

DOCUMENT PUBLIC

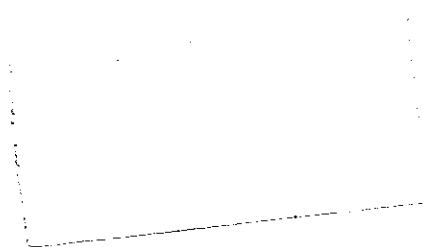
***Etat de l'art des méthodes géophysiques
appliquées à la localisation de failles actives dans
le cadre d'études de risque sismique***

Rédigé sous la responsabilité de
H. Fabriol et J.C. Gourry

**mai 2000
R 40898**



DOCUMENT PUBLIC



***Etat de l'art des méthodes géophysiques
appliquées à la localisation de failles actives dans
le cadre d'études de risque sismique***

mai 2000
R 40898



BRGM

L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

Mots clés : faille actives, géophysique, proche surface.

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

H. Fabriol, J.C. Gourry (2000) – Etat de l'art des méthodes géophysiques appliquées à la localisation de failles actives dans le cadre d'études de risque sismique. Rapport BRGM, R 40898, 26 p., 10 fig., 1 ann.

© BRGM, 2000, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport s'inscrit dans le projet de recherche BRGM « Risques naturels » et plus particulièrement dans son module « Failles actives ». Dans cette étude, nous proposons au sismotectonicien des fiches décrivant les méthodes géophysiques susceptibles d'être utilisées pour localiser des discontinuités de type faille en proche surface (moins de 50 m).

Nous définissons plusieurs configurations géologiques auxquelles le sismotectonicien peut être confronté. Afin que le géophysicien puisse orienter l'étude, chacune des rubriques doit être renseignée. Nous présentons ensuite sous forme de fiche treize méthodes géophysiques pouvant s'appliquer à la détection de faille suivant plusieurs critères : principe, type de résultats, interdits d'utilisation, coût et rendement ...

Pour la suite des travaux, nous proposons de tester ces méthodes dans différents contextes géologiques afin de valider le présent travail. Malgré tout le soin que l'on peut porter à la rédaction de ces fiches, rien ne remplacera l'expérience du géophysicien pour définir la meilleure méthode adaptée au problème posé par le sismotectonicien.

Sommaire

Synthèse	3
Introduction	9
1. Configurations géologiques	9
1.1. Avant-propos	9
1.2 Caractéristiques de la faille	12
1.2.1. Le recouvrement	12
1.2.2. Le remplissage	13
1.2.3. Le mouvement principal de la faille	13
1.2.4. Le pendage de la faille.....	13
1.2.5. L'encaissant.....	14
1.3. L'environnement	14
1.3.1. Humain.....	14
1.3.2. Climatique	14
1.3.3. Géologique.....	15
1.3.4. Topographique.....	15
2. Fiches par méthodes.....	17
3. Utilisation des fiches	19
4. Conclusion.....	23
Bibliographie	25
Liste des figures.....	26
Liste des tableaux.....	26
Liste des annexes.....	26

Introduction

Ce rapport s'inscrit dans le projet de recherche BRGM « Risques naturels » et plus particulièrement dans son module « Failles actives ». Dans cette étude, nous proposons au sismotectonicien des fiches décrivant les méthodes géophysiques susceptibles d'être utilisées pour localiser des discontinuités de type faille. Celles-ci sont de jeu récent (affectant le Pliocène ou le Quaternaire), situées à faible profondeur et sous un recouvrement de 0 à 10 m environ.

Ces fiches sont destinées à éclairer le sismotectonicien sur l'aide que peut lui apporter la géophysique de proche surface et sur le coût estimatif d'une opération. Les fiches donnent l'état de l'art de la géophysique pour la détection de ruptures de faible profondeur en fonction d'environnements géologiques variés. Mais il est difficile de prendre en considération tous les cas de figures possibles. L'organisation d'une opération de géophysique impliquera nécessairement l'appui d'un géophysicien expérimenté qui sera en mesure de définir le type de méthode et le volume de travail en fonction du problème posé par le sismotectonicien.

Les différentes configurations géologiques rencontrées par le sismotectonicien sont énumérées schématiquement (Chap. 1). Chaque méthode est décrite (principe, bibliographie, cadre d'utilisation, interdits, coût et rendement des mesures) et détaillée suivant une liste homogène de critères en liaison avec le problème posé (Chap. 2). Pour chacune des configurations géologiques, un tableau à double entrée propose des méthodes géophysiques suivant une graduation de l'adéquation de la méthode à résoudre le problème (Chap. 3).

1. Configurations géologiques

Nous avons cherché à détailler les différents cas de figure que le sismotectonicien pourrait rencontrer sur le terrain. Ceci afin de présenter au géophysicien un descriptif complet des paramètres à prendre en compte dans le choix de la (ou des) méthodes géophysiques proposées.

L'AGAP (Association pour la Qualité en Géophysique Appliquée) est en train de définir le cahier des charges à fournir par le demandeur et nécessaire à l'élaboration d'une étude géophysique. Les renseignements fournis doivent permettre de proposer la ou les méthodes géophysiques les plus adéquates compte tenu du niveau de connaissance de l'environnement géologique.

Le faible nombre de références bibliographiques, d'une part, et l'accroissement récent de la recherche dans ce domaine, d'autre part, montrent l'intérêt progressif des géophysiciens pour ce problème.

1.1. AVANT-PROPOS

A partir du problème simple d'une faille inverse ou d'une faille normale évoluant au cours du temps, les figures 1 et 2 montrent comment la situation géologique peut changer de manière significative. La réponse de la géophysique évoluera en conséquence, car chacun des stades d'évolution des failles est un cas de figure différent pour la géophysique. Nous n'avons pas mis d'échelle sur les figures 1 et 2, car toutes les méthodes géophysiques ont une profondeur d'investigation et une résolution qui dépendent du dispositif de mesure. En général, plus la profondeur d'investigation augmente, plus la résolution diminue. Par conséquent, les rejets minimums détectables dépendent de leur profondeur et de la méthode. Les stades 4 seront nécessairement plus faciles à mettre en évidence que les stades 1.

Au stade 1, la faille préexiste en profondeur mais il n'y a aucune rupture de surface et les premiers terrains ne sont pas décalés. Il y aura donc peu de méthodes susceptibles de la détecter, sauf si elle est altérée et remplie de matériau conducteur (électromagnétisme ou électrique) ou de matériau magnétique (magnétisme au sol).

Au stade 3 de la faille inverse (figure 1) et au stade 2 de la faille normale (figure 2), des dépôts de pente liés à l'érosion de l'escarpement apparaissent. Ces dépôts de pente peuvent être un indice indirect de la présence d'une faille active et ne sont pas toujours différenciés des terrains sous-jacents, échappant ainsi à l'analyse du géologue. En revanche, la géophysique pourra détecter le sur-épaississement en bas de l'escarpement (tomographie électrique ou sismique réfraction). Mais dans les deux cas cette couche en bas d'escarpement pourrait être une terrasse sans lien aucun avec la présence d'une faille.

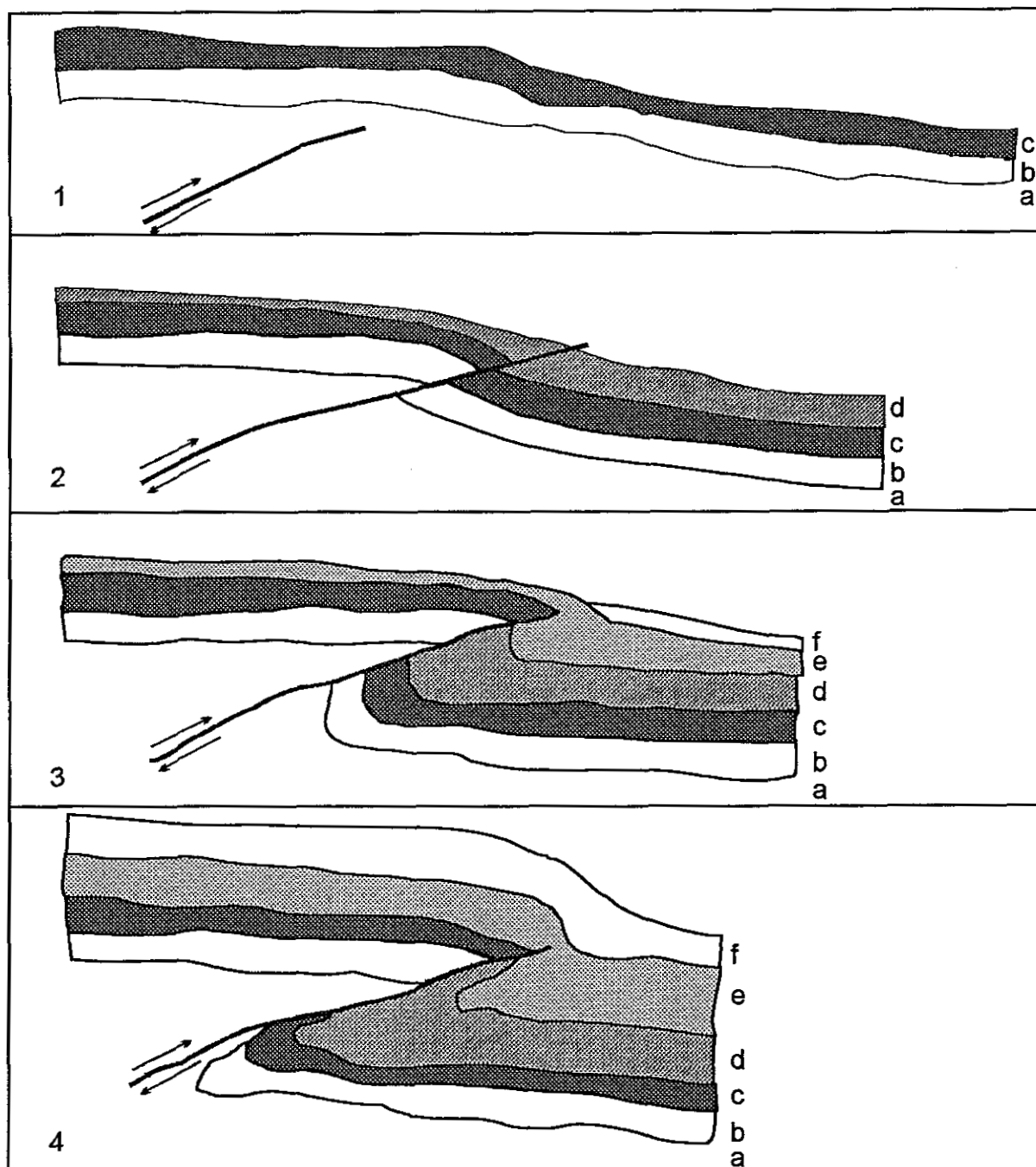


Figure 1 : Schémas décrivant l'évolution d'une faille inverse active (d'après Meghraoui, 1988). Chacun des stades d'évolution de cette faille est un cas de figure différent pour la géophysique

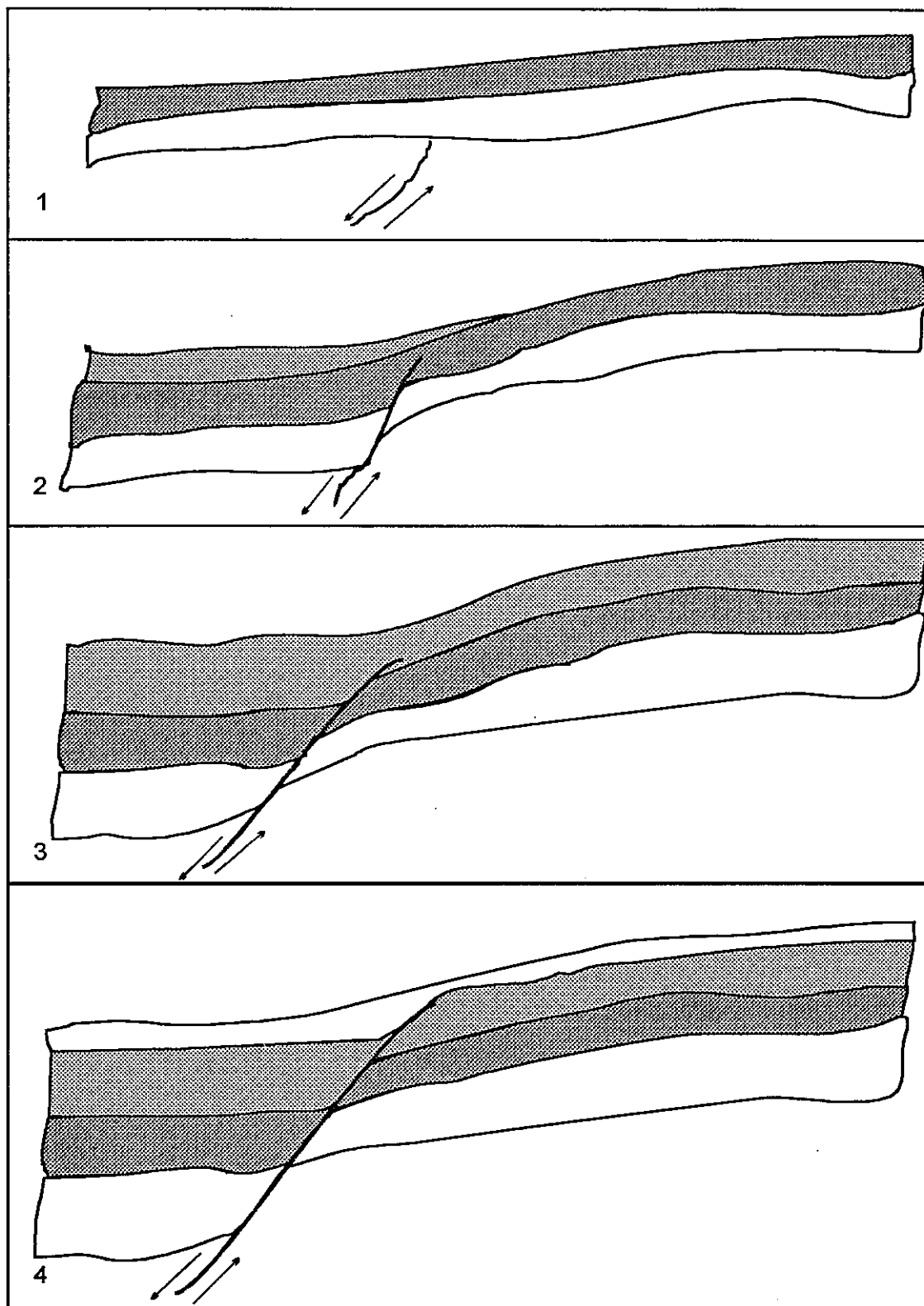


Figure 2: Schémas décrivant l'évolution d'une faille normale active (d'après Meghraoui, 1988). Chacun des stades d'évolution de cette faille est un cas de figure différent pour la géophysique

Pour qu'une méthode géophysique soit efficace, il faut que la géométrie des couches soit telle que des contrastes de propriétés physiques puissent être observés. Même à un stade très avancé de son évolution, il sera difficile de détecter la faille inverse au stade 4 (figure 1) car les couches ont tendance à s'entremêler. En revanche, la détection des failles normales est facilitée du fait que les couches "s'écartent" les unes des autres (figure 2, stades 3 et 4). A ce jour, les exemples de la littérature où la géophysique est employée par la reconnaissance de rupture de surface ne montrent que des failles normales.

1.2 CARACTERISTIQUES DE LA FAILLE

La connaissance des caractéristiques de la faille est fondamentale pour définir une étude géophysique. Nous nous sommes efforcés de classer les critères par ordre d'importance.

1.2.1 Le recouvrement

Paramètres qui le caractérisent:

- Epaisseur :
- Centimétrique
 - Décimétrique
 - Métrique (exemple : 2-3 m dans le cadre de failles récentes à Courthézon et Manosque)
 - Décamétrique à pluridécamétrique (sols alluvionnaires ou détritiques, exemple : Antilles)
- Nature :
- Remblais
 - Argiles (limons, loess, marnes fines ...)
 - Dépôts de pente
 - Sables
 - Latérites
 - Alluvions caillouteuses : graviers, galets, blocs
 - Volcanique :
 - Couches homogènes (coulées)
 - Flux pyroclastiques, lahars (plus ou moins altérés)

Profondeur du niveau phréatique dans le recouvrement.

Le recouvrement de la faille est le paramètre important pour définir la bonne méthode géophysique à appliquer. En effet, le recouvrement correspond à la couche géologique où la faille n'a pas encore joué : les dépôts sont plus récents que le dernier rejeu de la faille. La méthode et la configuration de la mesure vont donc être choisies suivant l'épaisseur du recouvrement qui détermine la profondeur d'investigation et la résolution (cette dernière étant inversement proportionnelle à la portée de la méthode).

