



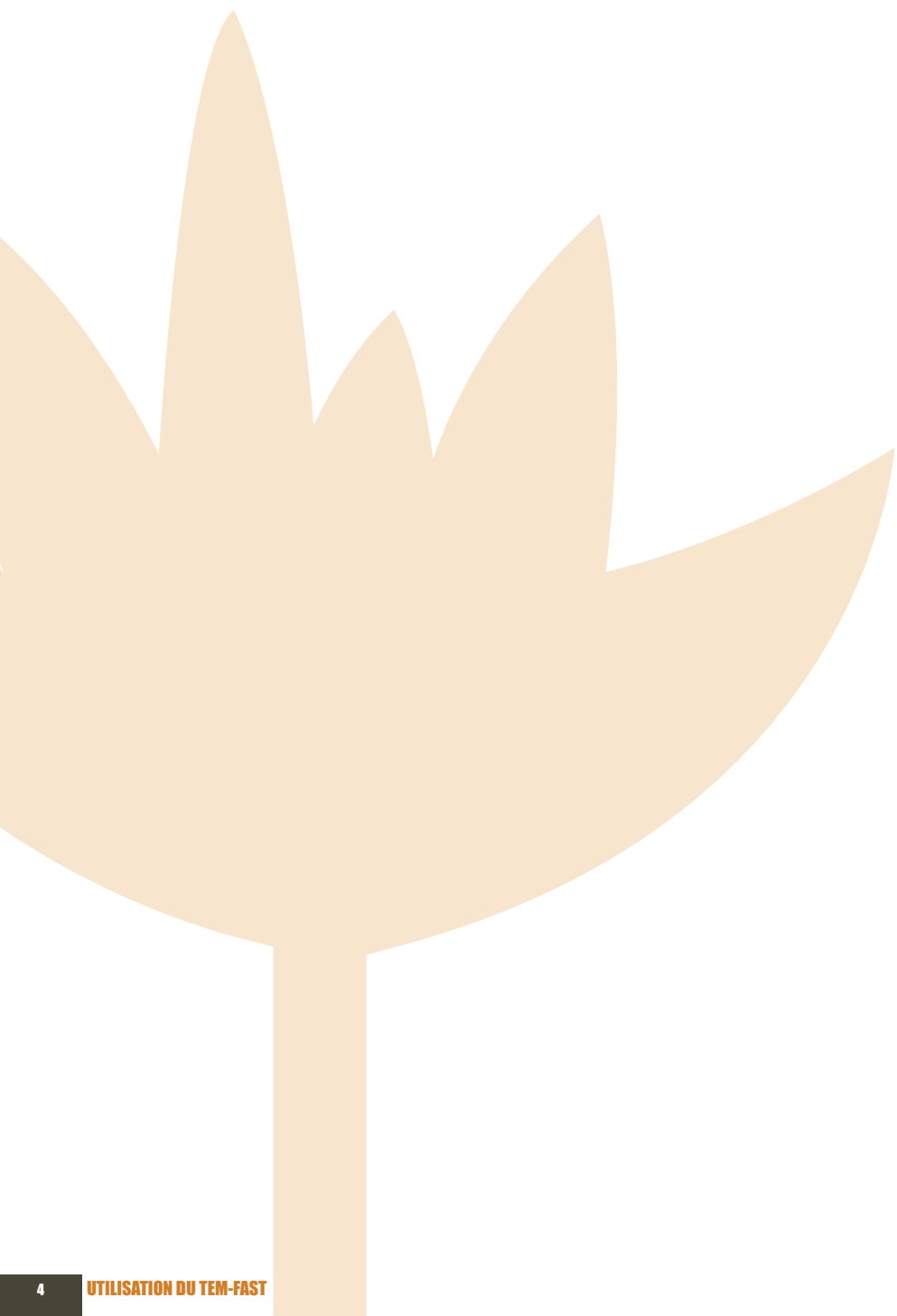
ACF - INTERNATIONAL

UTILISATION DU TEM-FAST DANS LE CADRE DE MISSIONS DE PROSPECTION GÉOPHYSIQUE



UTILISATION DU TEM-FAST

DANS LE CADRE DE MISSIONS DE PROSPECTION GÉOPHYSIQUE



Ce rapport technique a été rédigé dans le cadre d'un projet de *“recherche opérationnelle”* financé conjointement par l'organisation non-gouvernementale humanitaire *Action contre la Faim*, la *Croix Rouge Française* et le *Ministère des Affaires Etrangères*.



Nous tenons à remercier toutes ces organisations et institutions pour avoir rendu ce travail possible.



INFORMATIONS LÉGALES

DÉCLARATION CONCERNANT LES DROITS D'AUTEUR

© ACF International - 2010

Reproduction autorisée, moyennant mention de la source, sauf spécification contraire. Si la reproduction ou l'utilisation de données textuelles et multimédias (son, images, logiciels, etc.) sont soumises à autorisation préalable, cette autorisation annulera l'autorisation générale susmentionnée et indiquera clairement les éventuelles restrictions d'utilisation.

CLAUDE DE NON-RESPONSABILITÉ

Le présent document vise à promouvoir l'accès du public aux informations relatives à ses initiatives et aux politiques d'Action contre la Faim en général. Notre objectif est de diffuser des informations exactes et à jour à la date de création. Nous nous efforcerons de corriger les erreurs qui nous seront signalées. Toutefois, ACF n'assume aucune responsabilité quant aux informations que contient le présent document.

Ces informations :

- sont exclusivement de nature générale et ne visent pas la situation particulière d'une personne physique ou morale ;
- ne sont pas nécessairement complètes, exhaustives, exactes ou à jour ;
- renvoient parfois à des documents ou sites extérieurs sur lesquels ACF n'a aucun contrôle et pour lesquels ACF décline toute responsabilité ;
- ne constituent pas de manière exhaustive un avis juridique.

La présente clause de non-responsabilité n'a pas pour but de limiter la responsabilité d'ACF de manière contraire aux exigences posées dans les législations nationales applicables ou d'exclure sa responsabilité dans les cas où elle ne peut l'être en vertu des dites législations.

Cet ouvrage a été rédigé par le Dr Johan Hoareau (ACF), sous la supervision de Dr Jean Lapegue (ACF), et avec la collaboration d'Isabelle Livovsché, dans le cadre des activités de la Direction Scientifique et Technique ACF-France.

Merci au Dr Marc Desclotres pour son aide et ses conseils lors des missions de terrain et de la rédaction.

Conception graphique : Céline Beuvin

Photo de couverture : © Jean Lapegue - Conception illustration : © Johan Hoareau

Achevé d'imprimer en mai 2010 sur les presses de Cap Impression - 9, rue Salvador Allende - Z.I. des Glaives - 91120 Palaiseau

Imprimé sur papier recyclé Cyclus Print

Dépôt légal : Mai 2010

INTRODUCTION

Ce rapport est destiné aux utilisateurs de l'appareil TEM-Fast 48HPC. Ce n'est pas un cours de géophysique à proprement parler ! Son but est de donner à l'utilisateur quelques bases et quelques conseils pour l'aider à réaliser des mesures fiables avec cet appareil et à les interpréter. Il est organisé en trois parties :

1. La première partie rappelle les bases de la méthode TDEM, ses avantages, inconvénients et les caractéristiques d'une mesure.
2. La seconde partie est centrée sur le TEM-Fast lui même, sur son fonctionnement, sur la méthodologie proposée pour l'utiliser et interpréter ses mesures. Cette partie regroupe des conseils et des recommandations pour guider l'utilisateur au travers des différentes étapes de la mesure à l'interprétation.
3. La troisième partie présente quelques résultats de tests effectués dans le cadre de missions de prospection géophysique, et permet d'illustrer le protocole défini dans la seconde partie.

Ce rapport ne demande qu'à évoluer : tout commentaire, remarque, correction sont les bienvenus. Le but de ce rapport est de s'enrichir de l'expérience des utilisateurs du TEM-Fast afin d'être le plus complet possible, et d'aider l'utilisateur à faire face au plus grand nombre de situations possibles.

