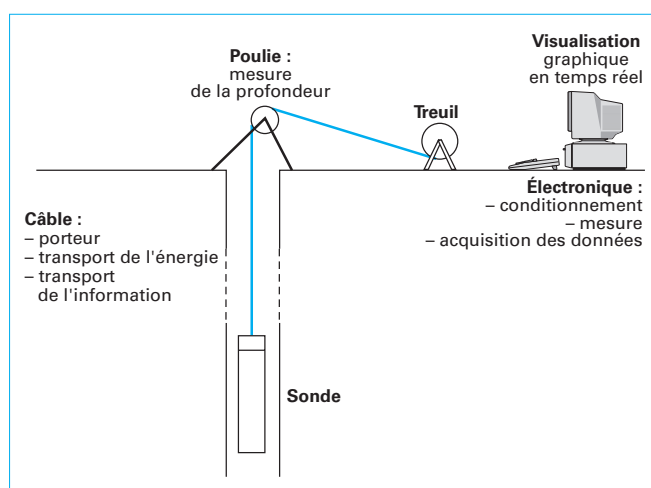


Figure 2 – Schéma général d'un matériel de diagraphie

1.2.2 Diagraphies différées

Elles sont l'objet principal de cet article. Elles consistent à mesurer depuis l'intérieur du forage l'une des grandeurs physiques caractéristiques du terrain telles que celles définies dans l'article [C 224] (§ 2.2 et 3^e colonne du tableau 1).

■ Ces diagraphies sont toujours réalisées à partir d'une sonde descendue dans le forage et reliée à la surface du sol par l'intermédiaire d'un câble. Celui-ci s'enroule autour d'un treuil en passant par une poulie posée sur un trépied à l'aplomb du forage (figure 2).

Le **câble** remplit plusieurs fonctions.

- Il est porteur ; il supporte le poids de la sonde et ne doit pas s'allonger, car sa longueur sert à mesurer la profondeur de la sonde ; celle-ci doit être connue avec une précision meilleure que 0,5 % (soit 5 cm à 10 m de profondeur...).
- Il transporte l'énergie nécessaire à l'alimentation des circuits électroniques situés dans la sonde.
- Il transporte l'information entre l'instrumentation située dans la sonde et celle qui est en surface. Si tous les circuits sont analogiques, cette information ne circule que de la sonde vers la surface ;

elle est constituée par le résultat de la mesure. Si l'instrumentation utilise une technologie numérique, l'information circule dans les deux sens, sous forme numérique.

Le **treuil** doit pouvoir enrouler et dérouler le câble de manière continue à vitesse régulée ; il peut comporter un dispositif de mesure de la longueur du câble, sinon c'est la poulie qui porte un capteur « roue codeuse » (figure 2).

■ Nous décrivons ci-dessous cinq techniques de diagraphies. Trois sont qualifiées de diagraphies légères et deux de diagraphies lourdes.

● Les **diagraphies lourdes** sont les diagraphies qui utilisent une source radioactive ; ce sont des diagraphies de radioactivité provoquée. Le qualificatif « lourd » tient au fait qu'elles sont complexes à mettre en œuvre, en particulier à cause des problèmes de sécurité, et qu'elles sont donc assez coûteuses. Nous citerons (§ 5) :

- la diagraphie **gamma-gamma**, qui sert à mesurer la masse volumique des matériaux ;
- la diagraphie **neutron-neutron**, qui sert à mesurer la teneur en eau.

● Les **diagraphies légères** sont les autres diagraphies ; elles sont plus simples à mettre en œuvre et posent moins de problèmes de sécurité. Nous citerons :

- la diagraphie de radioactivité naturelle (§ 2) ;
- la diagraphie de résistivité (§ 3) ;
- la diagraphie microsismique (§ 4).

2. Diagraphie de radioactivité naturelle (RAN ou γ ray naturel)

C'est la technique de diagraphie la plus largement utilisée et qui est d'ailleurs à recommander systématiquement.

2.1 Domaine et conditions d'application

■ La diagraphie de radioactivité naturelle met en évidence les matériaux plus ou moins radioactifs naturellement. Parmi les matériaux sédimentaires, l'argile est le matériau courant le plus

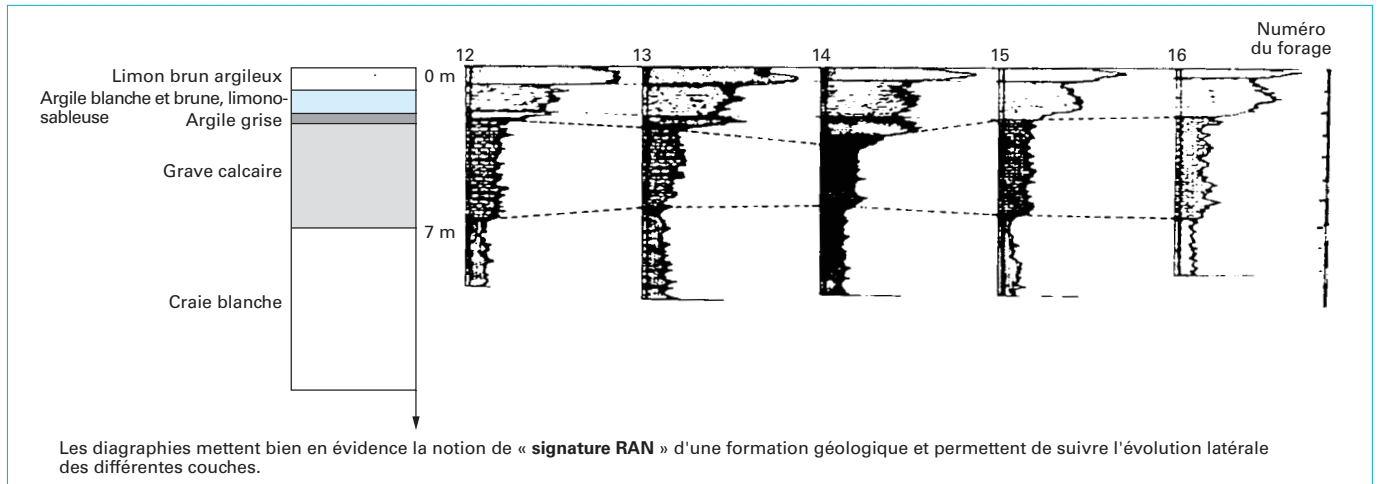


Figure 3 – Exemple de diagraphies de radioactivité naturelle dans plusieurs forages

radioactif ; c'est pourquoi la diagraphie de radioactivité naturelle s'appelle parfois, un peu abusivement, « diagraphie d'argilosité ». Parmi les matériaux cristallins, le granite (ou la rhyolite) est le plus radioactif. La RAN permet alors de distinguer le granite d'autres matériaux et, par exemple, lors de la reconnaissance d'un gisement de roches massives destinées à être exploitées en carrière, de distinguer entre différents types de granites.

Dans les **séries sédimentaires** de type alternances de calcaires, marnes, marnocalcaires, argiles, etc., les différentes couches sont caractérisées par un profil de radioactivité particulier (**signature**), que l'on retrouve d'un forage à l'autre à l'intérieur du massif. La juxtaposition des diagraphies dans les différents forages (figure 3) aide à comprendre la structure géologique du massif (variation de l'épaisseur des couches, failles, etc.).

L'exploitation de gisements de **granulats alluvionnaires** peut aussi être guidée par la mesure de la RAN, qui peut servir d'indicateur de « propreté » de granulats.

Dans les **massifs rocheux fissurés**, les fissures sont ou non remplies d'argile. Lorsqu'elles le sont, la RAN les met bien en évidence ; lorsqu'elles ne le sont pas, elles sont mises en évidence par d'autres types de diagraphies (résistivité ou microsismique), qui sont donc complémentaires pour l'étude des massifs rocheux (figure 1).

■ Concernant les conditions d'application, la diagraphie de radioactivité naturelle est très originale, car elle ne présente **aucune contre-indication**. Naturellement, elle ne donnera des résultats contrastés que si le terrain présente des contrastes de radioactivité, mais cette absence de contraste est déjà un renseignement utile.

Les forages peuvent être ou ne pas être tubés et le tubage peut être métallique ou en matière plastique. De même, les forages peuvent être noyés ou secs ; ils peuvent être de très faible diamètre intérieur, puisqu'il existe des sondes de diagraphies RAN de 2,5 cm de diamètre. Ainsi, la diagraphie RAN peut être mise en œuvre dès la fin de la foration par l'intérieur du train de tiges avant que celui-ci ne soit enlevé.

La mesure peut être parfois fortement bruitée dans les premiers mètres sous la surface du sol, lorsque le forage a été réalisé dans un terrain agricole où l'on a répandu des engrais potassiques qui contiennent du potassium 40 radioactif.

2.2 Principe et résultat fourni

Le résultat d'une diagraphie de radioactivité naturelle se présente, comme toutes les diagraphies, sous la forme d'une courbe dans un

système d'axes où la profondeur est portée sur l'axe vertical et la radioactivité mesurée, en nombre de coups par seconde (cps), est portée sur l'axe horizontal (figure 1). Cette valeur est relative, et dépend de la vitesse de remontée de la sonde dans le forage (plus cette vitesse est grande, moins la courbe est contrastée), de la nature du tubage s'il existe et du caractère sec ou noyé du forage, ainsi que de la taille du cristal qui constitue l'élément sensible du capteur.

Une sonde de diagraphie de radioactivité naturelle comporte en effet un capteur constitué d'un cristal qui transforme les impacts de photons gamma en signal électrique et d'un circuit électronique associé. C'est donc une sonde essentiellement passive. Du diamètre de la sonde dépend celui du cristal ; plus le diamètre est faible, moins le capteur est sensible et plus la vitesse de remontée doit être faible afin que le capteur reste assez longtemps à une profondeur donnée pour recevoir suffisamment d'impacts gamma pour que le signal soit mesurable (rappelons que la radioactivité est un phénomène aléatoire et qu'il faut donc effectuer un grand nombre de « tirs » pour obtenir un signal stable). L'instabilité du signal due au caractère aléatoire du phénomène est compensée par le calcul d'une moyenne à travers un circuit d'intégration pour lequel l'opérateur choisit la constante de temps d'intégration.

2.3 Autres appellations et techniques voisines

■ La diagraphie de radioactivité naturelle est souvent appelée **gamma-ray**, terme anglais, ou **gamma-ray naturel**.

■ Une technique voisine est la diagraphie de **radioactivité naturelle sélective** (RAN-S) encore appelée **gamma-ray spectral**. Elle permet de mesurer la radioactivité suivant plusieurs bandes d'énergie et donc de différencier différents éléments des roches.

Exemple

On distingue, ainsi, la radioactivité du potassium 40 (^{40}K), dont l'énergie du photon gamma est 1,46 MeV (mégaélectronvolt), et celles de l'uranium 238 (^{238}U) et du thorium 232 (^{232}Th), dont les énergies sont respectivement 2,35 MeV et 2,61 MeV.

Au prix d'une mesure plus longue et plus délicate, on caractérise mieux les matériaux en identifiant les types d'argile ou les types de granites.