Comme le montrent les figures 1 et 2, la présence de recouvrement ou de dépôts de pente peut masquer la faille, mais aussi être un indice de la présence d'une faille

1.2.2 Le remplissage

Paramètres qui le caractérisent:

- Remplissage :
- Broyage consolidé : brèche, mylonite
 - Broyage non consolidé
 - carbonates pulvérulents (circulation superficielle)
 - sables et/ou silts (suite à une liquéfaction)
 - Dépôts hydrothermaux
 - argiles
 - quartz ou autres minéraux “ cristallins ”
 - circulation de fluide salé ou saumâtre

- Largeur :
- Centimétrique
 - Décimétrique
 - Métrique

Pas de remplissage.

La présence d'un remplissage dans la faille fera souvent office de cible, en particulier si elle est remplie d'argiles d'altération ou de fluide salé ou saumâtre. L'absence de remplissage de la faille n'est pas forcément un problème : le radar géologique et la sismique réflexion sont sensibles à la présence d'interface matière/air.

1.2.3 Le mouvement principal de la faille

La faille peut être:

- Normale
- Inverse
- Décrochante (en coulissement)

Nous avons vu au chapitre 1.1 l'importance du mécanisme de la faille ; en général, une faille normale sera plus facile à détecter qu'une faille inverse. Une faille purement décrochante ne pourra être détectée que si la zone de broyage est suffisamment large.

1.2.4 Le pendage de la faille

Nous considérons deux cas:

- supérieur à 60°
- inférieur à 60°

Les méthodes géophysiques à propagation d'onde (sismique réflexion, radar géologique) permettent de détecter les plans de faille : des réflexions et des diffractions sur le plan de faille peuvent être enregistrées. Mais il est difficile de détecter la faille elle-même si le pendage est supérieur à 60°. Par contre, il est possible d'enregistrer des décalages de couches liés au mouvement de la faille.

1.2.5 L'encaissant

Ses différentes caractéristiques:

- Homogène (c'est-à-dire isotrope)
- Stratifié
- Non-homogène, c'est-à-dire présentant une sédimentation irrégulière, comme des conglomérats, ou une discontinuité stratigraphique
- Profondeur du niveau phréatique
- Présence de décalages dans le bedrock

1.3 L'ENVIRONNEMENT

1.3.1 Humain

Il peut être :

- industriel (urbain dense)
- urbain dispersé
- agricole à couverture végétale dense
- bois, forêt, taillis
- désertique (absence de couverture végétale)

L'environnement industriel ou urbain est toujours une gêne, voire un interdit, pour les méthodes géophysiques. La présence de bois peut également gêner la progression des opérateurs sur le terrain : il est souvent nécessaire de recourir à un layonnage des profils de mesure. De ce fait, le coût des campagnes de mesures en forêt augmente de plus de 25 %. La polarisation spontanée en forêt est délicate car des phénomènes d'électrofiltration existent au niveau des racines d'arbres. La présence de cultures fragiles ou dont les plants dépassent 50 cm sera une gêne: la progression dans les cultures devient difficile au-delà de cette hauteur.

1.3.2. Climatique

L'environnement peut être :

- gelé (permafrost)
- tempéré
- mangrove
- tropical
- aride ou semi-aride

En domaine aride, la résistivité des sols a tendance à s'homogénéiser. Les contrastes de résistivité des couches proches de la surface peuvent alors disparaître. En revanche, l'absence d'eau est un avantage pour la méthode radar car les résistivités deviennent très élevées. En domaine tempéré, il peut être judicieux de réaliser des mesures électriques ou électromagnétiques (mesure de résistivité) après une période pluvieuse afin de faire ressortir les contrastes de résistivité. A l'opposé, la résistivité de sols saturés a tendance à

s'homogénéiser. La polarisation spontanée qui mesure les potentiels électrocinétiques et électrochimiques du sol est très sensible au mouvement de fluides : cette méthode est adaptée à la détection de failles qui seraient des drains pour les eaux météoriques. La pluie devient un facteur nécessaire pour ce type de méthode.

Les sols gelés sur de grandes profondeurs comme le permafrost sont des terrains à faible perte électrique idéaux pour le radar géologique.

1.3.3 Géologique

Les trois grandes catégories :

- sédimentaire
- cristallin (métamorphique ou plutonique)
- volcanique

1.3.4 Topographique

Différents cas:

- Plaine
- Montagne
- Crête
- Vallée

La présence de topographie (ce qui est souvent le cas pour des ruptures de surface) est une gêne pour la mesure géophysique (accès rendu difficile) et pour l'interprétation car toutes les méthodes géophysiques sont sensibles au relief qui peut à son tour créer une anomalie géophysique ou au contraire masquer un rejet. Non corrigés de l'effet topographique au niveau d'un escarpement, une section radar peut ne pas révéler des décalages de couches. Cet effet topographique doit être corrigé, ce qui est parfois mal maîtrisé, comme par exemple en électromagnétisme.

2. Fiches par méthodes

Nous nous sommes inspirés du Code de Bonne Pratique en Géophysique Appliquée, établi par le BRGM, la CGG, la CPGF et le LCPC (1992). Chaque fiche présente brièvement le principe de la méthode avec un schéma explicatif, les conditions d'applications (favorables et défavorables), le résultat fourni et le coût approximatif (Annexe 1). Les treize méthodes choisies sont les suivantes (certaines d'entre elles sont illustrées par des exemples issus de la littérature)

- radar géologique (figures 3 et 4)
- gravimétrie au sol
- microgravimétrie (figure 5)
- profil sismique réfraction (figure 6c),
- sismique réflexion haute résolution (figure 7)
- tomographie sismique
- magnétisme au sol (figure 8)
- traîné électrique (figure 6a et 6b)
- panneau électrique
- polarisation spontanée (figure 9)
- radio magnétotellurique-VLF
- EM au sol avec émetteur fixe
- EM au sol avec émetteur mobile (figures 8 et 10).

3. Utilisation des fiches

Nous avons créé un tableau à double entrée où les lignes sont constituées par les différents contextes géologiques et conditions de terrain décrits au Chap. 1, et les colonnes par les 13 méthodes du Chap. 2 (Tableau 1). Nous avons cherché à remplir ce tableau, ce qui revient à prendre un cas géologique donné, lui adjoindre des conditions de terrain puis attribuer une note à chacune des treize méthodes décrites dans les fiches.

Ce tableau n'a qu'un caractère indicatif car toutes les méthodes peuvent être utilisées à des degrés divers. Chaque réponse peut être nuancée par une appréciation différente de l'efficacité de telle ou telle méthode. En fait, il n'y a que peu de cas où une méthode est réellement proscrite : par exemple en environnement urbain les méthodes électriques avec injection de courant ou les méthodes électromagnétiques. De même, attribuer une note est très subjectif. Nous nous sommes donc limités à indiquer sur le tableau les cas où une méthode ne peut pas s'appliquer (N) et les cas où la méthode est particulièrement bien adaptée (O) sous réserve qu'un interdit ne se superpose. Les autres cas sont laissés à l'appréciation de l'utilisateur. Cela signifie que celui-ci devra choisir à l'aide des fiches la (ou les) méthodes qui conviennent le mieux à son problème particulier. Cela devrait lui donner des éléments pour faire une première proposition chiffrée à son client. Par la suite, une discussion avec le géophysicien sera nécessaire pour arrêter le choix final et monter le devis précis.

Etat de l'art des méthodes géophysiques appliquées à la localisation de failles actives

Conditions Géologiques		Radar	Gravi.	Micro gravi.	Sismique Réfraction	Sismique HR	Tomogra- phie sismique	Magnétis- me	Trainé électrique	Panneau Electrique	Polarisa- tion spontanée	RMT-VLF	EM TX fixe	EM TX mobile
Nature du Recouvre- ment	Remblais, alluvions grossières													
	Sables, alluvions fines													
	Argiles humides	N							N	N		N	N	N
	Volcanique homogène													
	Volcanique inhomogène				N	N	N		N	N		N	N	N
Epaisseur recouvre- ment	Décimétrique													
	Métrique	N												
	Décamétrique	N		N		N	N		N	N				
Mouvement de la faille	Normale													
	Inverse													
	Décrochement	N			N	N	N							
Nature du remplissage	Consolidé													
	Non consolidé				N	N	N	N						
	Hydrothermal (argiles)	N			N	N	N	N						
	Minéralisé							O			O			O
	Fluide salé/saumâtre	N							O	O	O	O	O	O

Conditions Géologiques		Radar	Gravi.	Micro gravi.	Sismique Réfraction	Sismique HR	Tomogra- phie sismique	Magnétis- me	Trainé électrique	Panneau Electrique	Polarisa- tion spontanée	RMT-VLF	EM TX fixe	EM TX mobile
Taille du remplissage	Centimétrique		N		N	N		N	N	N		N	N	N
	Décimétrique		N		N	N		N						
	Métrique						N							
Absence remplissage		O	N		N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Pendage de la faille	Supérieur à 60°	N				N								
	Inférieur à 60°													
Nature de l'encaissant	Stratifié sans contrastes	N	N	N	N	N			N	N				
	Stratifié avec contrastes													
	Présence d'eau													
	Bedrock décalé	O		O	O	O	N							

Environnement Urbain								N	N	N	N	N	N	N
	Agricole (sans Haute Tension ou clôtures)													
	Agricole (avec HT ou clôtures)	N						N	N	N		N	N	N
	Bois, forêt													
	Désertique													

Environnement		Radar	Gravi.	Micro gravi.	Sismique Réfraction	Sismique HR	Tomogra- phie sismique	Magnétis- me	Tratné électrique	Panneau Electrique	Polarisa- tion spontanée	RMT-VLF	EM TX fixe	EM TX mobile
Climatique	Gelé	O												
	Tempéré													
	Tropical										N			
	Mangrove	N							N	N	N	N	N	N
	Aride, semi- aride													
Topographie	Plane													
	Accidentée			N	N	N	N		N	N	N		N	
Géologie régionale	Sédimentaire					O								
	Cristallin							O						
	Volcanique					N	N				O			

Tableau 1 : Tableau à double entrée caractérisant l'applicabilité des méthodes du Chap. 2 en fonction du contexte géologique ou de l'environnement humain et climatique. O : méthode recommandée, N: méthode déconseillée

4. Conclusion

Ce rapport est un état de l'art sur l'application des méthodes géophysiques à la reconnaissance des failles actives. Il vise essentiellement à montrer la palette d'outils à laquelle le sismotectonicien peut faire appel dans le cadre d'études de risque sismique. Si chacune des rubriques des configurations géologiques est correctement remplie (§ 1.2.), le géophysicien pourra alors mieux définir l'étude.

Les méthodes présentées sont au nombre de treize : chacune a ses avantages et ses inconvénients. Il existe toujours une méthode pouvant en remplacer une autre si cette dernière s'avère déficiente. Mais il n'y a pas de recette, de méthode prête à l'emploi. Ce sera au géophysicien que reviendra la tâche de définir les méthodes et le plan de travail en fonction du problème posé. Il est nécessaire que le sismotectonicien ait une bonne connaissance du terrain d'étude pour que le dialogue avec le géophysicien soit fructueux.

Certaines techniques telles que la polarisation spontanée ont été délaissées depuis quelques années car elles servent essentiellement pour la recherche minière ou hydrogéologique. De même nous avons omis volontairement la polarisation provoquée (PP) et la Résonance Magnétique Protonique (RMP) car ces deux techniques sont habituellement employées respectivement pour l'exploration minière et la recherche d'eau. Dans certains contextes particuliers, rien n'interdit que ces deux techniques soient utilisées, par exemple s'il y a minéralisation de la faille ou si le niveau statique est décalé par la présence de faille.

Une autre possibilité plus sophistiquée d'aide au sismotectonicien pourrait être un système expert qui intégrerait les données des chapitres 1 et 2. Par un dialogue approprié avec l'utilisateur, ce système lui proposerait en final un nombre limité de méthodes et apporterait toutes les informations pratiques nécessaires à la rédaction d'une demande auprès des prestataires de services. C'est une solution à moyen terme impliquant un informaticien (qui aurait à utiliser un logiciel du commerce), accompagné par un géologue et un géophysicien.

Parallèlement à cela, il serait souhaitable de programmer des études de géophysique légère sur des cas de failles masquées dans des zones à risque françaises (métropole ou DOM), pour vérifier sur le terrain l'adéquation des éléments présentés dans ces fiches.

Bibliographie

Des références supplémentaires sont incluses dans les fiches de méthodes (Annexe1)

BRGM, CGG, CPGF et LCPC (1992) Géophysique appliquée, code de bonne pratique, publié avec l'aide du Ministère de l'industrie.

Corwin R.F. and Hoover D.B. (1979) The self potential method in geothermal exploration. *Geophysics* 59. 202-214

Meghraoui M., Jaegy R., Lammali K. and Albarède F. (1988). Late holocene earthquake sequences on the El Asnam (Algeria) Thrust fault. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 90, pp.187-203.

Meghraoui M., Camelbeeck T., Vanneste K., Brondeel M. and Jongmans D. (2000) Active faulting and paleoseismology along the Bree Fault, Lower Rhine Graben (Belgium). *J. Geophys. Res.* (in press)

Nozaki K. and Kanamori T. (1996) Microgravity survey for shallow subsurface investigations. Proceedings of the Symposium on Applied *Geophysics for Environmental and Engineering Problems (SAGEEP)*. Keystone, CO, USA. pp. 951-959.

Pratt T. L., Dolan J.F., Odum J.K., Stephenson W.J., Williams R.A. and Templeton M.E. (1998). Multiscale imaging of active faults zones for hazard assessment : A case study of the Santa Monica fault zone, Los Angeles, California. *Geophysics*, Vol. 63, No. 2, pp. 479-489

Shields G., Allander K., Brigham R., Crosbie R., Trimble L., Sleeman M., Tucker R., Zhan H. and Louie J. (1998). Shallow Geophysical Survey across the Pahrump Valley Fault Zone, California-Nevada Border. *Bulletin of Seismological Society of America*. Vol 88, no 1, pp. 270-275.

Smith D. and Jol H. (1995). Wasatch Fault (Utah), detected and displacement Characterized by Ground Penetrating Radar. *Environmental and engineering Geosciences*. Vol I, no 4, pp. 489-496.

Wolf, L.W., Collier, J., Tuttle, M. and Bodin, P. (1998). Geophysical reconnaissance of earthquake-induced liquefaction features in the New Madrid seismic zone. *Jour. of App. Geophys.*, 39, pp. 121-129

Liste des figures

Figure 1 - Schémas décrivant l'évolution d'une faille inverse active.....	10
Figure 2 - Schémas décrivant l'évolution d'une faille normale active	11

Liste des tableaux

Tableau 1 - Tableau à double entrée caractérisant l'applicabilité des méthodes du Chap. 2 en fonction du contexte géologique ou de l'environnement humain et climatique	20
---	----

Liste des annexes

Annexe 1 - Fiches des méthodes géophysiques appliquées à la détection de failles en proche surface.	
---	--

Annexe

Annexe 1

Fiches des méthodes géophysiques appliquées à la détection de failles en proche surface

RADAR GEOLOGIQUE

METHODE : Electromagnétisme haute fréquence à émetteur proche contrôlé mobile

PRINCIPE

Emission d'impulsions électromagnétiques brèves de hautes fréquences (10 MHz à 5 GHz) qui se réfléchissent partiellement sur les interfaces entre milieux de constantes diélectriques et/ou de résistivités électriques et/ou de susceptibilités magnétiques différentes. Les échos sont enregistrés. Le dispositif est constitué d'antennes émettrice et réceptrice, et d'un système d'enregistrement des signaux.