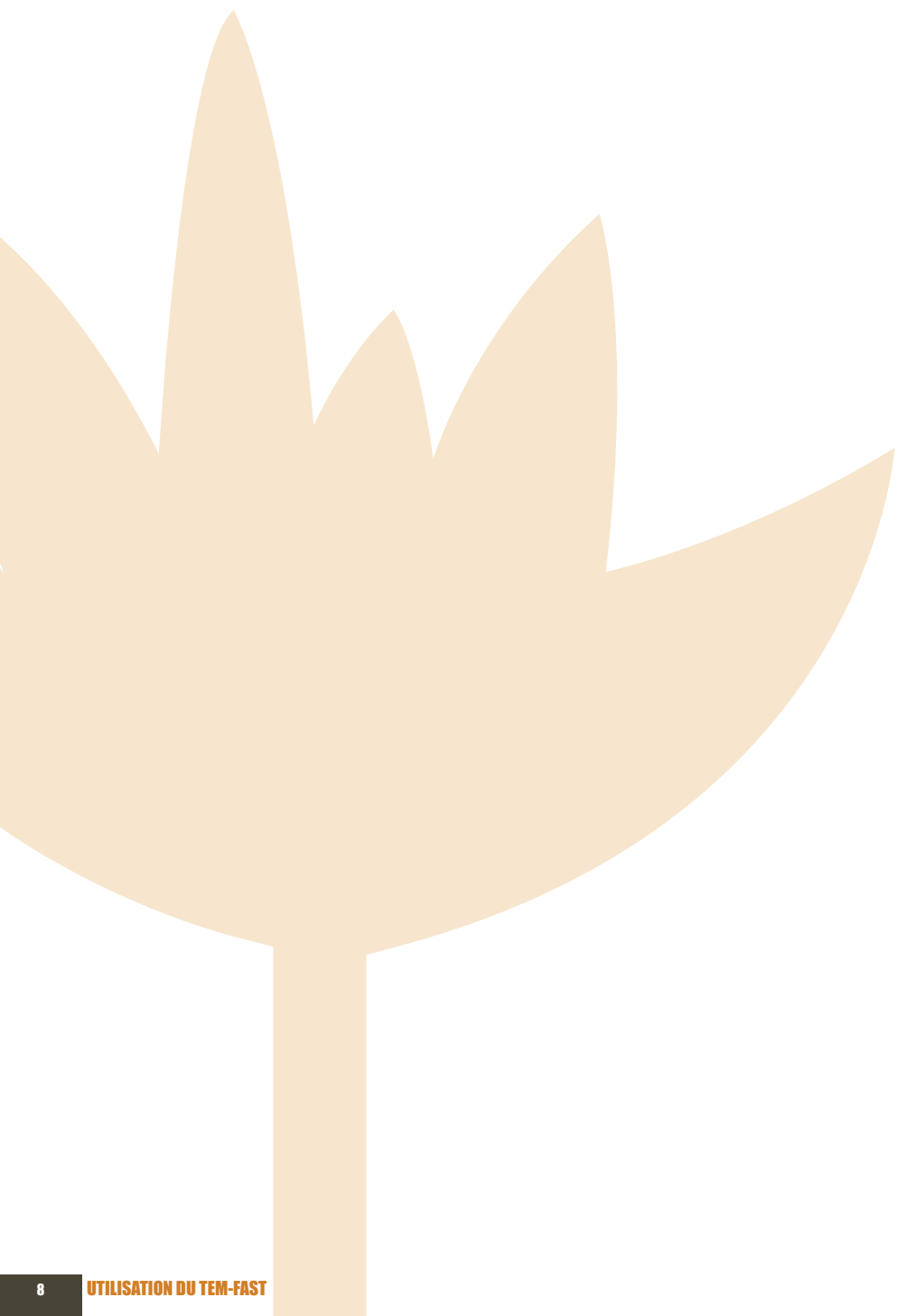
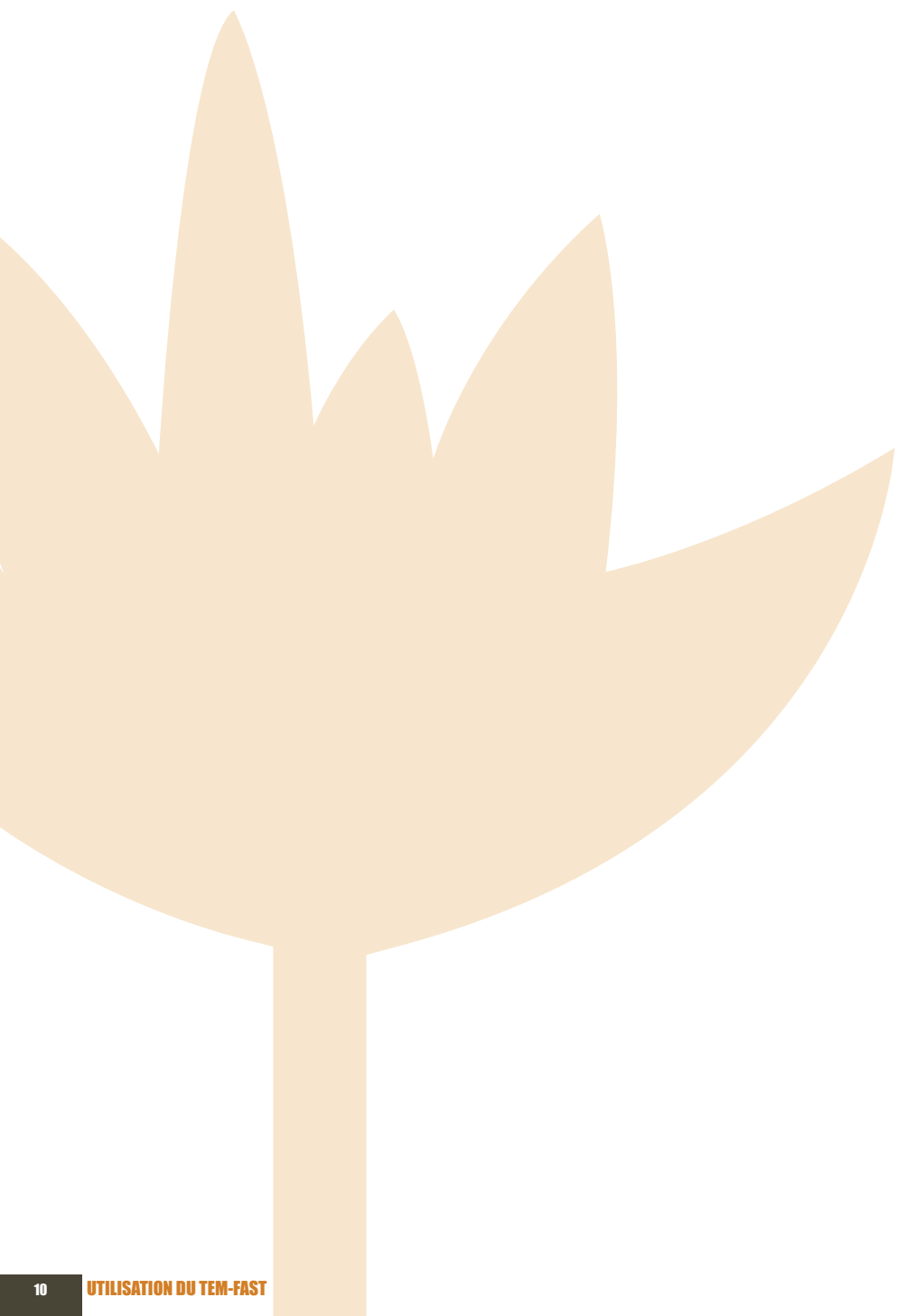


Table des matières

Principe de la méthode TDEM	11
Principe du TDEM	12
Réalisation d'un sondage	12
Profondeur d'investigation	16
Interprétation des résultats	19
Sources de perturbation	21
Méthode TDEM et hydrogéologie	23
Intérêt de la méthode	23
Exemples d'application	24
Le TEM-Fast	27
Présentation du TEM-Fast	28
Introduction	28
Acquisition d'un sondage TEM-Fast	29
Utilisation du TEM-Fast	32
Proposition d'un protocole d'acquisition	32
Que faire si le niveau de signal est faible ?	39
Que faire si le signal présente des distorsions ?	40
Interprétation des données TDEM	43
Préparation des mesures	43
Interprétation	44
Résumé	45
Exemples d'application	47
Exemple d'application en milieu côtier	48
Présentation du contexte	48
Choix des paramètres de sondage	49
Résultats	50
Exemple d'application en zone de socle	53
Généralités	53
Mode opératoire	54
Exemples de résultats obtenus	54
Conclusion et recommandations	55
Annexes	57
Annexes A : Liste de colissage du TEM-Fast	58
Annexes B : Description du TEM-Fast	60
Annexes C : Caractéristiques techniques du TEM-Fast	62
Table des figures	64
Liste des tableaux	65
Références bibliographiques	66



Chapitre 1

PRINCIPE DE LA MÉTHODE TDEM





PRINCIPE DU TDEM

La méthode TDEM (pour Time Domain Electro-Magnetism) fait partie des méthodes de prospection électromagnétique, ou “EM”. Elle permet de réaliser des sondages de résistivité électrique de manière non-destructrice, à partir d’un dispositif constitué uniquement de câbles électriques. Elle intervient dans de nombreuses applications pour lesquelles la structure du sol doit être connue, comme notamment la recherche d’aquifères, de minerai, ou encore le suivi de pollution du sous-sol. Son utilisation est toutefois réservée aux situations où :

1. les terrains intéressant le prospecteur sont conducteurs ($< 300 \Omega.m$), comme les argiles, les terrains contenant de l’eau saumâtre ou salée, ou les gisements de minerai ;
2. le sous-sol peut être assimilé en première approximation à un milieu tabulaire.

RÉALISATION D’UN SONDAGE

Principe général

La réalisation d’un sondage TDEM consiste à envoyer une impulsion électromagnétique dans le sous-sol à l’aide d’une boucle d’émission et d’étudier la réponse électromagnétique du sous-sol à cette impulsion. Cette réponse, mesurée à l’aide d’une boucle de réception dépend en effet de la conductivité électrique des terrains à l’endroit du sondage.

Ces boucles sont constituées d’un (ou plusieurs) câble(s) électrique(s) isolé(s). Lors du sondage, elles sont posées à même le sol, mais peuvent également être aéroportées dans le cadre de certaines applications. Chacune est reliée à l’unité de mesure du TDEM, qui contrôle tout le processus d’acquisition des données.

Déroulement du sondage

Afin de générer une impulsion électromagnétique dans le sol, un courant continu de plusieurs Ampères est injecté dans la boucle d’émission. La circulation de ce courant dans la boucle provoque l’apparition d’un champ magnétique statique : le champ “primaire”. Après un intervalle de temps donné, l’injection du courant est coupée brusquement. Dans la boucle d’émission, la coupure n’est pas instantanée : le courant décroît pendant quelques millisecondes avant de s’annuler. Cette diminution de l’intensité du courant entraîne une décroissance du champ primaire.

Selon la loi de Faraday, la variation d’intensité d’un champ magnétique au cours du temps provoque l’apparition d’une force électromotrice (fem) dans tout milieu conducteur situé à proximité. L’air étant infiniment résistant, c’est dans le terrain étudié que va apparaître cette fem lors d’un sondage TDEM. Celle-ci va induire dans le sol une circulation de courant électrique (*courant de Foucault, ou Eddy currents*), qui peut être vue comme une réplique de la boucle d’émission dans le sol (McNeill, 1994 ; Figure 1.1).

L'intensité de ce courant induit diminue immédiatement, à cause de la résistivité des formations qu'il traverse. Cette nouvelle décroissance entraîne l'apparition d'une nouvelle fem, mais à une distance et à une profondeur plus grandes de la surface du sol. De la même manière, cette fem va induire dans le sol un nouveau courant, qui va également diminuer, et générer une nouvelle fem, et ainsi de suite (McNeill, 1994). En résumé, immédiatement après la coupure du courant, des boucles de courant se propagent dans le sol, de plus en plus profondément, à la manière de "ronds de fumée" (Figure 1.2).

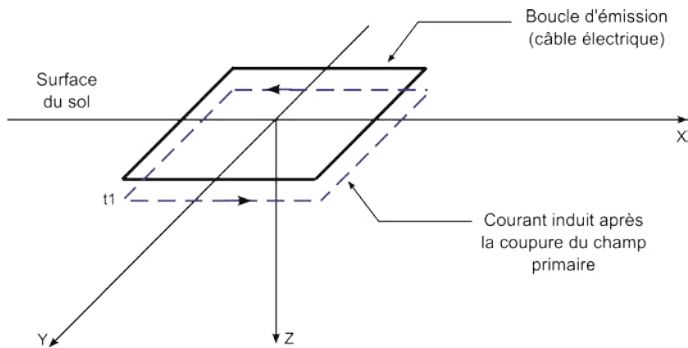


Figure 1.1 - Boucle de courant induite dans le sol juste après la coupure
modifié d'après McNeill (1990).

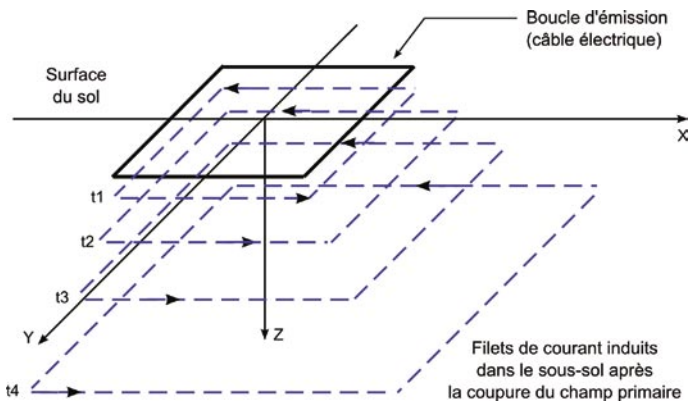


Figure 1.2 - Boucles de courant induites dans le sol aux instants suivants
modifié d'après McNeill (1990).