2.4 Organisation et déroulement d'une campagne

■ La **conception** et la **préparation** sont assez simples. Il faut naturellement se préoccuper du diamètre des forages, afin de choisir la sonde à utiliser, du type de tubage et de la nature du fluide, s'il est présent. Ces données conduisent à fixer la vitesse de remontée de la sonde en fonction de la sensibilité désirée, qui dépend aussi du caractère plus ou moins radioactif des matériaux traversés par les forages.

■ Les **mesures** : comme pour toutes les diagraphies, la profondeur doit être connue avec une précision meilleure que 0,5 %. La mesure se fait **en remontant** car c'est ainsi que l'on contrôle le mieux la vitesse de déplacement de la sonde dans le forage. Cette vitesse doit être maintenue constante et notée (entre 2 et 6 m/min).

En outre, et cela est vrai pour toutes les diagraphies, même si l'on enregistre numériquement les mesures, il convient de visualiser en temps réel la courbe enregistrée de manière à contrôler le bon déroulement des opérations. Si, en effet, on découvre, après avoir quitté le site, que la mesure ou l'enregistrement s'est mal fait, il est souvent trop tard, alors que, sur le terrain, il n'est en général pas difficile de recommencer la mesure.

On veillera à bien noter tous les paramètres influençant la mesure ainsi que les coordonnées du forage et les réglages de l'instrumentation : gains, constantes de temps d'intégration, vitesse de remontée, diamètre, tubage, fluide.

■ L'**interprétation** se fait au vu de la courbe ou des courbes obtenues sur plusieurs forages dans la même campagne de mesure. Elle consiste (figure 3) :

- à identifier les terrains traversés par le forage à partir de leurs « signatures » RAN et de la connaissance globale que l'on a de la géologie ;
- à comparer les différentes couches pour suivre d'un forage à l'autre l'évolution de la stratigraphie ;
- à détecter d'éventuels accidents tectoniques.

On détecte les fissures dans les massifs rocheux et, en confrontant différents types de diagraphies dans le même forage, on identifie les fissures remplies d'argile ou non (celles qui sont remplies d'argile sont radioactives, celles qui en sont dépourvues ne le sont pas) (figure 1).

À ces identifications qualitatives sont associées des déterminations quantitatives, comme la profondeur des couches ou des fissures et leurs épaisseurs.

3. Diagraphie de résistivité

3.1 Domaine et conditions d'applications

■ En génie civil, la diagraphie de résistivité est indiquée lorsque l'on veut préciser la **lithologie du terrain traversé par un forage**. Elle sert aussi à l'étude de la **fracturation d'un massif rocheux**. Elle est également un complément aux campagnes de prospection électrique de surface, en donnant des informations précises sur la répartition locale des résistivités des matériaux en fonction de la profondeur ; on peut ainsi caler l'interprétation des mesures de surface en en levant les ambiguïtés. On détermine, en particulier, avec précision la profondeur des interfaces et l'épaisseur des différentes couches géologiques mises en évidence.

On a vu au paragraphe 2.2 de l'article [C 224] que la résistivité est un paramètre très discriminant des matériaux du sous-sol, car elle présente une forte étendue de variations et des contrastes importants. Comme avec la radioactivité naturelle, la juxtaposition de diagraphies de résistivité réalisées dans un ensemble de forages dans un même massif géologique renseigne sur la **structure** de ce massif, tant du point de vue de la **stratigraphie** que des accidents **tectoniques** qui peuvent l'affecter.

Dans un massif rocheux, une fracture remplie de fluide ou d'argile apparaît comme une hétérogénéité conductrice et peut être mise en évidence par la résistivité, tandis que la radioactivité naturelle ne détectera que la fracture remplie d'argile. Les deux types de diagraphies sont donc complémentaires (figure 1).

■ Les **conditions d'application** sont moins générales que pour la RAN. En effet, le contact électrique entre les électrodes portées par la sonde et le terrain doit être de bonne qualité.

Cela exclut les tubages métalliques et les tubages plastiques continus. Si le forage est tubé avec un tubage plastique, celui-ci doit être crépiné (fendu dans le sens de la longueur).

Un forage sec ne convient pas non plus, car c'est le fluide contenu dans le forage qui assure le contact électrique. Il faut donc nécessairement travailler dans un forage contenant un fluide conducteur : eau, boue ou mousse conductrice (la technique de la boue conductrice est utilisée lorsque l'on doit réaliser des diagraphies au-dessus du niveau de la nappe phréatique).

Ces conditions un peu restrictives font que les diagraphies de résistivité ne sont pas aussi souvent mises en œuvre qu'elles le mériteraient, alors que les renseignements qu'elles fournissent sur le terrain sont souvent très riches.

3.2 Principe des mesures et résultat

■ Le matériel est assez simple : la sonde de diagraphie de résistivité est un cylindre fait dans un matériau isolant qui porte des électrodes en forme d'anneaux métalliques (figure 4).

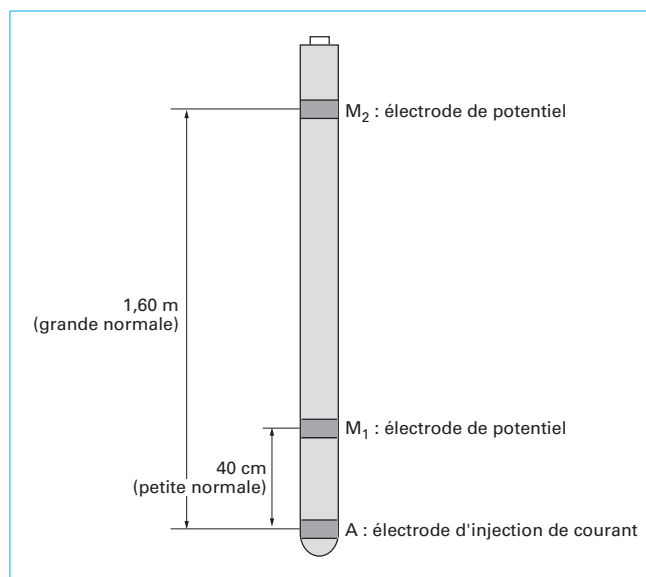


Figure 4 – Schéma de principe d'une sonde de résistivité normale

Dans les diagraphies de résistivité dites « normales », la sonde porte une électrode d'injection de courant A et deux électrodes de mesure de potentiel M_1 ($AM_1 = 40$ cm) et M_2 ($AM_2 = 1,60$ m). L'autre électrode de courant B se trouve en surface à plus de 50 m de la tête du forage, l'électrode de référence du potentiel N est aussi en surface à plus de 50 m du forage dans une direction très différente de celle de B. Si I est l'intensité du courant et V_1 et V_2 les potentiels mesurés en M_1 et M_2 , on mesure deux résistivités apparentes :

$$\rho_1 = 4\pi AM_1 V_1 / I \approx 5 V_1 / I \text{ et } \rho_2 = 4\pi AM_2 V_2 / I \approx 20 V_2 / I$$

■ On obtient donc deux courbes de diagraphies :

● La diagraphie **petite normale** ($AM_1 = 40$ cm) est très sensible aux variations rapides de la résistivité en fonction de la profondeur.

Elle donne donc une bonne résolution verticale. En revanche, le résultat est très influencé par le diamètre du forage et par le fluide qu'il contient, la précision est donc médiocre.

● La diagraphie **grande normale** ($AM_2 = 1,60$ m) est plus intégrante et moins sensible aux variations verticales de la résistivité.

La résolution est médiocre. En revanche, le résultat dépend peu du diamètre du forage et la précision est bonne.

Le résultat est donc représenté sous la forme de deux courbes où la profondeur est indiquée sur un axe vertical et la résistivité apparente en ohms-mètres sur l'axe horizontal (figure 1).

3.3 Autres appellations et techniques voisines

■ Les diagraphies **petite et grande normales** sont les plus indiquées pour la reconnaissance en génie civil.

■ Les diagraphies **en résistivité** dite focalisée sont aussi parfois utilisées (*Laterolog 7* ou *Laterolog 3*). L'appellation « *Laterolog* » est déposée par la société de prospection électrique Schlumberger.

Correctement mises en oeuvre (dans les forages *non tubés*), elles donnent théoriquement une bonne résolution verticale sans perte de précision (en particulier, dans les forages où les parois sont recouvertes d'un dépôt de boue). Leur réalisation est délicate, car, pour que la focalisation soit effective, il faut que les électrodes de surface B et N soient installées avec beaucoup d'attention afin que leur résistance de prise soit faible, ce qui peut être assez difficile.

L'instrumentation, plus complexe que pour les diagraphies normales, est aussi plus fragile, si bien que l'emploi des diagraphies focalisées n'est pas à préconiser en génie civil.

■ La diagraphie dite **monoélectrode** consiste à descendre dans le forage une simple électrode de courant A tandis que B reste en surface ; on mesure les variations de la résistance du circuit d'injection du courant, qui est la somme de deux résistances de prises A et B. Comme celle de B est constante, ces variations reflètent les variations de la résistance en A, fonction des résistivités des matériaux au voisinage de A : fluide et terrain proche.

On n'obtient pas une diagraphie de résistivité, mais la courbe obtenue présente une très bonne résolution.

3.4 Organisation et déroulement d'une campagne

■ La **conception** et la **préparation** consistent à s'assurer que les forages sont adaptés à la diagraphie de résistivité, c'est-à-dire que, s'ils sont tubés, seul un tubage plastique crépiné est acceptable

(§ 3.1) ; s'ils ne contiennent pas déjà un fluide conducteur de l'électricité, il faut envisager un atelier de fabrication et d'injection de mousse conductrice (qui doit être biodégradable).

Avant les mesures, on doit s'assurer que les deux électrodes de surface sont suffisamment loin de la tête de forage (plus de 50 m) et que leur résistance de prise est compatible avec les performances de l'instrumentation, en termes de capacité d'injection du courant et d'impédance d'entrée du voltmètre.

■ L'appareil de mesure doit pouvoir mesurer la résistance de transfert V/I avec une erreur inférieure à 3 % et la profondeur de la sonde doit pouvoir être connue à 0,5 % près.

Enfin, il faut pouvoir visualiser l'enregistrement en temps réel, même si l'acquisition finale des données est numérique.

■ L'**interprétation** consiste à identifier les matériaux traversés par le forage au moyen de leur résistivité et de la connaissance préalable que l'on peut avoir de la géologie locale. On détecte les fractures et on compare l'enregistrement de la résistivité à celui de la radioactivité naturelle ; on détermine alors si elles sont remplies ou non d'argile (figure 1).

En confrontant plusieurs diagraphies électriques sur des forages différents, on peut préciser la structure géologique du massif en termes de stratigraphie et de tectonique.

Enfin, ces données qualitatives sont complétées par les informations quantitatives de profondeurs et d'épaisseurs. Les résistivités mesurées en place et les épaisseurs des couches peuvent servir à préciser l'interprétation quantitative des résultats d'une prospection électrique de surface.

