



DOCUMENT PUBLIC

***Réflexions méthodologiques sur les prospections
géophysiques réalisées pour les projets ROCC
Étude de massifs crayeux en bordure de falaise***

décembre 2001
BRGM/RP-51359-FR





DOCUMENT PUBLIC

***Réflexions méthodologiques sur les prospections
géophysiques réalisées pour les projets ROCC
Étude de massifs crayeux en bordure de falaise***

F. Lebert, J.M. Baltassat

décembre 2001
BRGM/RP-51359-FR



Mots clés : Sismique réfraction, Tomographie sismique, SASW, Onde P, Onde S, Compression, Cisaillement, Résistivité, Conductivité, Panneau électrique, Électromagnétisme, RMP, Méthodologie, Géophysique.

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

Lebert F., Baltassat J.M. (2001) - Réflexions méthodologiques sur les prospections géophysiques réalisées pour les projets ROCC : études de massifs crayeux en bordure de falaise. BRGM/RP-51359-FR, 47 p., 3 ann.

© BRGM, 2001, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le BRGM a réalisé plusieurs campagnes de prospection géophysique dans le cadre du projet ROCC dont l'objectif est l'étude de la stabilité des falaises.

Les différentes méthodes utilisées sont décrites dans leurs principes (reportés en annexe), leur apport vis-à-vis du thème d'étude et leurs coûts (de manière sommaire). Si les méthodes sismiques, en particulier la sismique réfraction, et la Résonance Magnétique des Protons (RMP) répondent le mieux aux questions posées (stabilité hydromécanique), une saine compréhension des impératifs budgétaires et techniques amènera probablement à utiliser en combinaison différentes méthodes permettant d'explorer tous les aspects des sites d'études.

Panneau électrique et réfraction donnent la structure stratigraphique du massif ainsi que les zones de fracture. La résistivité est plus sensible au contenu en eau ou en argile qu'à la consistance mécanique, contrairement à la sismique qui montre bien la dégradation mécanique du massif. La cartographie de la conductivité électromagnétique peut permettre de soutenir l'interpolation de résultats obtenus par d'autres moyens ou de dégrossir le travail sur de grandes surfaces.

L'étude d'un massif de falaise (comme d'autres études) ne peut se faire en se contentant d'utiliser la « bonne méthode décrite dans le manuel ». La bonne combinaison des différentes méthodes et leur configuration d'utilisation doivent être conçues au cas par cas par le géophysicien d'application, en réponse au problème posé et en référence aux enseignements des expériences passées.

Divers développements méthodologiques sont proposés :

- application RMP à la zone non saturée ;
- faisabilité de la SASW dans les massifs crayeux ;
- méthodologie de prospection de la bande des trente premiers mètres en arrière de la falaise en assurant la sécurité des opérateurs.

Sommaire

1. Introduction	5
2. Apport des différentes méthodes	7
2.1. Méthodes électriques	7
2.2. Méthodes électromagnétiques	7
2.3. Sismique réfraction et SASW	8
2.4. Imagerie sismique	9
2.5. Résonance magnétique protonique (RMP)	10
3. Discussion	13
4. Conclusion	15

Liste des annexes

Ann. 1 - Récapitulatif des travaux de géophysique entrepris au cours du projet ROCC	17
Ann. 2 - Méthodes sismiques	21
Ann. 3 - Méthodes électriques et électromagnétiques	29

1. Introduction

Plusieurs études géophysiques ont été réalisées par le BRGM dans le cadre du projet ROCC sur des sites de falaise de craie (cf. ann. 1, le récapitulatif des travaux entrepris) :

- analyse de l'altération de la falaise du Bois de Cise (Somme) par combinaison de méthodes géophysiques et mesure de l'épaisseur de cordons de galets par SASW à Cayeux (Somme), rapport BRGM/RP-51378-FR ;
- caractérisation géométrique par RMP de la nappe de la craie le long d'un profil perpendiculaire à la falaise sur le site du Bois de Cise (Somme), rapport BRGM/RP-51343-FR ;
- geophysical surveys on two ROCC sites, on the Channel coast, Sussex, England, rapport BRGM/RC-51342-FR ;
- détermination par sismique réfraction et sismique transparence de la structure du massif crayeux en bordure de la falaise d'Ault (80), rapport BRGM/RP-51344-FR.

Ces réalisations ont vu mettre en œuvre trois types de méthodes que nous décrivons succinctement en annexe :

- les méthodes électriques et électromagnétiques (panneau électrique, conductivité EM34) ;
- les méthodes sismiques (réfraction, SASW, tomographie sismique) ;
- la méthode RMP (résonance magnétique protonique).

La finalisation des travaux du projet ROCC est l'occasion de formaliser l'expérience acquise au cours des différentes réalisations.

2. Apport des différentes méthodes

2.1. MÉTHODES ÉLECTRIQUES

Les profils de panneaux électriques, réalisés au Bois de Cise, ont permis d'établir la présence de fractures et la résistivité de différentes couches de terrains. Le nombre d'observations est toutefois insuffisant pour permettre la mise en évidence des directions du réseau de fracturation. Ceci n'a été possible qu'en utilisant des connaissances complémentaires : les directions de fracturation connues régionalement. Une connaissance détaillée du réseau de fracture aurait demandé une importante densification du réseau de mesure.

La résistivité des couches géophysiques n'est pas significative du degré d'altération ou de dureté de la craie. Alors que la roche est de moins en moins altérée avec la profondeur, on observe une succession de couches résistantes et conductrices. En fait, ce paramètre reflète plus la nature de la roche (argilosité, taux de silex dans le milieu), sa porosité, la teneur en eau et la salinité de l'eau. Les fractures ne se manifestent que si leur volume et leur remplissage (argile ou eau) sont suffisants.

La résistivité est donc un paramètre complexe à utiliser puisqu'il donne indistinctement des indices concernant la nature de la roche, sa texture ou le remplissage des vides. La méthode de panneaux (ou tomographies) électriques semble être la manière la plus performante d'utiliser les mesures de résistivité. Elle permet en effet d'obtenir des coupes bidimensionnelles (distance x profondeur), tout en limitant les phénomènes d'équivalence.

Un panneau du type de ceux mis en œuvre au Bois de Cise (50 électrodes espacées de 5 m) représente approximativement deux heures de travail sur le terrain pour deux personnes et deux heures de traitement informatique pour obtenir une coupe interprétée.

2.2. MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Elles sont sensibles aux mêmes phénomènes que les méthodes électriques. En effet, les méthodes électriques mesurent la résistivité, et les méthodes électromagnétiques, la conductivité qui en est l'inverse ($\text{conductivité} = 1/\text{résistivité}$). Leur intérêt vient du fait que ce sont des méthodes de cartographie rapides et économiques. En contrepartie, à la complexité d'interprétation du paramètre mesuré (*cf.* paragraphe précédent) s'ajoutent les phénomènes de superposition des anomalies : Alors qu'il est souvent difficile d'obtenir de ces mesures des informations de type coupe en profondeur, les résultats présentés sous forme de carte ou de profil intègrent les effets de différents phénomènes à différentes profondeurs qu'il est difficile de distinguer.

Au Bois de Cise, seules les plus grandes structures ont été mises en évidence par électromagnétisme. Il est probable que le pas de mesure utilisé, de 20 m, était trop lâche

par rapport à certaines structures recherchées. Il en va de même pour l'espacement entre profil.

A Birling Gap et à Porto Bello, la carte montre essentiellement l'occupation des sols et les niveaux très superficiels : événements anthropiques (observatoire militaire en béton armé, terrassements préhistoriques, zones goudronnées, terrassements récents), événements naturels (variations de densité de la végétation associées à celles de l'épaisseur des sols). Une fois ces éléments reconnus et identifiés, il est heureusement possible de mettre en évidence des éléments de structure locale ou générale.

Un pas de mesure de 10 m voire 5 m semble être nécessaire pour donner des résultats et prendre en compte les zones de fracture les plus significatives (*cf.* le test de Mer-les-Bains dans le rapport du Bois de Cise BRGM/RP-51378-FR). Une équipe bien entraînée peut réaliser le levé d'une dizaine d'hectares dans la journée; une demi-journée à une journée est également nécessaire à l'établissement d'une carte documentée.

2.3. SISMIQUE RÉFRACTION ET SASW

Sur l'ensemble des sites, la sismique donne des résultats intéressants :

- à Birling Gap, comme à Porto Bello, la sismique réfraction permet de mettre en évidence la structuration mécanique du massif : répartition des vitesses de propagation des ondes sismiques sur une épaisseur de 30 m et structuration par couloirs (failles ou zones de fracture) ;
- les méthodes sismiques se sont avérées performantes pour calculer l'épaisseur des digues de galets dans la zone des Bas-Champs. La corrélation avec les résultats de forage est bonne ;
- à Ault et au Bois de Cise, la sismique réfraction met en évidence des discontinuités verticales qui limitent, le long de la vailleuse et de la falaise, l'extension horizontale des couches superficielles de faible vitesse. Les discontinuités peuvent être interprétées comme des fractures, en particulier quand elles ont des directions cohérentes avec les directions régionales connues ; les zones de faible vitesse peuvent être interprétées comme des zones particulièrement fracturées et altérées.

En règle générale, les méthodes sismiques donnent de manière non ambiguë le degré d'altération et de dureté de la roche, ainsi que l'épaisseur des couches d'altération ou de recouvrement. Le volume de travail nécessaire pour une base sismique est sensiblement équivalent à celui demandé par un profil de panneau électrique. Réfraction et SASW peuvent être systématiquement utilisées conjointement pour autant que l'on choisisse des paramètres d'enregistrement compatibles, et que l'on prévoit le temps de double interprétation dans les budgets. Cela doit aboutir à une bonne évaluation des caractéristiques mécaniques des massifs étudiés (compression et cisaillement).

L'efficacité de la méthode sismique réfraction est amoindrie en bord de falaise du fait de l'impossibilité de réaliser, côté falaise, les tirs à offset lointains sur les dispositifs perpendiculaires à la falaise. Il convient donc de pallier ce manque par la réalisation,

côté falaise, de plusieurs tirs sur dispositif ou à offset proche, et par des dispositifs parallèles au bord de falaise.

Quatre à six bases de sismique réfraction (24 traces, 5 m entre trace, 3 à 5 tirs) peuvent être réalisées dans une journée. Environ deux heures sont nécessaires pour traiter une base et obtenir une coupe sismique interprétative où les différents terrains sont représentés par leur vitesse sismique.