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- décalage de bancs réflecteurs aux ondes électromagnétiques (résistance électrique élevée) - remplissages consolidés ou non, ou absence de remplissage - fissures ouvertes ou non - recouvrement centimétrique ou décimétrique autre qu'argileux - environnement urbain (méthode non destructive) - failles normales ou inverses.	Terrain relativement résistant électriquement (résistivité supérieure à 50 Ohm-m)	Tout écran conducteur - niveau phréatique proche de la surface (eau minéralisée) - recouvrement argileux humide - mangrove - remplissage hydrothermal conducteur

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes ponctuelles permettant la localisation d'un objet géologique au mètre près.	De 0 à 10-15 m. Proportionnelle à la résistivité du milieu et inversement proportionnelle à la fréquence de l'antenne utilisée. Dans les milieux argileux, la visibilité est limitée à moins de 1 m

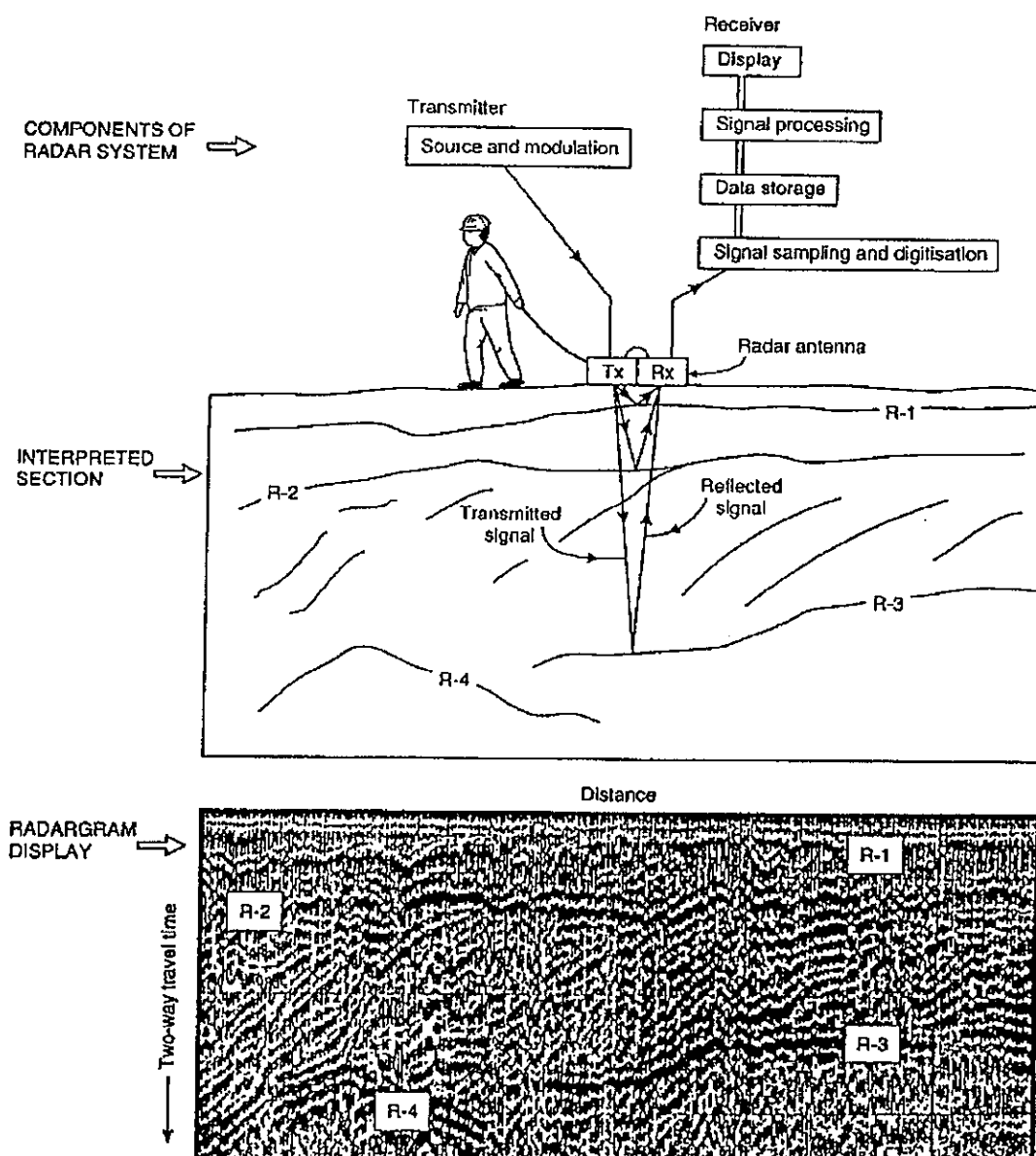
RESULTAT FOURNI

- Section radar commentée
- Sections ou plans traités et/ou interprétés (non exclusif)

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Jongmans, D., Demanet D. & Krings, J. (1998)- Application of geophysical prospecting methods for investigating a Quaternary normal fault in the Bree area (Roer graben). Abstracts Summer School in Active faulting and seismology, Luxembourg, pp. 85-89.
- Cai, J., McMechan, G. & Fisher, M. (1996)- Application of Ground-Penetrating Radar to Investigation of Near-Surface Fault Properties in the San Francisco Bay Region. BSSA, Vol. 86, No. 5, pp. 1459-1470.
- Busby, J.P. & Merritt, J.W. (1999)- Quaternary deformation mapping with ground penetrating radar. J. of Applied Geoph., No. 41, pp. 75-91.
- Shields G., Allander K., Brigham R., Crosbie R., Trimble L., Sleeman M., Tucker R., Zhan H. & Louie J. (1998)- Shallow Geophysical Survey across the Pahump Valley Fault Zone, California-Nevada Border. Bulletin of Seismological Society of America. Vol 88, no 1, pp. 270-275.
- Smith D. and Jol H. (1995)- Wasatch Fault (Utah), detected and displacement Characterized by Ground Penetrating Radar. Environmental and engineering Geosciences. Vol I, no 4, pp. 489-496.
- Bano M., Marquis G., Nivière B., Maurin J.C. et Cushing M. (2000)- Investigating alluvial and tectonic features with Ground Penetrating Radar and analysing diffractions patterns. J. Appl. Geophys. (in press)

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Encombrement et régularité de la surface du sol, niveau phréatique, lithologie (teneur en argiles)	Un radar et un jeu d'antennes appropriées. Un opérateur, un manœuvre
UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
Mètre de profil ou journée (entre 15 et 20 KF/j). Entre 1 et 10 km/j suivant conditions de terrain. Traitement et interprétation compris. Traitements plus sophistiqués (similaires à la sismique réflexion) en supplément	GéoRadar, GPR (Ground Probing Radar ou Ground Penetrating Radar)



Principe de la méthode "radar géologique"

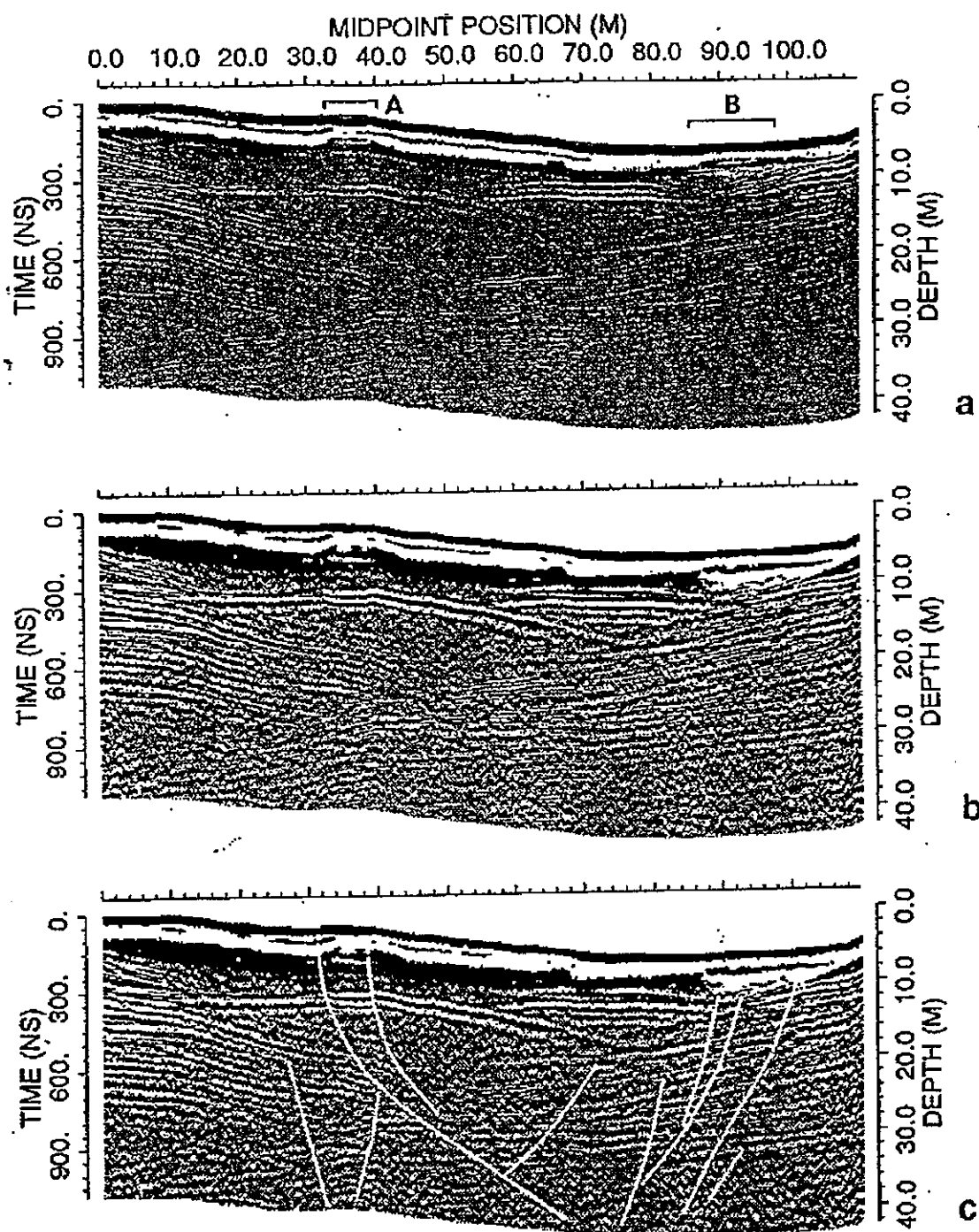


Figure 3 : Données radar à travers la faille de San Andreas près d'Olema. Acquisition à 50 MHz avec 3 m de séparation, stack de 128 traces, intertrace de 20 cm : a) données brutes; b) et c) filtrage passe-bas, correction NMO et d'altitude et conversion temps-profondeur. Les traits blancs superposés à (c) sont les failles. En (a), "A" est la position de la trace principale de l'événement de 1906 et "B" la position de la portion active de la zone faillée (d'après Cai et al., 1996).

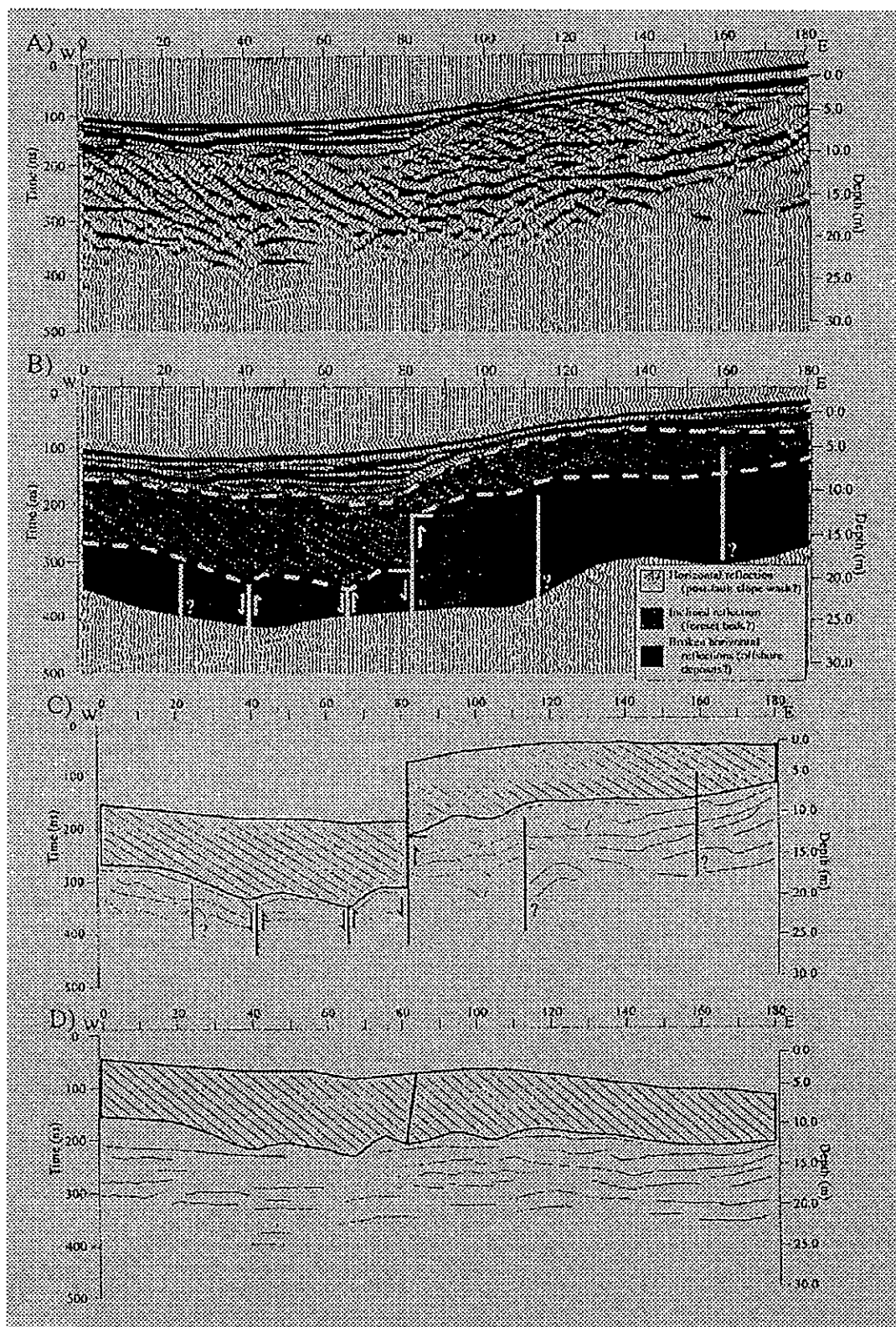


Figure 4 : Données radar corrigées de la topographie dans le lac de Bonneville : a) données traitées avec un AGC ; b) 3 faciès radar distincts interprétés comme 3 lithofaciès. La faille principale est située au point 82 m ; c) reconstruction du transect immédiatement après le déplacement de la faille ; d) reconstruction du transect avant le mouvement de la faille mais après la régression du lac Bonneville (d'après Smith and Jol, 1995).

GRAVIMETRIE AU SOL

METHODE : Gravimétrie

PRINCIPE

Mesure de la valeur relative de la gravité à la surface du sol en vue d'établir la répartition des densités dans le sous-sol.

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- mise en évidence de grandes structures géologiques (failles régionales) - remplissages non consolidés (moins dense) - recouvrement métrique ou décamétrique - failles normales	Présence d'un contraste de densité entre différentes unités géologiques, ou entre cible et encaissant	Absence de contraste de densité : milieu géologique homogène

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes régionales ou locales permettant la localisation d'un objet géologique à quelques mètres (ou quelques dizaines de mètres) près, selon les distances entre les lignes de la maille	0-1 km, dépend de la maille de mesure

RESULTAT FOURNI

Carte d'anomalie de Bouguer et dérivés, prolongement vers le haut et vers le bas, individualisation des différentes unités géologiques par leur densité. Coupe 2 D avec interprétation. Modèle de densités 3 D.

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bonvalot S., Diamant M. et Gabalda G. (1998)- Continuous gravity recording with Scintrex CG-3M meters : a promising tool for monitoring active zones. Geophys. J. Int. 135, pp. 470-494.

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Documents topographiques disponibles, localisation x, y et z des stations et système de référence, bases gravimétriques de référence, accès.	1 gravimètre, 1 opérateur, 1 équipe de topographie préalable

UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
200 à 300 F TTC par point (traitement compris). Interprétation 2D-3D possible (en supplément)	Prospection gravimétrique

MICROGRAVIMETRIE

METHODE : Gravimétrie

PRINCIPE

Grandeur mesurée : variation du champ de gravité exprimée en gal (unité d'accélération en cm/s^2), mgal ou microgal (μgal). Le pouvoir de résolution est fonction de la nature de l'anomalie (contraste de densité, largeur, profondeur). L'amplitude de la réponse est fonction de la profondeur de l'anomalie (inversement proportionnelle au carré de la distance à la surface), de sa taille et du contraste de densité.

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- remplissages non consolidés (moins denses) - dépôts hydrothermaux ou minéralisations (plus denses) - recouvrement décimétrique ou métrique - failles normales ou de coulissement.	Présence d'un contraste de densité entre les différentes unités géologiques, ou entre cible et encaissant	Absence de contraste de densité : milieu géologique homogène. Fort relief (topographie accidentée). Bruit microsismique ou industriel élevé (vibrations, vent).

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes locales ou ponctuelles permettant la localisation d'un objet géologique à quelques mètres ou au mètre près.	0-50m

RESULTAT FOURNI

Carte d'anomalie de Bouguer, carte d'anomalie résiduelle (plus sophistiqué : cartes de dérivés, prolongement vers le haut et vers le bas, filtrage spatial, individualisation des différentes unités géologiques par leur densité, modélisation 2D et 3D).
Des mesures de gradient de gravité (mesures à 2 altitudes différentes) peuvent être réalisées pour la localisation de discontinuités de proche surface.

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bonvalot S., Diamant M. and Gabalda G. (1998)- Continuous gravity recording with Scintrex CG-3M meters : a promising tool for monitoring active zones. *Geophys. J. Int.* 135, pp. 470-494.
Nozaki K. and Kanamori T. (1996)- Microgravity survey for shallow subsurface investigations. *Proceedings of the Symposium on Applied Geophysics for Environmental and Engineering Problems (SAGEEP)*. Keystone, CO, USA. pp.951-959.