4. Diagraphie microsismique

4.1 Domaine et conditions d'application

■ La diagraphie microsismique est une excellente méthode pour l'**étude détaillée** des **massifs rocheux**. Elle consiste à mesurer en place la vitesse de l'onde mécanique de compression, celle-ci étant très sensible à l'état du rocher et à ses propriétés mécaniques en général.

La diagraphie microsismique permet, en outre, de détecter les **fractures**.

On s'en sert donc pour prévoir l'aptitude au terrassement des massifs rocheux, pour préparer les plans de tir pour leur minage et pour régler ces plans de tir en fonction de la taille des blocs que l'on désire extraire.

Les applications principales sont la préparation de la réalisation de déblais rocheux et l'exploitation des carrières de roches massives, soit pour fabriquer des granulats, soit pour fabriquer des enrochements.

■ Les forages ne doivent pas être tubés, car un bon contact mécanique est nécessaire entre les sources sismiques, les capteurs et le rocher. Les forages peuvent ou non contenir un fluide.

4.2 Principe de la mesure et résultat

■ La sonde est constituée par **trois éléments** reliés par des amortisseurs (*silent block*), qui maintiennent la structure de la sonde mais empêchent les vibrations de se propager d'un élément à l'autre (figure 5).

● Le premier élément porte la **source sismique**, qui est un petit marteau pneumatique.

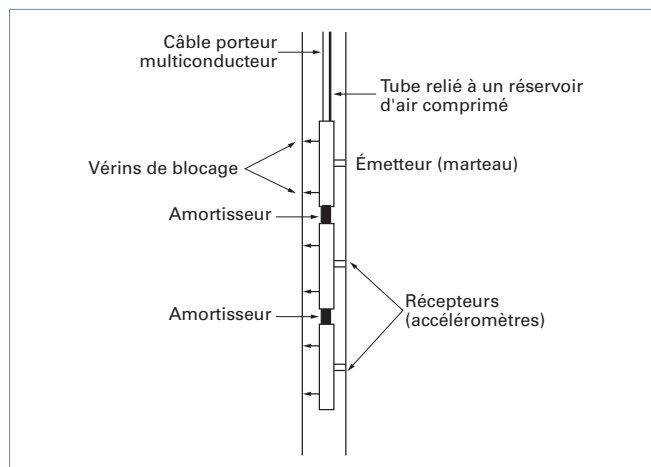


Figure 5 – Schéma de principe d'une sonde microsismique

- Le deuxième élément porte un **accéléromètre** à environ 35 cm de la source.

- Le troisième élément porte un **autre accéléromètre** à environ 35 cm du premier accéléromètre.

La source et les deux accéléromètres peuvent entrer ou sortir de la sonde grâce à de petits vérins qui les déplacent perpendiculairement à l'axe ; les autres vérins, placés sur la génératrice opposée aux instruments, permettent de bloquer la sonde dans le forage et d'assurer un bon contact mécanique entre source, capteur et rocher.

Outre le câble porteur qui transporte l'alimentation électrique et les signaux sismiques, la sonde est reliée à la surface par un petit tuyau souple résistant à la pression (tube de polyamide), pour transmettre la pression de l'air comprimé nécessaire à l'action des vérins et de la source sismique.

■ Contrairement au cas des diagraphies de résistivité et de radioactivité naturelle, la mesure se fait point par point, la source devant être bloquée au forage pour chaque mesure.

L'énergie élastique se propage entre la source et le capteur le plus proche dans le rocher au voisinage de la paroi, là où le terrain a été plus ou moins endommagé par la foration ; elle se propage entre la source et le capteur le plus éloigné dans une zone plus profonde derrière la paroi du forage, là où le terrain n'a pas été affecté par la foration.

Le pas de mesure est généralement de 35 cm. Il y a donc un recouvrement des bases de mesure correspondant à la plus grande des deux distances source-capteur.

Les deux signaux sismiques, synchronisés avec la source, sont remontés en surface, visualisés sur un oscilloscope à mémoire numérique disposant d'un curseur de pointé et les deux temps de trajets, correspondant à la petite et à la grande distance source-récepteur, sont mesurés et notés. Les signaux peuvent éventuellement être enregistrés pour un traitement ultérieur.

La division de la longueur de chacune des distances source-récepteur par chacun des deux temps de trajet donne deux vitesses de propagation (en m/s) de l'onde dans le rocher. Il serait, en fait, préférable de faire la division du temps de trajet par la longueur de la distance source-récepteur, qui donne la **lenteur** exprimée en microsecondes par mètre. L'avantage est que l'erreur sur la lenteur est proportionnelle à l'erreur sur le temps de trajet de manière uniforme sur toute l'étendue de la mesure, alors que, si l'on calcule la vitesse, l'erreur est proportionnelle à l'inverse du carré du temps, ce qui donne une erreur absolue importante pour les vitesses les plus élevées.

Le **résultat** de la mesure est constitué de **deux courbes** : la profondeur des points de mesure est portée sur l'axe vertical et les vitesses (ou les lenteurs) relatives aux deux distances source-récepteur sont portées sur l'axe horizontal (cf. exemple figure 11).

4.3 Techniques voisines

La diagraphie microsismique a été inventée par Pierre Allard pour étudier les massifs rocheux en dehors de la nappe phréatique [6], c'est-à-dire en forage sec, ce qui est un cas fréquent en génie civil.

Lorsque le forage contient de l'eau ou de la boue, celle-ci peut assurer la transmission de l'onde mécanique de compression entre les sources, les capteurs et le terrain ; en utilisant des capteurs piézoélectriques et des sources piézoélectriques ou à effet magnétostrictif, on peut éviter d'avoir à bloquer la sonde dans le forage. On réalise ainsi des diagraphies continues de vitesse de l'onde mécanique. La mesure est beaucoup plus rapide et les rendements plus élevés. Les applications sont les mêmes que pour la diagraphie microsismique. Cette diagraphie s'appelle **diagraphie sonique**.

■ Un certain nombre de **précautions** doivent être prises pour l'employer correctement.

- La sonde doit comporter deux sources symétriques par rapport au couple de récepteurs. Ces deux sources fonctionnent alternativement et c'est la moyenne des deux différences de temps de trajet entre les récepteurs qui constitue le résultat de la mesure. Ce dispositif sert à compenser les éventuelles variations du diamètre du forage.

- Le pointé des temps doit se faire en surface sur des signaux enregistrés. Le pointé automatique, fondé sur la détection d'un seuil d'amplitude, est en effet une importante source d'erreur, l'amplitude des signaux pouvant varier au cours de la remontée de la sonde.

■ Les diagraphies soniques où le signal sismique complet est enregistré (par exemple tous les 10 cm) sont dites « *full waveform* » (ou à signal sismique complet).

Le **résultat** se présente sous la forme d'une coupe-temps où les signaux sismiques sont juxtaposés. Ce type de diagraphie sonique est très riche ; il permet, en particulier, de mesurer la vitesse des ondes de cisaillement en plus de celles des ondes de compression et de suivre des fractures à l'intérieur même du terrain et par là d'avoir une idée de leur direction.

L'**interprétation** est assez délicate et affaire de spécialistes très expérimentés (figure 6).

La figure 6 donne un **exemple** d'enregistrement sonique en signal complet. La distance entre la source et le récepteur est de 3,5 m. Il y a un enregistrement tous les 50 cm environ dans le forage. Les ondes de compression P apparaissent à environ 0,6 ms, les ondes de cisaillement S à environ 1 ms. Lorsque les ondes S ne sont pas assez énergétiques, les ondes de Stoneley (ondes guidées par le trou de forage) visibles sur l'enregistrement à environ 2,3 ms permettent de calculer la vitesse des ondes S. L'exploitation de ces mesures en termes de caractéristiques dynamiques des matériaux est possible (module d'Young et coefficient de Poisson) [4].

4.4 Organisation et déroulement d'une campagne

■ La **préparation** de la campagne de mesure consiste à vérifier l'état des forages, vérifier qu'ils ne sont pas tubés, que leur diamètre est suffisant pour pouvoir y passer la sonde, mais pas trop grand pour que la course des vérins permette de la bloquer. Comme il a déjà été dit (§ 4.1), la présence d'eau n'est pas une contre-indication.

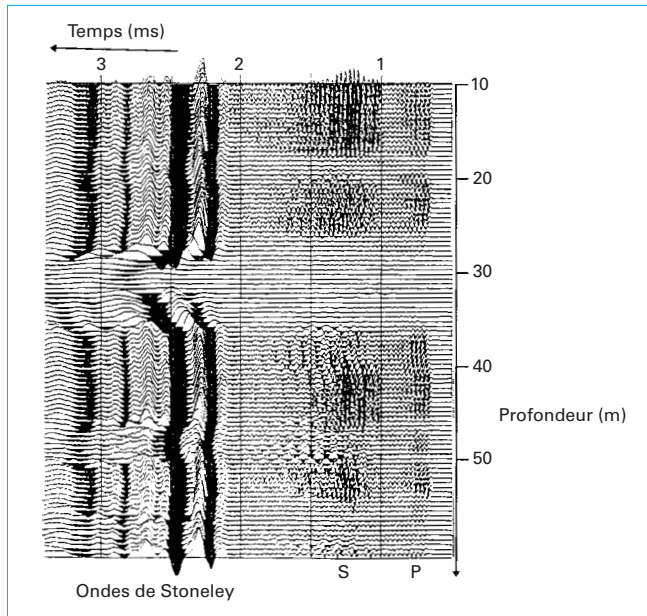


Figure 6 – Exemple d'enregistrement sonique en signal complet, d'après [4]

■ Au moment des mesures, l'**observation** des signaux sismiques sur l'écran d'un oscilloscope (ou d'un moniteur d'ordinateur) permet d'en apprécier la qualité, en particulier la qualité du couplage sonde-terrain. On peut ainsi vérifier que l'on parvient à pointer les temps de trajet avec une erreur inférieure à 10 μ s.

Le pas de mesure devra être inférieur à la plus petite des bases (distance source-récepteur) et la précision sur la profondeur meilleure que 0,5 %.

Enfin, il est nécessaire de contrôler le bon fonctionnement de l'ensemble de l'appareillage dans un tube métallique de caractéristiques connues.

■ L'**interprétation** des mesures consiste à identifier les différentes unités géologiques caractérisées par leur vitesse sismique. On identifie les fractures (vitesse plus faible sur une faible hauteur) et on compare la diagraphie microsismique avec la diagraphie de radioactivité naturelle réalisée dans le même forage. La confrontation des deux diagraphies permet de mieux identifier les unités géologiques et de distinguer les fractures remplies d'argile de celles qui ne le sont pas.

La synthèse de l'interprétation des diagraphies sur un seul forage et sur un ensemble de forages dans un même massif rocheux conduit à l'établissement de plans de tirs, qui sont fonction de la blocométrie souhaitée si l'état du massif est compatible avec cette dimension des blocs.

5. Diagraphies gamma-gamma et neutron-neutron

5.1 Domaine et conditions d'application

■ Les diagraphies de radioactivité provoquée, gamma-gamma (γ - γ) et neutron-neutron (N-N), fournissent une **information quantitative**

précise sur les grandeurs qui sont directement utilisables par le concepteur de l'ouvrage. Il s'agit respectivement de la masse volumique et de la teneur en eau des matériaux traversés par le forage.