La SASW a été peu utilisée dans le cadre du projet ROCC et uniquement sur les cordons de galets. Elle est potentiellement utilisable sur les massifs crayeux où elle serait bien adaptée à décrire l'induration progressive (Matthews *et al.* 1996¹). Dans une mise en œuvre adaptée avec dispositif traîné (flûte de géophones guimbal) sur route, chemin ou pâture, elle permettrait des rendements plus élevés que la sismique réfraction. De même, l'inversion selon des procédures routinières, des courbes de dispersion SASW, est une procédure plus rapide que l'inversion des données sismique réfraction. Mais la faisabilité de la SASW dans le contexte de la craie reste à expérimenter.

2.4. IMAGERIE SISMIQUE

La tomographie sismique (ou imagerie sismique ou sismique en transparence) permet d'obtenir une bonne résolution spatiale en profondeur, notamment dans le cas de mise en œuvre entre deux forages. Dans le contexte où nous l'avons utilisé (forage-surface), les renseignements obtenus ne sont cependant pas supérieurs à ceux obtenus par sismique réfraction. Notre dispositif, où les trajets relient la surface du sol au flanc de la falaise ou à un forage, apparaît mal adapté à l'étude de terrains stratifiés subhorizontaux tels que la craie et son altération. En effet ces dispositifs génèrent peu de transmission horizontale ; celle-ci est pourtant nécessaire à une bonne définition des vitesses des différentes couches stratifiées horizontales.

L'inversion tomographique selon des raies droites y aurait été inopérante, car elle réduit encore la modélisation de raies se propageant horizontalement. Le modèle classique de l'altération faisant intervenir des terrains de caractéristiques mécaniques de qualité croissante avec la profondeur est un modèle typiquement réfractant dont seule une modélisation par raies courbes dans un milieu continu pouvait rendre compte. L'inversion des tomographies que nous avons réalisées, a donc été effectuées par raie courbe. La performance de la modélisation est toutefois limitée d'une part, par l'absence de trajets horizontaux permettant de déterminer les vitesses par couches et, d'autre part, par la difficulté de rendre compte de couches homogènes aux interfaces contrastés (argile à silex sur craie altérée en particulier) avec un modèle où les vitesses varient graduellement.

¹ Matthews M.C. & *al.*, 1996, The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles, Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng, 119, pp. 84-95

En fait, si les méthodes sismiques réfraction et transparence ont donné des renseignements équivalents, leurs méthodes d'interprétation sont complémentaires : le modèle de la réfraction décrit des interfaces de couches, donc un milieu discontinu dans le sens des profondeurs, alors que le modèle de transparence décrit des variations continues dans lesquelles on recherche des hétérogénéités. Dans le domaine des falaises de craie soumises à l'altération météoritique, le modèle en couches contrastées permet de bien décrire la couverture superficielle (alluvion, colluvion, argiles à silex) alors que le modèle continu permet de bien rendre compte de l'altération progressive du milieu crayeux et de la détérioration continue des caractéristiques mécaniques qui en découlent.

Quoiqu'il en soit, les méthodes sismiques réfractions et transparence utilisées donnent des résultats en parfaite cohérence. Considérant le rapport de un à cinq entre les prix de revient des deux méthodes, la sismique réfraction, plus facile à mettre en œuvre et plus rapide à compiler, est recommandée. Si toutefois la méthode sismique transparence devait être utilisée (pour étudier, en détail, des structures d'extension limitée) les meilleurs résultats seraient obtenus avec un dispositif forage-surface-forage.

Un panneau de tomographie sismique élémentaire (forage-surface-forage) à 50 m de profondeur peut être mesuré en 1 à 1,5 jours et nécessite un jour pour être traité et interprété.

2.5. RÉSONANCE MAGNÉTIQUE PROTONIQUE (RMP)

La méthode RMP testée le long d'un profil orthogonal à la falaise a permis de mettre en évidence :

- la géométrie de la nappe aquifère de la craie en cohérence avec les éléments connus par forage ou régionalement. En particulier, une limite verticale possiblement argilisée et attribuable à une faille ou zone de fracture de direction régionale, commandant la morphologie de la vallée proche est mise en évidence. Elle sépare l'aquifère, côté falaise, dont le toit s'abaisse progressivement jusqu'au niveau de la base de la falaise et l'aquifère côté terre qui apparaît tabulaire ;
- des teneurs en eau non nulles sont mises en évidence au-dessus du niveau piézométrique de la nappe principale. Elles peuvent être dues à des nappes perchées (dans des niveaux de silex, en particulier) mais peuvent également rendre compte de la zone non saturée (ZNS).

Bien qu'ils permettent de déterminer le toit de la nappe (soit le niveau piézométrique), les sondages RMP ne peuvent, du fait de leur précision limitée (de l'ordre de quelques mètres) remplacer un piézomètre pour suivre les variations du niveau piézométrique. Ils seront, en revanche, utiles pour déterminer la structure de la nappe en vue d'implanter judicieusement les piézomètres de surveillance. Dans l'exemple du Bois de Cise, un piézomètre sera implanté au mieux, à l'écart de la falaise, pour des raisons de stabilité et de faisabilité du forage, mais au-delà (côté mer) de la limite hydrogéologique réalisée

par la faille décrite ci-dessus. Il pourra alors fournir les informations en relation avec la partie active de la falaise.

Les données sur la ZNS sont très intéressantes si l'on considère les points suivants :

- la craie est un milieu à forte porosité (20 à 40 %) et la saturation de la ZNS est généralement supérieure à 90 % (teneur en eau généralement supérieure à 20 %). Il est ainsi probable que dans la craie, l'hydrologie de la ZNS joue un rôle aussi importante que l'hydrologie de la zone saturée dans le comportement hydromécanique du massif et dans la stabilité de la falaise ;
- les méthodes de mesure des caractéristiques de la ZNS, aujourd'hui disponibles, ne sont mises en œuvre que dans les premiers mètres de profondeur.

La RMP pourrait être une méthode efficace pour décrire les caractéristiques hydrodynamiques de la ZNS jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Cette application en est au stade de la R&D et demande à être développée.

C'est une méthode économique (deux à cinq sondages RMP par jour suivant les conditions de rapport signal sur bruit, 1 à 2 h d'interprétation par sondage) en comparaison de forages de reconnaissance hydrogéologique.

3. Discussion

Toutes ces méthodes sont utilisées, du fait de leur coût d'acquisition et de traitement, pour une reconnaissance détaillée. Des méthodes de reconnaissance générale à l'échelle régionale de la dizaine ou de plusieurs dizaines de kilomètres (l'électromagnétisme héliporté pourrait être envisagé dans les zones non urbaines) n'ont pas été testées et sortent donc du champ de cette discussion.

En terme de coût, les méthodes peuvent être facilement classées de la moins chère à la plus chère :

- 1) cartographie électromagnétique,
- 2) base sismique, panneaux électriques,
- 3) sondages RMP,
- 4) imagerie sismique.

En termes d'efficacité, compte tenu du thème d'étude (stabilité mécanique des falaises) et des résultats obtenus sur les quatre études, il apparaît que les méthodes sismiques sont les plus pertinentes, voire les seules. Les paramètres mesurés sont, en effet, directement en rapport avec les qualités mécaniques des roches. Parmi ces méthodes, seule la réfraction permet la réalisation de campagne systématique, économique. La SASW reste à tester. L'imagerie sismique doit être considérée comme une méthode de très grand détail s'appliquant à des objectifs très localisés quand des forages sont disponibles.

Toutefois, dans la pratique, la densité nécessaire de bases sismiques risque de n'être que rarement obtenue (pour des raisons budgétaires). Il sera alors tentant d'utiliser une méthode rapide et économique, de type électromagnétisme EM34 soit comme méthode de reconnaissance générale, soit pour interpoler les résultats obtenus par d'autres méthodes telles que la sismique. Cette cartographie ne sera bien utilisée que si elle est accompagnée de travaux de résistivité de type sondage ou panneau. En effet, la compréhension d'une carte de conductivité EM est grandement facilitée par l'existence de sondages ou panneaux électriques judicieusement placés pour expliquer ou confirmer les anomalies mesurées.

Les propriétés mécaniques des roches dépendent également de la saturation en eau. C'est particulièrement le cas de la craie dont la teneur en eau est généralement supérieure à 20 % même dans la zone non saturée. La RMP, par la détermination de la teneur en eau et de la perméabilité, apporte les nécessaires informations pour le traitement des problèmes hydromécaniques.

Toutes ces méthodes sont complémentaires : résistivité et réfraction donnent la structure stratigraphique du massif ainsi que les zones de fracture ou failles. La résistivité est plus sensible au contenu en eau ou en argile qu'à la consistance mécanique, contrairement à la sismique qui montre bien la dégradation mécanique du massif. La cartographie de la

conductivité électromagnétique peut reconnaître de grandes surfaces en mettant en évidence les principales structures, mais n'apportera pas d'information très pertinente sur les caractéristiques mécaniques du massif. De nombreuses structures mises en évidence par sismique réfraction ou même par panneau électrique n'ont pas été observées par électromagnétisme sur le site du Bois de Cise.

Des reconnaissances RMP en bord de falaise seront utiles pour :

- définir la structure de l'aquifère crayeux et implanter en conséquence les piézomètres de surveillance du niveau de la nappe ;
- appréhender les phénomènes hydrodynamiques dans la zone non saturée.

Ce deuxième objectif ne pourra être atteint qu'au prix d'un développement méthodologique important. La ZNS est un domaine d'application prometteur de la méthode mais qui n'a, à ce jour, été qu'effleuré.

Des structures très marquées ont été mises en évidence, par sismique, en toute proximité (moins de 30 m) de la Falaise sur le site du Bois de Cise. De telles observations n'ont pas été réalisées sur les autres sites mais là, aucune mesure n'avait été réalisée dans cette bande pour des raisons de sécurité, principalement. Il est possible que des structures importantes commandant l'évolution à court terme des falaises soient situées dans cette zone. Les méthodologies pour reconnaître cette partie de la falaise, en sécurité, sont à développer. La mise en œuvre des mesures directement sur les falaises comme cela fut fait au Bois de Cise sont à proscrire, en tout cas en l'absence de toute mesure particulière visant à réduire les risques (purgés, consolidations...?).

L'étude d'un massif de falaise (comme d'autres études) ne peut se faire en se contentant d'utiliser la bonne méthode décrite dans le manuel. Ce doit être une démarche intelligente adaptée au problème posé (qu'il s'agit de repérer à chaque étude) et utilisant les enseignements des expériences antérieures.

4. Conclusion

La réflexion menée sur les campagnes de prospections géophysiques réalisées pour le projet ROCC, portant sur l'étude de massifs crayeux en bordure de falaise permet de comprendre l'utilité des différentes méthodes employées : sismique réfraction, SASW et transparence, profilage électromagnétique EM34, panneaux électriques, sondages de résonance magnétique protonique (RMP).