L'intensité de ces courants de Foucault dépend essentiellement de la résistivité des formations dans lesquelles ils se forment. Ces courants génèrent un champ magnétique dit "secondaire", dont l'intensité est fonction de cette résistivité. A son tour, ce champ magnétique secondaire induit un courant faible dans la boucle de réception, qui s'exprime par une tension mesurable au bornes de cette boucle. La valeur de cette tension est directement liée à l'intensité du champ magnétique secondaire, et donc à la résistivité des formations. Cette tension est mesurée à différents instants au fur et à mesure du sondage, correspondant à des boucles de courants de plus en plus profondes : c'est le principe "temporel" du TDEM.

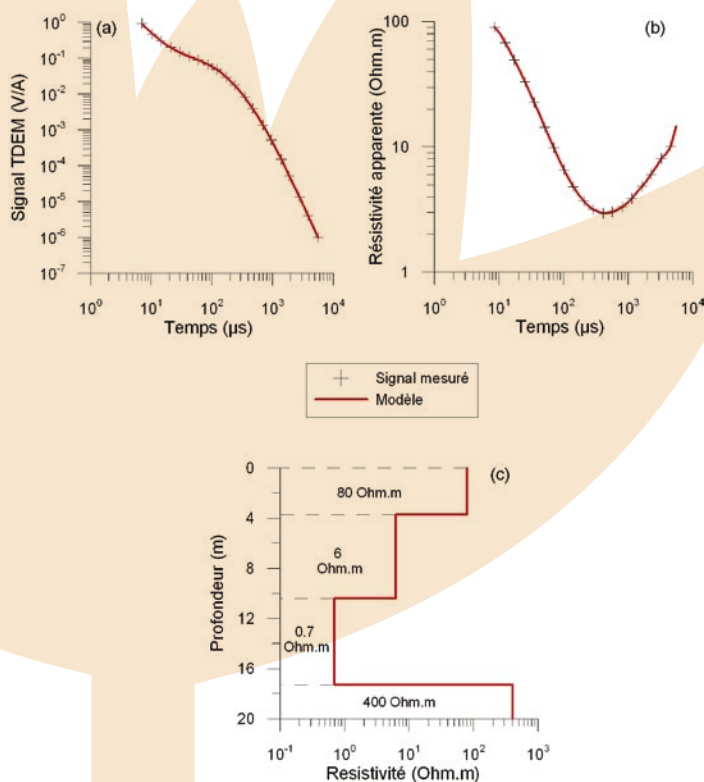


Figure 1.3 - Exemple de sondage TDEM : Signal mesuré dans la boucle de réception (a), représentation sous forme de résistivité apparente en fonction du temps (b) et interprétation de ces données sous forme de résistivité en fonction de la profondeur (c).

Le signal enregistré lors d'un sondage TDEM correspond donc à la décroissance d'un courant au cours du temps, dont l'amplitude et la forme sont liées à la résistivité électrique des terrains à l'endroit du sondage (Figure 1.3a).

Ce signal peut également être présenté sous la forme de résistivité apparente (ρ_a) en fonction du temps (Figure 1.3b). On peut considérer cette forme de signal comme une première interprétation de la mesure, avec le paramètre "temps" jouant le rôle de pseudo-profondeur. Cette transformation est très pratique pour avoir un premier aperçu des résistivités rencontrées, mais doit être employé avec précaution, car l'interprétation des courbes de résistivité apparente en TDEM est moins simple qu'en sondage électrique. Dans la suite de ce rapport, le terme "signal du TDEM" décrira la décroissance du courant dans la boucle de réception.

L'interprétation du signal TDEM (ou du signal de résistivité apparente) donne une distribution de la résistivité en fonction de la profondeur, présentée Figure 1.3c.

Dispositifs de mesure

Différents dispositifs peuvent être utilisés pour organiser les boucles d'émission et de réception lors d'un sondage TDEM. Deux de ces dispositifs sont couramment utilisés (Figure 1.4) :

- le dispositif coïncident, pour lequel une seule boucle est utilisée pour l'émission et la réception du signal. Simple à mettre en place, ce dispositif permet de bénéficier d'une surface de réception importante, et donc d'amplifier le champ magnétique secondaire. Il est cependant très sensible aux effets magnétiques (Buselli, 1982).
- Le dispositif central, où l'émission et la réception sont assurées par deux boucles distinctes, la boucle de réception étant située au centre de la boucle d'émission. Ce dispositif, moins sensible aux effets magnétiques, permet de s'affranchir de quelques artefact obtenus avec le dispositif coïncident.

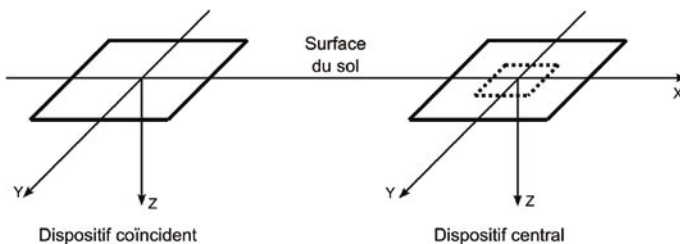


Figure 1.4 - Agencement pour les boucles d'émission (en traits pleins) et de réception (en pointillés).



PROFONDEUR D'INVESTIGATION

La méthode TDEM permet d'effectuer des sondages de résistivité électrique, qui caractérisent un certain volume de terrain situé sous le dispositif d'émission-réception. L'épaisseur de ce volume de terrain est comprise entre deux limites : la profondeur minimale à partir de laquelle il est possible de mesurer un signal, et la profondeur maximale à partir de laquelle ce signal devient trop faible pour être mesuré.

Profondeur minimale

Comme illustré Figure 1.5, la coupure du courant n'est pas instantanée dans la boucle d'émission. Ce décalage temporel permet à l'induction d'avoir lieu dans le sol.

Dans la boucle de réception, l'enregistrement du signal ne démarre pas immédiatement après cette coupure dans la boucle d'émission : la mesure est retardée par un délai instrumental : le temps de coupure, ou *Turn Off Time*. Ce "temps mort" correspond en effet au temps nécessaire pour qu'il n'y ait plus de trace du courant d'injection dans la boucle d'émission, ce dernier perturbant fortement la mesure.

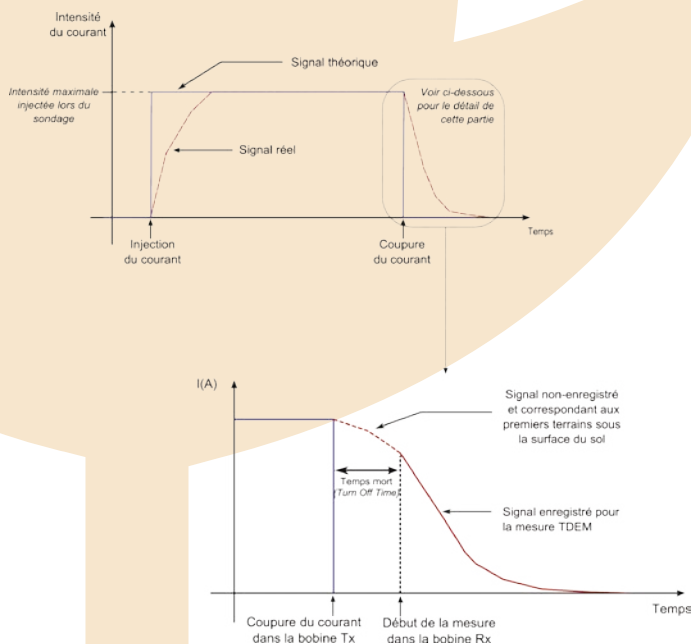


Figure 1.5 - Intensités, théorique et réelle, du courant dans la boucle d'émission : l'intensité réelle du courant (en pointillés) ne s'annule pas instantanément après la coupure.

Ce “temps mort” entre la coupure et la première mesure empêche donc de mesurer le signal généré par les premiers terrains sous la surface du sol. Par conséquent, le TDEM est “aveugle” sur les premiers mètres de terrain : le premier signal enregistré correspond à des informations provenant déjà d’une certaine profondeur, la profondeur minimale.

Cette épaisseur “aveugle” sera donc d’autant plus importante que le temps de coupure sera grand. Généralement, ce délai augmente avec la taille de la boucle utilisée, ainsi qu’avec l’intensité du courant injecté. Il est en effet aisément compréhensible qu’un courant électrique mette plus de temps à s’annuler si son intensité initiale est forte, et/ou si le câble dans lequel il circule est long. Le temps de coupure varie également selon l’appareil ou encore selon la résistivité des terrains à l’endroit du sondage. L’épaisseur aveugle est donc variable en fonction de la configuration du sondage et du lieu où ce sondage est effectué. Si les cibles aquifères sont peu profondes, on privilégiera une configuration permettant une profondeur aveugle faible (donc un *Turn Off Time* court), et inversement pour des cibles profondes.

Profondeur maximale

La profondeur maximale d’investigation peut être définie comme la profondeur maximale à laquelle il est possible de détecter un terrain et de mesurer sa résistivité. Si on se réfère au principe de la méthode TDEM (cf : “*Déroulement du sondage*”, p.12), cette profondeur dépend en premier lieu du temps pendant lequel le signal est enregistré dans la boucle de réception. Cependant, comme illustré Figure 1.6, il ne suffit pas de mesurer le plus longtemps possible pour augmenter cette profondeur d’investigation.

La limite d’investigation d’un sondage TDEM est donc liée au temps pendant lequel ce signal mesuré est interprétable : le temps pendant lequel l’amplitude du signal est supérieure à celle du bruit. Pour caractériser cela, on utilise le rapport “signal sur bruit”, ou SNR (*Signal to Noise Ratio*, Equation 1.1), qui exprime le rapport entre l’information utile de la mesure (*Signal*) et celle du bruit qui l’accompagne.

$$SNR = \frac{Signal}{Bruit}$$

Equation 1.1

La valeur de ce paramètre renseigne sur la quantité d’information disponible devant le bruit, et permet de comparer les différents sondages réalisés sur un même site. Une valeur élevée traduit un niveau de signal fort devant le niveau de bruit et donc un signal mesurable plus longtemps. Inversement, une valeur faible traduit une quantité d’information plus faible. De manière générale, on cherchera toujours à maximiser la valeur de ce rapport.

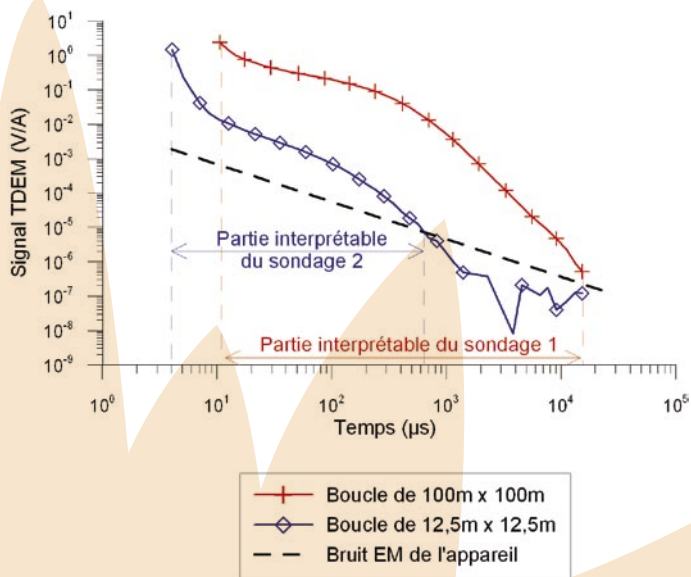


Figure 1.6 - Les deux signaux présentés sont enregistrés pendant le même temps, mais ne donneront pas la même profondeur d'investigation. L'amplitude du signal pour le sondage est constamment supérieure au bruit, garantissant ainsi une profondeur d'investigation importante. En revanche, le signal du sondage se noie rapidement dans le bruit, limitant ainsi la profondeur d'investigation. L'épaisseur aveugle ne sera non plus pas la même pour les deux elle sera plus importante pour le sondage n° 1, qui n'est interprétable qu'à partir de 10 μ s, contre 4 pour le sondage n° 2.