En outre, comme les autres diagraphies, elles contribuent à la connaissance géologique du terrain : nature, profondeur et épaisseur des couches.

Les fractures sont caractérisées par une faible masse volumique et une forte teneur en eau lorsqu'elles sont noyées et ouvertes. Lorsqu'elles contiennent un autre matériau, argile ou sable, la masse volumique reste plus faible que celle de l'encaissant rocheux, mais plus forte que si elles étaient pleines d'eau et la teneur en eau plus forte que l'encaissant.

■ Les mesures de masse volumique et de teneur en eau sont **faites sur place**, dans un terrain non remanié, ce qui est particulièrement utile lorsque des échantillons intacts sont difficiles à prélever.

Une application possible (mais rare) de la mesure de la masse volumique en forage est le calage de l'interprétation des mesures de microgravimétrie réalisée en surface.

Techniquement, on peut réaliser des diagraphies de radioactivité provoquée dans des forages non tubés. Le tubage (sa nature et son épaisseur) a une influence sur les mesures, mais cette influence peut être corrigée ; de même, l'existence d'un fluide dans le forage (eau ou boue) n'interdit pas la réalisation de ces diagraphies. Il faut simplement veiller à corriger les résultats de son influence.

Cependant il faut absolument éviter de réaliser des diagraphies de radioactivité provoquée dans des forages non tubés, car la réglementation **interdit** de laisser une source radioactive dans le terrain ; il faut donc absolument éviter de coincer une sonde dans le forage.

5.2 Principes des techniques et résultats

■ En diagraphie γ - γ , la **sonde** est constituée de trois parties (figure 7).

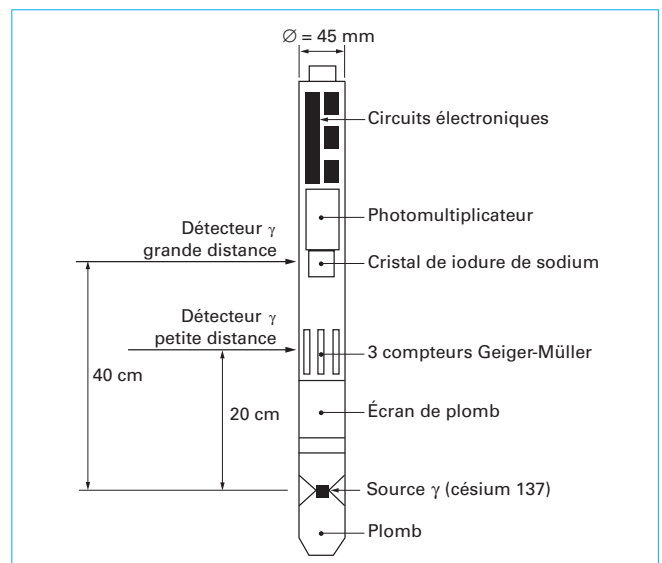


Figure 7 – Schéma de principe d'une sonde γ - γ

- Une **source de rayonnement γ** (par exemple du césium 137) émet dans toutes les directions ; ce rayonnement interagit avec le terrain et il est d'autant plus atténué que la masse volumique est forte.

- Un **premier détecteur** de rayonnement γ est séparé de la source par un cylindre de plomb, qui empêche les rayons émis par la source d'aller directement aux détecteurs ; la distance source - premier détecteur est de l'ordre de 20 cm ; le rayonnement qui parvient à ce détecteur a peu interagi avec le terrain (le trajet est court) et dépend surtout du diamètre du forage.

- Un **second détecteur**, situé à une distance double, est le capteur principal ; le rayonnement qui y parvient dépend à la fois de la masse volumique du terrain et du diamètre du forage.

On corrige donc les mesures du second détecteur avec les données obtenues avec le premier, de manière à avoir une information qui puisse être transformée en masse volumique.

■ Le principe de la diagraphie neutron-neutron est le même avec les différences suivantes (figure 8) :

- la **source de rayonnement** est une source à neutrons rapides (source d'américium-béryllium) ; le rayonnement de neutrons est arrêté ou ralenti essentiellement par les atomes d'hydrogène, donc par l'eau qui se trouve dans le terrain (les hydrocarbures sont rares dans les terrains superficiels qui intéressent la construction d'ouvrages) ;

- le **premier détecteur** est un détecteur de neutrons ; il est protégé du rayonnement direct de la source, non par du plomb, mais par du polyéthylène (riche en hydrogène) ;

- le **second détecteur** détecte, lui aussi, des neutrons.

La quantité de neutrons qui parvient au deuxième détecteur dépend principalement de la teneur en eau des matériaux ; elle dépend aussi du diamètre des forages, mais cette influence peut être corrigée grâce à la présence du premier détecteur. Elle dépend enfin, de manière non négligeable, de la composition chimique des matériaux.

Le passage des mesures à la teneur en eau est donc assez délicat et nécessite le recours à des étalonnages sur des matériaux identiques à ceux qui sont dans le forage, avec des teneurs en eau contrôlées et variées.

Certaines sondes ne présentent qu'un seul détecteur de rayonnement (γ ou neutron). Les diagraphies que l'on obtient ne peuvent pas alors être précisément traduites en termes de masse volumique ou de teneur en eau, ce qui retire de l'intérêt à ces mesures par ailleurs continues.

Cependant, on peut réaliser, dans le même forage, une diagraphie de mesure du diamètre du forage (diamètreur) qui sert à corriger les mesures γ - γ et neutron-neutron de l'influence de ce diamètre et donc accéder à la masse volumique ou à la teneur en eau.

■ Les **résultats** se présentent sous la forme de courbes qui indiquent, en fonction de la profondeur, le nombre de coups par seconde (cps) mesurés ; lorsque l'interprétation quantitative est possible, ces courbes indiquent la masse volumique et la teneur en eau (figure 9).

5.3 Techniques voisines

La **diagraphie neutron-gamma** utilise une source de neutrons et des détecteurs du rayon γ . Les neutrons rapides émis par la source sont éventuellement capturés par des atomes contenus dans le terrain. Cette capture s'accompagne de l'émission d'un photon γ , dont l'énergie dépend de l'élément chimique responsable de la capture. L'analyse spectrale du rayonnement enregistré permet d'obtenir la

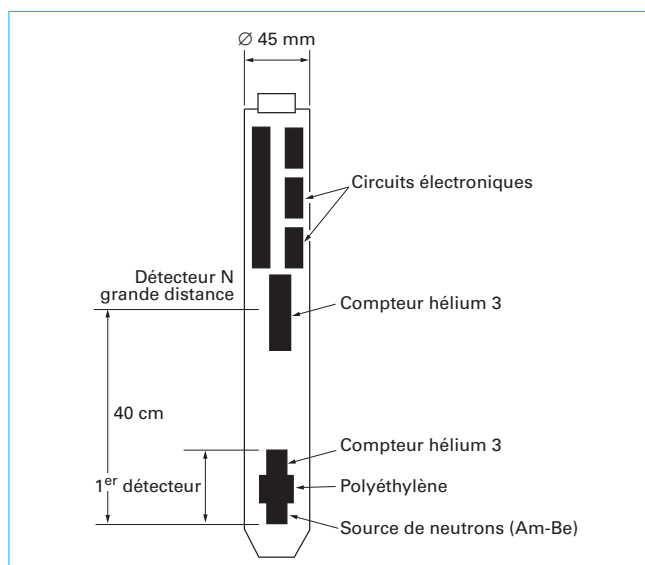


Figure 8 – Schéma de principe d'une sonde neutron-neutron

composition chimique élémentaire des roches traversées par le forage. On réalise ainsi, par exemple, des diagraphies de teneur en silicium, en fer, en aluminium, etc.

La diagraphie neutron-gamma (ou de capteur à activation neutronique) est peu employée en génie civil ; son coût élevé explique cette désaffection ; elle est davantage utilisée en exploitation minière.

5.4 Organisation et déroulement d'une campagne

■ La **conception** et la **préparation** de la campagne consiste à vérifier d'abord les caractéristiques des forages : consistance et nature des forages, consistance et nature du fluide de forage. Si le forage n'est pas tubé, on doit s'assurer de la stabilité de ses parois. Si l'on utilise des sondes à un seul détecteur, on doit associer aux diagraphies γ - γ et N-N une diagraphie de diamètre (cf. encadré § 5.2).

■ Au moment des **mesures**, la profondeur doit être connue à 0,5 % près ; la vitesse de remontée doit être régulée, connue et notée. Les enregistrements graphiques des mesures non corrigées sont visualisés en temps réel, tandis que les données sont enregistrées pour être traitées ultérieurement.

Les données sont ensuite traitées. Pour cela, on utilise les mesures issues des deux détecteurs ou d'un détecteur et d'un diamètreur. Les mesures sont, de plus, calibrées pour tenir compte du tubage et des fluides de forage. Ces traitements aboutissent à des diagraphies quantitatives de masse volumique et de teneur en eau.

■ L'**interprétation** consiste à identifier les matériaux et les formations géologiques rencontrées (éventuellement avec l'aide d'autres types de diagraphies) et à les caractériser par leur profondeur, leur épaisseur, leur masse volumique et leur teneur en eau.