Les méthodes sismiques et de sondage RMP paraissent les plus adaptées car elles permettent d'appréhender les caractéristiques hydromécaniques commandant l'évolution du massif crayeux.

Le paramètre résistivité produit par les méthodes électriques et électromagnétiques est plus difficile à utiliser car il est dépendant de très nombreux facteurs. Toutefois ces dernières méthodes, de mise en œuvre et d'interprétation plus rapide que les précédentes, pourraient être utilisées pour reconnaître de grandes surfaces ou pour interpoler les résultats des autres méthodes.

Ces différentes méthodes sont complémentaires : la bonne combinaison de ces méthodes et leur configuration d'utilisation doivent être conçues au cas par cas par le géophysicien d'application en réponse au problème posé et en référence aux enseignements des expériences passées.

Des développements peuvent être apportés dans les domaines suivants :

- application des sondages RMP à la caractérisation hydrodynamique de la zone non saturée ;
- test de faisabilité de la SASW pour l'étude des caractéristiques mécaniques du massif crayeux.
- développement d'une méthodologie d'étude de la bande d'environ 30 m de profondeur en arrière de la falaise, dans des conditions de sécurité raisonnables.

ANNEXE 1

Récapitulatif des travaux de géophysique entrepris au cours du projet ROCC

Méthodes	Bois-de-Cise (Rectangle 6 ha)	Ault (Carré 6 ha, dans village, avec relief)	Cayeux/Bas-Champs	Porto Bello (Carré 6 ha, traversé par route type RN)	Birling Gap (Triangle 3 ha, zone protégée)
Sismique réfraction	Dispositif : 15 bases de 24 géophones espacés de 5 m, 3 à 5 tirs Résultats : définition de couches en bon accord avec les panneaux électriques et la tomographie sismique ; corrélation vitesse et altération ; augmentation de la profondeur d'altération en bordure de falaise et de vailleuse. Dispositif : 1 panneau triangulaire, réception : 21 géophones espacés de 3 m en flanc de falaises et 2 géophones en surface ; émission : 26 tirs espacés de 3 m en surface. Résultats : définition de couches en bon accord avec les panneaux électriques et la sismique réfraction	Dispositif : 5 profils de 48 géophones espacés de 5 m, 5 à 10 tirs Résultats : définition de couches en bon accord avec la tomographie sismique ; corrélation entre vitesse et altération ; diminution de la profondeur d'altération en fond de vailleuse (altitude du front d'altération à peu près constante).		Dispositif : 12 bases de 24 géophones espacés de 5 m, 4 à 5 tirs, disposées systématiquement. Résultats : Mise en évidence des variations des épaisseurs d'altération, et du découpage du massif par les principales fractures.	Dispositif : 11 bases de 24 géophones espacés de 5 m, 3 à 5 tirs, irrégulièrement disposées Résultats : Mise en évidence des variations des épaisseurs d'altération, et du découpage du massif par les principales fractures. Répartition de la vitesse sismique des terrains superficiels
Tomographie sismique		Dispositif : 8 panneaux triangulaires, réception : 24 géophones espacés de 2,5 m en surface ; émission : tirs espacés de 2 m dans 3 sondages de 40 m Résultats : définition de couches en bon accord avec la tomographie sismique ; corrélation entre vitesse et altération ; diminution de la profondeur d'altération en fond de vailleuse (altitude du front d'altération à peu près constante).	Dispositif : 3 bases de 24 géophones, intertracé de 2 ou 3 m. Résultats : Détermination de l'épaisseur des digues de galets en bon accord avec les données de sondage.		
SASW					
Panneaux électriques	Dispositif : 5 profils de 52 électrodes (255 m). Résultats : définition de couches en bon accord avec les méthodes sismiques ; mise en évidence de traces de fracture, mais le réseau de mesure est insuffisant pour montrer leurs directions				
Electro- magnétisme EM34	Dispositif : 16 profils espacés de 20 m, espacement entre mesure de 20 m, ou 10 m. Résultats : visualisation des principales zones fracturées, corrélation avec l'altitude indiquant des variations d'épaisseur d'une couche superficielle		Dispositif : 7 Sondages ponctuels. Résultats : néant.	Dispositif : 314 points de mesures sur 8 profils irrégulièrement disposés (zone protégée), espacement entre mesures de 5 m. Résultats : visualisation des principales zones fracturées, corrélation avec l'altitude indiquant des variations d'épaisseur d'une couche superficielle.	Dispositif : 222 points de mesures sur 8 profils irrégulièrement disposés (zone protégée), espacement entre mesures de 5 m. Résultats : visualisation des principales zones fracturées.
RMP	Dispositif : Profil de 9 sondages sur 1,3 km Résultats : Image qualitative des variations du niveau piézométrique de la nappe de la craie				

Tableau récapitulatif des travaux réalisés au cours du projet ROCC.

ANNEXE 2

Méthodes sismiques

Présentation de la méthode de sismique réfraction

Présentation de la méthode de tomographie sismique

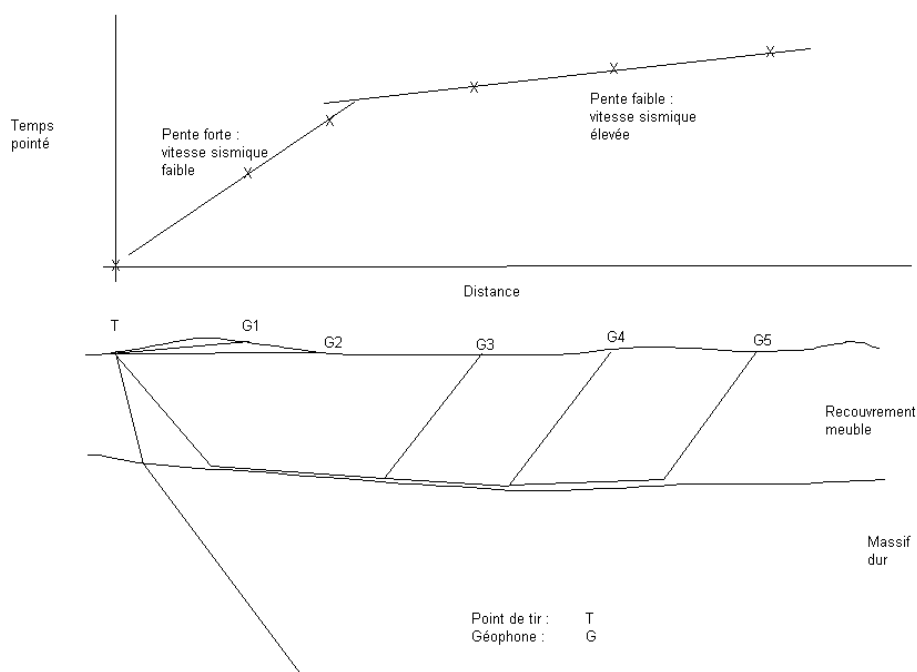
Présentation des méthodes de sismique SASW

Présentation de la méthode de sismique réfraction

Les méthodes d'exploration sismiques utilisent la transmission des vibrations par le sol et le sous-sol. Pour générer les vibrations, plusieurs types de sources sont utilisés de manière à provoquer un choc brutal (explosif, marteau, chute de poids, fusil...). Les vibrations générées par le choc se propagent dans le terrain. Elles sont enregistrées par un géophone, dispositif assimilable à une masse suspendue à un ressort.

Plusieurs types d'études peuvent être menés, en fonction du mode de transmission des ondes.

En **SISMIQUE RÉFRACTION**, on ne s'intéresse qu'au temps de parcours de la première onde reçue (« arrivée première »). Elle est généralement utilisée pour déterminer la profondeur d'un massif dur, le « réfracteur » (vitesse sismique élevée) sous un recouvrement plus meuble (vitesse sismique plus lente).



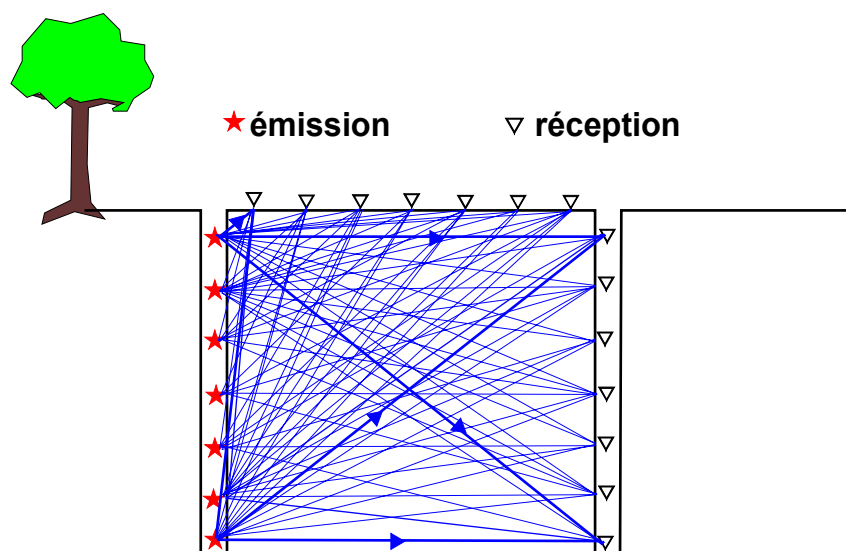
Les dispositifs utilisent 12, 24 (le plus souvent), voir 48 géophones, alignés au sol, qui constituent la base sismique. La distance entre géophone est constante, sauf parfois aux extrémités et au centre où elles sont parfois réduites de moitié pour augmenter la résolution de la définition du premier terrain (sol). Pour une base sismique, cinq tirs (utilisation de la source en un point donné) sont généralement effectués : un au centre, un en chaque extrémité, et un éloigné d'une distance égale à la moitié de la base (tir en offset).

Les trois premiers tirs permettent de déterminer la vitesse des terrains, les profondeurs sous tirs, ainsi que sous certains géophones. Les deux tirs en offset permettent de déterminer la profondeur du réfracteur recherché sous chaque géophone. Dans certains cas, la distance d'offset doit être modifiée pour que les ondes reçues ne viennent que d'un seul réfracteur.

Présentation de la méthode de tomographie sismique

Sismique transparence, Imagerie sismique, Tomographie sismique, ces termes sont équivalents et désignent une méthode sismique d'étude des sols généralement réservée aux études détaillées de zones restreintes dont l'importance est considérable au regard du projet qui les concerne. C'est une méthode d'étude, certes, mais pas une méthode de prospection.