Afin de maximiser le rapport Signal/Bruit, on peut faire en sorte :

- d'amplifier le signal émis en augmentant l'intensité I du courant d'injection et/ou la surface AT_x du dispositif d'émission ;
- d'amplifier le signal reçu (pour AT_x constant) en augmentant AR_x la surface du dispositif de réception ;
- de réaliser un nombre important de mesures afin de les moyenner pour diminuer l'influence du bruit aléatoire.

Cependant, certains paramètres naturels comme le bruit électromagnétique et la résistivité des terrains sondés doivent également être pris en compte :

- le bruit EM peut masquer le signal si son amplitude est élevée ;
- l'induction est faible dans les terrains résistants.

Toutefois, en présence de terrains conducteurs, l'induction dans le sol est forte (donc le signal mesuré est fort) mais la profondeur de diffusion du signal T_x est faible, ce qui limite la profondeur d'investigation. Dans le cas opposé, en présence de terrains résistants, l'induction est faible, mais

le signal diffuse rapidement en profondeur. La profondeur d'investigation est donc plus importante en présence de terrains résistants qu'en présence de terrains conducteurs.

Ainsi, lors de sondages TDEM en présence de formations conductrices, le rapport signal sur bruit est important, mais la profondeur d'investigation est plus faible que pour le même sondage en présence de formations résistantes. On considère de façon empirique qu'en l'absence de phénomène particulier, la profondeur d'investigation est comprise entre 0.5 et 1.5 fois la taille d'un côté de la boucle de réception. Elle peut également être calculée de manière rigoureuse en prenant en compte tous les paramètres du sondage (Spies, 1989), mais cela dépasse un peu le cadre de ce document.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'interprétation des mesures TDEM permet d'obtenir une distribution de la résistivité en fonction de la profondeur à partir de la variation d'un courant mesurée dans la boucle de réception. Le détail des équations utilisées pour cela ne sera pas traité dans ce rapport, mais on peut se référer à Nabighian et Macnae (1991) pour plus d'informations à ce sujet.

Théorie

L'interprétation d'une mesure TDEM consiste à définir un modèle de structure du sol (résistivité en fonction de la profondeur) qui puisse reproduire cette mesure (Spies et Frischknecht, 1991). En pratique, un modèle de structure du sol est proposé et sa réponse théorique un sondage TDEM est calculée. La courbe théorique obtenue est alors comparée à la courbe mesurée sur le terrain, et le modèle proposé est ajusté afin que les deux courbes soient les plus proches possibles.

L'ajustement est généralement effectué automatiquement à l'aide d'un programme d'inversion itérative. Pour cela, la différence entre données calculées et mesurées est déterminée à l'aide d'un critère d'erreur, et le modèle est ajusté de manière à minimiser ce critère d'erreur (*Figure 1.7*). Le critère d'écart aux moindres carrés (ou RMS, pour *Root Mean Squared*) est communément utilisé pour ce genre d'applications.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$$

Equation 1.2 : où x_i représente les données calculées,
 y_i les données mesurées et N le nombre total de données.

Afin de proposer un modèle théorique cohérent avec les données du sondage, il est nécessaire d'avoir quelques connaissances préalables à propos du terrain étudié, ou des structures géologiques "classiques" rencontrées sur ce type de terrain. De manière générale, lorsqu'on ne dispose pas



d'information à priori, on cherche à définir le modèle résistivité/épaisseur le plus simple possible pour interpréter des mesures. Si on dispose d'informations provenant d'un log de forage par exemple, celles-ci doivent obligatoirement être prises en compte dans l'interprétation.

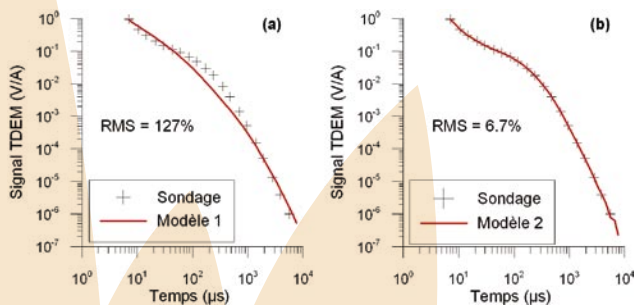


Figure 1.7 - Ajustement du modèle sur les données de terrain en minimisant le critère d'erreur RMS.

Principe d'équivalence

La notion d'équivalence est définie par le fait que plusieurs modèles résistivité/épaisseur différents peuvent donner les mêmes courbes théoriques de sondage (Figure 1.8). Ainsi, plusieurs solutions équivalentes peuvent être envisagées lors de l'interprétation d'une mesure TDEM.

Cependant, toutes ces solutions équivalentes ne sont que des solutions mathématiques. Certaines peuvent être très différentes, voire complètement aberrantes par rapport à la structure du terrain étudié. La sélection du modèle "correct" parmi les équivalences nécessite donc des connaissances préalables sur le terrain étudié (contexte géologique, logs de forages, mesures géophysique réalisées lors de mission antérieures).

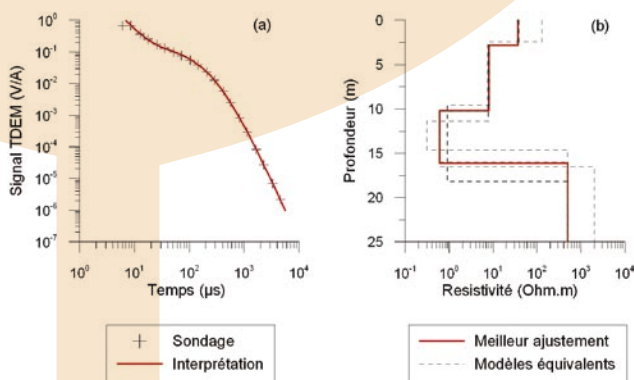


Figure 1.8 - Sondage TDEM (a) et solutions équivalentes (b) ; le « meilleur ajustement » est le modèle pour lequel le critère d'erreur RMS est minimal.

Notion de suppression

Lors d'un sondage, toutes les couches composant le terrain étudié ne vont pas forcément apparaître sur la courbe de mesure. En effet, certaines couches sont trop fines, ou ne présentent pas de contrastes de résistivité suffisamment importants pour influencer la mesure. Ces couches sont donc "masquées" lors de la mesure, et n'apparaissent pas sur les résultats de l'interprétation.

De manière générale, lors de l'étude d'un terrain, il est inutile de chercher à décrire l'intégralité des différentes couches présentes (couches qui se distinguent par leur résistivité). En effet, excepté pour certaines applications, on cherche plutôt à définir les structures majeures qui composent le terrain. Ces structures englobent les couches plus fines, et permettent d'avoir un bon aperçu de la structure du terrain.

SOURCES DE PERTURBATION

Les mesures TDEM, et par conséquent leur interprétation, peuvent être rendues difficiles, voire impossible par différentes sources de perturbations. Ces perturbations ont des origines variées, qui peuvent être liées (Nabighian et Macnae, 1991; Descloitres, 1998) :

- à l'appareil lui même,
- à des erreurs de mise en oeuvre du sondage,
- au contexte géologique du site étudié,
- au bruit électromagnétique (naturel ou anthropique) sur le site étudié.

Erreurs liées l'appareil

Les perturbations liées à l'instrument peuvent être dues au bruit électromagnétique généré par le fonctionnement de l'instrument. Ce bruit est généralement très faible (de plus en plus pour les appareils récents) et n'intervient que très peu sur les dernières fenêtres temporelles, à condition que le bruit électromagnétique du site soit faible devant celui de l'appareil. Les perturbations peuvent également provenir d'éventuelles dérives des composants de l'appareil (Descloitres, 1998).

Erreurs liées à la mise en oeuvre du sondage

Ceci concerne toutes les erreurs commises sur le terrain lors de la préparation du sondage : une boucle mal installée, un courant d'injection trop faible, une boucle trop petite (ou trop grande) peuvent sérieusement limiter la qualité de la mesure.

Erreurs liées au contexte géologique du site étudié

L'interprétation des mesures TDEM est basée sur l'hypothèse que les terrains sondés sont tabulaires : que les variations de résistivité ne se font qu'avec la profondeur (Krivochieva, 2002). Dans le cas où des structures à deux ou trois dimensions sont présentes, les lignes du courant induit sont déformées et l'interprétation à une dimension n'est plus valide (Auken, 1995).



Cependant, en fonction de la taille de la boucle utilisée, ces hétérogénéités peuvent être intégrées (et “noyées”) dans le volume de terrain sondé. Dans le cas où ces structures sont petites devant la taille de la boucle, elles n’auront que peu d’effet sur les mesures.

Deux autres phénomènes peuvent également perturber la mesure (Krivochieva, 2002) : le phénomène de polarisation provoquée et le phénomène de viscosité magnétique. La polarisation provoquée (ou polarisation induite) se produit en présence de roches polarisables comme les argiles ou les sulfures. Lors d’un sondage TDEM, ces roches se polarisent et donnent naissance à un courant électrique parasite qui s’oppose au courant induit par le TDEM. La conséquence sur la mesure est une distorsion du signal mesuré, ce qui peut rendre les interprétations difficiles.

Le phénomène de viscosité magnétique se produit en présence de roches ferromagnétiques et ferrimagnétiques. Il s’exprime par un champ magnétique parasite qui s’ajoute au champ induit et modifie la forme du signal, ce qui peut également conduire à des erreurs d’interprétations.

Ces deux phénomènes peuvent affecter fortement la mesure. On peut cependant minimiser leurs effets en utilisant des configurations adaptées, ou en s’éloignant des zones où ces phénomènes sont observés.

Erreurs liées au bruit électro-magnétique sur le site étudié

Les sources de bruit électromagnétique artificiel sont nombreuses. Elles peuvent être “actives”, comme les lignes électriques (dans lesquelles circulent un courant alternatif) ou les antennes radio. Généralement, les équipements destinés à être utilisés sur le terrain peuvent filtrer les fréquences parasites liées à ces installations électriques (50 et 60 Hz).

Les sources de bruit peuvent également être “passives” : il s’agit généralement des bâtiments en métal (grange, toits en tôle), des clôtures fermées ou des tuyaux métalliques en surface ou enterrées (pipe-line, canalisations) et plus généralement de toutes les structures métalliques proches des boucles. En effet, lors de la coupure du champ primaire, tous les éléments conducteurs situés à proximité de la boucle d’émission induisent des courants de Foucault qui peuvent perturber la réponse du terrain étudié.