6. Géophysique de forage

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

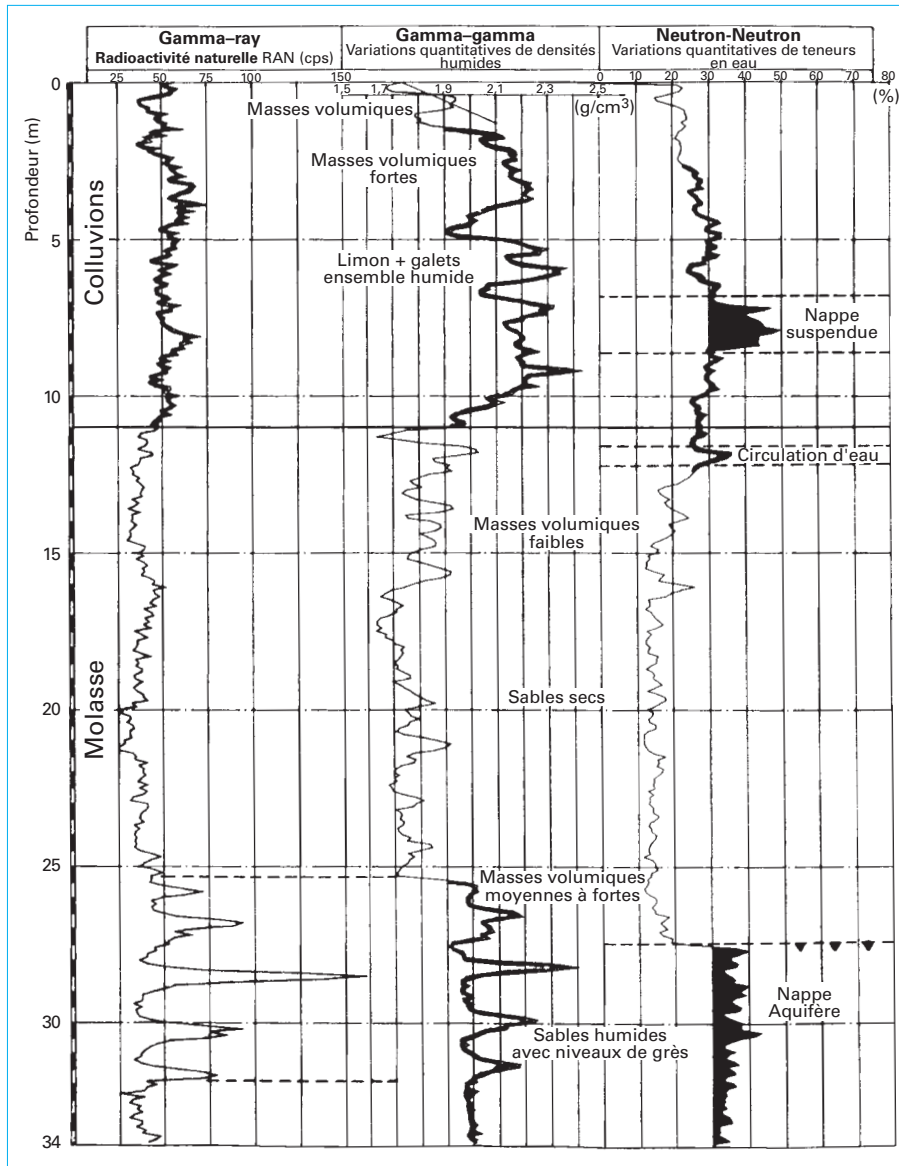


Figure 9 – Diagrammes nucléaires et leur interprétation (document Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien)

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

■ Certaines méthodes n'utilisent qu'un seul forage.

C'est le cas du radar géologique de forage en mode réflexion ou encore du cylindre électrique (nom déposé par la société EDG – Européenne de Géophysique) et la distance électrode de courant-électrode de potentiel est grande devant le diamètre du trou (elle peut atteindre la longueur du forage), de sorte que le rayon d'investigation est très grand devant le rayon de forage.

De même, dans la technique dite « down-hole », une source sismique est en surface au voisinage de la tête de forage, tandis que les récepteurs sismiques sont répartis sur toute la longueur du forage.

■ D'autres méthodes utilisent **deux forages** ou **deux forages et la surface du sol** : un des forages sert à recevoir les sources et l'autre les récepteurs. C'est le cas des méthodes de tomographie (électrique, électromagnétique, radar, sismique), ou, plus simplement, des techniques « cross-hole ». Le volume de terrain exploré est alors le terrain situé en gros entre les forages.

■ D'autres méthodes, enfin, utilisent **un forage et la surface du sol** ou un forage et une galerie... Le volume de terrain exploré se situe entre le forage et la surface ou entre le forage et la galerie...

■ Pour les techniques géophysiques de forage, les forages servent à rapprocher l'instrumentation de la cible.

Lorsque des forages sont implantés pour vérifier des anomalies géophysiques décelées en surface et que ces forages n'ont pas traversé l'hétérogénéité recherchée, on n'est pas assuré que cette hétérogénéité n'existe pas ; une technique géophysique de forage servira alors à rechercher et à caractériser l'hétérogénéité au voisinage du forage ou entre le forage et la surface ou entre deux forages.

Tableau 1 – Performances de quelques techniques géophysiques de forages pour la détection d'une petite cavité souterraine

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

La détection des cavités souterraines peut servir d'exemple pour comparer les performances des techniques géophysiques de forage. Une cavité dont le diamètre est grand devant la distance de la cavité au forage sera détectée à peu près par n'importe quelle technique géophysique de forage. Une cavité plus petite sera plus difficile à déceler.

Le tableau 1 est un résumé des performances comparées de différentes techniques pour déceler, entre deux forages séparés de 10 m, une **petite cavité** de 2 m de diamètre suivant qu'elle est vide ou remplie d'eau ou d'argile.

Une **grosse cavité** peut être détectée avec toutes les méthodes du tableau 1, sauf par les méthodes électromagnétiques dans le domaine de la propagation si l'encaissant est trop conducteur de l'électricité.

On voit que le choix de la technique la plus appropriée doit reposer sur un minimum de connaissances préalables concernant les caractéristiques des hétérogénéités à détecter et celles du terrain encaissant.

7. Tomographie sismique

7.1 Domaine et conditions d'application

■ La tomographie sismique sert à mettre en évidence des variations de propriétés mécaniques d'un terrain situé entre deux forages, entre un forage et la surface de sol ou encore entre des galeries souterraines. Elle sert aussi à explorer l'intérieur d'objets dont on peut faire le tour, comme des piles d'ouvrages d'art ou des piliers de mines ou de carrières souterraines.

Les **applications** principales sont l'étude des fondations d'ouvrages (piles de ponts ou appuis de culées de ponts, fondations de barrages), la reconnaissance du terrain de recouvrement d'un tunnel, le contrôle des injections dans le sol ou dans des ouvrages, à faible profondeur ou lors du creusement d'un tunnel à partir du front de taille. Lors du terrassement de déblais rocheux, elle permet de mettre en évidence les modifications des propriétés du terrain resté en place, provoquées par les tirs de mines pour le déroctage.

La tomographie sismique ne peut être mise en œuvre que s'il existe des forages ou des galeries dans le sol. S'il s'agit d'ausculter une structure, comme une pile de pont ou un pilier de carrière, il faut que cet objet soit accessible sur plusieurs faces. Si les forages sont tubés, le couplage mécanique entre le tubage et le terrain doit être de bonne qualité. S'agissant de mesures de vibrations, l'environnement ne doit pas être trop bruyé (engins de chantiers, circulation automobile intense...).

7.2 Principes de la technique et résultats fournis

■ Prenons, pour fixer les idées, le cas de la tomographie sismique entre deux forages. Dans l'un des forages, on descend une source d'ébranlement mécanique (détonateur, marteau bloqué à la paroi, source piézoélectrique dans un forage noyé...) et, dans l'autre forage, des récepteurs sont répartis sur toute la longueur du forage (hydrophone en forage noyé, accéléromètre ou géophones plaqués à la paroi en forage sec). On mesure, à chacun des récepteurs, le temps de trajet de l'onde mécanique de compression entre la source et le récepteur. Cette opération est répétée pour des positions successives de la source qui balayent toute la longueur du forage où elle se trouve.

Cette collection de temps de trajets, correspondant à des rayons sismiques (le plus souvent courbes) qui s'entrecroisent dans toutes les directions dans le terrain situé entre les forages, alimente un algorithme de calcul qui permet de décrire une répartition de la vitesse sismique dans le sous-sol. On conçoit que plus grand est le nombre de couples source-capteurs et plus nombreuses sont les directions dans lesquelles s'entrecroisent les rayons sismiques, mieux on est capable de décrire la répartition des vitesses dans le terrain.

On peut aussi placer les sources et/ou les récepteurs à la surface du sol, dans des galeries ou autour d'un objet de dimensions limitées ; la source peut alors être un petit marteau et les récepteurs des accéléromètres collés à la paroi (de la galerie, de la pile du pont...).

■ Le **résultat** d'une tomographie sismique est une **image** de la répartition calculée des vitesses sismiques dans le terrain exploré. Cette répartition n'est pas la seule qui soit compatible avec les

résultats des mesures. Elle doit être impérativement associée à des informations quantifiant la confiance que l'on peut accorder aux résultats de calcul. Ces informations sur la résolution et l'erreur peuvent être des cartographies dans les mêmes coordonnées géométriques que l'image des vitesses.

Dans l'exemple de la figure 10, il s'agit de l'étude de l'appui d'un pont autoroutier sur un talus rocheux. Les sources sismiques ont été placées à la surface et sur la paroi du talus tandis que les récepteurs sont à la surface et dans un forage oblique situé à l'arrière.

La figure 10 a montre le résultat de l'interprétation en terme de vitesse de l'onde mécanique dans le rocher. Elle montre l'existence de roches de mauvaise qualité (vitesse inférieure à 1 000 m/s), jusqu'à une quinzaine de mètres à l'arrière du talus. À la suite de cette auscultation, le mauvais terrain a été terrassé et l'appui de l'ouvrage reculé d'une quinzaine de mètres par rapport aux plans initiaux.

Les autres éléments de cette figure permettent de juger de la qualité des résultats présentés sur la figure 10 a.

Sur la figure 10 b, la courbe de suivi de la convergence indique, pour chaque itération de calcul, l'écart moyen quadratique entre les temps de trajet observés et les temps calculés dans le terrain caractérisé par une répartition des vitesses sismiques telle que celle représentée figure 10 a.

Sur la figure 10 c, les rayons sismiques, correspondant aux temps de trajet calculés dans le modèle de la figure 10 a, sont représentés. Les zones traversées par un grand nombre de rayons qui s'entrecroisent dans toutes les directions sont mieux caractérisées que les zones traversées par un petit nombre de rayons.

Sur la figure 10 d, on montre la répartition relative des erreurs sur les vitesses calculées. Elle quantifie la confiance que l'on peut accorder aux résultats suivant la zone de terrain considérée. Ainsi la zone à faible vitesse marquée par une flèche (figure 10 a) correspond à une erreur relative plutôt faible. On peut donc avoir confiance en l'interprétation et prendre des décisions bien fondées.

Les figures 10 e et 10 f rendent compte de la résolution spatiale autour de deux points au centre de la partie rouge foncée. Il s'agit de la cartographie de l'influence relative, sur la détermination de la vitesse en un point, des variations de la vitesse en tous les autres points du modèle ; la figure 10 f montre que la résolution est meilleure autour du point indiqué que celle qui est représentée sur la figure 10 e.

7.3 Techniques voisines

Il y a un grand nombre de variantes de la tomographie sismique.

■ La première est l'extension à trois dimensions de la technique décrite au paragraphe 7.2. On décrit alors en volume la répartition de la vitesse sismique dans l'objet à explorer. Cela nécessite une répartition des sources et des capteurs suivant des lignes qui ne sont pas coplanaires ; les mesures doivent être beaucoup plus nombreuses que dans les études à deux dimensions (2D). Cette technique d'imagerie tridimensionnelle (3D) est parfois, à tort, appelée tomographie 3D. Elle est très lourde et coûteuse et ne permet pas une aussi bonne résolution qu'en 2D, car les mesures ne sont jamais assez nombreuses.

■ Au lieu d'observer uniquement les ondes de compression (qui sont les plus faciles à observer puisqu'elles correspondent au premier temps d'arrivée de l'énergie sismique), on peut aussi mesurer le temps de trajet des ondes de cisaillement. On aboutit ainsi à une tomographie de vitesse de cisaillement qui, associée à la tomographie en vitesse de compression, permet théoriquement de calculer des tomographies en modules d'élasticité (moyennant une hypothèse sur la masse volumique), mais le caractère de non-unicité des cartes de vitesse doit inciter à la plus grande prudence quant à ce type d'interprétation.