La sismique transparence est généralement utilisée entre forages ou entre forage et surface. Les ondes sismiques générées en plusieurs points régulièrement disposés (en forage généralement) sont enregistrées le long d'un dispositif de récepteurs régulièrement espacés en forage ou/et en surface.



L'analyse par méthode tomographique des temps de trajet (arrivées premières) des ondes sismiques conduit à définir la distribution des vitesses de propagation sismiques dans le plan contenant les dispositifs émetteurs et récepteurs. L'analyse peut être réalisée selon des raies droites (trajets directs) dans des cas simples, mais l'analyse en raies courbes (trajets réfractés) est nécessaire dans la plupart des cas. Les différents terrains ou couches recoupés par ce plan sont ainsi définis par leurs vitesses sismiques de compression (V_p).

Présentation des méthodes de sismique SASW

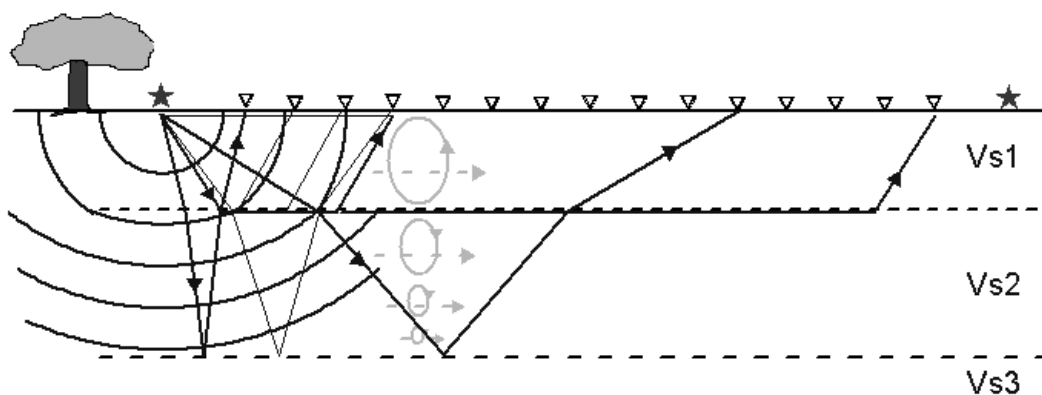
Détermination du profil vertical de vitesse des ondes de cisaillement par analyse spectrale des ondes de surface (SASW)

1. OBJECTIFS DE LA MÉTHODE

La vitesse des ondes de cisaillement est un paramètre essentiel pour évaluer la réponse dynamique des sols soumis à des tremblements de terre ainsi qu'à d'autres sollicitations dynamiques. Elle permet également de définir les modules mécaniques élastiques des sols, correspondant à de très faibles déformations.

L'utilisation de la nature dispersive des ondes de surface (méthode SASW, Spectral Analysis of Surface Wave en anglais) pour obtenir le profil vertical des ondes de cisaillement présente les avantages d'un essai non destructif dont la mise en œuvre aisée autorise la multiplication des profils d'acquisition. Elle s'applique donc particulièrement aux études portant sur de grandes surfaces (microzonage sismique) ou de grands linéaires.

2. PRINCIPE DE L'ANALYSE SPECTRALE DES ONDES DE SURFACES (SASW)

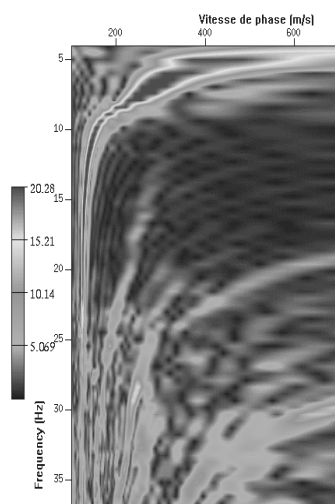


Dans un milieu élastique semi-infini, c'est-à-dire limité par une surface libre telle que la surface du sol, les déformations élastiques se propagent en ondes de volume qui affectent le milieu en profondeur et en ondes de surface qui se déplacent le long de la surface libre sans pénétrer profondément dans le milieu.

Si les caractéristiques mécaniques des sols sont variables, les ondes de surface de différentes longueurs d'onde se propagent à des vitesses variables. Cette variation de vitesse en fonction de la longueur d'onde est appelée dispersion. Une grande longueur d'onde affecte une grande épaisseur de terrain sous la surface alors qu'une courte longueur d'onde affecte des terrains plus superficiels. La dispersion des ondes de surface contient ainsi de l'information sur les variations des caractéristiques mécaniques des sols en profondeur.

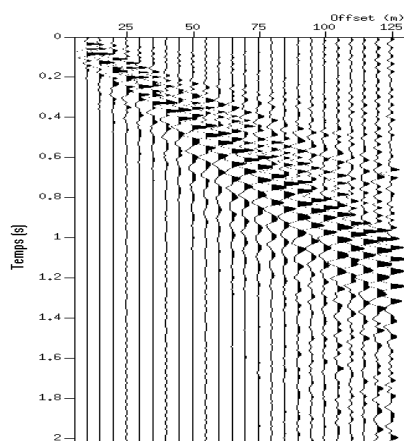
La méthode SASW consiste à obtenir la dispersion des ondes de surface et à déterminer par inversion la distribution verticale de vitesse des ondes de cisaillement, V_s qui rend compte de cette dispersion.

3. MISE EN ŒUVRE, ACQUISITION



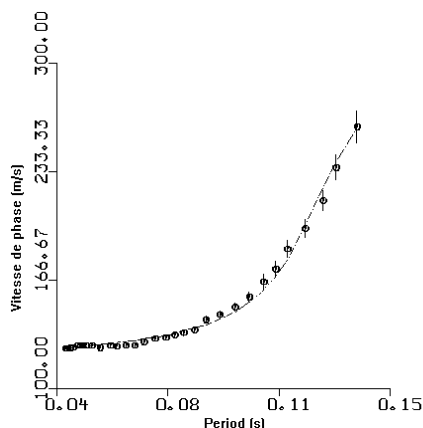
Le dispositif de mesure utilisé est comparable à ceux utilisés en acquisition sismique réfraction. C'est typiquement une collection de géophones verticaux (4) régulièrement espacés et alignés avec le point de tir. La source d'énergie peut être fournie par un marteau léger, une chute de poids plus conséquente ou de la dynamite. Un tir (A) est réalisé à chaque extrémité du dispositif pour mettre en évidence d'éventuelles variations des propriétés mécaniques des sols le long du profil de mesure. L'enregistrement est réalisé grâce à un enregistreur sismique numérique.

4. MISE EN ŒUVRE, TRAITEMENT



Collection point-de-tir : Les signaux sismiques sont mesurés en fonction du temps sur un dispositif de géophones alignés avec le point de tir. Les ondes de surface, qui correspondent à la majorité de l'énergie générée au point de tir et qui sont peu atténuées (par rapport aux ondes de volume), sont bien exprimées.

Diagramme de dispersion : La collection point-de-tir est transformée dans le domaine paramètre-de-raie-fréquence. Les maxima d'amplitude dans ce domaine (vers le rouge) décrivent la dispersion



des ondes de surface qui apparaît très clairement.

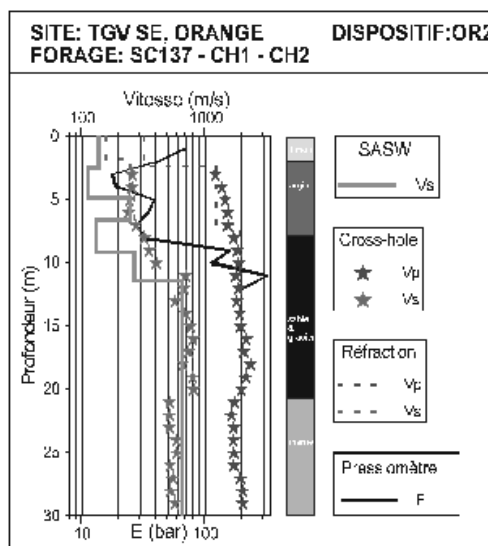
Courbes de dispersion : Le pointé des maxima du diagramme de dispersion permet d'obtenir la courbe de dispersion. Cette courbe est inversée pour obtenir la distribution en profondeur des vitesses V_s . L'inversion est réitérée jusqu'à ce que la courbe de dispersion calculée (---) offre un ajustement acceptable avec la courbe mesurée (oo).

5. RÉSULTATS

Essais pressiométriques cross hole et SASW ont été réalisés sur le site d'un ouvrage d'art du tracé TGV SE près d'Orange.

La collection point de tir acquise pour la SASW a fait l'objet d'une interprétation réfraction.

Les résultats obtenus par les différentes méthodes sont bien corrélés sauf pour les couches de faible vitesse intercalées entre des couches plus rapides. Celles-ci ne sont mises en évidence que par le pressiomètre et la SASW. Elles sont trop peu épaisses pour être mises en évidence avec le dispositif cross-hole utilisé ici.



Source : Rapport BRGM R39877

Pour toute information complémentaire : Tél. 02.38.64.33.37 - Fax. 02.38.64.36.89

Nous remercions la SNCF d'avoir autorisé l'accès aux données géotechniques du site d'Orange et permis leur utilisation.

ANNEXE 3

Méthodes électriques et électromagnétiques

Présentation générale des méthodes électriques et électromagnétiques

Présentation de la méthode électromagnétique EM34

Présentation de la méthode des panneaux électriques

Présentation de la méthode de résonance magnétique protonique

Présentation des principales méthodes électriques et électromagnétiques

Les méthodes de prospection électriques et électromagnétiques sont couramment utilisées en prospection hydrogéologique. Cela tient au fait que la résistivité d'une roche dépend largement de sa teneur en eau. En fait, elle dépend de la porosité des roches, de la saturation en eau et de la charge minérale des eaux d'imbibition. Cependant, à partir de la résistivité des roches, on ne peut généralement pas déduire directement la quantité d'eau présente dans ces roches, ni la qualité des eaux. À ce titre, ces méthodes sont généralement des méthodes de recherche indirectes de l'eau. En outre, ces méthodes ne donnent généralement pas de renseignements sur la mobilité possible de l'eau (caractérisation hydraulique des aquifères), elles ne permettent donc pas de prévisions sur les débits possibles d'un puits.