La seule façon d’éviter ces perturbations est de s’éloigner de ces conducteurs (si cela est possible). McNeill (1994) conseille même de repérer les structures métalliques enfouies à l’aide d’un détecteur de métaux sur le site étudié avant de faire un sondage. On considère empiriquement que pour s’affranchir de l’influence d’un élément perturbateur, il est nécessaire de s’en éloigner d’une distance égale au moins à la taille d’un côté du dispositif de mesure.

Cependant, sachant que les mesures sont généralement consultables directement sur le terrain, et que la durée d’un sondage TDEM varie entre cinq à trente minutes (selon l’appareil utilisé et la configuration du sondage), il est possible de repérer rapidement d’éventuelles perturbations. Une fois ces perturbations identifiées, il est possible de faire un nouveau sondage avec une configuration permettant de meilleures mesures.

MÉTHODE TDEM ET HYDROGÉOLOGIE

INTÉRÊT DE LA MÉTHODE

L'utilisation de la méthode TDEM pour résoudre les questions relatives à l'hydrogéologie (où se trouve la ressource et en quelle quantité ?) est assez récente. De nombreux articles font état de l'intérêt de cette méthode dans des contextes variés. Ceux-ci seront rapidement cités dans cette partie, on pourra s'y référer pour plus d'informations. Deux exemples d'application seront également présentés dans la dernière section de ce rapport.

La plupart des missions hydro-géophysiques d'Action contre la Faim ont impliqué l'utilisation de sondages électriques à l'aide de résistivimètres (méthode courant continu). Ces missions ont été réalisées dans des contextes variés, comme en zone de socle en Ouganda, ou en milieu côtier en Birmanie. Si on considère seulement le résultat, le TDEM et les sondages électriques sont similaires : ils permettent tous les deux d'obtenir la distribution de la résistivité électrique en fonction de la profondeur.

Cependant, la méthode TDEM se distingue sur plusieurs points :

- elle permet de localiser et de décrire les formations conductrices (position du toit, valeur de résistivité) avec plus de précision que les méthodes de courant continu ;
- elle est peu sensible aux variations latérales superficielles de résistivité, ce qui permet son utilisation sur des terrains présentant de telles structures ;
- l'absence de contact entre les bobines et le sol permet de travailler facilement sur des terrains très résistants, ou très durs en surface (sable sec, rochers), là où les méthodes électriques (pour lesquelles il est nécessaire de planter des électrodes dans le sol) sont plus limitées ;
- la mise en oeuvre du sondage est plus simple et la mesure plus rapide que pour un sondage électrique équivalent.

Néanmoins, elle présente également quelques inconvénients :

- la mesure sur les premiers mètres du sol est très limitée (épaisseur aveugle) et varie en fonction du temps de coupure de l'instrument utilisé (la première mesure n'a pas lieu au même moment pour tous les instruments) ;
- les terrains résistants sont moins bien contraints qu'avec les méthodes courant continu : la méthode distingue difficilement un terrain résistant d'un terrain très résistant (entre 1 000 et 10 000 Ohm.m par exemple). Il est donc quasi impossible de décrire des formations résistantes avec cette méthode ;
- il peut être difficile d'installer une boucle de sondage TDEM dans une zone boisée ou une zone habitée.



En termes d'études hydrogéologiques, le TDEM apparaît donc comme un outil performant pour l'étude des milieux présentant de forts contrastes de résistivité. Ceci concerne surtout les milieux sédimentaires et les milieux côtiers (sédimentaires ou pas), qui peuvent présenter des contrastes suffisamment importants.

EXEMPLES D'APPLICATION DE LA MÉTHODE TDEM

En milieux côtier soumis à des intrusions salines, l'utilisation de la méthode TDEM permet de déterminer la géométrie du milieu, en localisant l'interface entre l'eau douce et l'eau salée et donc de connaître la géométrie de l'aquifère. De nombreuses références existent, parmi lesquelles on peut citer Goldman et al. (1991) ; Fitterman et al. (1999) ; Kafri et Goldman (2005) ; Hoareau et al. (2006). Dans ce genre de milieu, le TDEM se distingue du VES (Vertical Electrical Sounding) par la facilité et la rapidité de mise en place des sondages et la précision dans la cartographie du toit de l'intrusion saline.

De même, Descloitres (1998) et Descloitres et al. (2000) ont démontré l'intérêt de la méthode TDEM pour la prospection d'eau souterraine en milieu volcanique, où les sondages électriques sont très difficiles, à cause de la dureté du sol et des résistances de prise importantes au niveau des électrodes.

Guérin et al. (2001) ont utilisé le TDEM pour effectuer des sondages profonds sur l'Altiplano bolivien. Ceci leur permis de connaître la géométrie des aquifères profonds et de comprendre l'origine de la salinité des eaux de cette région.

Jørgensen et al. (2003) ont pu cartographier d'importantes structures aquifères au Danemark : des paléo-vallées comblées, dont le potentiel aquifère est très fort.

Le TDEM peut également être associé à d'autres méthodes de prospection géophysique comme la résonance magnétique protonique (RMP). Cette méthode permet de localiser directement les aquifères, mais ne donne aucune information sur la résistivité des formations dans lesquelles cet aquifère est en place, et donc sur la salinité de l'eau. Le TDEM peut donc être employé en parallèle de la RMP pour avoir le maximum d'information sur la ressource (Goldman et al., 1994).

ACF a déjà eu l'occasion d'utiliser la méthode TDEM lors de missions de prospection géophysique. Ainsi, au Cambodge (1999), au Honduras (2000) et au Mozambique (2001). Le TDEM avait permis :

- de faire un premier repérage rapide des contrastes de résistivité sur le terrain, et donc des zones à étudier plus précisément,
- d'avoir des informations sur la salinité de l'eau des aquifères,
- de délimiter précisément l'interface aquifère résistant/substratum conducteur, dans un contexte où d'autres méthodes de prospection se révélaient moins précises et plus lourdes à mettre en oeuvre.

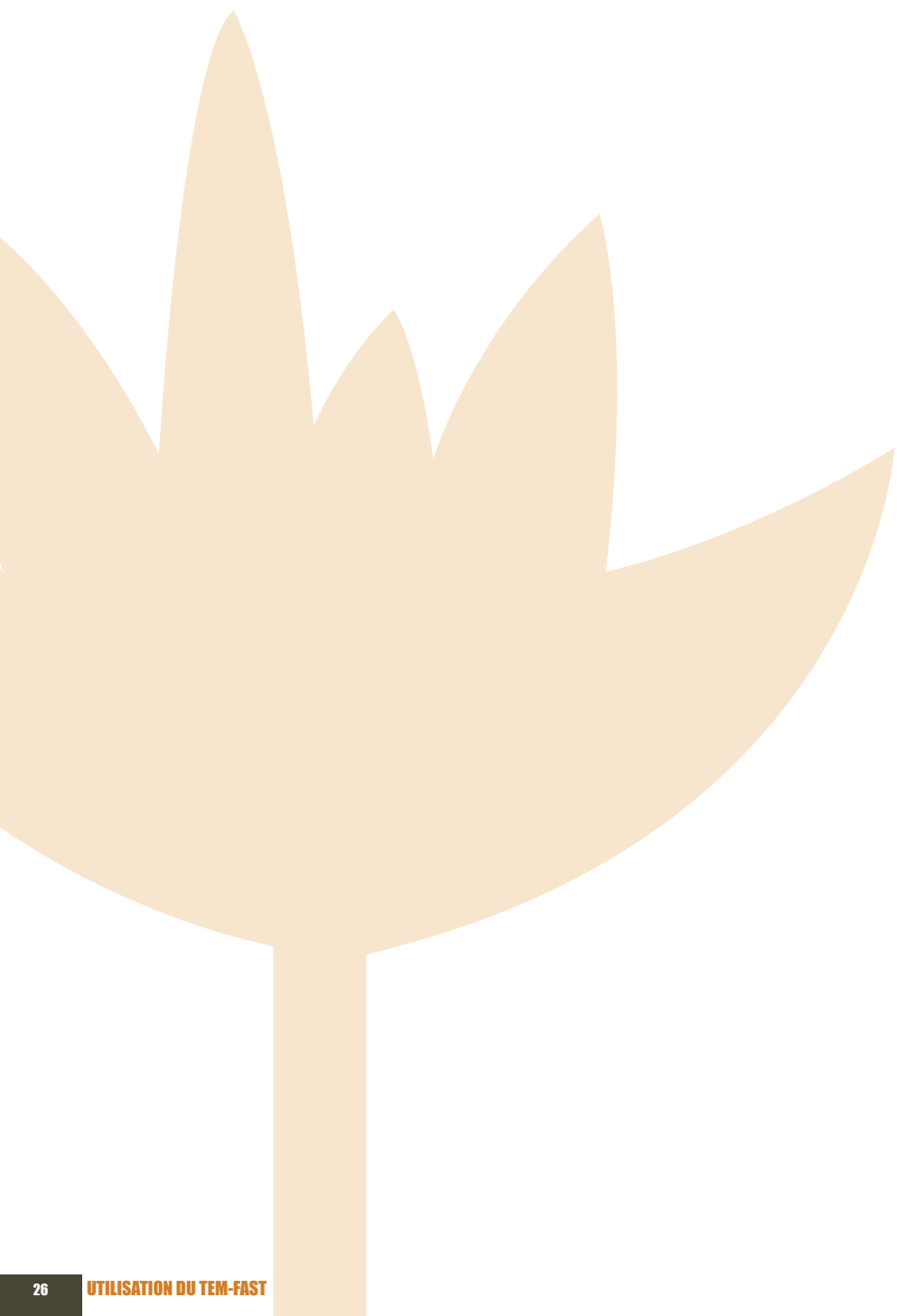
De manière générale, les résultats obtenus avec le TDEM étaient utilisés pour contraindre les résultats d'autres méthodes de prospection, ceci afin de limiter les équivalences.

RÉSUMÉ DE LA PREMIÈRE PARTIE

La méthode TDEM fait partie des méthodes EM, et permet de réaliser des sondages de résistivité électrique. Elle repose sur l'étude de la réponse du sol à une impulsion électromagnétique, réponse dépendant de la résistivité électrique des terrains à l'endroit du sondage. Basée sur un mode opératoire plus simple que la méthode de sondage électrique (VES, pour Vertical Electrical Sounding), elle permet de caractériser rapidement et précisément les formations conductrices.

Fonctionnant sans contact avec le sol, cette méthode est particulièrement adaptée pour l'étude de milieux où les sondages électriques s'avèrent limités, comme les milieux sableux ou rocheux. Cependant, elle s'avère peu efficace en présence de formations résistantes uniquement, et ne permet pas de caractériser les premiers mètres du sol.

Comme pour les autres méthodes géophysiques, l'interprétation des mesures TDEM est sujette des problèmes d'équivalence et de suppression, qui peuvent être réduits par l'utilisation de données provenant d'autres sources (logs géologiques de forages, diagraphies réalisées dans les forages, résultats d'autres méthodes géophysiques).



Chapitre 2

LE TEM-FAST





PRÉSENTATION DU TEM-FAST

INTRODUCTION

Le TEM-Fast est un appareil de type TDEM, développé par l'entreprise Applied Electro Magnetism Research (AEMR). Il s'agit d'un appareil autonome, de faible encombrement, permettant d'effectuer un sondage en une vingtaine de minutes (pour l'installation des bobines et la mesure proprement dite) et piloté par un PC de poche (*Figure 2.1*).