■ L'amplitude du signal est difficile à mesurer, car elle dépend fortement de la qualité du couplage entre la source et le terrain, d'une part, et les capteurs et le terrain, d'autre part. En revanche on peut

assez bien mesurer le temps de montée (figure 11) du début du signal ; celui-ci est bien corrélé aux propriétés d'atténuation du terrain. On obtient alors des tomographies en facteur de qualité.

■ Enfin, il existe une méthode beaucoup plus simple que la tomographie : la technique *cross hole* entre forages consiste à utiliser deux forages verticaux et à mesurer le temps de trajet entre source et récepteurs situés à la même profondeur entre les deux forages. Le résultat est une courbe qui donne une vitesse apparente dans le sol en fonction de la profondeur. Si les forages sont proches (relativement à l'épaisseur des matériaux traversés), cette vitesse a un sens ; elle correspond bien à la vitesse dans les matériaux traversés par les forages ; si les forages sont éloignés, aucune interprétation raisonnable n'est possible.

Il est préférable d'utiliser 3 forages coplanaires : l'un sert à placer les sources, les deux autres, plus rapprochés, reçoivent les récepteurs. On interprète alors les différences de temps de trajet entre les récepteurs.

7.4 Organisation et déroulement d'une campagne

■ Au moment de la **conception** d'une campagne de tomographie sismique, il faut d'abord s'assurer que le problème à résoudre est bien susceptible de l'être par le choix de cette technique : quel type d'hétérogénéité recherche-t-on, de quelle taille et présentant quel contraste de vitesse par rapport à l'encaissant ?

L'ordre de grandeur de ces caractéristiques étant connu, il peut être utile de réaliser une simulation numérique des mesures et de leur interprétation. Cette simulation peut aider à faire des choix techniques : distance entre points sources successifs, distance entre deux récepteurs, extension et position du dispositif, afin de s'assurer que la distribution angulaire des rayons sismiques (ou trajets en propagation) est suffisante.

Le type de tubage et le caractère noyé ou non du forage sont des données essentielles pour choisir le type de source et de récepteur. Ce choix dépend aussi de la distance entre les forages et des caractéristiques du terrain. En particulier, si c'est un terrain qui transmet mal les ondes mécaniques, il faudra choisir une source puissante et travailler avec des forages peu éloignés.

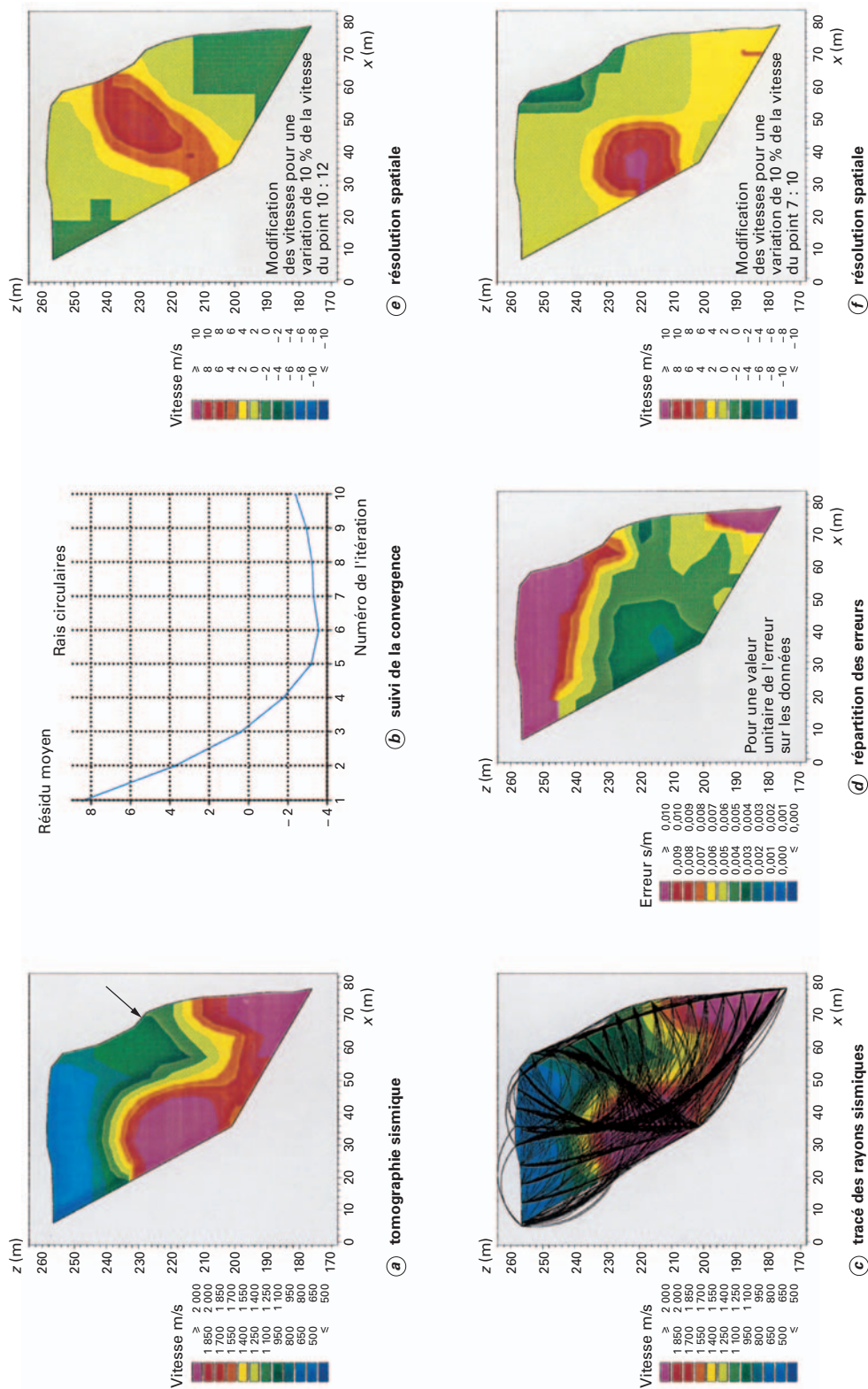
Les tubages doivent être bien couplés mécaniquement au terrain.

■ Les **mesures** proprement dites comprennent les déterminations de la géométrie des forages. En effet, le calcul de la vitesse à partir des temps de trajet n'est possible que si la position des sources et des récepteurs est connue.

Les forages sont souvent déviés de la verticale ; des mesures précises de leur géométrie sont donc nécessaires, par exemple par un procédé inclinométrique.

Les signaux sismiques sont visualisés sur un écran d'oscilloscope ou d'un moniteur d'ordinateur ; cela permet de contrôler leur qualité et l'importance du rapport signal sur bruit. Une faible amplitude des signaux, malgré un terrain réputé peu atténuant, peut être le signe d'un mauvais couplage entre tubage et terrain encaissant.

Une attention particulière doit être apportée à la qualité des systèmes de déclenchement de la mesure des temps (détermination du t_B – *time-break* ou origine du temps), car une indétermination systématique sur l'origine des temps s'ajoute aux causes d'erreurs plus aléatoires (bruit environnant) qui rendent le pointé de temps de trajet imprécis.



Sur les figures (a), (c), (d), (e) et (f) : après 10 itérations : raiis circulaires

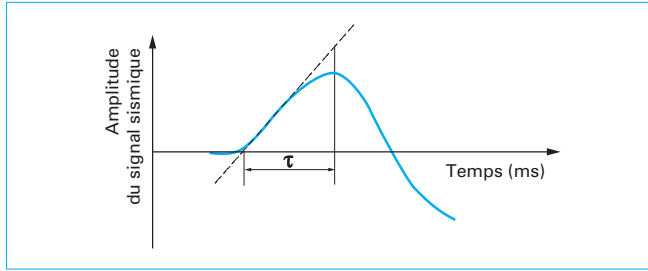


Figure 11 – Définition du temps de montée τ déterminé sur le début d'un signal sismique

Le traitement des données consiste à pointer les temps d'arrivée des ondes élastiques. Cela se fait en reprenant l'enregistrement numérique des signaux sismiques et en les dessinant sur un écran d'ordinateur. Un logiciel qui gère un curseur de pointé est nécessaire. Comme on l'a déjà vu à propos des diagraphies soniques (§ 4.3), un système de pointé entièrement automatique est à proscrire : il vaut mieux d'abord pointer manuellement, même approximativement, et faire ensuite appel à un logiciel d'ajustement qui affine le pointé manuel.

■ On peut alors passer au **calcul** proprement dit de la répartition des vitesses et à la représentation des images proprement dites. Une tomographie en vitesse seule n'a pas une grande valeur, car on ne sait pas quelle confiance lui accorder ; c'est pourquoi cette image doit obligatoirement être assortie au moins du tracé des rayons sismiques. Dans les zones où ces rayons sont denses et ont une bonne distribution angulaire, la valeur calculée de vitesses a de bonnes chances d'être représentative de leur valeur réelle ; dans les zones où ces rayons sont peu nombreux ou dans des directions sensiblement parallèles, l'information obtenue sur les vitesses est moins sûre.

Le calcul de la répartition des vitesses est assorti de calculs statistiques qui contrôlent le bon déroulement du calcul global. Les calculs statistiques conduisent à la connaissance de la répartition de l'erreur et de la résolution, dont on peut tracer des images qui renseignent elles aussi sur la qualité de la tomographie obtenue.

L'algorithme de calcul tomographique comporte obligatoirement une phase de tracé de la géométrie des rayons sismiques, qui sont courbes dès que le terrain n'est pas caractérisé par une vitesse uniforme.

L'algorithme de tracé de rayons doit donc nécessairement être capable de déterminer la courbure des rayons.

■ L'**interprétation** des images consiste à identifier les différentes zones caractérisées par leur vitesse et à expliquer leur présence. Les matériaux à faible vitesse sismique ont généralement des propriétés mécaniques plus faibles que les matériaux à grande vitesse sismique. Les données peuvent servir par exemple à préparer une campagne d'injection ou de renforcement de terrain par clouage ou ancrage, etc.

8. Tomographie électromagnétique

Nous avons vu, dans l'article [C 224] (§ 7.1.1), que les méthodes électromagnétiques se divisaient en deux grandes catégories suivant la fréquence de l'onde. Nous traitons, ici, d'une méthode où les fréquences utilisées sont supérieures à 50 MHz. Dans ce cas, le phénomène prépondérant dans l'interaction entre l'onde et le terrain est la **propagation**.

8.1 Domaine et conditions d'application

La tomographie électromagnétique en ondes monochromatiques (MEW, *monofrequency electromagnetic waves*) sert principalement à détecter les cavités souterraines lorsque celles-ci sont à des profondeurs et ont des dimensions qui les rendent indétectables par les méthodes géophysiques de surface. Parmi les **méthodes géophysiques de forage**, c'est la plus performante pour cette application.

■ Elle ne peut être utilisée que si les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans le sol d'un forage à l'autre sans être trop atténuées. Cela exclut les terrains très conducteurs (de résistivité inférieure à $100 \Omega \cdot m$).