D'un point de vue pratique, les technologies utilisées par les méthodes électriques sont simples (injection de courant électrique, mesure de tension et de courant), et leur interprétation relativement aisée ; mais leur mise en œuvre est lourde (longueur de dispositifs électriques à installer) et sensible à l'occupation des sols (couverture forestière en particulier) ; elles sont peu ou pas sensibles aux perturbations d'origine humaine. Les technologies utilisées par les méthodes électromagnétiques sont sophistiquées (mesure de champs magnétiques et de tensions faibles), et leur interprétation également ; mais leur mise en œuvre est simple (dispositifs de faible dimension) ; elles sont très sensibles aux perturbations d'origine humaine (champs électriques générés par les réseaux électriques) et par la présence de roches magnétiques (basaltes en particulier).

1. MÉTHODES ÉLECTRIQUES

Méthodes de prospection géophysique où l'on injecte un courant I entre deux électrodes (ou pôles) A et B et où l'on mesure la tension V entre deux électrodes M et N. Un tel dispositif d'émission et de réception est qualifié de quadripôle. La résistivité apparente du sol est définie comme celle d'un sol homogène où l'on mesurerait la même tension pour un même courant :

$$\rho = K \cdot V / I ,$$

où K (appelé coefficient géométrique) est fonction des distances entre les différentes électrodes A, B, M et N.

En principe, le résultat est le même si, sans changer les positions des électrodes, leur rôle est interverti, c'est-à-dire si A devient M, B devient N, M devient A et N devient A.

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

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

1.1. Méthodes de sondage électrique

Les électrodes A, B, M et N sont alignées, et les segments AB et MN ont même milieu. Le log géo-électrique apparent est établi en faisant varier l'écartement des électrodes extrêmes, généralement A et B. Compte tenu de la diminution de la résolution avec la profondeur, donc avec l'écartement des électrodes extrêmes, la variation de cet écartement est généralement selon une progression géométrique. Le log géo-électrique apparent, en fonction de la distance caractéristique, ainsi établi est interprété en log de résistivité « vraie » en fonction de la profondeur, positionné au point milieu de AB, d'où son nom de sondage électrique.

Les différentes couches de terrains sont supposées tabulaires et homogènes. Ces hypothèses ne sont pas toujours vérifiées, ce qui peut poser des problèmes d'interprétation plus ou moins graves en fonction du contexte et de l'échelle de la prospection. En général, ces hypothèses sont admissibles dans les contextes structuraux simples comme un bassin sédimentaire, mais elles ne le sont plus dans les contextes structuraux complexes comme les zones volcaniques où les corps géologiques ont des formes et des dimensions finies. Outre ces problèmes liés à la géométrie et la régularité des couches, les modèles de coupe d'interprétation ne sont pas uniques, plusieurs modèles différents peuvent rendre compte d'un même ensemble de mesures ; ces modèles sont dits « équivalents » entre eux. Une prospection par sondage électrique doit donc impérativement être « calée » ou étalonnée sur un ou plusieurs sondages mécaniques, de manière à résoudre les équivalences. Le nombre de sondages d'étalonnage nécessaires dépend de la variabilité latérale (attendue, suspectée ou remarquée) des résistivités des terrains.

1.1.1. Méthode de sondage électrique Schlumberger

La longueur de ligne AB est grande par rapport à celle de MN. La dimension caractéristique est l'écartement entre A et B. La longueur de ligne MN n'est augmentée que pour assurer la stabilité des mesures. La profondeur d'investigation est cinq à dix fois inférieure à la longueur AB en fonction de la résistivité des terrains.

1.1.2. Méthode de sondage électrique Wenner

La longueur de ligne AB est égale à trois fois celle de MN. Ceci fait que les segments AM, MN et NB ont même longueur (a). Cette longueur (a) est la dimension caractéristique du dispositif. La profondeur d'investigation est cinq à dix fois inférieure à la longueur AB en fonction de la résistivité des terrains.

1.2. Méthodes de panneaux électriques

Ces méthodes sont utilisées pour prendre en compte les variations de résistivité le long d'un profil. Les plus simples sont constituées de la juxtaposition des sondages électriques à un pas régulier. Des méthodes spécifiques ont cependant été mises au point pour réduire les difficultés et les coûts de mise en œuvre. L'interprétation des résultats fait également appel à des algorithmes spécifiques de calcul tenant compte, notamment, des variations d'altitudes le long du profil.

Ces méthodes utilisent des ensembles d'électrodes régulièrement espacées le long d'un profil rectiligne, auxquelles on ajoute 1 ou 2 électrodes placées loin du profil et réputées placées « à l'infini ». Le dispositif de mesure se décompose en plusieurs sous-ensembles. On distinguera les parties immobiles du dispositif, utilisant les électrodes lointaines, des parties mobiles, utilisant les électrodes du profil; dans les parties mobiles, on distinguera la partie émettrice de la partie réceptrice. Les grandeurs caractéristiques de ces méthodes sont le spacing (terme anglais couramment traduit par espacement) qui correspond à la distance entre les électrodes du profil, et le rang, grandeur entière qui indique la distance entre les parties émettrice et réceptrice du dispositif. La position de la mesure est celle du milieu du segment émetteur-récepteur. La profondeur d'investigation augmente avec le rang.

La coupe géo-électrique de résistivité apparente, appelée pseudocoupe, est établie en mesurant la tension pour toutes les combinaisons possibles d'émetteur et de récepteur. Les mesures effectuées avec un écartement entre émetteur-récepteur de un spacing sont dites de rang 1, celles effectuées avec un écartement de deux spacing sont de rang 2, etc. Les mesures sont présentées sous formes de coupe isovaleur dont l'axe des abscisses correspond à la position le long du profil, et l'axe des ordonnées correspond au rang (pseudo-profondeur). L'interprétation de la pseudocoupe prend en compte l'ensemble des mesures et aboutit à une coupe approchant la répartition réelle des résistivités vraies selon la position le long du profil et la profondeur. Cette interprétation est plus contrainte que celle des sondages électriques, les méthodes de panneau électrique sont donc moins sensibles au phénomène d'équivalence, et l'étalonnage sur sondage n'est pas nécessaire.

1.2.1. Méthode de panneau électrique pôle-pôle

La partie immobile du dispositif est constituée de deux électrodes placées loin de part et d'autre du profil ; l'une jouera le rôle de B, l'autre celui de N. La partie émettrice est constituée par l'électrode A, mobile, et la partie réceptrice par l'électrode M, mobile également.

A spacing et rang égaux, cette méthode a la plus grande profondeur d'investigation, mais le moins bon pouvoir de résolution.

1.2.2. Méthode de panneau électrique pôle-dipôle

La partie immobile du dispositif est constituée d'une électrode placée loin du profil ; elle jouera le rôle de B. La partie émettrice est constituée par l'électrode A, mobile. La partie réceptrice est constituée par deux électrodes, M et N, écartées de un spacing ; ces deux électrodes constituent un dipôle, mobile également, dont la position caractéristique est située en son milieu.

1.2.3. Méthode de panneau électrique dipôle-dipôle

Cette méthode n'utilise pas de partie immobile. La partie émettrice est constituée par deux électrodes, A et B, écartées de un spacing ; ces deux électrodes constituent un dipôle, mobile, dont la position caractéristique est située en son milieu. La partie réceptrice est également constituée par deux électrodes, M et N, écartées de un spacing qui constituent un dipôle.

À spacing et rang égaux, la méthode dipôle-dipôle a la plus faible profondeur d'investigation, mais le meilleur pouvoir de résolution.

2. MÉTHODES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Les méthodes électromagnétiques mesurent l'intensité de champs magnétiques variables, avec ou sans mesures du champ électrique associé dans le sol. Le paramètre qui fait varier la profondeur d'investigation est la fréquence de variation du champ magnétique. Le capteur magnétique est une antenne généralement constituée par un solénoïde ou une boucle. Le capteur électrique est constitué d'un dipôle électrique.

On distingue les méthodes à champs magnétiques naturels des méthodes à champs magnétiques artificiels ; dans ces dernières, on distingue celles à champs non contrôlés de celles à champs contrôlés.

L'ensemble de ces méthodes est sensible aux champs magnétiques émis par l'activité humaine (« bruits industriels »), en particulier par les lignes électriques, qu'elles soient de basse, moyenne ou haute tension.

2.1. Méthodes électromagnétiques à champs naturels, la magnéto-tellurique

Les circulations naturelles de courants telluriques induisent des champs électromagnétiques. La mesure simultanée du champ magnétique et du champ électrique associé, en fonction de la fréquence, permet d'établir un log géo-électrique du sous-sol, sous réserve de la vérification des hypothèses de tabularité et d'homogénéité des couches. Pour cette méthode, les hétérogénéités, superficielles en particulier, sont des facteurs limitants importants. En fonction des gammes de fréquences, on parlera de méthode magnéto-tellurique ou M.T. (de la fraction de Hz à quelques Hz), et on s'intéressera à une gamme de profondeur de plusieurs centaines de mètres à plusieurs

kilomètres, ou d'audio-magnéto-tellurique ou A.M.T. (quelques Hz à 20 000 Hz), et on s'intéressera à une gamme de profondeur de 100 m à 1 km.

Ces méthodes n'ont pas de résolution à faible profondeur.

Les champs mesurés étant très faibles, ces méthodes sont très sensibles aux bruits industriels.

2.2. Méthodes électromagnétiques à champ artificiel

2.2.1. Méthodes électromagnétiques à champ artificiel non contrôlés

Ces méthodes vont mesurer les intensités des champs magnétiques ou électromagnétiques de fréquences élevées, typiquement ceux utilisés en transmission radiophonique. Les champs mesurés étant très faibles, ces méthodes sont très sensibles aux bruits industriels.

Ces méthodes sont essentiellement des méthodes de cartographie rapide qui utilisent une ou quelques fréquences, mais ne sont pas utilisées pour effectuer des sondages géo-électriques, ni encore moins des coupes le long de profils. L'interprétation est généralement qualitative (variations latérales de faciès, variations de profondeur d'un substratum, etc...). Les profondeurs d'investigations atteintes sont généralement de plusieurs dizaines de mètres.

Parmi les principales méthodes, on peut citer la méthode V.L.F. (Very Low Frequency), utilisant soit un capteur magnétique seul, soit un capteur magnétique et un dipôle électrique, et la méthode R.M.T. (Radio-Magnéto-Tellurisme) utilisée principalement en génie civil pour effectuer des mesures de profilage continu.

2.2.2. Méthodes électromagnétiques à champ artificiel contrôlé

Ces méthodes vont mesurer les intensités d'un champ magnétique produit spécifiquement pour la prospection par un émetteur associée à un récepteur. L'émetteur est constitué soit d'un solénoïde parcouru par un courant, pour les instruments portables des méthodes de cartographie rapide, soit une boucle de fil électrique étalée au sol et parcourue par un courant important pour les méthodes destinées à établir un log géo-électrique.