La miniaturisation et la rapidité du TEM-Fast sont autant d'atouts sur le terrain : l'appareil peut être utilisé pour faire du repérage (plusieurs sondages rapides en différents endroits sur un site) afin de localiser les zones à étudier plus précisément. Ensuite, ce même appareil peut être utilisé pour étudier ces zones pré-sélectionnées.

Cette miniaturisation en fait néanmoins un appareil moins puissant que d'autres TDEM : le courant injecté peut atteindre au maximum 4 ampères, alors que d'autres appareils vont jusqu'à 30 ampères. Ceci affecte le rapport signal sur bruit des mesures, et peut limiter la profondeur d'investigation et la qualité du signal enregistré (en cas de bruit EM important). Cependant, de manière générale, les sondages TEM-Fast couvrent les profondeurs habituelles des forages mis en place par ACF.



Figure 2.1 - TEM-Fast 48HPC (AEMR), avec le PC de poche et le câble permettant de construire le dispositif de mesure.

ACQUISITION D'UN SONDAGE TEM-FAST

Afin de réaliser un sondage TEM-Fast, l'opérateur doit renseigner cinq paramètres (Figure 2.2) :

- les dimensions du dispositif employé,
- la fréquence du courant électrique industriel (dans les lignes haute tension par exemple) à l'endroit du sondage,
- le temps de mesure,
- le nombre de répétition de la mesure (nombre de stack),
- l'intensité du courant à injecter.

Définir autant de paramètres peut sembler difficile au premier abord, mais devient très vite un automatisme. Dans la suite de cette section, chaque paramètre est brièvement décrit afin de mettre en évidence le lien entre ce paramètre du TEM-Fast et le principe de la méthode TDEM.

The image shows a software window titled "TEM-FAST 48 HPC". It contains several input fields and controls:

- Name: WELCOME 00
- Site: TEM-FAST 48HPC AEMR
- Mark: WELCOME: IPAQ 3850 OCT 2002
- TR: 25
- REC: 25
- Turn: 1
- Central box: Ampl=off, I = 1A, F=50Hz, HVP=3
- X: 0
- Y: 0
- Z: 0
- Stack: A slider bar from 0 to 20, currently at 5.
- Time: A slider bar from 1 to 9, currently at 5.
- Buttons: START, FUNCTION, QUIT

Figure 2.2 - Fenêtre de configuration du TEM-Fast. Le sondage paramétré comprend une bobine de 25 mètres de côté (TR et REC), une fréquence F de courant industriel de 50Hz, un temps de mesure de 5 (Time, sans unité), 5 répétitions (Stacks) et un courant d'injection I de 1A.



Type de dispositif, dimensions et fréquence

Le type de dispositif utilisé (coïncident, central ou avec offset) et ses dimensions sont indiqués à l'appareil en lui indiquant la taille de chaque bobine (paramètres TR et REC). L'appareil détecte lui même si deux bobines sont utilisées plutôt qu'une seule. Ainsi, si le dispositif coïncident est utilisé, il suffit d'indiquer les mêmes valeurs pour TR et REC. Le paramètre *Turn* permet d'utiliser des bobines multispire.

Concernant le bruit industriel, le TEM-Fast est équipé pour s'affranchir du bruit aux fréquences de 50 ou de 60 Hz. Ce n'est pas un filtre à proprement parler, mais en fonction de la fréquence choisie, les temps d'acquisition sont légèrement différents, et adaptés afin d'éviter ces fréquences parasites et leurs multiples.

Temps de mesure (T)

Par défaut, quelle que soit la taille du dispositif employé, la mesure du TEM-Fast commence 4 μ s après la coupure du courant dans la boucle d'émission. Le temps de fin de mesure est choisi par l'opérateur à l'aide d'un indice allant de 1 à 9, correspondant à un temps variant respectivement entre 64 μ s et 16 ms après la coupure (*Tableau 2.1*). L'utilisation d'un indice plutôt que d'une valeur de temps permet de simplifier la configuration du sondage.

En fonction de l'indice temporel sélectionné, la mesure fait intervenir un nombre variables de fenêtres temporelles qui permettent d'échantillonner le signal dans le temps (*Figure 3.3*). Un maximum de 48 fenêtres peut être utilisé, correspondant à des temps définis (et fixes) du cycle de mesure. Ces fenêtres sont initialement très courtes (1 μ s pour les premières) afin d'échantillonner le maximum du signal au début de la décroissance, puis s'allongent petit à petit (les dernières atteignent 2048 μ s).

Indice temporel	Nombre de fenêtres temporelles activées	Début et fin de mesure (en μ s)
1	16	4 - 64
2	20	4 - 128
3	24	4 - 256
4	28	4 - 512
5	32	4 - 1024
6	36	4 - 2048
7	40	4 - 4096
8	44	4 - 8192
9	48	4 - 16388

Tableau 2.1 - Indices temporels du TEM-Fast.

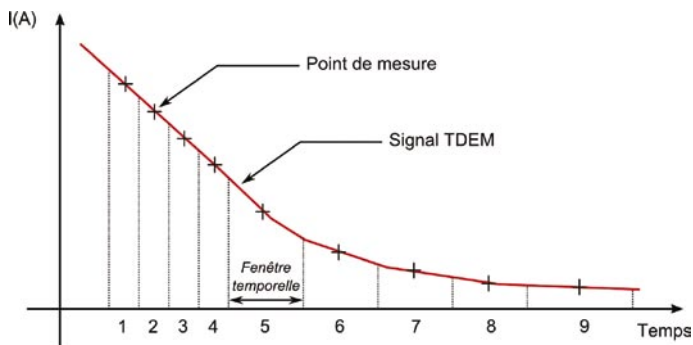


Figure 2.3 - Aperçu de l'échantillonnage du signal par quelques fenêtres temporelles (les numéros correspondent aux numéros des fenêtres temporelles).

Nombre de Stack (S)

Le nombre de Stack correspond au nombre de répétitions du cycle de mesure du TEM-Fast. Répéter une mesure permet d'améliorer le rapport signal sur bruit et donc la qualité de la mesure. Compris entre 1 et 20, chaque Stack correspond à 13 cycle de mesure de l'appareil (injection-coupure-mesure). Ainsi, pour un sondage réalisé avec un Stack de 20, la courbe obtenue sera en réalité une moyenne de $13 \times 20 = 260$ courbes. D'un point de vue pratique, le temps nécessaire pour réaliser un sondage est proportionnel au nombre de stacks choisi entre une trentaine de seconde pour un Stack de 1 contre 10 minutes environ pour un stack de 20.

Intensité du courant (I)

Ce paramètre correspond à l'intensité du courant injecté dans la bobine d'émission afin d'établir le champ primaire. Sur le TEM-Fast, ce courant peut prendre deux valeurs : 1 ou 4 ampères. Selon la résistance du câble employé pour la bobine (dépendant de sa longueur et de son diamètre), ces valeurs sont plus ou moins atteintes. Le temps de sondage est le même avec 1 et 4 ampères.

CONCLUSION

Au vu des conclusions de la section précédente, le TEM-Fast apparaît comme un appareil simple à utiliser, et d'un format pratique pour le terrain. Dans le cadre de cette étude, cet appareil fait l'objet d'une série de tests afin d'en définir les possibilités, les limites, ainsi qu'une méthodologie d'utilisation efficace.



UTILISATION DU TEM-FAST

Au vu des conclusions des sections précédentes, un sondage TDEM peut être réalisé de nombreuses façons différentes. Sans rentrer dans les détails de toutes ces façons possibles, l'objectif de cette section est de donner des clefs permettant de réaliser des mesures correctes avec le TEM-Fast. Pour cela, on tentera de répondre aux questions principales qui se posent au moment de la mesure. On peut citer de manière non-exhaustive :

- Quel dispositif utiliser ?
- Quelle taille pour ce dispositif ?
- Quelle puissance injecter pour le sondage ?
- Quel temps d'acquisition ?
- Combien de stacks ?
- Comment se situent mes mesures par rapport au bruit EM du site ?

Il n'existe pas de réponse unique à proprement parler pour l'ensemble de ces questions tout dépend de l'objectif de l'étude, et du site étudié. On peut se rendre compte que les vraies questions à se poser sont plutôt : “ Quelle est la cible de mon étude ? ” et “ comment être sûr de pouvoir la caractériser ? ”. Pour cela, la méthodologie proposée dans cette section se veut adaptative : les premiers sondages sont réalisés avec une configuration de base, puis, en fonction des résultats obtenus, cette configuration est adaptée afin de réaliser les meilleures mesures possibles.

PROPOSITION D'UN PROTOCOLE D'ACQUISITION

Le protocole proposé consiste à réaliser en premier lieu deux mesures sur le site étudié :

1. un sondage de résistivité électrique “classique”, afin d'avoir un aperçu des signaux mesurables sur le site étudié,
2. une mesure de bruit électromagnétique pour pouvoir situer ces signaux mesurables par rapport à un éventuel bruit EM.

Première mesure aperçu des signaux mesurables

Le but de cette mesure est d'avoir un premier aperçu de l'amplitude et de la forme des signaux sur le site étudié avec une configuration “standard”. Cette mesure est réalisée avec les paramètres présentés dans le tableau 2.2.

De manière générale, ces paramètres permettent d'avoir un rapport signal sur bruit correct, tout en limitant les contraintes d'installation. Le dispositif choisi est le dispositif coïncident (une seule bobine pour l'émission et la réception) de 25 mètres de côté, à la fois pour la rapidité d'installation, mais aussi pour l'importance de la surface d'émission/réception (625 m^2).

Paramètre	Configuration de base
Dispositif	Coïncident
Dimensions	25m de côté
Puissance	4A (maximal)
Temps d'acquisition	9 (maximal)
Nombre de Stacks	5

Tableau 2.2 - Paramètres de la configuration de base.

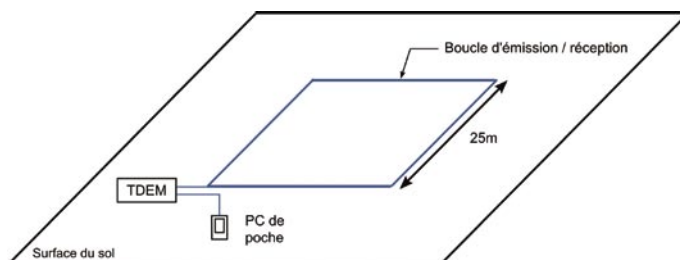


Figure 2.4 - Illustration de la configuration de base.

Afin de maximiser le rapport signal sur bruit, on utilise pour ce sondage un courant d'injection de 4A. Le choix du temps d'acquisition maximal ($T=9$) permet de mesurer le signal sur l'intégralité de l'intervalle de mesure de l'appareil afin de maximiser l'information. Enfin, l'utilisation de stacks permet de disposer d'une mesure de qualité correcte, le tout dans un temps très court (moins de trois minutes).

Deuxième mesure bruit électro-magnétique

Une fois cette mesure effectuée, il faut pouvoir la situer par rapport au niveau de bruit EM du site étudié. Cela permet de définir la limite à partir de laquelle les mesures ne seront plus interprétables (comme illustré figure 1.6).