Les forages ne doivent pas être tubés avec un tubage métallique. La distance entre forages dans l'état actuel de la technique ne peut être supérieure à 10 m.

8.2 Principe et résultats fournis

■ La technique utilise **deux antennes** :

— l'antenne **d'émission** est accordée à une fréquence fixée (typiquement 100 MHz) et émet une onde monochromatique à cette fréquence ;

— l'antenne de **réception** est identique à l'antenne d'émission ; elle sert à mesurer l'amplitude du champ électrique reçu.

Dans l'un des forages (forage d'émission), on descend l'antenne émettrice à une profondeur déterminée.

L'antenne réceptrice mesure le champ électrique reçu le long de l'autre forage (forage récepteur) à toutes les profondeurs (en pratique, elle est remontée en continu et on effectue une prise de mesure tous les 20 cm environ). Cette opération est répétée pour toutes les profondeurs de l'antenne d'émission.

Cette collection d'amplitudes A , correspondant à l'interaction entre l'onde électromagnétique et le terrain suivant des trajets qui s'entrecroisent dans toutes les directions, alimente un algorithme de calcul qui permet de décrire une répartition de la longueur caractéristique L_c du matériau à cette fréquence (cf. [C 224], relations 12 et 13) :

$$L_c = \frac{\rho}{60\pi} \sqrt{\epsilon_r} \text{ et } A = A_0 \exp(-z/L_c)$$

On conçoit que plus grand est le nombre de couples émetteurs-récepteurs et plus nombreuses sont les directions dans lesquelles s'entrecroisent les trajets de l'onde, mieux on est capable de décrire la répartition des longueurs caractéristiques dans le terrain.

■ Le **résultat** d'une tomographie électromagnétique en onde monochromatique est une **image** de la répartition calculée des longueurs caractéristiques dans le terrain exploré. Les algorithmes de calcul de cette image font appel à des hypothèses très simplificatrices, si bien que les valeurs calculées de L_c sont à considérer avec prudence, mais la technique permet de bien positionner des hétérogénéités localisées et d'en évaluer les dimensions.

La figure 12 donne un exemple de tomographie électromagnétique en ondes monochromatiques à 85 MHz dans un calcaire karstique (figure 12 a). Les deux forages de 35 m de profondeur sont à 8 m de distance. Le calcaire sain est caractérisé par une grande longueur caractéristique (couleur claire). Le karst est tapissé d'argile et atténue les ondes électromagnétiques (couleurs sombres). Les diagraphies RAN (figures 12 b et 12 c) et microsismique (figure 12 d) réalisées dans les deux forages mettent bien le karst en évidence là où il est traversé par les forages ; la tomographie électromagnétique permet de préciser son extension latérale.

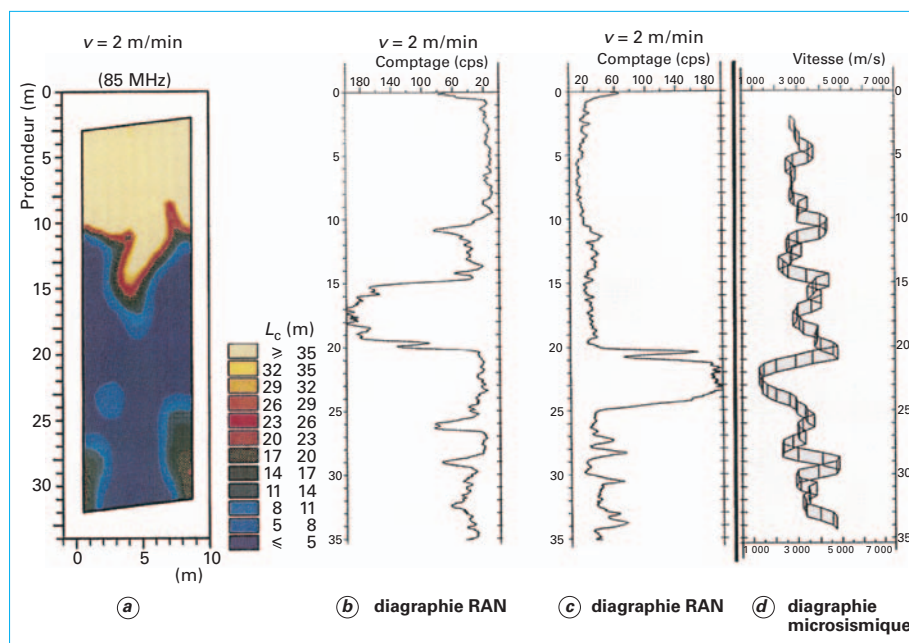


Figure 12 – Exemple de tomographie électromagnétique en ondes monochromatiques à 85 MHz dans un calcaire karstique (document X. Derobert, LCPC, et P. Azémard, CETE d'Aix-en-Provence)

8.3 Techniques voisines

La technique décrite au paragraphe 8.2 a deux variantes principales.

■ La **première** est beaucoup **plus simple** : on réalise les mêmes mesures, mais en *cross hole*, c'est-à-dire uniquement pour les mêmes profondeurs de la source et du récepteur (pour une profondeur donnée de la source, le récepteur est placé dans l'autre forage à la même profondeur et source et récepteur sont remontés simultanément). On réalise ainsi un enregistrement en fonction de la profondeur d'une propriété globale d'atténuation du terrain. Cela peut être suffisant pour détecter la présence d'une cavité et sa profondeur, mais on n'a pas d'information quant à sa position entre les deux forages ni à son extension latérale. Le coût est naturellement beaucoup plus faible que celui de la tomographie proprement dite.

■ La **deuxième** variante est **plus complexe** : elle consiste à réaliser des mesures de tomographie successivement pour plusieurs fréquences (autant d'ensembles complets de mesures qu'il y a de fréquences). Moyennant des calculs beaucoup plus longs, on peut espérer obtenir des images améliorées de la structure et des propriétés du terrain.

■ La **tomographie radar** est une **technique voisine**. On utilise des antennes radar de forage ; l'antenne émettrice balaye l'un des forages, l'antenne réceptrice l'autre. Plusieurs types d'interprétations sont possibles :

- Si l'on interprète le temps de première arrivée, on utilise les mêmes algorithmes qu'en tomographie sismique (§ 7) et on obtient des images qui décrivent la répartition de la vitesse de l'onde électromagnétique dans le terrain entre les deux forages. Cette technique, efficace pour les cavités vides, est moins performante lorsqu'elles contiennent de l'eau.

- Si l'on interprète les signaux complets, il n'existe pas actuellement d'algorithme simple d'inversion des données, mais on peut faire appel à des techniques de simulation numérique pour vérifier si une structure donnée de terrain permet d'expliquer les données.

Ce deuxième type d'interprétation n'est pas encore sorti des laboratoires de recherche.

Remarque sur la tomographie radar :

On a vu sur le tableau 1 que la tomographie sismique n'était pas très efficace pour détecter de petites cavités. Il n'est en pas de même pour la tomographie radar : si la cavité est vide, elle agit, vis-à-vis des rayons électromagnétiques, comme une lentille divergente qui concentre l'énergie, si bien qu'un grand nombre de rayons sont affectés par la présence de la cavité qui est bien détectée (à condition que le terrain ne soit pas trop conducteur de l'électricité et donc qu'il transmette bien l'énergie).

La figure 13 illustre la différence d'efficacité entre les deux méthodes. Il s'agit de deux forages parallèles, situés à 4 m de distance de part et d'autre d'une galerie de section carrée de 2 m sur 2 m.

8.4 Organisation et déroulement d'une campagne

■ Au moment de la **préparation** d'une campagne de tomographie électromagnétique, il faut, d'abord, vérifier que le problème à résoudre est bien susceptible de l'être par cette technique. Le terrain n'est-il pas trop conducteur, les cavités recherchées sont-elles de taille suffisante (quelques mètres cubes au minimum) ? Les ordres de grandeurs étant connus (résistivité du terrain, taille et caractéristique des cavités vides, remplies d'eau, de sable, d'argile...), il peut être utile de réaliser une simulation numérique qui aidera à faire les choix techniques : distances entre forages, fréquence de l'onde, profondeur des forages.

Il faut connaître, aussi, la position de la nappe phréatique, car les antennes à utiliser ne sont pas les mêmes suivant que l'on travaille sous l'eau ou hors d'eau. Il convient, enfin, de s'assurer que les

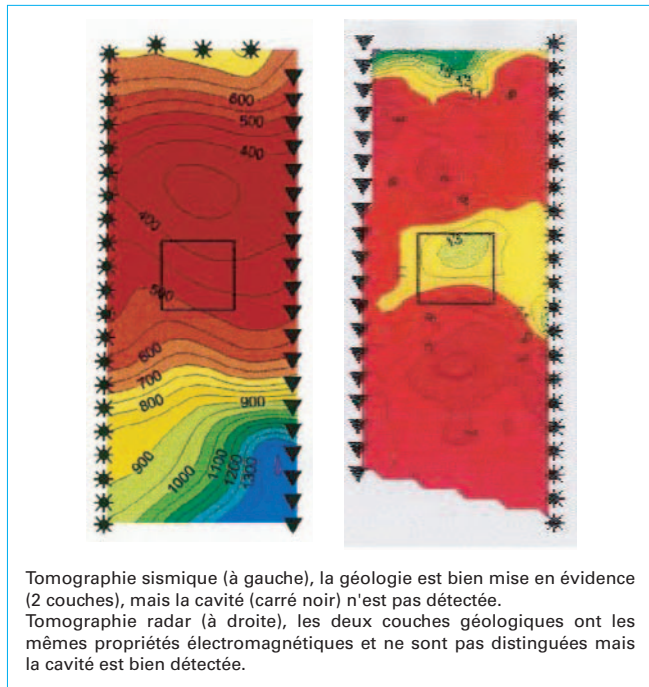


Figure 13 – Différence d'efficacité entre deux méthodes de tomographie (à gauche, tomographie sismique, à droite, tomographie radar)

forages sont de diamètre suffisant pour y faire passer les antennes et de vérifier qu'ils ne sont pas tubés avec un tubage métallique.

■ Les **mesures** proprement dites comportent la détermination de la géométrie des forages. En effet, le calcul de la longueur caractéristique à partir des amplitudes de champ électrique n'est possible que si les positions relatives des antennes sont connues.

Les forages étant souvent déviés de la verticale, des mesures de leur géométrie sont donc nécessaires (ce problème est cependant moins crucial qu'en sismique).

Le matériel comprend un générateur d'onde électromagnétique, un amplificateur et une antenne d'émission reliée à l'appareillage de surface par un câble. Il comprend un voltmètre vectoriel qui est relié à l'antenne de réception par un câble et à l'émetteur par un coupleur qui permet de lui transmettre la référence du signal émis (détection synchrone).

Sur le terrain, on vérifie la stabilité et la répétitivité des mesures, qui sont constituées par la composante verticale du champ électrique.

Les profondeurs doivent être connues à 0,5 %, comme en diagraphie. L'utilisation de roues codeuses sur les poulies qui servent à descendre les câbles dans les forages est pour cela efficace.