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Documents topographiques disponibles, localisation x, y et z des stations (altimétrie de l'ordre du cm) et système de référence, bases gravimétriques de référence, accès, situation, niveau de bruit	1 gravimètre de précision (" microgal "), 1 géophysicien, 1 topographe.

UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
200 à 300 F TTC par point (traitement compris). Pour un hectare compter 400 points (maille de 5 m). Rajouter 15 à 20 KF minimum pour interprétation avec modélisation 2D ou 3D.	Prospection gravimétrique de précision VARIANTES : Gradient vertical, endoscopie microgravimétrique (EMG)

La gravimétrie au sol et la microgravimétrie ne nécessitent pas un schéma descriptif. Ces méthodes consistent à déplacer à pas régulier un gravimètre le long de profils décrivant une grille. Après correction en chaque point de l'influence topographique et luni-solaire, une carte du champ de gravité est obtenue par interpolation.

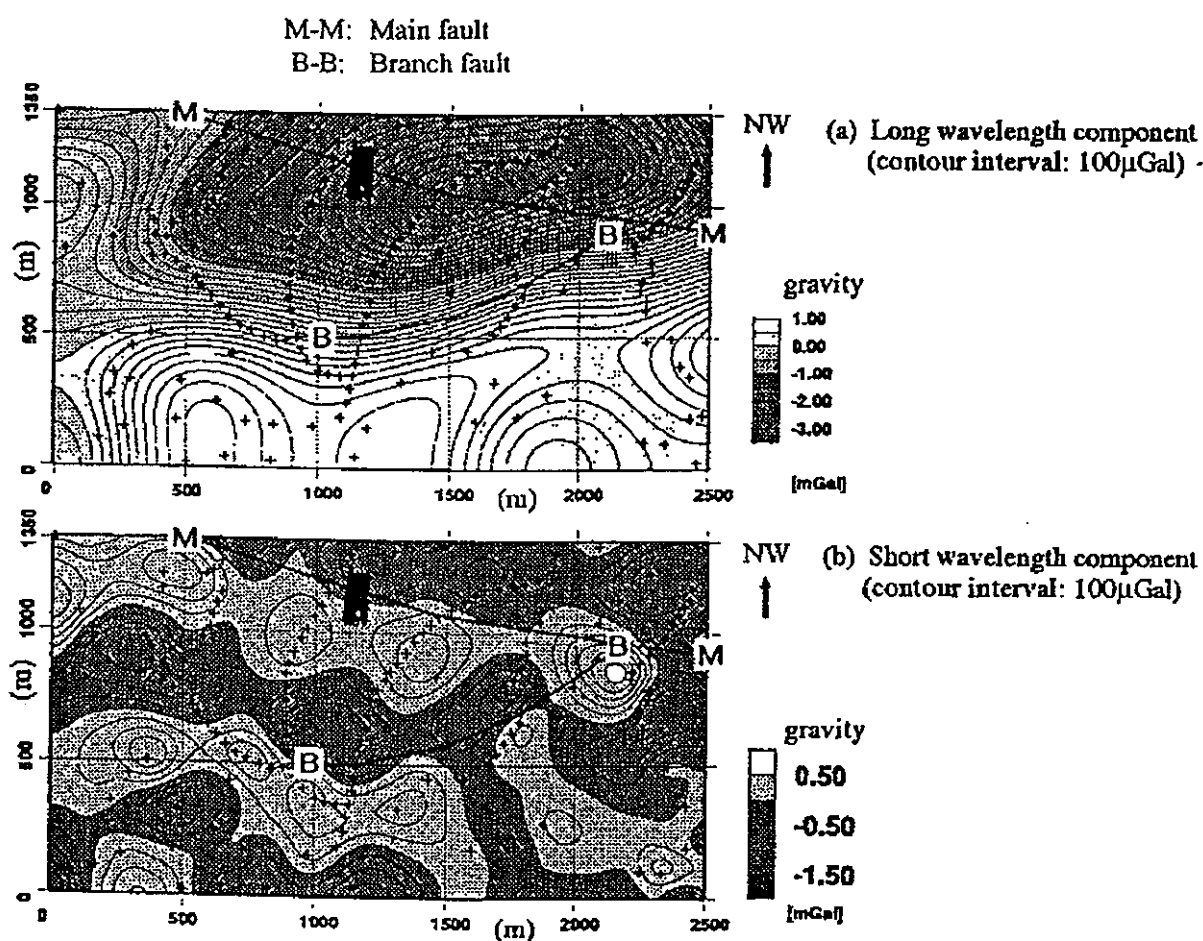


Figure 5 : Etude microgravimétrique sur la faille de Nojima (Japon) ayant causé le séisme de 1995 au sud d'Hyogo : a) Composante de grande longueur d'onde (800 à 3000 m), b) composante de courte longueur d'onde (200 à 800 m). Pour les courtes longueurs d'onde, l'anomalie de plus forte amplitude s'aligne bien sur la faille principale. D'après Nozaki and Kanamori (1996).

PROFIL SISMIQUE REFRACTION

METHODE : Sismique réfraction

PRINCIPE

Enregistrement en surface des ondes réfractées le long des interfaces lithologiques pour en déduire les vitesses de propagation et les profondeurs des couches. Les surfaces susceptibles de constituer des "marqueurs" en sismique réfraction sont celles qui séparent des milieux de vitesse croissante avec la profondeur. Les contrastes de vitesse ne correspondent pas forcément aux couches géologiques. Sur le terrain, la mise en oeuvre consiste à mesurer les temps de trajet dans le sol d'une impulsion mécanique de compression entre une source sismique (explosif, marteau, vibreur, chute de poids) située en surface et des récepteurs (géophones) également placés en surface pour des distances croissantes entre l'impulsion et les récepteurs

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- décalage de bancs de vitesse sismique Vp (ondes P) bien individualisée - décalage dans le substratum - failles normales.	Reconnaissance du sous-sol lorsqu'il existe une distribution des vitesses sismiques (ondes P) croissante avec la profondeur	Distribution de vitesses non croissante avec la profondeur, ou forte inclinaison des couches par rapport à la surface. Site trop bruyant. Environnement urbain (mais possibilité d'utilisation d'une source non explosive)

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes de niveau semi local, réalisation de profils hectométriques, précision de l'ordre de quelques mètres, décroissante avec la profondeur.	0-200 m (entre 1/4 et 1/6 de la longueur du dispositif), suivant couplage de la source et du milieu et suivant puissance de la source (limitée en ville)

RESULTAT FOURNI

Coupes interprétées fournissant une représentation de la profondeur des interfaces sismiques, de la vitesse sismique des couches et de leurs pendages apparents. L'interprétation en 2 D est un plus, mais nécessite une mise-en-oeuvre plus coûteuse sur le terrain

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

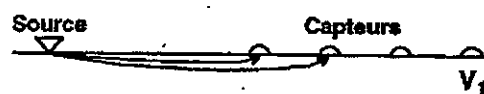
- Jongmans, D., Demanet D. & Krings, J. (1998)- Application of geophysical prospecting methods for investigating a Quaternary normal fault in the Bree area (Roer graben). Abstracts Summer School in Active faulting and seismology, Luxembourg, pp. 85-89.
- Eberhart-Phillips, D., Stanley, W.D., Rodriguez, B., D. & Lutter W.J. (1995)- Surface seismic and electrical methods to detect fluids related to faulting. J.G.R., Vol. 100, No. B7, pp. 12919-12936
- Meghraoui M., Camelbeeck T., Vanneste K., Brondeel M. et Jongmans D. (2000)- Active faulting and paleoseismology along the Bree Fault, Lower Rhine Graben (Belgium). J. Geophys. Res. (in press)

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Accès, topographie, urbanisation	Source sismique (explosif, marteau ou chute de poids), géophones (entre 12 et 48) et flûtes sismiques (câbles), enregistreur sismique 12 voies minimum. 2 opérateurs (source et enregistreur)

UNITE DE PRIX	VARIANTES
Prix fonction du nombre de tirs, du nombre de géophones et du type de source. Le rendement moyen est de 4 à 5 bases par jour (une base = 24 géophones et 5 points de tir). Une journée avec rapport : entre 15 et 20 KF	Sismique transposée, bloc sismique, Sismique réfraction onde S

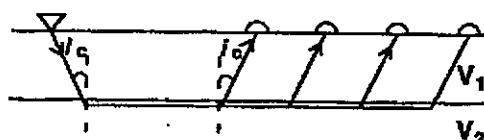
Onde directe : ①

$$t = \frac{x}{V_1}$$



Onde réfractée : ②

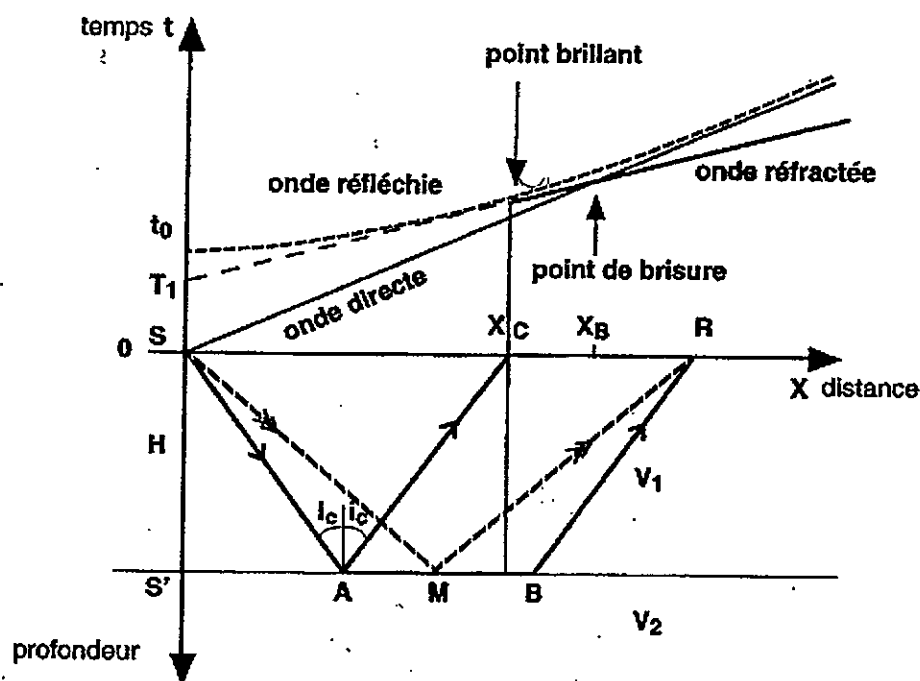
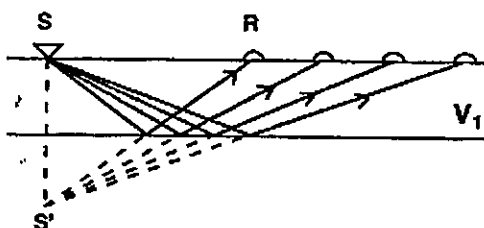
$$t = \frac{x}{V_2} + T_1 \quad \sin i_c = \frac{V_1}{V_2}$$



Onde réfléchie : ③

$$S'R^2 = SS^2 + SR^2$$

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V_1^2}$$



Principe de la méthode "sismique réfraction". La position de la source doit être suffisamment éloignée pour créer des ondes réfractées.

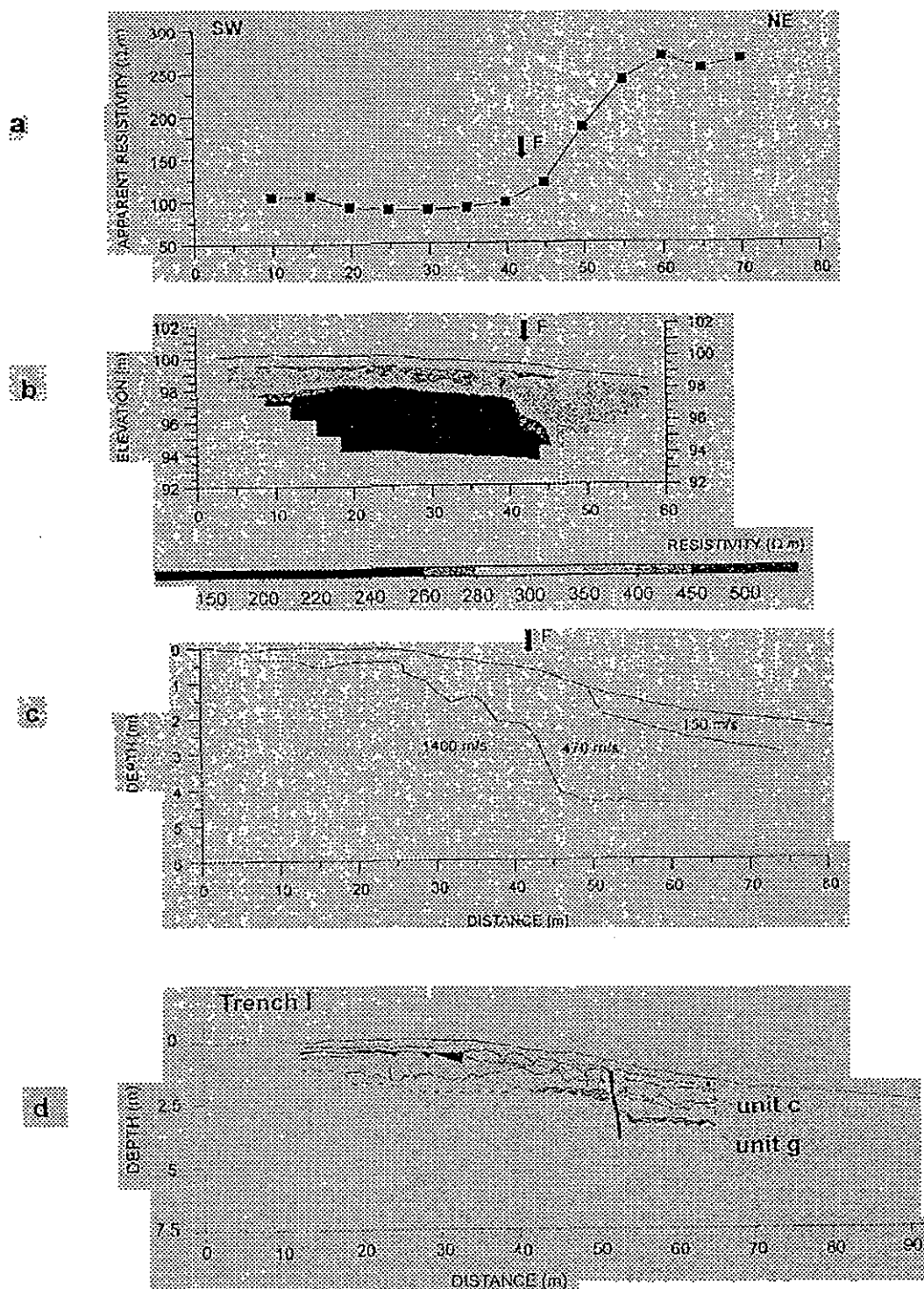


Figure 6 : Données sismiques et électriques à travers l'escarpement de Bree : a) Profil électrique Schlumberger AB=12 m; b) tomographie électrique Wenner 1 m; c) sismique réfraction intertrace 2,5 m; d) tranchée. La flèche F montre la position de la faille principale déduite des données géophysiques (d'après Meghraoui et al., 2000)

SISMIQUE REFLEXION HAUTE RESOLUTION

METHODE : Sismique réflexion

PRINCIPE

Analyse des temps mis par les ondes longitudinales pour se propager entre la surface et une série de réflecteurs. Les profondeurs sont liées aux temps de trajet (coupe-temps). Sur le terrain, cela consiste à mesurer les temps de trajet dans le sol d'une impulsion mécanique de compression entre une source sismique (explosif, vibreur, chute de poids) située en surface et des récepteurs également placés en surface. La source et le dispositif (géophones+câbles) sont déplacés le long du profil avec un écart (offset) constant.

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- décalage de bancs de vitesse sismique V_p (ondes P) bien individualisée - décalage dans le substratum - mise en évidence d'un remplissage consolidé et/ou minéralisé (réflecteur) - mise en évidence d'un remplissage non consolidé (zone d'absorption) - failles normales ou inverses.	Reconnaissance du sous-sol lorsqu'il existe des contrastes d'impédance acoustique (vitesse sismique et/ou densité) permettant d'obtenir de bons réflecteurs	Environnement urbain (mais utilisation d'une source non explosive –vibreux- possible). Pendage des couches ou de la faille supérieur à 60 °

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes locales ou ponctuelles, profils décimétriques à hectométriques, permettant la localisation d'un objet géologique à quelques mètres ou au mètre près	5-100 m

RESULTAT FOURNI

Coupe détaillée de l'extension structurale horizontale et verticale des différents horizons géologiques réflecteurs (coupe ou section temps)

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Eberhart-Phillips, D., Stanley, W.D., Rodriguez, B., D. & Lutter W.J. (1995)- Surface seismic and electrical methods to detect fluids related to faulting. J.G.R., Vol. 100, No. B7, pp. 12919-12936
- Pratt, T. L. & al. (1998)- Multiscale imaging of active faults zones for hazard assessment : A case study of the Santa Monica fault zone, Los Angeles, California. Geophysics, V. 63, No. 2, pp. 479-489
- Shields, G. & al. (1998)- Shallow Geophysical Survey across the Pahump Valley Zone, California-Nevada Border. BSSA, Vol. 88, No. 1, pp. 270-275.