L'émission peut être continue pendant la prospection, ce sont alors des méthodes de cartographie rapide comme la méthode MAX-MIN. La source émettrice étant proche du récepteur, généralement, ces méthodes ne sont sensibles aux bruits industriels qu'à proximité immédiate des installations à l'origine des perturbations.

L'émission peut être discontinue, et la mesure se fait pendant les instants suivant la coupure du champ magnétique ; ces méthodes permettent d'établir des coupes géo-électriques comme la méthode T.D.E.M. (Time Domain Electro Magnetism), voire des

coupes hydrogéologiques (quantité, qualité, mobilité) comme la méthode R.M.P. (Résonance Magnétique Protonique) qui est la seule méthode de prospection directe de l'eau.

Ces deux dernières méthodes à émission discontinue, récentes, utilisent comme émetteur une boucle de courant d'environ 100 m x 100 m étalées au sol, qui leur permet un pouvoir d'investigation jusqu'à 100 m. Au-delà, seule la méthode T.D.E.M. peut être utilisée, mais avec des boucles d'émission de plusieurs centaines de mètres de côté, peu utilisables en domaine forestier. Cependant, elles restent prisonnières des hypothèses de tabularité et d'homogénéité des couches, ce qui les rend peu efficaces pour les contextes structuraux tourmentés. De plus, en présence des roches magnétiques (roches volcaniques particulièrement) ces méthodes sont fortement perturbées, voire inutilisables, car ces roches modifient fortement le comportement des champs magnétiques émis et reçus. Comme ces méthodes mesurent les champs résiduels, très faibles, à la coupure de l'émission, elles sont très sensibles aux bruits industriels.

Présentation de la méthode électromagnétique EM34

La méthode électromagnétique EM 34 a été mise au point par la Société canadienne Geonics. Son objet est la mesure de la conductivité du sol. Le dispositif utilisé est constitué de deux bobines placées dans le même plan (*cf.* fig. 1). La première, appelée **émetteur**, est le siège d'une circulation de courant alternatif qui génère un champ magnétique (**champ primaire**). Ce champ a pour effet de provoquer l'apparition d'un courant induit dans le sol. Ce courant induit génère également un champ magnétique (**champ secondaire**). La somme du champ primaire et du champ secondaire (**champ total**) est mesurée au moyen de la deuxième bobine (**récepteur**) qui fonctionne comme une antenne.

Une liaison par fil entre les deux bobines permet au récepteur de distinguer l'importance du champ primaire dans le champ total et, par différence, d'évaluer le champ secondaire. L'intensité du champ secondaire croît avec la conductivité du sous-sol pour une fréquence d'émission et une configuration de bobines données.

Les variantes du dispositif concernent l'orientation des bobines et la taille du dispositif ou espacement.

1. L'ORIENTATION DES BOBINES

- quand les deux bobines sont dans le même plan vertical, le champ primaire est horizontal au niveau de l'émetteur : c'est le **mode polarisation horizontale** ;
- quand les deux bobines sont dans le même plan horizontal, le champ primaire est vertical au niveau de l'émetteur ; c'est le **mode polarisation verticale**.

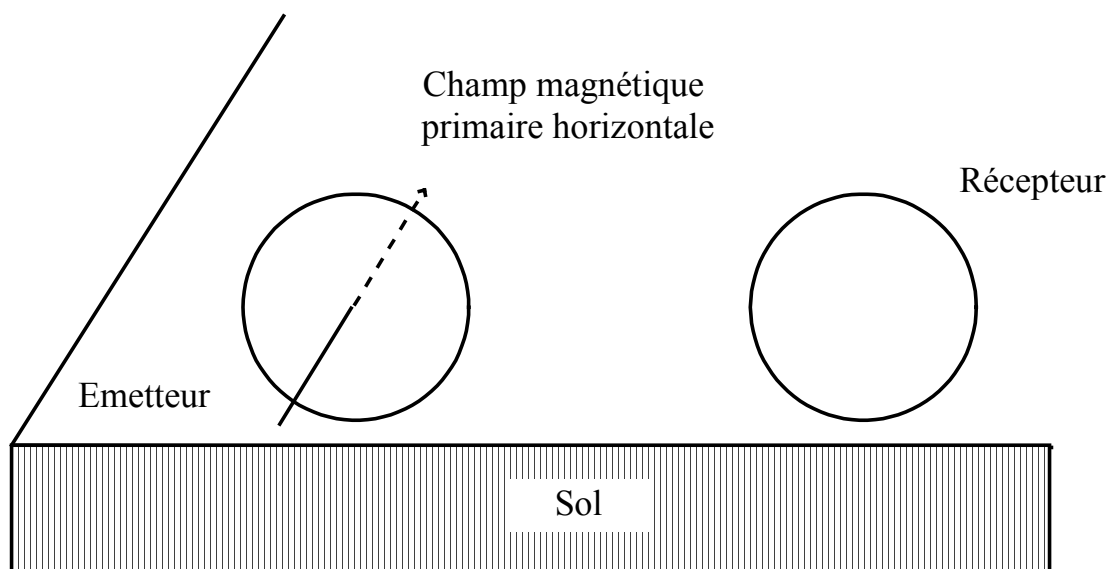
En polarisation verticale, la profondeur d'investigation dans le sol est plus importante qu'en polarisation horizontale.

2. LA TAILLE DU DISPOSITIF OU ESPACEMENT

Le matériel EM 34 est étalonné pour trois espacements (distance entre émetteur et récepteur = 10, 20 et 40 m). La profondeur d'investigation croît avec l'espacement.

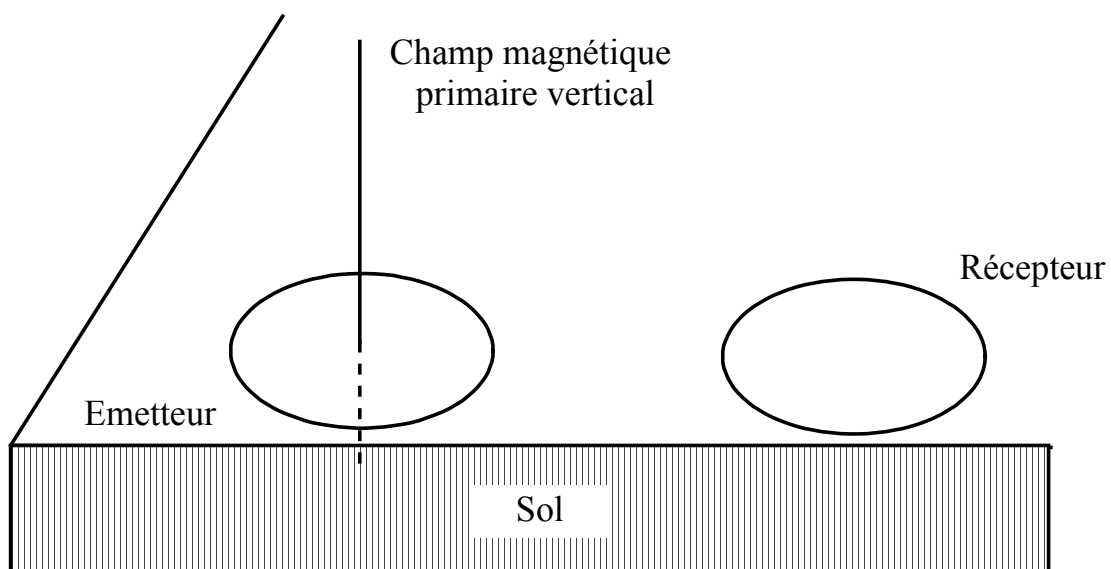
Dans tous les cas, la profondeur d'investigation décroît avec la conductivité.

Ce genre de dispositif permet généralement une prospection rapide sous forme de profil ou de carte.



Les deux bobines sont verticales dans le même plan, le champ primaire émis est horizontal

Polarisation horizontale



Les deux bobines sont horizontales dans le même plan, le champ primaire émis est vertical

Polarisation verticale

Présentation de la méthode des panneaux électriques

INTRODUCTION

La méthode de prospection par panneaux électriques est une méthode géophysique dont le but est de décrire les variations de résistivité en profondeur et le long d'un profil. Les plus simples sont constitués de la juxtaposition de sondages électriques le long d'un profil ; les interprétations 1D sont extrapolées d'un sondage électrique à l'autre pour établir une coupe géoélectrique. Des méthodes spécifiques ont cependant été mises au point pour réduire les difficultés et les coûts de mise en œuvre. L'interprétation des résultats, qui est réellement une interprétation 2D, fait également appel à des algorithmes spécifiques de calcul tenant compte, notamment, des variations d'altitudes le long du profil.

1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DES MÉTHODES DE PROSPECTION ÉLECTRIQUES

D'un point de vue pratique, les technologies utilisées par les méthodes électriques sont classiques (injection de courant électrique, mesure de tension et de courant), et leur interprétation relativement aisée ; mais leur mise en œuvre est lourde (longueur de dispositifs électriques à installer) et sensible à l'occupation des sols (couverture forestière en particulier) ; elles sont peu ou pas sensibles aux perturbations d'origine humaine.

Ce sont des méthodes de prospection géophysique où l'on injecte un courant I entre deux électrodes (ou pôles) A et B et où l'on mesure la tension V entre deux électrodes M et N. Un tel dispositif d'émission et de réception est qualifié de quadripôle. La résistivité apparente du sol est définie comme celle d'un sol homogène et isotrope qui, avec le quadripôle utilisé, donnerait entre les électrodes M et N la différence de potentiel V .

$$\rho = K \cdot V / I,$$

où K (appelé coefficient géométrique) est fonction des distances entre les différentes électrodes A, B, M et N.

La théorie du potentiel montre que l'on peut inverser les rôles des électrodes d'émission et de réception.