A la base, une mesure de bruit EM est similaire un sondage à TDEM classique, mais sans émission de signal Tx. Lors d'une telle mesure, le signal Rx enregistré par l'appareil correspond à la somme de trois signaux : le bruit EM naturel du site, le bruit EM anthropique et le bruit produit par le fonctionnement de l'appareil. Sauf en cas de dysfonctionnement, le bruit de l'appareil est toujours le même, et son amplitude est inférieure au seuil de détection minimal de l'appareil. Ainsi, seuls le bruit naturel et le bruit anthropique sont réellement enregistrés lors de cette mesure.

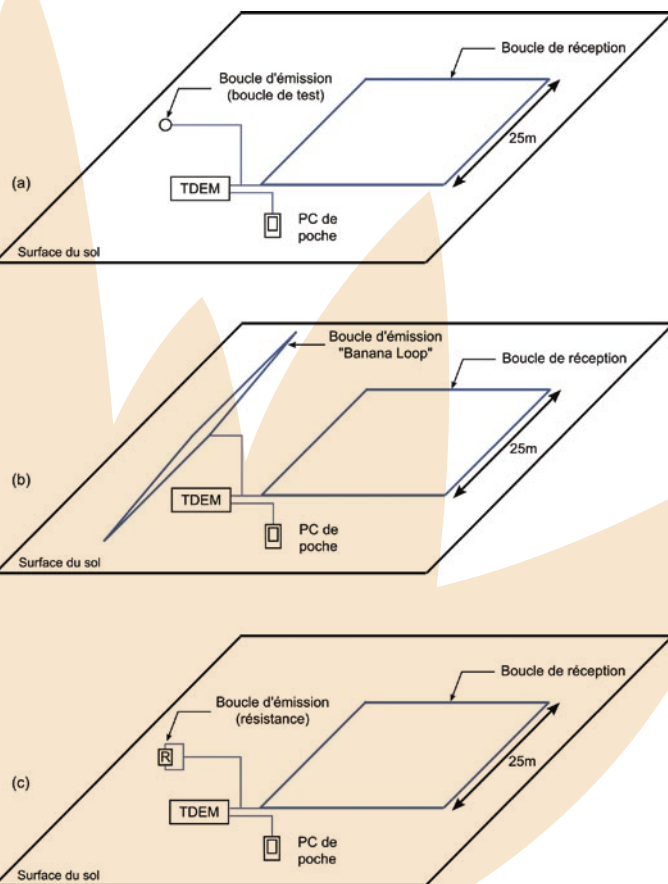


Figure 2.5 - Trois configurations possibles pour mesurer le bruit EM sur le site : avec la boucle ronde de test (a), avec une « banana loop » (b), et avec une résistance (c). Toutes reposent sur le même principe : limiter au maximum l'amplitude du signal Tx en diminuant la surface de la bobine d'émission.

Par défaut, le TEM-Fast n'est pas équipé d'une fonction de mesure du bruit : une séquence de mesure pour cet appareil comprend obligatoirement une émission (T_x) puis une réception (R_x). La méthode consiste à réaliser un sondage TDEM "classique", tout en réduisant le plus possible l'amplitude du signal Tx. Ceci peut être réalisé en réduisant au maximum la taille de la bobine d'émission. De cette façon, le signal T_x émis par la bobine d'émission est trop faible pour générer une induction mesurable dans le sol.

On réalise donc un sondage en dispositif central, soit avec deux bobines distinctes : la bobine de réception, correspondant à la bobine utilisée pour le premier sondage et la bobine d’émission, dont la surface doit être la plus faible possible. Le fait d’utiliser la même bobine de réception pour les deux mesures peut être facilement compris : (i) cette bobine est déjà en place sur le terrain, et (ii) ces deux mesures ne pourront être comparées que si le dispositif de réception impliqué est le même pour les deux.

Réduire la surface de la bobine d’émission peut être fait de différentes manières (Figure 2.5) :

- en utilisant comme bobine d’émission la petite bobine de test livrée avec le TEM-Fast, posée le plus loin possible de la bobine de réception (sa surface faible 1m²) ne provoquant pas une induction suffisamment importante pour être mesurée (Figure 2.5a) ;
- en utilisant une bobine d’émission classique, mais allongée de façon à annuler sa surface (on parle alors de “Banana Loop” Figure 2.5b) ;
- en utilisant à la place de la bobine d’émission un conducteur ohmique (ou résistance) dont la résistance est proche de celle des câbles utilisés habituellement (entre 4 et 10 Ohm, Figure 2.5c).

Parmi ces trois possibilités, la première (avec la boucle ronde de test) s’est révélée la plus simple à utiliser. On prendra soin toutefois d’éloigner la boucle ronde de test de la bobine de réception de toute source métallique (comme un véhicule) et de la disposer perpendiculairement au sol. Les paramètres de la mesure sont présentés dans le tableau 2.3.

Paramètre	Mesure de bruit
Dispositif	Central (2 bobines)
Dimensions	TR=25 et REC=25m
Puissance	1A
Temps d’acquisition	9 (maximal)
Nombre de Stacks	1

Tableau 2.3 - Paramètres de la mesure de bruit. Il est nécessaire d’indiquer à l’appareil que la bobine d’émission est aussi grande que celle de réception. Il s’agit d’une sécurité du TEMFast, qui refuse de mesurer lorsque la bobine de réception est plus grande que celle d’émission.

Pour résumer, la mesure de bruit consiste à “faire croire” à l’appareil qu’il injecte du courant dans une bobine d’émission au moins aussi grande que la bobine de réception. Le paramètre le plus important de cette mesure est le nombre de stacks : il doit obligatoirement être minimal (S=1). Si ce n’est pas le cas, la mesure sera une moyenne du bruit, donc une sous-estimation de son amplitude réelle. La figure 2.6 illustre un exemple de résultats à l’issue de ces deux mesures.

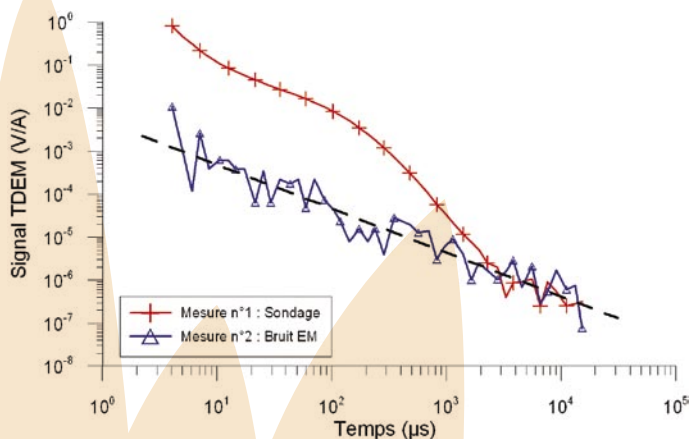


Figure 2.6 - Mesure du signal et du bruit EM sur un site côtier au Sri Lanka. Le niveau de signal fort devant le bruit (représenté par le trait noir en pointillés), garantissant ainsi des mesures plus facilement exploitables. On peut déduire de ce genre de cas que le dispositif utilisé est bien adapté au site étudié : le signal a une amplitude forte, et reste mesurable longtemps.

Ces deux mesures peuvent être réalisées en un temps très court, et permettent de décider de la suite des opérations : continuer avec la même configuration si les mesures sont satisfaisantes, ou au contraire changer quelques paramètres afin d'améliorer la qualité des mesures. La solution idéale consiste à consacrer une partie de la première journée de terrain pour répéter ces deux mesures avec différentes tailles de dispositif, courants d'injection et stacks. L'interprétation de ces test permet ensuite de définir quel sont les paramètres optimum pour le site étudié.

Types de bruit

Il peut paraître surprenant que le bruit mesuré sur la figure 2.6 décroisse avec le temps. Pour comprendre, il faut revenir au mode de fonctionnement du TEM-Fast cet appareil possède 48 fenêtres temporelles, qui correspondent aux 48 points d'échantillonnage du signal. Lors d'une mesure, chaque fenêtre enregistre une valeur du courant décroissant dans la bobine de réception. Chacune de ces fenêtre est bornée : la valeur mesurée ne peut excéder une certaine valeur maximale sous peine de saturation de l'appareil, et une valeur minimale correspondant au seuil de détection minimal de l'appareil. Toute mesure s'inscrit donc dans cet intervalle de mesure (Figure 2.7).

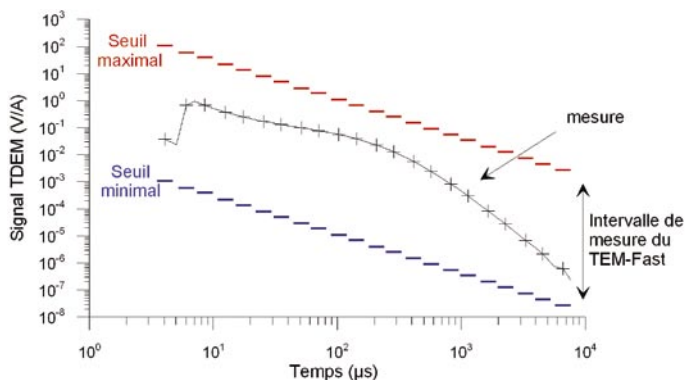


Figure 2.7 - Illustration du principe de l'intervalle de fonctionnement du TEM-Fast. Pour être mesuré par une fenêtre de l'appareil, la valeur du signal doit être comprise entre les deux seuils de la fenêtre en question, représentés par les délimiteurs rouge et bleu sur le schéma. Ce schéma n'est qu'indicatif, les valeurs des seuils dépendent des paramètres du sondage et ne doivent pas être considérées comme exactes.

Cet intervalle de mesure peut être utile lors de la mesure du bruit. En effet, si lors de la mesure du bruit telle que présentée dans la section précédente, le signal mesuré décroît avec le temps en restant très proche des valeurs minimales de détection de l'appareil (comme illustré Figure 2.8), cela signifie que le bruit EM du site est trop faible pour être mesuré, et que le signal mesuré correspond au bruit de fonctionnement de l'appareil.

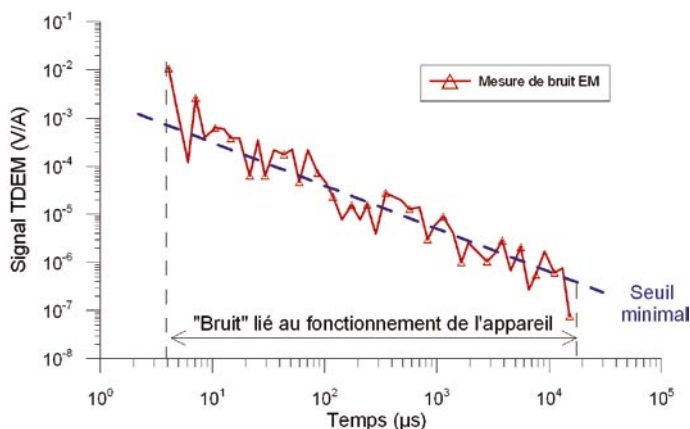


Figure 2.8 - Mesure du bruit : le signal enregistré s'aligne sur le seuil minimal de détection de l'appareil : il correspond au bruit instrumental.