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Accès, topographie, urbanisation	Source sismique (explosif, marteau, vibreur ou chute de poids), géophones (24 ou 48) et flûtes sismiques (câbles), enregistreur sismique 24 voies minimum. 2 opérateurs (source et enregistreur), un topographe

UNITE DE PRIX	VARIANTES
Prix de l'acquisition en régie (ou au km de profil sismique). Prix de la sismique réfraction multiplié par 3 à 4	Sismique Très Haute Résolution

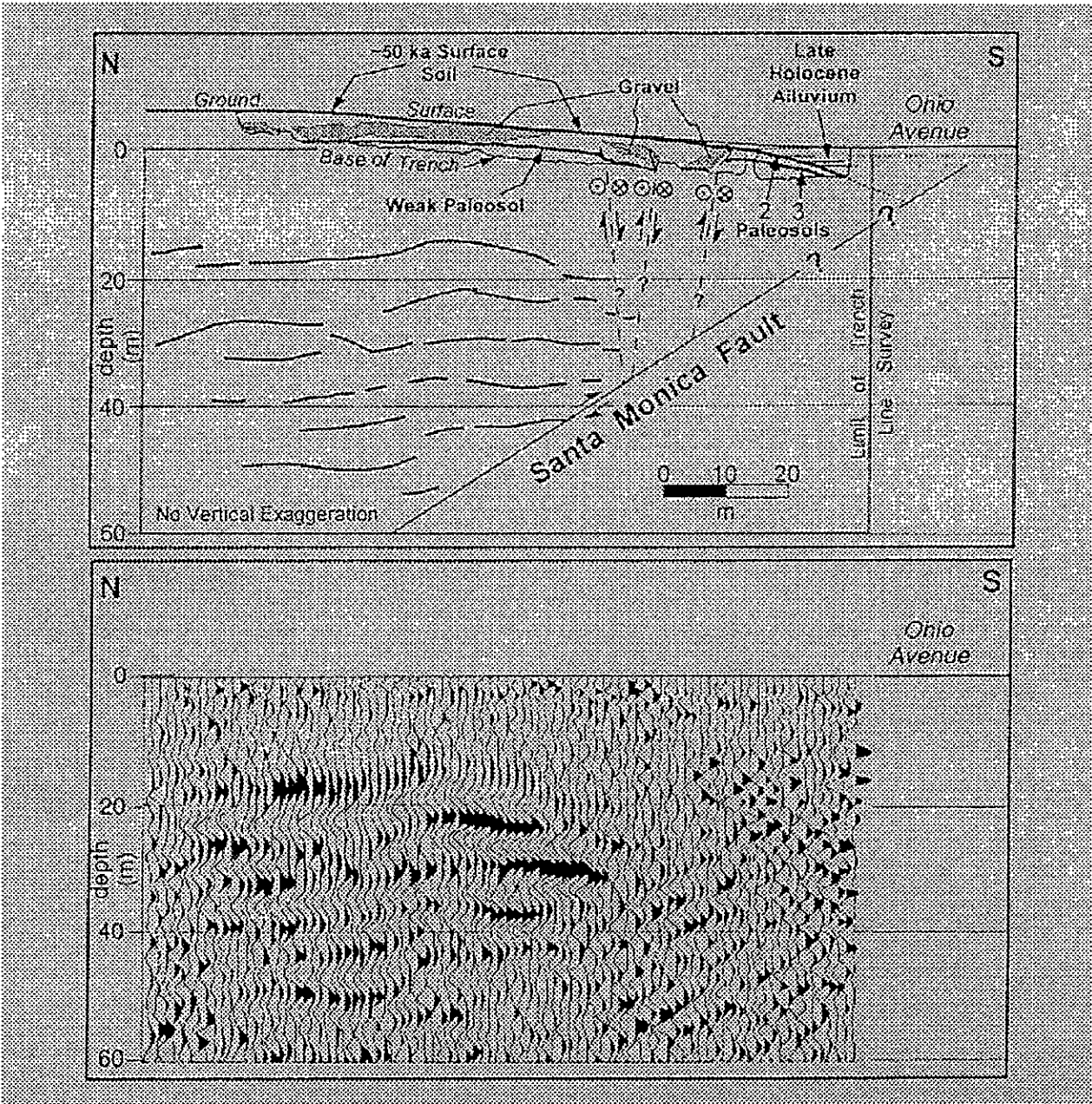
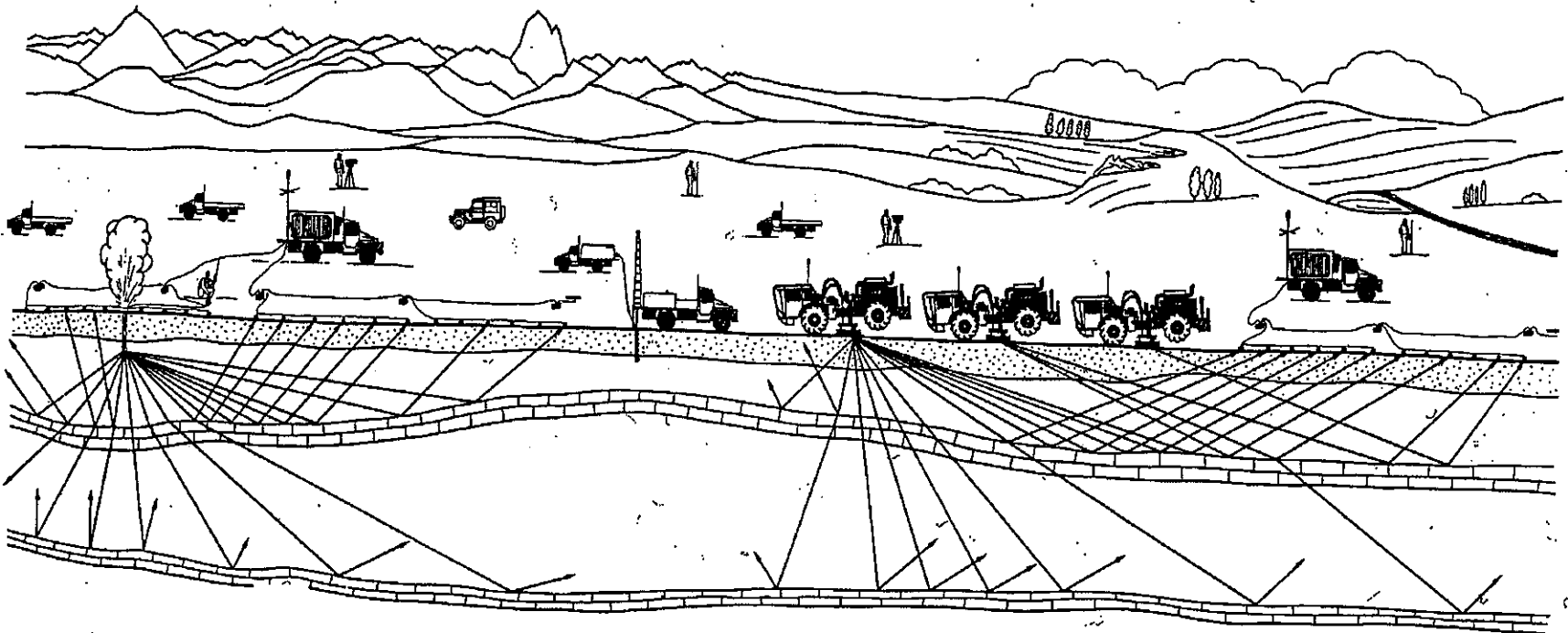


Figure 7 : Figure composée montrant les 60 premiers mètres des données sismiques réflexion le long de la tranchée (en bas) et l'interprétation du profil avec un schéma de la tranchée (en haut). Les failles en coulissement vues dans la tranchée sont interprétées comme sub-verticales et continues vers le bas et atteignent la faille de Santa Monica à 20-40 m de profondeur. La section sismique est migrée en temps et convertie en profondeur en utilisant une fonction de la vitesse lissée (d'après Pratt et al., 1998).



Exemple d'enregistrement
tir au centre



TYPE D'EXPLOITATION	→	SISMIQUE EXPLOSIF TERRESTRE
TYPE DE VEHICULE	→	CAMION LABORATOIRE CAMIONS CABLIERS CAMION BOUTEFEU LAND ROVER TOPO CAMION CITERNE FORAGE CAMION DE FORAGE
TYPE DE SOURCE	→	EXPLOSIF ENTERRE
TYPE DE CAPTEURS	→	GEOPHONES TERRESTRES
CABLE ET TRANSMISSION DE L'INFORMATION	→	CABLES MULTICONDUCTEURS BOITIERS TELEMETRIQUES
POSITIONNEMENT	→	TOPOGRAPHIE CLASSIQUE TERRESTRE

VIBROSISMIQUE

CAMION LABORATOIRE ET
CORRELATEUR STACKEUR

ENGINS VIBRATEURS

Exemple d'enregistrement corré
tir en bout



Schéma des différentes étapes d'une campagne de sismique réflexion. Pour la sismique réflexion haute résolution, les sources de type "mini-vibro" ou de chute de poids sont couramment utilisées.

TOMOGRAPHIE SISMIQUE

METHODE : Sismique transmission

PRINCIPE

La tomographie sismique reconstruit une image de structures interne du sol à partir des temps de trajets, amplitudes ou temps de montée d'ondes sismiques, se propageant le long de rais sismiques à l'intérieur d'une section définie par des forages, galeries ou la surface du sol

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- décalage de bancs de vitesse sismique Vp (ondes P) bien individualisée - mise en évidence d'un remplissage non consolidé (zone d'absorption) - failles normales ou inverses.	Existence de forages ou de galeries. Contrastes d'impédance acoustique (vitesse sismique et/ou densité) permettant d'obtenir des différences dans les temps d'arrivée ou les amplitudes	Environnement à fort bruit sismique. Mauvais couplage tubage-terrain si le forage est tubé

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Ponctuelle, localise un objet géologique au mètre près	délimitée par le dispositif de mesure

RESULTAT FOURNI

Coupe de vitesses sismiques d'ondes de compression et/ou de cisaillement, coupes de facteur de qualité sismique (coefficient d'atténuation)

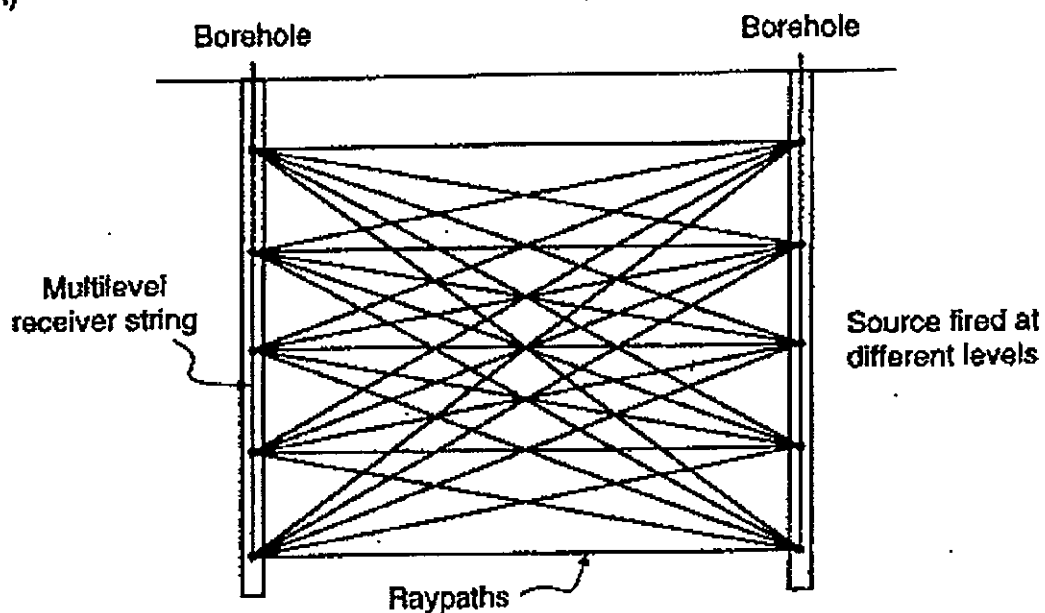
QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Tura, M.A.C., Johnson, L., Majer, E. and Peterson J.E. (1992)- Application of diffraction tomography to fracture detection. Geophysics, Vol. 57, Nro 2, pp. 245-257

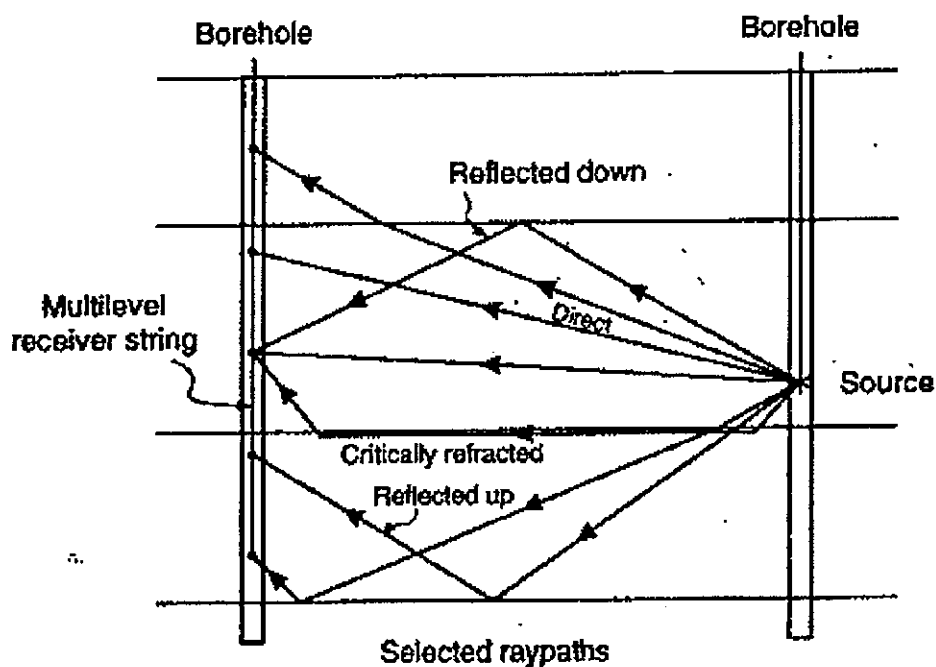
INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Description de l'environnement (forages, galeries, bruit sismique)	Source sismique de puits, sonde sismique, treuil de diagraphies, enregistreur sismique numérique. 2 opérateurs (source et enregistreur)

UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
Au rai sismique (nombre de couples émetteur-récepteur). Exemple de coût d'une campagne de 5 sections tomographiques (entre puits), avec interprétation, sans Mob-Démob: entre 100 et 150 KF	Panneau sismique Tomographie acoustique Cross-hole sismique VARIANTES : Surface-forage, galerie-forage, galerie-galerie etc.

(A)



(B)



Principe de la tomographie sismique entre forages (cross-hole).