Le but des méthodes électriques est d'établir un profil, une coupe (bidimensionnel) ou un log (monodimensionnel) de résistivité apparente ou de polarisation provoquée.. Ce résultat de mesure est ensuite interprété pour approcher la répartition des résistivités vraies dans le sol. La profondeur d'investigation augmente avec les dimensions du dispositif d'électrodes, mais diminue avec la résistivité des terrains. La résolution décroît avec la profondeur. Un terrain superficiel conducteur est généralement un inconvénient qui limite la profondeur d'investigation et la résolution ; il oblige à

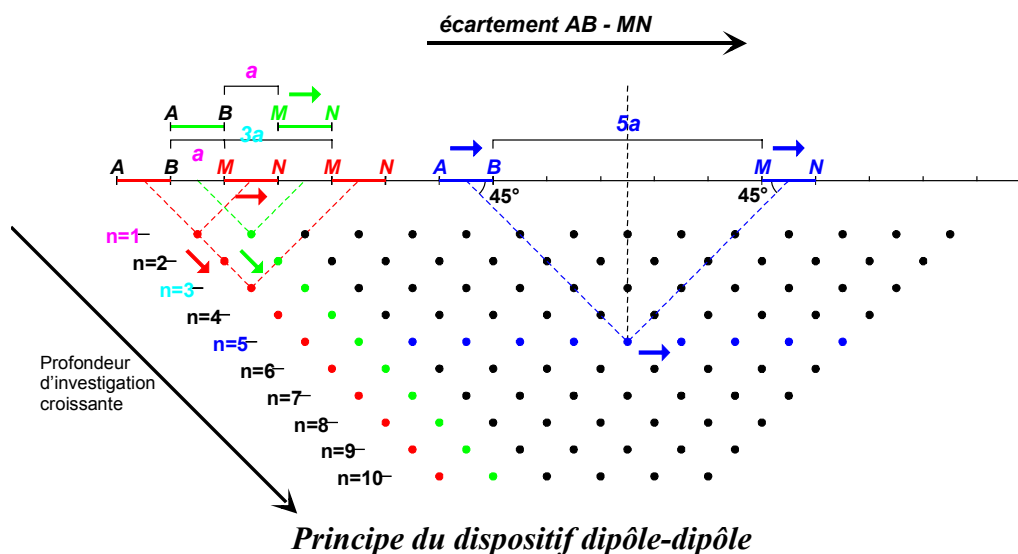
fortement augmenter la longueur de dispositif pour obtenir un résultat comparable à celui obtenu sur un terrain superficiel résistant.

2. PRINCIPES DES MÉTHODES DU PANNEAU ÉLECTRIQUE

Ces méthodes utilisent des ensembles d'électrodes régulièrement espacées le long d'un profil rectiligne, auxquelles on ajoute parfois une ou deux électrodes situées loin du profil et réputées placées « à l'infini ». Le dispositif de mesure se décompose en plusieurs sous-ensembles. On distinguera les parties immobiles du dispositif, utilisant les électrodes lointaines, des parties mobiles, utilisant les électrodes du profil ; dans les parties mobiles, on distinguera la partie émettrice de la partie réceptrice. Les grandeurs caractéristiques de ces méthodes sont le spacing D (terme anglais couramment traduit par espacement) qui correspond à la distance entre les électrodes du profil, et le rang, grandeur entière qui indique la distance (en nombre de spacing n) entre les parties émettrice et réceptrice du dispositif. La position de la mesure est celle du milieu du segment émetteur-récepteur. La profondeur d'investigation augmente avec le rang n .

La coupe géo-électrique de résistivité apparente, appelée pseudocoupe est établie en mesurant la tension pour toutes les combinaisons possibles d'émetteur et de récepteur. Les mesures effectuées avec un écartement entre émetteur-récepteur de un spacing sont dites de rang 1, celles effectuées avec un écartement de deux spacing sont de rang 2, etc. Les mesures sont présentées sous formes de coupe isovaleur dont l'axe des abscisses correspond à la position le long du profil, et l'axe des ordonnées correspond au rang (pseudo-profondeur).

L'interprétation de la pseudocoupe prend en compte l'ensemble des mesures et aboutit à une coupe, distribution continue des résistivités vraies le long du profil et en fonction de la profondeur. Cette interprétation est plus contrainte que celle des sondages électriques, les méthodes de panneau électrique sont donc moins sensibles au phénomène d'équivalence, et l'étalonnage sur sondage est moins primordial



3. VARIANTES DE DISPOSITIF

- Méthode de panneau électrique pôle-pôle : La partie immobile du dispositif est constituée de deux électrodes lointaines; l'une jouera le rôle de B, l'autre celui de N. La partie émettrice est constituée par l'électrode A, mobile, et la partie réceptrice par l'électrode M, mobile également ;
- Méthode de panneau électrique pôle-dipôle : La partie immobile du dispositif est constituée d'une électrode lointaine; elle jouera le rôle de B. La partie émettrice est constituée par l'électrode A, mobile. La partie réceptrice est constituée par deux électrodes, M et N, écartées de un spacing ; ces deux électrodes constituent un dipôle, mobile également et dont la position caractéristique est située en son milieu ;
- Méthode de panneau électrique dipôle-dipôle : Cette méthode n'utilise d'électrode lointaine. La partie émettrice est constituée par deux électrodes, A et B, écartées de un spacing ; ces deux électrodes constituent un dipôle, mobile, dont la position est définie par l'abscisse de son milieu. La partie réceptrice est également constituée par deux électrodes, M et N, écartées de un spacing qui constituent un dipôle.

À spacing et rang égaux, la méthode dipôle-dipôle a la plus faible profondeur d'investigation, mais le meilleur pouvoir de résolution, alors que la méthode pôle-pôle a la plus grande profondeur d'investigation, mais le moins bon pouvoir de résolution.

4. INTERPRÉTATION

Toutes les pseudo-coupes sont interprétées par inversion simultanée de la résistivité apparente et de la polarisation provoquée avec le logiciel RES2DINV (M.H. Loke). Ce logiciel est utilisé en configuration éléments finis et comporte des algorithmes de convergence très perfectionnés.

Le logiciel RES2DINV prend en compte la topographie des profils et permet de corriger les effets de relief (anomalies parasites dues aux variations de relief importantes). Le logiciel s'affranchit également de tous les artefacts « classiques », liés au dispositif dipôle-dipôle (à-coups de prises dus aux structures superficielles) et au mode de représentation des pseudo-coupes (« chapeaux chinois », branches inclinées à 45°).

Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme de coupe-profondeur de résistivité ou de polarisation provoquée vraie.

Cette interprétation par inversion fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : caractéristiques électriques (résistivité et chargeabilité vraies), géométrie et profondeur, pendage.

Même si la précision et la stabilité des inversions sont optimisées par des algorithmes de convergence très performants, en l'absence d'étalonnage (résistivité et chargeabilité

mesurées sur échantillons, profondeur des interfaces géoélectriques) les paramètres géométriques fournis par l'inversion des pseudo-coupes peuvent varier, en théorie, dans une fourchette comprise entre 10 et 20 %.

5. MATÉRIEL UTILISÉ

Système multi-électrodes pour résistivimètre **E-NODE** de IRIS Instruments qui permet l'automatisation des séquences de mesure de panneaux électriques. Cet instrument présente les avantages suivants :

- simplicité de mise en œuvre ;
- le système de commutation automatique d'électrodes permet une acquisition rapide des mesures pour la réalisation de profils, sondages ou pseudo-coupes de résistivité.



Exemple - Contribution à la caractérisation hydrogéologique d'une zone de faille dans le bassin parisien par panneaux électriques.

6. OBJECTIF

Le but de l'étude est la localisation précise d'une faille d'amplitude régionale connue par ailleurs grâce aux données de sismique réflexion issues de la prospection pétrolière et grâce à d'autres études géophysiques à but hydrogéologique.

L'objectif de la géophysique est de localiser de façon très précise la zone de fracturation pour ensuite implanter un forage de contrôle qui permettra de tester le potentiel aquifère de cette zone.

7. MÉTHODOLOGIE

La zone fracturée devrait se caractériser par un contraste de résistivité.

La méthode utilisée est celle du courant électrique continu, le paramètre mesuré est donc la résistivité apparente en panneau électrique avec des dispositifs dipôle-dipôle de 25 et 50 m.

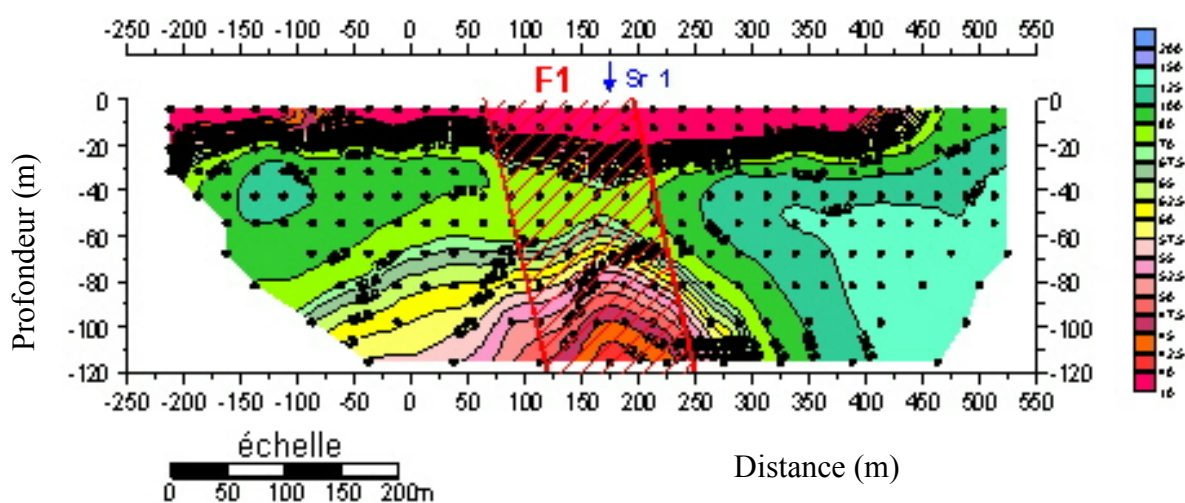
8. RÉSULTATS

Trois profils ont été mesurés et interprétés, dont l'un est représenté sur la figure ci-dessous.

Le schéma géoélectrique qui se dessine est le suivant, conforme à la coupe géologique prévisionnelle :

- de 0 à une vingtaine de mètres, présence d'un horizon conducteur ($< 60 \text{ Ohm.m}$), correspondant aux calcaires d'Etampes et aux meulière de Montmorency ;
- de 20 à 80 m un ensemble résistant (70-300 Ohm.m) caractérise les sables de Fontainebleau. Ce résistant est affecté par des discontinuités (anomalies conductrices) qui peuvent être en relation avec des zones faillées ;
- de 80 à 110 m (profondeur d'investigation maximale) les résistivités qui caractérisent la craie présentent des contrastes importants. Les résistivités de l'ordre de 100 à 150 Ohm.m sont assimilées à la craie saine, alors que les zones où la résistivité est inférieure à 55 Ohm.m indique probablement la présence de fracturation.

La faille F1 est marquée par une importante anomalie conductrice ($< 45 \text{ Ohm.m}$) et par une discontinuité dans les sables de Fontainebleau.