Il n'y a pas à proprement parler de traitement des données, qui sont constituées par l'ensemble des amplitudes associées aux positions des sources et des récepteurs.

■ L'**interprétation** des données se fait à travers l'algorithme de calcul des images de la répartition de la longueur caractéristique L_c dans le terrain.

Sur ces images, on identifie les **hétérogénéités** qui apparaissent entre les forages.

Si ces hétérogénéités sont **de petite taille** (quelques mètres carrés sur l'image), on ne conserve comme information fiable sur la cavité détectée que sa position et l'ordre de grandeur de sa taille.

Si les hétérogénéités sont **de grande taille** (plusieurs mètres dans toutes les directions, plus de 10 m^2), alors en plus de la position et de l'ordre de grandeur de la taille, on peut avoir une idée de la nature du remplissage de la cavité : une longueur caractéristique L_c plus faible que celle de l'encaissant signifie que la cavité est remplie d'un matériau conducteur, eau ou argile ; si L_c est plus grand, la cavité est vide ou remplie d'un matériau résistant (par exemple, du sable sec).

L'interprétation des images peut être facilitée par les données des diagraphies qu'il est souhaitable de réaliser dans les deux forages, en particulier des diagraphies de radioactivité naturelle qui renseignent sur la présence d'argile, matériau ayant une forte influence sur la propagation des ondes électromagnétiques.

9. Radar de forage en mode réflexion

9.1 Domaine et condition d'application

■ Le radar géologique mis en œuvre en mode réflexion à partir d'un forage sert à explorer le terrain autour du forage dans un rayon qui peut être de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres suivant les propriétés d'altération des matériaux. En milieu cristallin ou dans un massif calcaire homogène, il permet de détecter des fractures, des cavités (par exemple, des karsts).

■ L'onde électromagnétique doit pouvoir se propager ; dans les matériaux très conducteurs de l'électricité, le radar géologique n'est donc pas indiqué. On considère généralement que la résistivité du terrain doit être supérieure à $100\ \Omega \cdot \text{m}$ (pour un rayon d'investigation supérieur à 3 m).

Le forage, s'il est tubé, doit l'être avec un tubage en matière plastique, un tubage métallique faisant écran aux ondes électromagnétiques.

9.2 Principe et type de résultat

■ Le radar comporte une **antenne émettrice-réceptrice** descendue dans le forage (figure 14 a) et qui émet des impulsions électromagnétiques d'une durée de quelques nanosecondes. Celles-ci se propagent dans le terrain autour du forage et se réfléchissent sur les hétérogénéités qui s'y trouvent (interfaces entre couches géologiques, fractures, cavités...).

■ Le **résultat**, comme pour le radar géologique de surface [C 224] (§ 7.4), est une coupe-temps, dans laquelle la profondeur de la sonde est indiquée sur l'axe vertical et le temps de trajet (temps double) est porté sur l'axe horizontal.

■ L'**interprétation** de cette coupe-temps est délicate, car le radar émet dans toutes les directions autour du forage. La coupe-temps représente, sur un seul plan, les propriétés du terrain dans un cylindre axé sur le forage. Ainsi une fracture plane recoupant le forage se traduit sur la coupe-temps par deux segments de droite de pentes opposées recoupant l'axe vertical à la profondeur de l'intersection de la fracture avec le forage (figure 14 b).

La figure 15 donne un exemple de coupe-temps : le réflecteur localisé à 22 m de profondeur et 10 m de forage est probablement un karst.

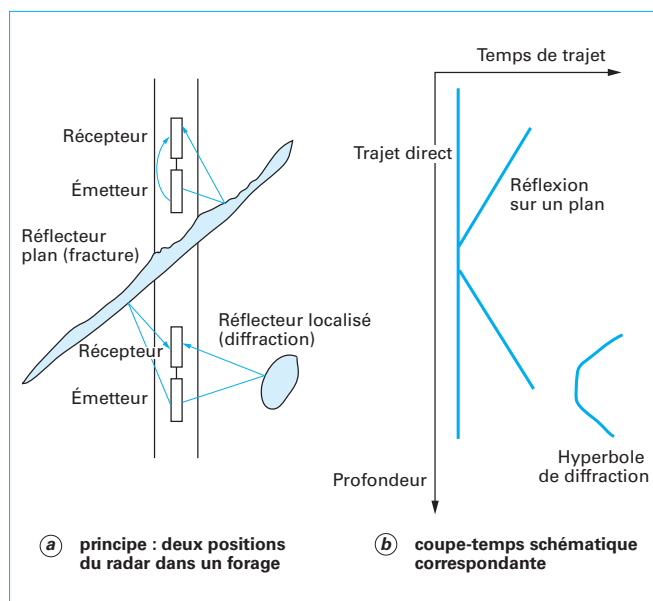


Figure 14 – Principe du radar de forage en mode réflexion

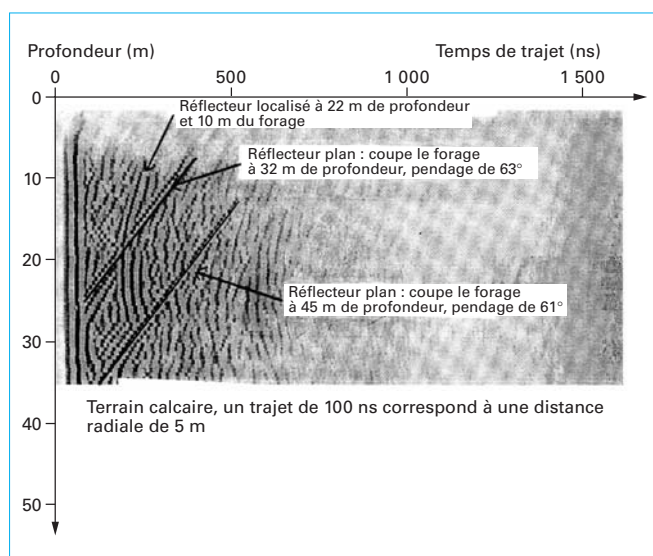


Figure 15 – Coupe-temps radar réalisé dans un massif calcaire sur 35 m de profondeur [3]

9.3 Techniques voisines

■ Le radar géologique en forage peut être mis en œuvre en mode transmission, l'antenne émettrice étant dans un forage et l'antenne réceptrice dans l'autre. On réalise alors des tomographies radar (cf. § 8).

■ Certaines antennes sont focalisées et l'on peut réaliser plusieurs coupes-temps en tournant l'antenne dans le forage suivant plusieurs azimuts.

9.4 Organisation et déroulement d'une campagne

■ Il faut d'abord s'assurer de l'adaptation de la technique au problème à résoudre. En particulier, il faut vérifier que le terrain n'est pas trop conducteur de l'électricité et que le rayon d'investigation est suffisant.

La taille et la position des cibles (cavités, fractures...) conditionnent aussi le choix de la fréquence (comme pour le radar de surface, on doit tenir compte du compromis inévitable entre le rayon d'investigation et la résolution). Il convient aussi de vérifier le diamètre des forages et la nature de leur éventuel tubage.

■ La sonde radar de forage est remontée en continu dans le forage et le système de repérage de la profondeur déclenche l'acquisition des signaux à un intervalle égal à environ la moitié de la longueur d'onde (par exemple, avec une antenne émettant une impulsion dont le spectre de fréquence est centré sur 100 MHz, l'intervalle est d'environ 50 à 75 cm).

La coupe-temps est visualisée en temps réel afin de vérifier la qualité des mesures, qui sont par ailleurs enregistrées numériquement pour un traitement ultérieur. La durée des enregistrements doit être adaptée au rayon d'investigation visé.

Le traitement des données est comparable à ce qui est fait en radar géologique de surface ([C 224], § 7).

■ L'interprétation consiste à identifier sur la coupe-temps les phénomènes que l'on peut relier à la structure du sous-sol ou à la nature des matériaux traversés. On repère ainsi les fractures et les hétérogénéités localisées dont la profondeur est estimée et la distance au forage évaluée moyennant une hypothèse sur la vitesse de l'onde électromagnétique.

Si, sans informations complémentaires, on ne peut pas connaître l'azimut des phénomènes observés, on peut, en revanche, déterminer l'orientation des fractures ou des interfaces par rapport à la verticale (ou à l'axe du forage s'il n'est pas vertical).

10. Conclusion générale

Ce tour d'horizon général des méthodes géophysiques de surface, de forage et des diagraphies montre que les géophysiciens peuvent apporter au processus de reconnaissance une contribution riche et variée par la diversité des techniques. Encore faut-il bien en comprendre les domaines d'application et les limites.

Leur mise en œuvre et leur interprétation est affaire de spécialistes, qui sont capables de choisir parmi toute la panoplie de techniques celles qui sont les plus appropriées aux problèmes à résoudre.

La reconnaissance doit être mûrement réfléchie et la méthodologie doit faire appel de manière logique à un ensemble de méthodes, dont celles de la géophysique. Les résultats obtenus à chacune des étapes sont utilisés pour réinterpréter ceux obtenus aux étapes précédentes et pour optimiser les étapes suivantes, afin d'aboutir à un modèle fiable et cohérent du terrain sur lequel on veut construire.

Références bibliographiques

- [1] CHAPPELLIER (D.). – *Diagraphies appliquées à l'hydrologie*. Techniques et Documentation (Lavoisier), Paris, 165 pp. (1987).
 - [2] *Géophysique Appliquée, Code de Bonne Pratique*. BRGM, Compagnie Générale de Géophysique (CGG), Compagnie de Prospection Géophysique Française (CPGF), Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (LRPC), géré par AGAP-Qualité, diffusé par UFG, Paris, 206 pp. (1996).
 - [3] CORIN (L.), HALLEUX (L.), DETHY (B.) et RICHTER (T.). – *Borehole Radar Survey Applied to HVT Tunnel investigation*. Proc. EEGS.ES 1st meeting, Torino, pp. 16-154 (1995).
 - [4] MARI (J.L.), DELAY (J.), GAUDIANI (P.) et ARENS (G.). – *Geological formation characterisation by stoneley waves*. Actes du 2^e congrès géophysique de l'ingénieur et de l'environnement (EEGS-ES), Nantes, pp. 27-30 (1996).
 - [5] BARON (J.P.), CARIOU (J.) et THORIN (R.). – *Les diagraphies nucléaires développées par les Laboratoires des Ponts et Chaussées ; principe physique, mise en œuvre, domaine d'application*. Bulletin de liaison des LPC, n° 164, pp. 17-31 (décembre 1989).
 - [6] ALLARD (P.). – *Caractérisation des massifs par diagraphie microsismique pour travaux à l'explosif*. Actes du séminaire PRACTIR 98, 2-5 juin 1996, Nice, pp. 9-22.
 - [7] COTE (Ph.), DEGAUQUE (P.), LAGABRIELLE (R.) et LEVENT (N.). – *Detection of underground cavities with monofrequency electromagnetic tomography between bore-holes in the frequency range 100 MHz-1 GHz*. Géophy. Prosp. 43, pp. 1083-1107 (1995).
-