MAGNETISME AU SOL

METHODE : Magnétisme

PRINCIPE

Mesure du champ magnétique total à la surface du sol mesuré en nanoTesla (nT). 1 nanoTesla=1 gamma. Une variation du champ magnétique peut être attribuée à un changement de concentration en composés ferromagnétiques. Une anomalie magnétique est fonction de la masse de l'objet à l'origine de cette anomalie, et de son orientation par rapport au champ magnétique. Elle est inversement proportionnelle à la profondeur de l'objet

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- Reconnaissance en géologie structurale - Remplissages minéralisés (magnétiques) - Failles normales.	Existence d'un contraste de susceptibilité magnétique ou d'une aimantation entre cible et encaissant	Absence de contraste de susceptibilité magnétique. Toute zone bruitée (lignes HT, clôture, ferrailage, contexte industriel...) pour laquelle la réponse magnétique parasite est supérieure à celle qui est recherchée. Période d'orage magnétique

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes régionales ou locales permettant la localisation d'un objet géologique à quelques mètres (ou quelques dizaines de mètres) près, selon les distances entre les lignes de la maille	0-1 km, dépend de la maille de mesure

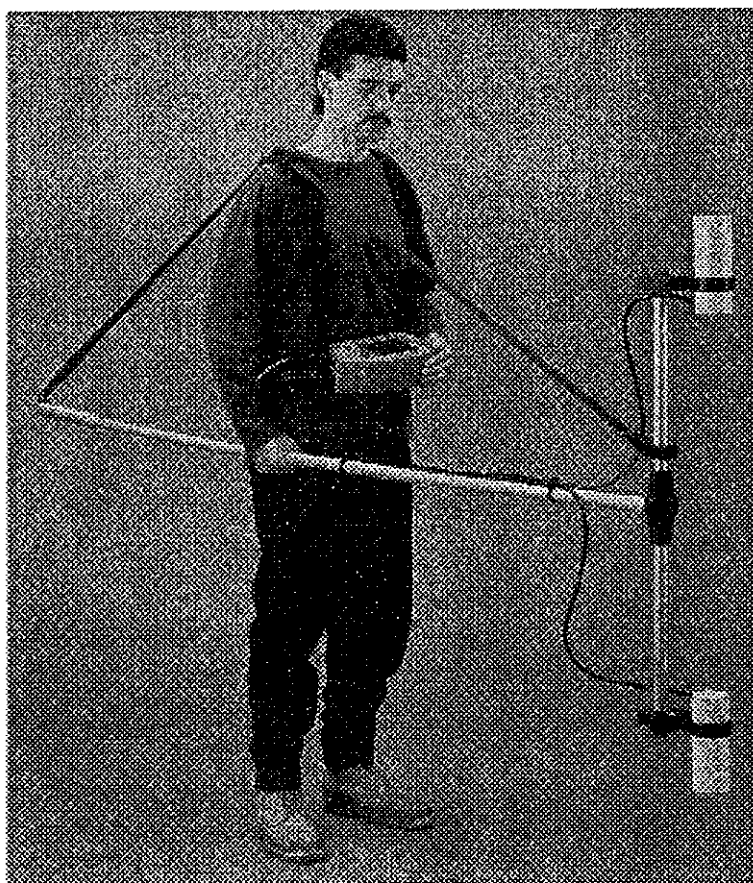
RESULTAT FOURNI

Carte d'isovaleurs et/ou profil magnétique, en vue d'individualiser des unités de susceptibilité magnétique différente. L'application conjointe de la gravimétrie est un plus pour l'interprétation.

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Shields, G. & al. (1998)- Shallow Geophysical Survey across the Pahrump Valley Zone, California-Nevada Border. BSSA, Vol. 88, No. 1, pp. 270-275.

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Localisation de l'étude, accès, parasites industriels	1 ou 2 magnétomètres (fixe avec enregistreur et mobile, pour élimination des variations 'rapides' du champ magnétique terrestre), 1 opérateur
UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
Prix au km de profil ou à la mesure (environ 200 mesures par jour, entre 10 et 15 KF par 0.5 ha) avec, éventuellement différenciation des prix au niveau de l'interprétation (filtrages, réduction au pôle, modélisation 2D-3D)	MAG au sol (par opposition à AIRMAG) VARIANTES Magnétométrie différentielle (pour des mesures effectuées à hauteurs différentes : 1.8 et 1 m par exemple, permettant d'éliminer certains parasites ou interférences)



En haut, magnétomètre à proton, mesure du champ total et du gradient, mesure au point par point.

En bas, magnétomètre à vapeur de césium, mesure du champ total et du gradient, mesure en continu ou au point par point.

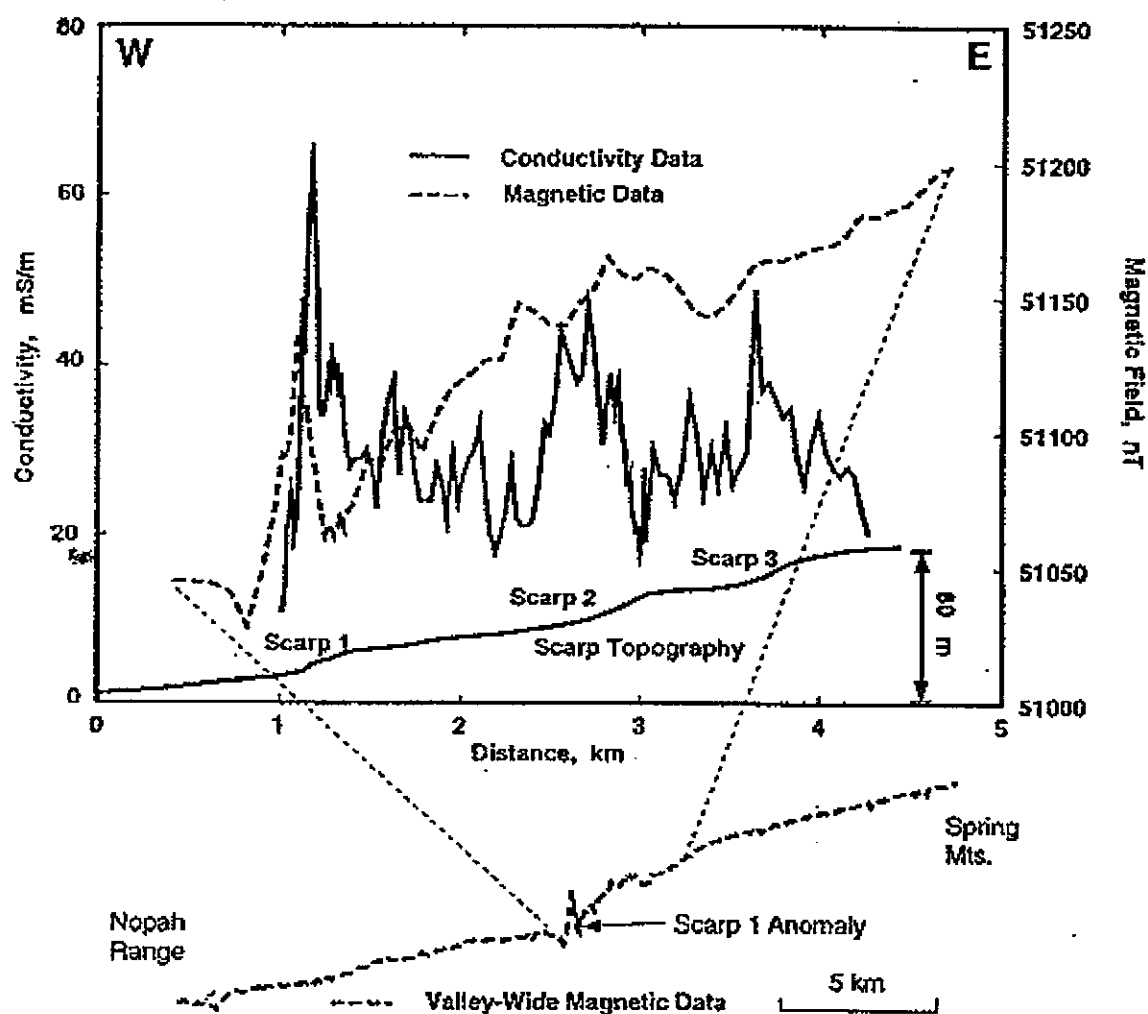


Figure 8 : Courbes de profils de conductivité EM31 et de magnétisme superposées au profil topographique des escarpements. Des anomalies significatives apparaissent à l'aplomb de l'escarpement 1 pour les deux méthodes. Le profil magnétique complet est représenté sous le profil topographique. Il montre une augmentation régionale vers l'Est et l'absence d'autres anomalies magnétiques (d'après Shields et al., 1998).

TRAINE ELECTRIQUE

METHODE : Electrique en courant continu ou basse fréquence

PRINCIPE

Analyse de la résistivité apparente du sous-sol mesurée à partir d'un quadripôle symétrique AMNB (injection entre A et B, mesure de la différence de potentiel entre M et N), de dimension constante, traîné le long d'un profil.

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- remplissages minéralisés ou hydrothermaux - remplissages non consolidés (liquéfaction) - décalage dans le bedrock - failles normales	Reconnaissance du sous-sol lorsqu'il existe des variations latérales de résistivité contrôlées par sondage électrique Problèmes de mise en œuvre : si couverture trop résistante électriquement (prise de terre des électrodes élevée), ou trop conductrice (effet d'écran)	Zones urbaines et industrielles (selon l'échelle), lignes haute tension (HT) enterrées

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes locales ou ponctuelles, profils décamétriques à hectométriques, localisation d'un objet géologique à quelques mètres ou au mètre près	0-100 m. Entre $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{8}$ de la longueur des lignes d'injection.

RESULTAT FOURNI

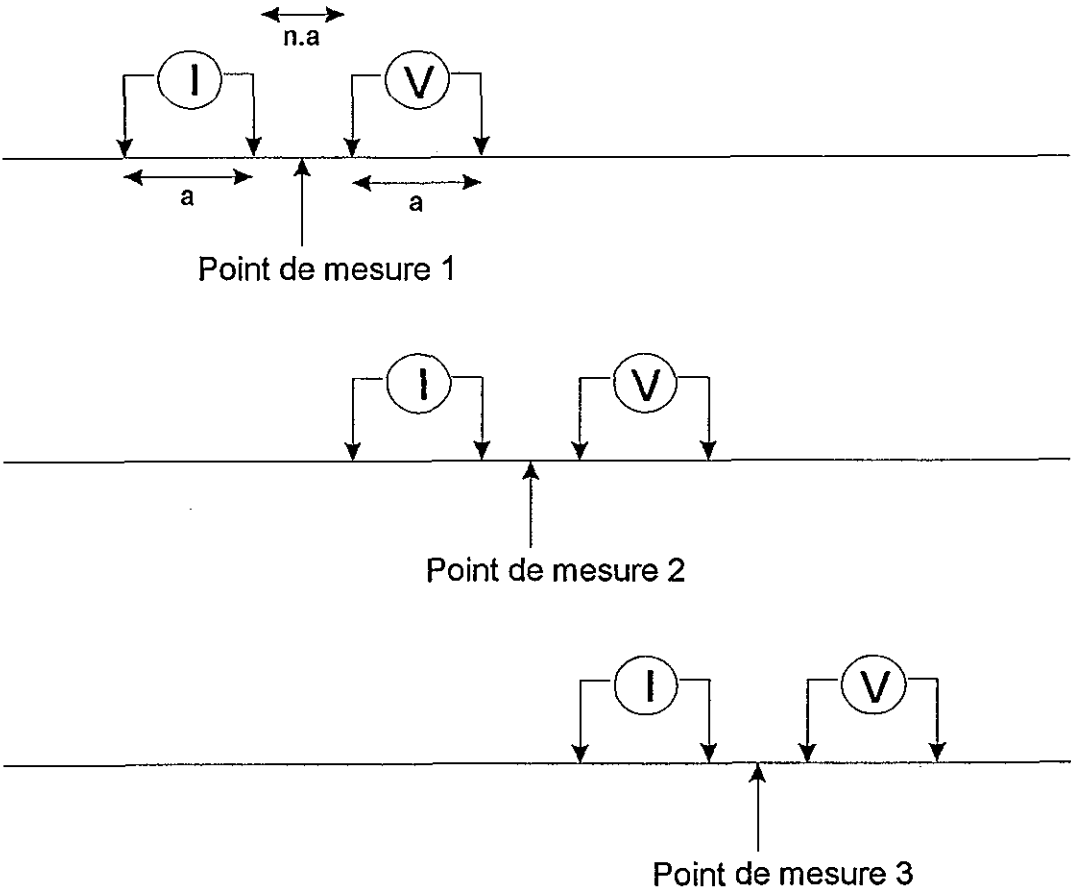
Localisation d'anomalies de résistivité : profils ou cartes de résistivité apparente représentant la distribution des résistivités à une profondeur quasi-constante (fonction du quadripôle)

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Eberhart-Phillips, D., Stanley, W.D., Rodriguez, B., D. & Lutter W.J. (1995)- Surface seismic and electrical methods to detect fluids related to faulting. J.G.R., Vol. 100, No. B7, pp. 12919-12936
- Jongmans, D., Demanet D. & Krings, J. (1998)- Application of geophysical prospecting methods for investigating a Quaternary normal fault in the Bree area (Roer graben). Abstracts Summer School in Active faulting and seismology, Luxembourg, pp. 85-89.
- Wolf, L.W., Collier, J., Tuttle, M. & Bodin, P. (1998)- Geophysical reconnaissance of earthquake-induced liquefaction features in the New Madrid seismic zone. Jour. of App. Geophys., 39, pp. 121-129

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Présence de canalisations enterrées, clôtures métalliques, topographie.	1 résistivimètre (avec source pour injection de courant incorporée ou non), électrodes et câbles. L'emploi d'électrodes capacitives permet de les déplacer par un moyen mécanique (profondeur d'investigation limitée à 5 m). 1 opérateur, 2-3 manœuvres

UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
Prix de la station ou au km de profil, en fonction du pas de mesure, et la longueur de la ligne AB, de la topographie, du nombre de sondages électriques. Selon les difficultés d'interprétation et le nombre de manoeuvres nécessaires sur le terrain, coût journalier entre 10 et 15 KF pour 500 à 750 m de profil (distance entre électrodes : 2m), sans Mob-Démob. Interprétation, 10 KF minimum en sus	Traîné de résistivité, Profilage électrique VARIANTES : Dipôle-dipôle, Profilage Wenner (AM=MN=NB), Traîné à répétition, traîné combiné, rectangle ou gradient



Traîné électrique en configuration dipôle-dipôle.

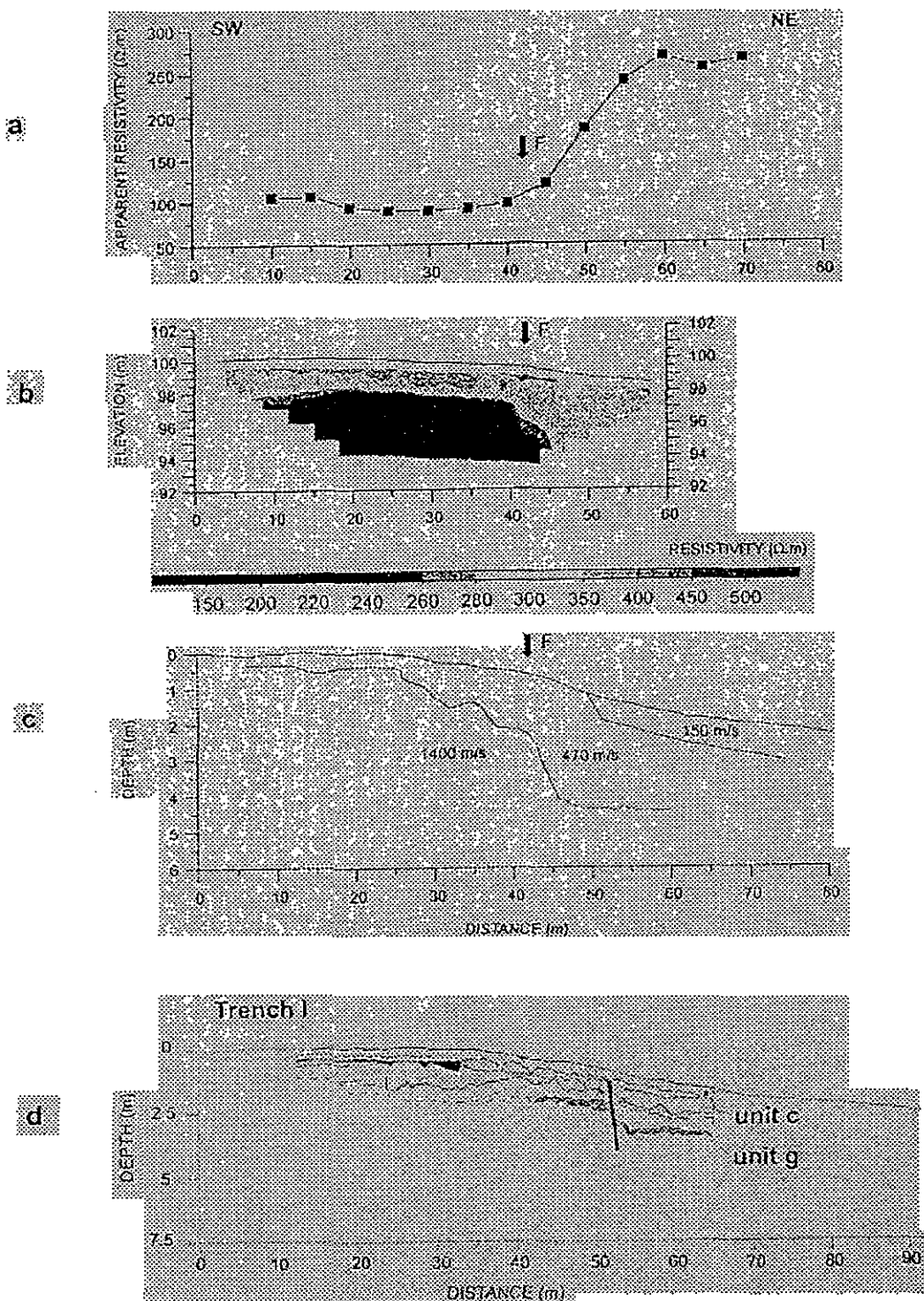


Figure 6 : Données sismiques et électriques à travers l'escarpement de Bree : a) Profil électrique Schlumberger AB=12 m; b) tomographie électrique Wenner 1m; c) sismique réfraction intertrace 2,5 m; d) tranchée. La flèche F montre la position de la faille principale déduite des données géophysiques (d'après Meghraoui et al., 2000)