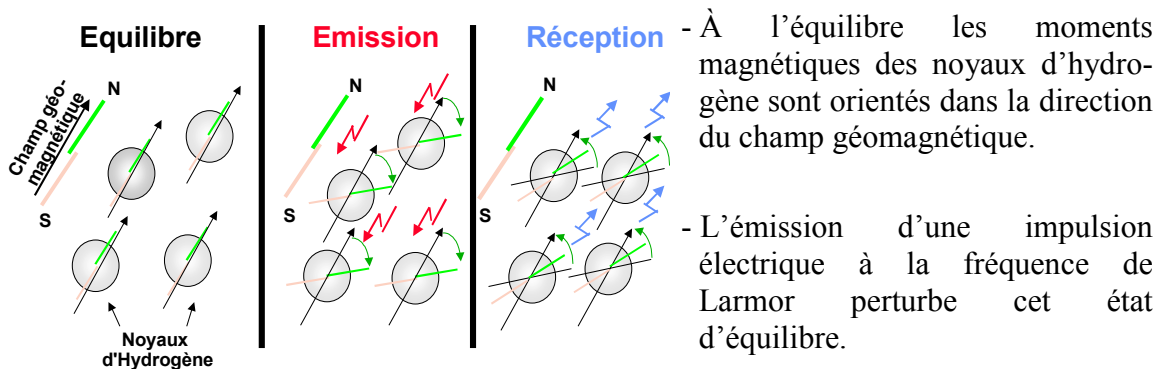
Présentation de la méthode de résonance magnétique protonique

INTRODUCTION

Le BRGM, dans le cadre de ses programmes de Recherche et Développement, a mis au point, en collaboration avec l'Institut of Chemical Kinetics and Combustion (Russie) et IRIS Instruments, une nouvelle méthode de d'exploration de l'eau souterraine fondée sur le principe de la Résonance Magnétique Protonique (RMP). Le fruit de cette collaboration s'est concrétisé par la réalisation d'un équipement opérationnel, dénommé « NUMIS », avec lequel différents tests méthodologiques ont été réalisés dans des environnements géologiques variés.

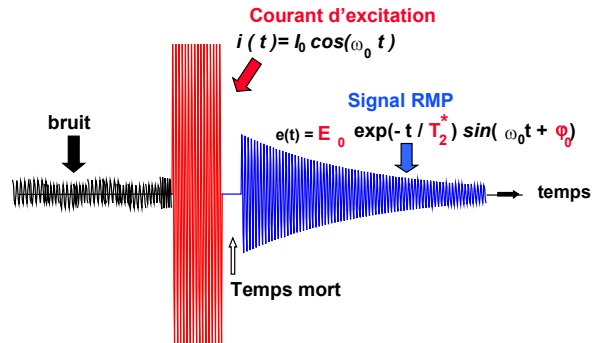
1. PRINCIPES : UNE MÉTHODE DIRECTE DE DÉTECTION DE L'EAU

Les méthodes géophysiques traditionnelles reposent sur la mesure des paramètres physiques des roches et ne renseignent que de façon indirecte sur la présence de l'eau dans le sous-sol. Le principe de la méthode consiste à mesurer le champ magnétique émis par les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau excités par un courant électrique de fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) injecté dans une boucle déployée en surface.



- Après coupure de l'injection, on enregistre le signal RMP produit lors du retour à l'équilibre.

Pour réaliser un sondage RMP, une série d'impulsions électriques (paramètre d'excitation) d'amplitudes différentes et connues sont injectées dans une boucle de diamètre D déployée en surface, qui sert à la fois d'antenne d'émission et de réception. Le volume de terrain pris en compte correspond environ à un cylindre de diamètre $1,5 \times D$ et de hauteur 100 m (suivant la géométrie de l'antenne et la conductivité des terrains).



Les paramètres mesurés sont les suivants :

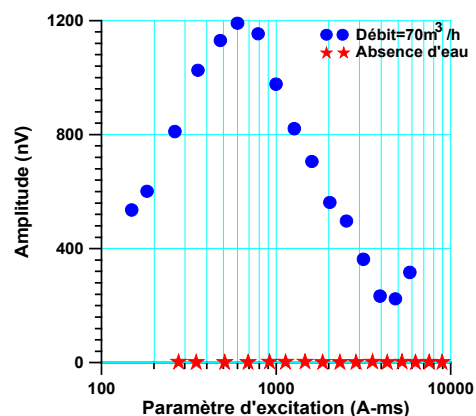
- l'amplitude E_0 du signal mesuré qui fournit des informations sur la localisation et la teneur en eau du sous-sol au droit du sondage ;
- le temps de décroissance T_2^* du signal mesuré qui est lié à la taille moyenne des pores des formations aquifères ;
- la phase ϕ_0 du signal mesuré qui est liée à la conductivité des terrains.

L'inversion de ces paramètres mesurés en fonction des différentes valeurs du paramètre d'excitation conduit à l'obtention de courbes précisant la distribution des teneurs en eau et des temps de décroissance en fonction de la profondeur.

2. RÉSULTATS D'APPLICATIONS

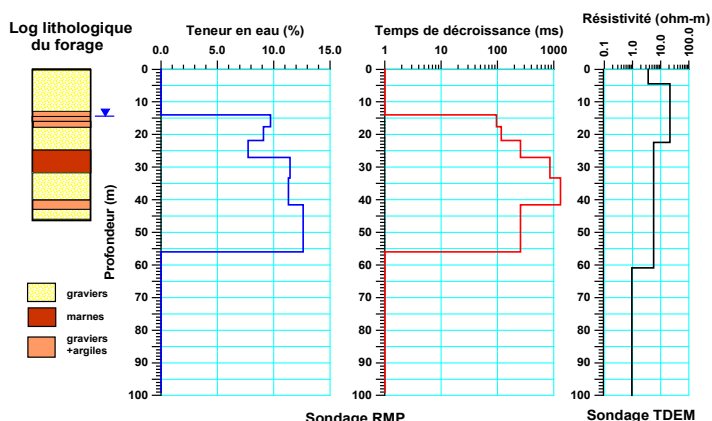
2.1. Détection

L'existence d'un signal RMP est directement liée à la présence d'eau : Exemple de courbes d'amplitudes RMP en fonction du paramètre d'excitation, obtenues près de deux forages: l'un est producteur, l'autre ne produit pas.

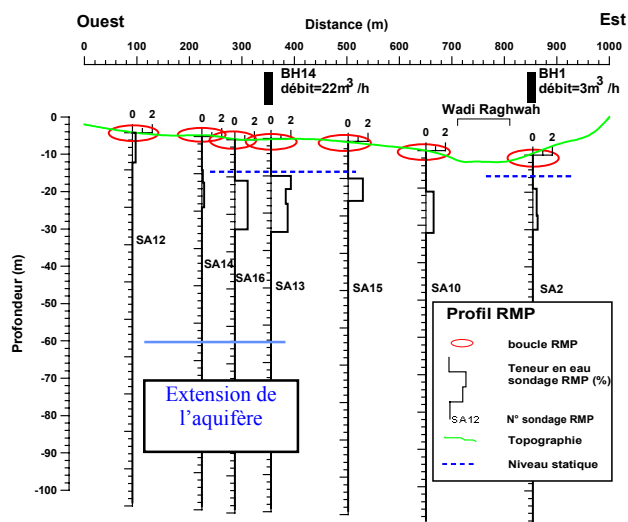


2.2. Caractérisation des qualités des aquifères

Résultats d'un sondage RMP réalisé dans un contexte géologique comprenant une alternance de graviers, de marnes et d'argiles. Le niveau hydrostatique est bien déterminé par la RMP. La formation aquifère a bien été localisée. Des variations significatives des teneurs en eau et des temps de décroissance révèlent la présence d'argiles, marnes et graviers. A droite de la figure, le résultat d'un sondage TDEM ne permet pas de statuer sur l'existence d'un aquifère, ni de le caractériser. Toutefois, la présence de terrains conducteurs ($< 10 \text{ ohm.m}$) influence la profondeur d'investigation et la précision des résultats d'un sondage RMP ; les deux méthodes peuvent donc s'avérer complémentaires.



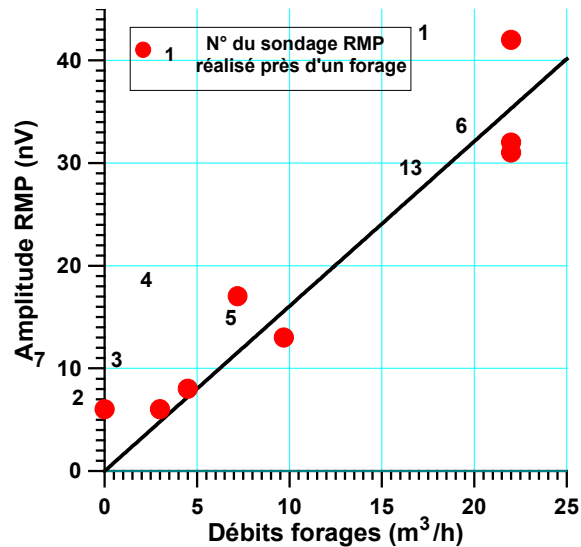
2.3. Profilage



La réalisation de profils comprenant plusieurs sondages RMP permet de définir précisément l'extension géométrique d'un aquifère. Exemple obtenu dans un milieu granitique fracturé montrant les variations des teneurs en eau en fonction de la profondeur, déduites des sondages RMP entre deux forages de débits différents.

2.4. Optimisation

Après calibration avec des données des forages, des relations empiriques peuvent être établies entre paramètres RMP et caractéristiques hydrodynamiques des aquifères. Exemple de relation linéaire entre les débits mesurés de huit forages et les amplitudes des signaux RMP, obtenue dans le même contexte géologique que pour la figure précédente.



CONCLUSIONS

La RMP est une méthode directe exclusivement sensible à l'eau. Quelle que soit la nature des formations géologiques étudiées (milieux poreux, fracturés ou fissurés), elle permet de prendre en compte la seule signature de l'eau. Elle en précise la répartition dans le sous-sol et peut contribuer à une implantation optimale de forages. Elle constitue un nouvel outil géophysique d'exploration des ressources en eau utile aux hydrogéologues.

BIBLIOGRAPHIE

- Legtchenko A., Shushakov O. A. (1998) - Inversion of surface NMR data, *Geophysics*, Vol. 63, n°1, 75-84.
- Legtchenko A., Beauce A., Guillen A., Valla P., Bernard J. (1997) - Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface, *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 2, 173-190.
- Beauce A., Bernard J., Legtchenko A., Valla P. (1996) - Une nouvelle méthode géophysique pour les études hydrogéologiques: l'application de la résonance magnétique nucléaire, *Hydrogéologie*, Vol. 1, 71-77.