PANNEAU ELECTRIQUE

METHODE : Electrique en courant continu ou basse fréquence
(combinaison de sondage électrique et de traîné électrique)

PRINCIPE

Mesure à la verticale d'une ligne d'électrodes MN (minimum 12) de la résistivité apparente pour différentes positions d'une électrode d'injection. Nécessité pour chaque dipôle MN de mesures doubles pour des positions symétriques de A, l'électrode B étant placée à l'infini. L'écartement des électrodes MN est choisi en fonction de la profondeur d'investigation souhaitée et de la taille de la cible

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- remplissages minéralisés ou hydrothermaux - remplissages non consolidés (liquéfaction) - décalage dans le bedrock - failles normales	Reconnaissance du sous-sol lorsqu'il existe des discontinuités verticales ou obliques de résistivité Problèmes de mise en œuvre : si couverture trop résistante électriquement (prise de terre des électrodes élevée), ou trop conductrice (effet d'écran)	Zones urbaines et industrielles (selon l'échelle), lignes HT enterrées

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes locales ou ponctuelles, profils décimétriques à hectométriques, localisation d'un objet géologique à quelques mètres ou au mètre près	0-100 m (fonction de l'écartement entre les électrodes MN)

RESULTAT FOURNI

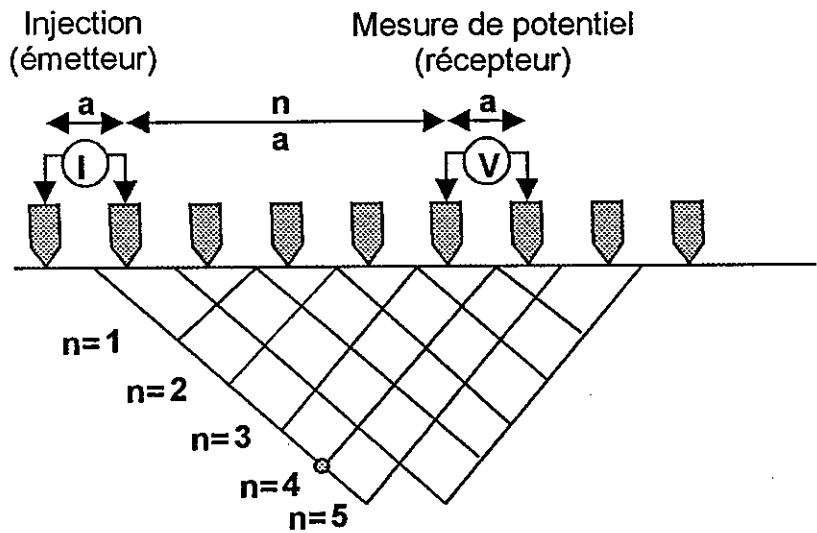
Description et localisation des discontinuités du sous-sol à partir de la distribution des résistivités apparentes à la verticale d'une ligne d'électrodes donnée. Inversion des mesures à l'aide d'un modèle en 2 D, lequel donne une coupe des résistivités vraies et des profondeurs

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Eberhart-Phillips, D., Stanley, W.D., Rodriguez, B., D. & Lutter W.J. (1995)- Surface seismic and electrical methods to detect fluids related to faulting. J.G.R., Vol. 100, No. B7, pp. 12919-12936
- Jongmans, D., Demanet D. & Krings, J. (1998)- Application of geophysical prospecting methods for investigating a Quaternary normal fault in the Bree area (Roer graben). Abstracts Summer School in Active faulting and seismology, Luxembourg, pp. 85-89
- Wolf, L.W., Collier, J., Tuttle, M. & Bodin, P. (1998)- Geophysical reconnaissance of earthquake-induced liquefaction features in the New Madrid seismic zone. Jour. of App. Geophys., 39, pp. 121-129

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Présence de canalisations enterrées, lignes à haute tension, clôtures métalliques, topographie	1 résistivimètre (avec source pour injection de courant incorporée ou non), électrodes et câbles, 1 opérateur, 2 à 4 manœuvres

UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
Panneau défini par sa longueur et le nombre de points de mesures. Suivant les difficultés d'interprétation et le nombre de manœuvres nécessaires sur le terrain, coût journalier entre 10 et 15 KF, pour 500 à 750 m de profil (distance entre électrodes : 2m), sans Mob-Démob. Interprétation, 10 KF minimum en sus	Panneau de résistivité, tomographie de résistivité électrique. VARIANTES : Dipôle-dipôle, pôle-pôle, pôle-dipôle.



Panneau électrique en mode dipôle-dipôle : injection entre 2 électrodes et réceptions successives entre les autres paires d'électrodes en faisant varier l'écartement ($n.a$). Puis déplacement de la position de l'injection.

POLARISATION SPONTANEE

METHODE : Electrique

PRINCIPE

Mesure du potentiel naturel du sous-sol lié à des phénomènes électrocinétique (par exemple électrofiltration) ou électrochimique entre 2 électrodes impolarisables.

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- remplissages minéralisés ou hydrothermaux - circulation de fluides au niveau de la faille - failles normales ou inverses	Reconnaissance du sous-sol lorsqu'il existe des variations latérales de potentiel	Zones urbaines et industrielles (selon l'échelle), lignes HT enterrées Zones boisées tropicales ou accidentées, car problème du potentiel d'électrofiltration dû au ruissellement

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes locales ou ponctuelles, profils décimétriques à hectométriques, localisation d'un objet géologique à quelques mètres ou au mètre près	0-100 m.

RESULTAT FOURNI

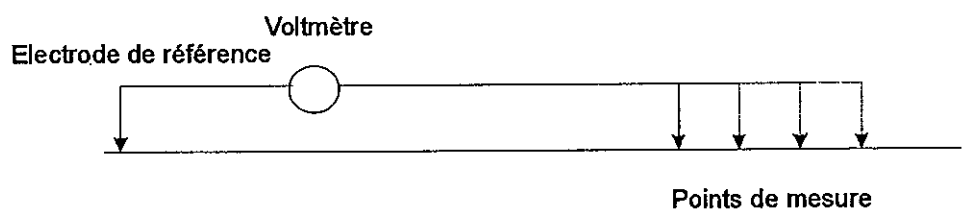
Localisation d'anomalies de potentiel : profils ou cartes de potentiel

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

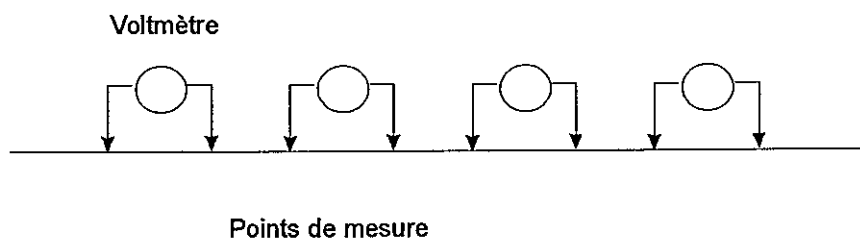
Fournier C. (1989) Spontaneous potentials and resistivity surveys applied to hydrogeology in a volcanic area : case history of the Chaîne des Puys (Puy de Dome, France). Geophysical Prospecting. 37: 647-668.
 Corwin R.F. et Hoover D.B.(1979) The self potential method in geothermal exploration. Geophysics 59. 202-214.

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Présence de canalisations enterrées, clôtures métalliques, topographie.	1 voltmètre, électrodes impolarisables et câbles. 1 opérateur.

UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
Prix au km de profil, en fonction du pas de mesure, de la topographie : 200 à 300 points/jour ou plus si utilisation d'une « flûte » d'électrodes. Pour un espacement entre les points de 2m : 400 à 600 m de profil/jour. Coût journalier entre 8 à 12 KF, suivant les difficultés du terrain, avec interprétation.	



a)



b)

a) méthode de l'amplitude de potentiel,
b) méthode du gradient.

Principe de la méthode "polarisation spontanée"

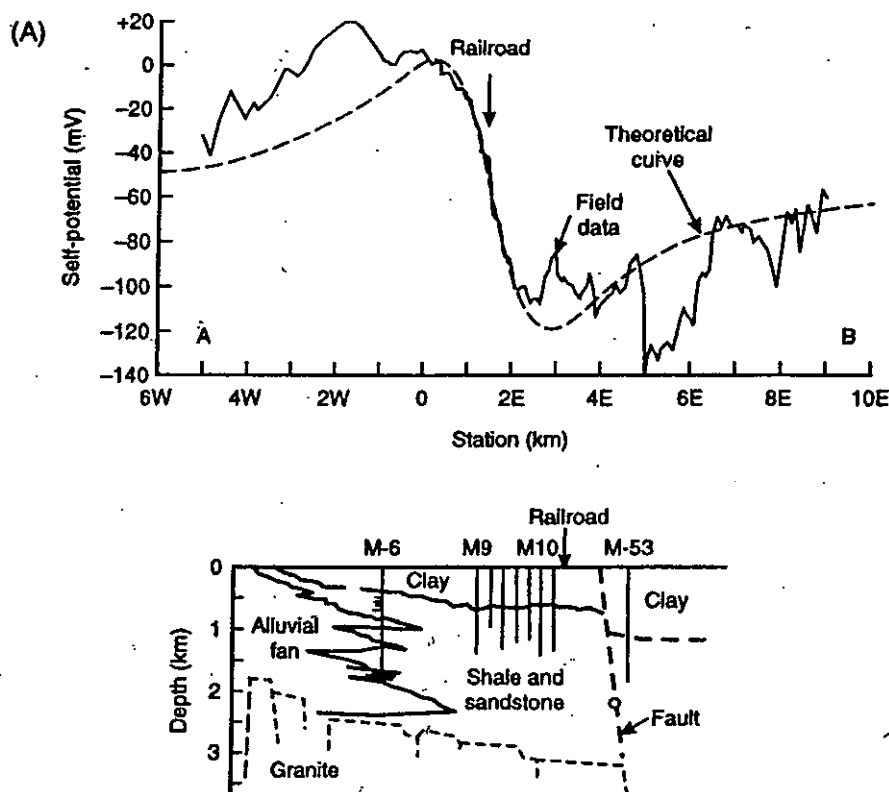


Figure 9 : Anomalie de polarisation spontanée le long du profil A-B au dessus du champ géothermique de Cerro Prieto (Mexique) avec une coupe géologique simplifiée (d'après Corwin and Hoover, 1979). La faille normale s'inscrit profondément dans le socle donnant une anomalie de potentiel de 60 mV.

RADIO MAGNETOTELLURIQUE-VLF

METHODE : Electromagnétique avec émetteur très éloigné

PRINCIPE

Mesure simultanée du champ électrique et du champ magnétique (composantes horizontales et perpendiculaires) issues d'un émetteur de radiodiffusion (militaires, public ou privé lointain), dans l'une des bandes VLF, grandes ondes ou ondes moyennes (de 8 KHz à 1,6 MHz). La résistivité apparente, exprimée en Ohm.m, est fonction du rapport des champs électriques et magnétiques. Il est souvent intéressant de réaliser des mesures avec plusieurs type de fréquences (d'émetteurs) et différentes orientations de l'émetteur par rapport au profil de mesure

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- remplissages minéralisés ou hydrothermaux - décalage dans le bedrock - failles normales	Existence d'un contraste de résistivité. Bonne réception des ondes radio dans au moins une des bandes VLF (Very Low Frequency : 8 à 25 KHz), grandes ondes et ondes moyennes	Réseaux métalliques enterrés, clôtures électriques. Mauvaise réception des ondes radio, risque d'arrêt de l'émetteur. Topographie accidentée. Orages magnétiques. Lignes électriques enterrées ou aériennes

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes ponctuelles, profils décamétriques à hectométriques, localisation d'un objet géologique à quelques mètres ou au mètre près	0-50 m (inversement proportionnelle à la fréquence de l'émetteur)

RESULTAT FOURNI

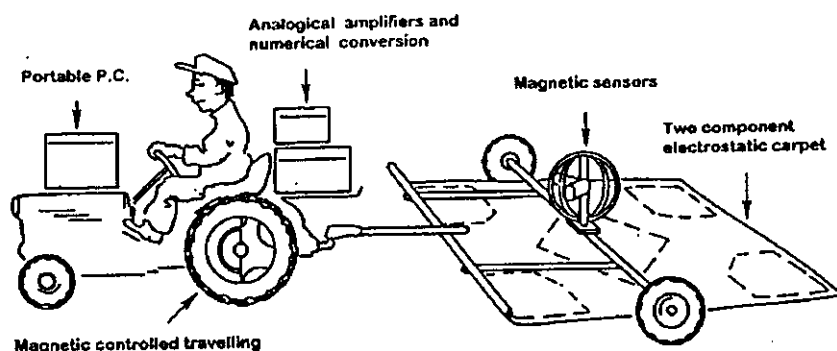
Profils continu et/ou cartes de résistivité apparente du sous-sol à différentes fréquences (selon émetteur choisi). Coupes de résistivité vraie après inversion des mesures (nécessite l'acquisition à plusieurs fréquences et sur plusieurs décades).

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Eberhart-Phillips, D., Stanley, W.D., Rodriguez, B., D. & Lutter W.J. (1995)- Surface seismic and electrical methods to detect fluids related to faulting. J.G.R., Vol. 100, No. B7, pp. 12919-12936
 - Lagabriele, R. (1986)- Les bases de la Radio-Magnétotellurique. Revue de l'Industrie Minière, Mines et Carrières, Octobre 1986

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Présence de canalisations enterrées, clôtures métalliques, plan du terrain à reconnaître avec orientation, topographie	1 capteur de champ magnétique, 1 capteur de champ électrique (capacitif), électronique d'amplification-filtrage, un enregistreur numérique. Il existe des dispositifs intégrés mobiles, sur traîneau ou 4 roues à moteur, 1 opérateur.

UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
Prix au point ou au km de profil : 100 à 200 points par jour, si mesures discrètes, 1 à 3 km de profil par jour, si mesures en continu, 10 à 15 KF/jour	RMT, MTA (MT artificielle)

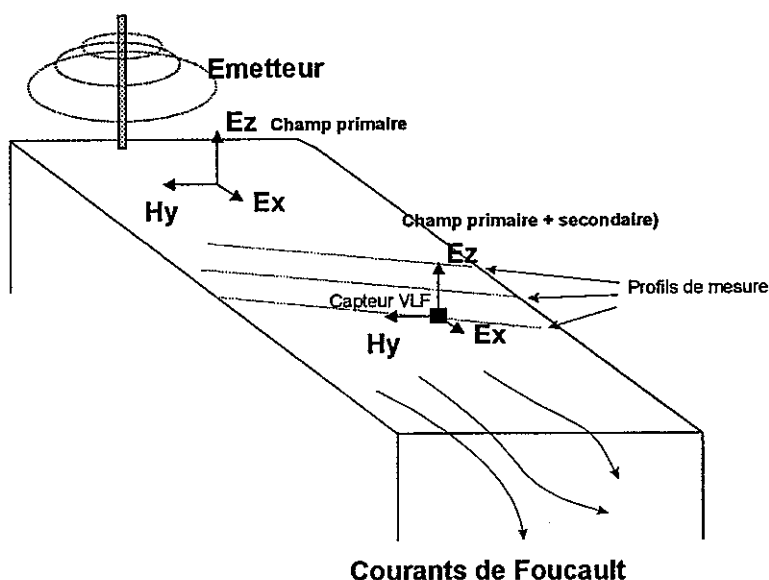


- V.L.F. (Very Low Frequency) : de 10 à 30 kHz.
- L.F. (Low Frequency) : de 100 à 300 kHz.
- M.F. (Middle Frequency) : de 300 à 3000 kHz.

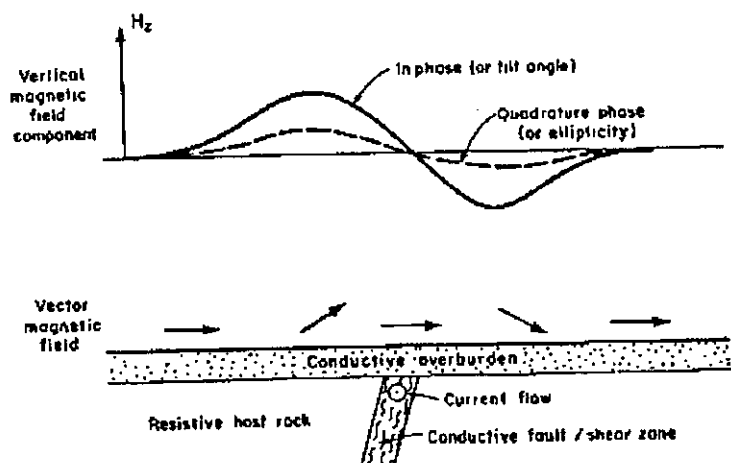
RADIO M.T.

10 kHz – 1 MHz

Dispositif de mesure radio-magnétotellurique. Le conditionnement des électrodes capacitatives sous forme de « tapis » permet le déplacement continu sur le sol.



Principe de la mesure VLF. Un émetteur radio lointain émet un champ magnétique qui crée des courants de Foucault dans le sol, eux-mêmes à l'origine du champ secondaire mesuré par un capteur VLF.



Exemple de mesure VLF au dessus d'un filon conducteur

EM AU SOL AVEC EMETTEUR FIXE

METHODE : Electromagnétique avec émetteur proche contrôlé fixe

PRINCIPE

Une bobine émettrice est étalée sur le sol et est parcourue par un courant alternatif (champ primaire) dans la gamme de fréquence 100 Hz à 10 KHz. Celui-ci induit dans le sol un courant qui génère en retour un champ électromagnétique (champ secondaire) qui se superpose au champ primaire. Ceux-ci sont d'autant plus élevés que la conductivité du milieu est élevée. La conductivité apparente, exprimée en millisiemens/m ou mS/m, est fonction du rapport des mesures des champs primaires et secondaires pour un sol donné. Deux types de dispositif :

- sondages (ou profils) fréquentiels avec une bobine réceptrice fixe et une fréquence variable,
- sondages (ou profils) géométriques, à fréquence fixe et position de bobine réceptrice variable.

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- remplissages minéralisés ou hydrothermaux - remplissages non consolidés plus ou moins humides - décalage dans le bedrock - failles normales	Existence d'un contraste de résistivité suffisant entre cible et encaissant	Environnement trop bruité : lignes HT aériennes ou enterrées, conducteur de surface trop marqué, structures métalliques

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes ponctuelles, profils décimétriques à hectométriques, localisation d'un objet géologique à quelques mètres ou au mètre près	0-100 m (inversement proportionnelle à la fréquence de l'émetteur) ; fonction des dimensions de la bobine émettrice, du nombre de spires, de l'écartement émetteur-récepteur

RESULTAT FOURNI

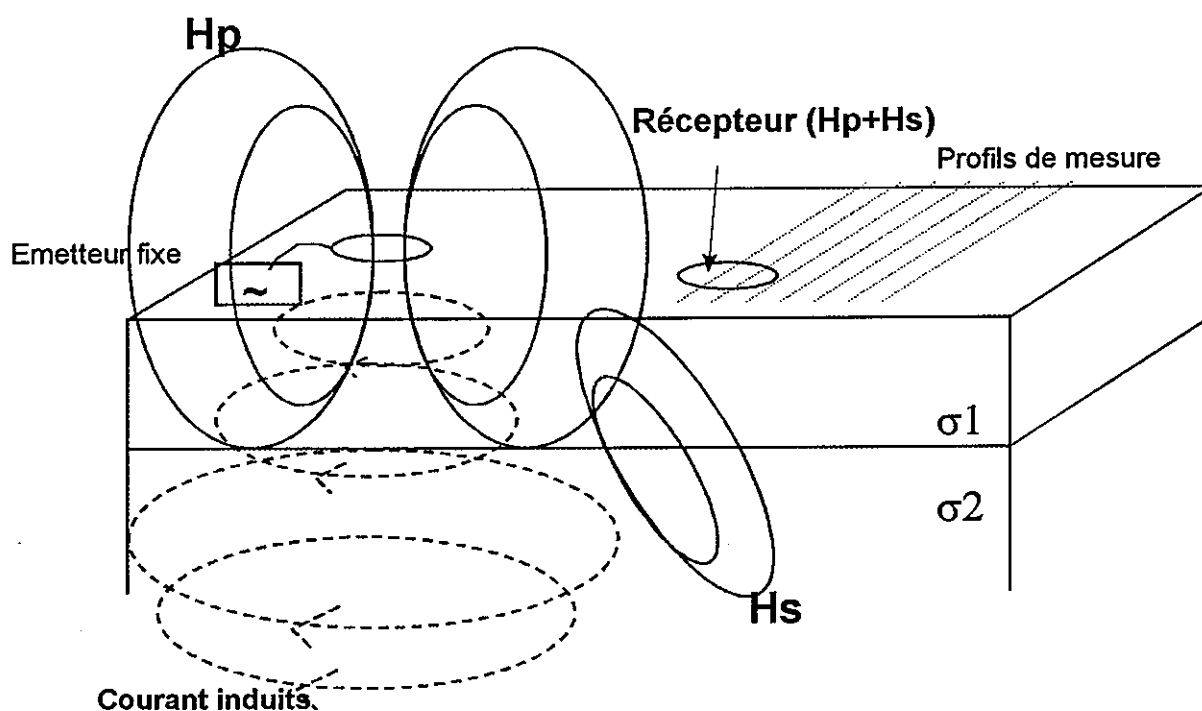
Profils et/ou cartes de résistivité apparente (ou de conductivité électrique), sondages électromagnétiques fréquentiels ou géométriques (différents écartements émetteur-récepteur)

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Eberhart-Phillips, D., Stanley, W.D., Rodriguez, B., D. & Lutter W.J. (1995)- Surface seismic and electrical methods to detect fluids related to faulting. J.G.R., Vol. 100, No. B7, pp. 12919-12936
- Shields G., Allander K., Brigham R., Crosbie R., Trimble L., Sleeman M., Tucker R., Zhan H. & Louie J. (1998)- Shallow Geophysical Survey across the Pahump Valley Fault Zone, California-Nevada Border. Bulletin of Seismological Society of America. Vol 88, no 1, pp. 270-275.
- Valla, P. (1991)- Application de la modélisation numérique aux méthodes d'électromagnétisme fréquentiel en prospection géophysique. Document du BRGM, n° 206.

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Environnement et topographie	Emetteur adapté et boucle d'émission, capteur magnétique et/ou ligne tellurique, récepteur EM, 1 opérateur

UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
Prix : - au point (si récepteur mobile pour une fréquence fixe) : espacement entre points : 1, 2 ou 5 m, de 200 à 300 points par jour ; - au sondage (plusieurs fréquences d'émetteur), entre 20 et 40 sondages par jour (selon difficultés de terrain) ; Environ 10 à 15 KF par jour, plus Mob-Démob, plus interprétation.	EM, MELIS, TURAM VARIANTES : EM dans le domaine transitoire (TDEM) : traitement du temps de retour à zéro du champ secondaire après coupure du champ primaire, exemple EM37



Principe de la méthode électromagnétique à émetteur contrôlé fixe, mais proche du récepteur (exemple du TDEM ou du MELIS).

EM AU SOL AVEC EMETTEUR MOBILE

METHODE : Electromagnétique avec émetteur proche contrôlé mobile

PRINCIPE

Un champ électromagnétique de fréquence imposée est émis par l'émetteur. Ce champ primaire (champ inducteur) est perturbé par la présence des conducteurs qui provoquent l'apparition de courants induits produisant à leur tour un champ secondaire superposé au champ primaire. La comparaison du champ magnétique total reçu par le récepteur et du champ primaire permet le calcul d'une conductivité apparente, exprimée en millisiemens/m ou mS/m.

DOMAINES D'APPLICATION	CONDITIONS D'APPLICATION	INTERDITS D'APPLICATION
- remplissages minéralisés ou hydrothermaux - remplissage non consolidé, plus ou moins humide - décalage dans le bedrock - failles normales	Existence d'un contraste de conductivité	Milieu industriel, urbain. Lignes HT aériennes ou enterrées, conducteur de surface trop marqué, structures métalliques

PRECISION	PROFONDEUR D'INVESTIGATION
Etudes ponctuelles, profils décimétriques à hectométriques, localisation d'un objet géologique à quelques mètres ou au mètre près	0-50 m (inversement proportionnelle à la fréquence de l'émetteur), fonction des dimensions de la bobine émettrice, du nombre de spires, de l'écartement émetteur-récepteur

RESULTAT FOURNI

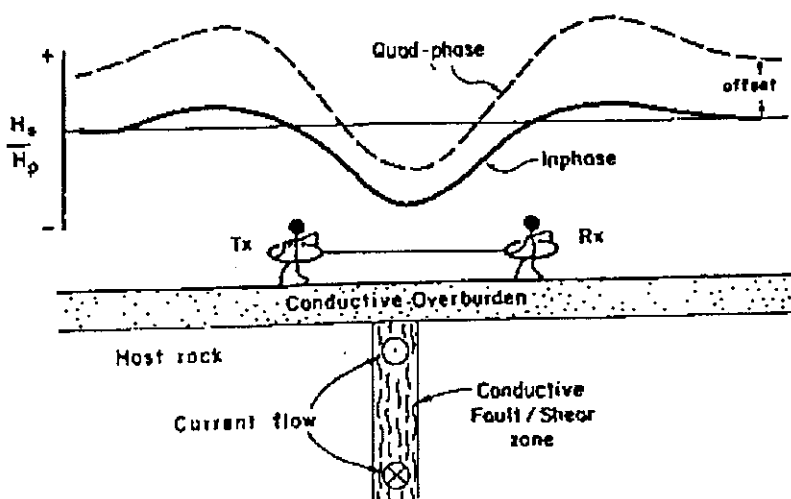
Profils et/ou cartes de résistivité apparente (ou de conductivité électrique), sondages électromagnétiques fréquentiels ou géométriques (différents écartements émetteur-récepteur)

QUELQUES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Shields, G. & al. (1998)- Shallow Geophysical Survey across the Pahrump Valley Zone, California-Nevada Border. BSSA, Vol. 88, No. 1, pp. 270-275.
- Jongmans, D., Demanet D. & Krings, J. (1998)- Application of geophysical prospecting methods for investigating a Quaternary normal fault in the Bree area (Roer graben). Abstracts Summer School in Active faulting and seismology, Luxembourg, pp. 85-89
- Wolf, L.W., Collier, J., Tuttle, M. & Bodin, P. (1998)- Geophysical reconnaissance of earthquake-induced liquefaction features in the New Madrid seismic zone. Jour. of App. Geophys., 39, pp. 121-129

INFORMATIONS UTILES POUR ETABLIR LE PROGRAMME TECHNIQUE	LOGISTIQUE TERRAIN
Environnement industriel, urbain. Topographie	1 dispositif intégré émetteur-récepteur, 1 opérateur

UNITE DE PRIX	AUTRES APPELLATIONS
Prix au point: espacement entre points : jusqu'à 1 m pour le EM 31 (400 points/jour), 5 m pour le EM34, (200 points/jour). Environ 10 à 15 KF par jour, plus Mob-Démob, plus interprétation.	- EM31 : un seul écartement émetteur-récepteur = 3,6 m, fréquence = 9,6 KHz), - EM34 : 3 écartements possibles avec 3 fréquences différentes, Il est intéressant de combiner EM31 et EM34 - SLINGRAM, MAX-MIN, traîné électromagnétique.



Principe de la méthode électromagnétique à émetteur proche et contrôlé (méthode Slingram). Mesure du champ en phase (inphase) et du champ en quadrature (quad-phase).

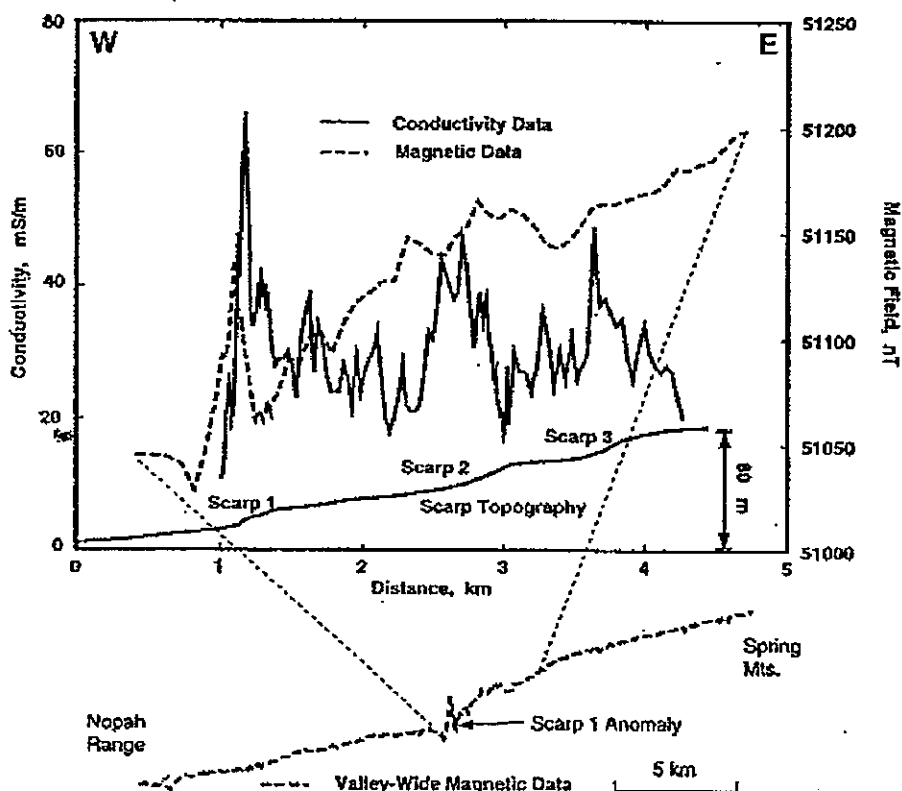


Figure 8 : Courbes de profils de conductivité EM31 et de magnétisme superposées au profil topographique des escarpements. Des anomalies significatives apparaissent à l'aplomb de l'escarpement 1 pour les deux méthodes. Le profil magnétique complet est représenté sous le profil topographique. Il montre une augmentation régionale vers l'Est et l'absence d'autres anomalies magnétiques (d'après Shields et al., 1998).

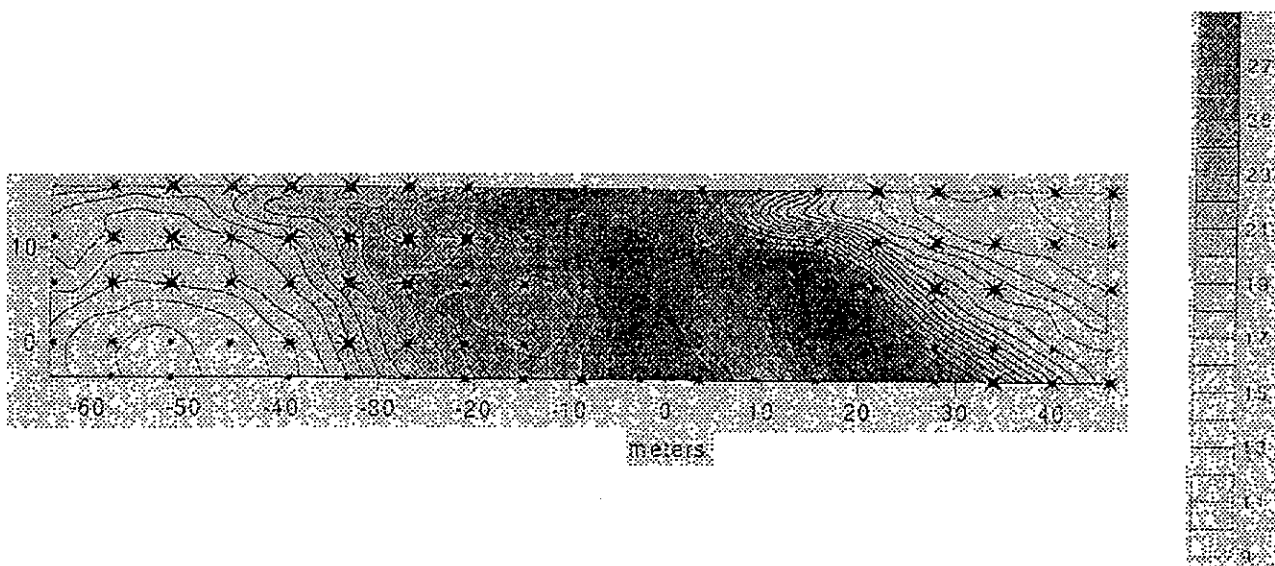


Figure 10 : Hauteur relative des plants de coton dans la grille de mesures superposés aux contours de conductivité EM31 (mS/m). La taille de chaque étoile est proportionnelle à la taille moyenne des plants de coton (d'après Wolf et al., 1998). Les racines des plants de coton s'étendent au maximum jusqu'à 10 cm de profondeur et leur croissance est fonction de l'humidité et de la fertilité du sol dans cette tranche de profondeur. Un déficit important de croissance est observé au centre de la grille de mesures, où est localisé le volcan de sable dû à la liquéfaction. Cet exemple montre la possibilité d'utiliser un effet induit (la liquéfaction) pour localiser la faille.

BRGM
SERVICE AMENAGEMENT ET RISQUES NATURELS
Unité Aléa, Vulnérabilité, gestion du Risque
BP 167 – 13276 MARSEILLE Cedex 9 – France – Tél. (33) 04 91 17 74 74