En revanche, dans le cas où le signal mesuré se distingue nettement du seuil minimal (Figure 2.9), on peut considérer qu'on a affaire à un bruit EM qui risque de perturber les mesures.

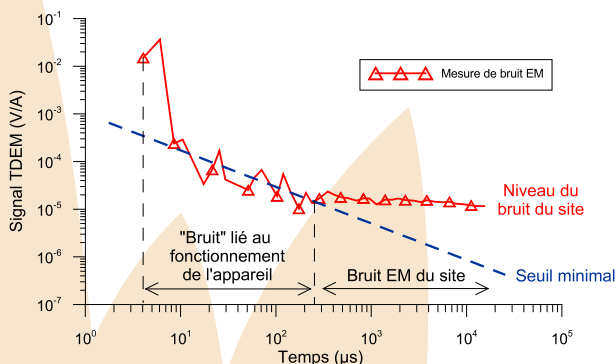


Figure 2.9 - Mesure du bruit : le signal enregistré se distingue du bruit instrumental au delà de 260 μs et se maintient. Il s'agit d'un bruit anthropique, ou d'un signal parasite dû à une induction dans un matériau conducteur.

Intervalle de dispersion

Une façon relativement simple de vérifier la qualité des données est de contrôler la dispersion de la mesure (Figure 2.10). Chaque point de la courbe de sondage correspond à une moyenne de plusieurs mesures (ou stacks), qui se situe dans un intervalle délimité par les valeurs maximales et minimales mesurées lors de ces stacks. Cet intervalle est l'intervalle de dispersion de la mesure, délimité par les barres de dispersion.

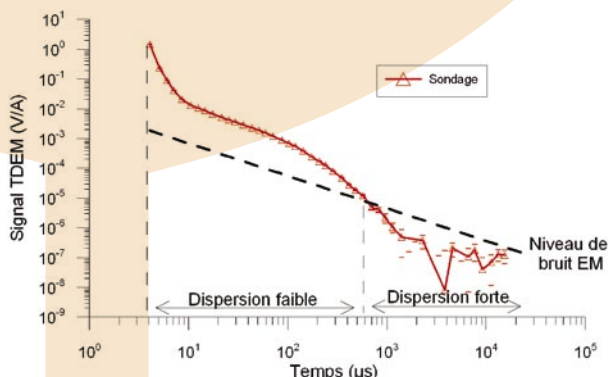


Figure 2.10 - Intervalle de dispersion de la mesure. On peut remarquer que les barres de dispersion sont très resserrées quand le niveau de signal est supérieur à celui du bruit, et s'ouvrent dès que le signal atteint le bruit.

Lors d'une mesure, si un point de la courbe présente un intervalle de dispersion étroit (i.e. des barres proches), cela signifie que lors des différents stacks, la valeur mesurée est restée sensiblement la même. En revanche, un intervalle de dispersion large signifie que la valeur a varié pendant les stacks, et donc que la mesure n'a pas été stable. De manière générale, on cherche toujours à minimiser la dispersion.

QUE FAIRE SI LE NIVEAU DE SIGNAL EST FAIBLE ?

Il peut arriver que le niveau de signal Rx mesuré soit faible devant le bruit. Ceci peut être dû à plusieurs phénomènes :

- soit les terrains sondés sont trop résistants pour générer un signal mesurable ;
- soit le site étudié présente un niveau de bruit EM élevé par rapport à l'amplitude du signal mesurable ;
- soit les terrains sont résistants et le niveau de bruit est élevé.

Pour cela, trois solutions possibles :

- augmenter l'intensité du courant injecté,
- augmenter la surface du dispositif d'émission,
- augmenter le nombre de stacks.

Dans tous les cas, essayer d'améliorer la mesure revient à améliorer le rapport signal sur bruit. En pratique, la solution la plus simple consiste à commencer par augmenter l'intensité du courant injecté. Si cela n'apporte rien, ou que le courant utilisé est déjà le courant maximal délivré par l'appareil, on peut augmenter la surface du dispositif d'émission, puis le nombre de stacks.

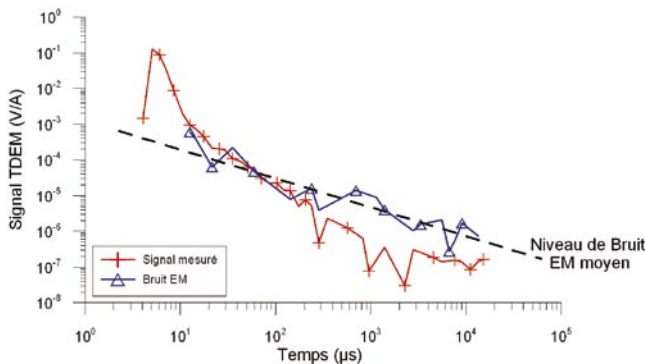


Figure 2.11 - Exemple de niveau de signal faible : le signal (courbe rouge) se noie très rapidement dans le bruit (courbe bleue). Ce genre de mesure est très difficilement exploitable.



Cependant, en dispositif coïncident, l'augmentation de la taille du dispositif d'émission implique une augmentation de la taille du dispositif de réception. Or, théoriquement, plus le dispositif de réception est important, plus le niveau de bruit mesuré est important. Cependant, les différents tests réalisés ont montré une augmentation du rapport signal sur bruit lors de l'augmentation de la taille de la bobine d'émission/réception en dispositif coïncident.

La stratégie la plus simple envisagée consiste à refaire le même sondage, mais avec une bobine de 50m de côté (tout en restant en dispositif coïncident) et en augmentant légèrement le nombre de stacks.

QUE FAIRE SI LE SIGNAL PRÉSENTE DES DISTORSIONS ?

Avant d'atteindre le niveau de bruit, le signal mesuré lors d'un sondage TDEM décroît généralement de manière monotone. Il peut cependant arriver dans certains cas que ce signal présente des distorsions, qui traduisent généralement la présence d'un effet perturbateur de la mesure. Celles-ci peuvent se présenter sous la forme d'oscillations, de valeurs négatives, ou de chute abrupte du niveau de signal. Sans trop rentrer dans les détails de chaque effet, l'intérêt de cette section est de permettre à l'utilisateur d'identifier l'origine de la perturbation, et de prendre les bonnes décisions pour s'en affranchir.

Le principe de ces perturbations est toujours le même : elles produisent un signal qui vient parasiter le signal mesuré, ce qui peut gêner, voire fausser l'interprétation. La distinction se fait sur l'origine du signal parasite. On peut citer principalement deux origines de phénomènes naturelle ou anthropique. Parmi les phénomènes naturels, on distingue deux phénomènes principaux : la viscosité magnétique (ou SPM pour Super ParaMagnétisme) et la polarisation provoquée (ou IP pour Induced Polarisation).

Viscosité magnétique

Le phénomène de viscosité magnétique est dû à la présence de matériaux magnétiques dans les sols ou dans les environs de la bobine. Il se manifeste principalement par l'apparition d'un terrain profond conducteur fictif sur les courbes de sondage. On peut suspecter un cas de SPM dans le cas où :

- les derniers points de la courbe $t \cdot E(t)$ (temps multiplié par l'amplitude du signal) s'alignent sur une valeur constante;
- la fin de la courbe de résistivité en fonction du temps décroît brusquement vers des valeurs très faibles (et parfois peu réalistes);
- les courbes de résistivité en fonction du temps pour des bobines de tailles différentes ne convergent pas vers une même valeur pour les temps longs, mais présentent les mêmes diminutions parallèles.

Non détecté, ce phénomène peut provoquer des erreurs d'interprétation importantes un terrain conducteur profond fictif est suggéré. Dans le cas où l'on suspecte un tel effet, le mieux est de renouveler le sondage, et de vérifier si le phénomène se répète :

- en augmentant la taille du dispositif coïncident,
- en utilisant un dispositif central (deux bobines),
- en soulevant la bobine de quelques dizaines de cm par rapport au niveau du sol (le phénomène se produit généralement dans le sol au voisinage immédiat de la bobine).

Polarisation provoquée

Le phénomène de polarisation provoquée (PP, ou IP pour polarisation induite) est dû à la présence dans le sol de matériaux polarisables comme les argiles ou les sulfures. Il se manifeste notamment par l'obtention de courbes avec des formes compliquées (le "chapeau chinois" ou par l'apparition de points avec des valeurs négatives).

Comme pour le SPM, la solution dans ce cas consiste à réaliser un nouveau sondage en changeant un peu la configuration et de vérifier si cet effet se produit à nouveau :

- en augmentant la taille du dispositif utilisé,
- en soulevant la bobine de quelques dizaines de cm par rapport au sol.

Induction parasite dans les matériaux conducteurs

Lors d'un sondage TDEM, tout élément conducteur situé à proximité de la bobine est susceptible de générer une induction. Parmi ces conducteurs, on peut citer principalement les bâtiments métalliques (granges, abris en tôles), les clôtures fermées ou encore les véhicules.

Dans le cas où un tel effet est suspecté, la solution pour s'en assurer consiste à :

- vérifier les barres de dispersion du signal : une mesure normale devient de plus en plus bruitée avec le temps, et présente donc des intervalles de dispersion de plus en plus larges. En présence d'une induction parasite de ce genre, le signal parasite est généralement très fort, et la mesure présente très peu (voire pas) de dispersion.
- comparer la mesure avec d'autres sondages réalisés à proximité (Figure 2.12) : si une très grande différence est remarquée, on peut se questionner sur la validité d'une telle mesure.

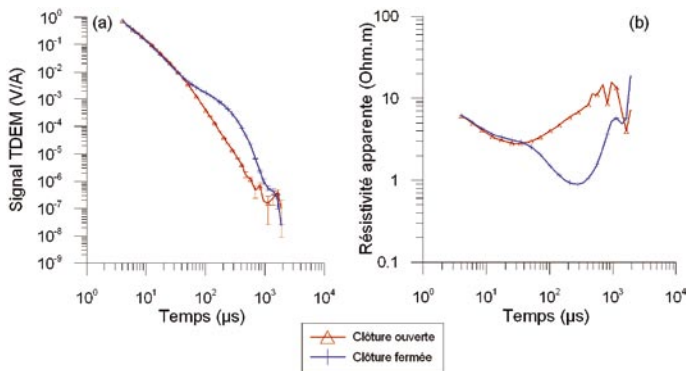


Figure 2.12 - Exemple d'induction parasite : les deux sondages sont réalisés au même endroit, sur un terrain entouré d'une clôture. Lorsque cette clôture est fermée, l'induction déforme le signal mesuré (a) et fait apparaître un terrain très conducteur facilement repérable sur la courbe de résistivité apparente (b).



Dans ces cas de figure, la solution la plus simple est de s'éloigner de la source d'induction parasite. On considère empiriquement qu'en s'éloignant d'une distance égale à un côté de la bobine, on peut s'affranchir raisonnablement de l'effet de ces structures parasites.

Il peut arriver qu'aucune des solutions proposées ne s'avère efficace, et que la mesure soit difficilement exploitable. Ceci peut arriver lorsque la solution utilisée n'est pas adaptée à la perturbation, ou lorsque cette perturbation est réellement dominante sur le signal. Dans ce cas, une autre méthode de prospection est à envisager...

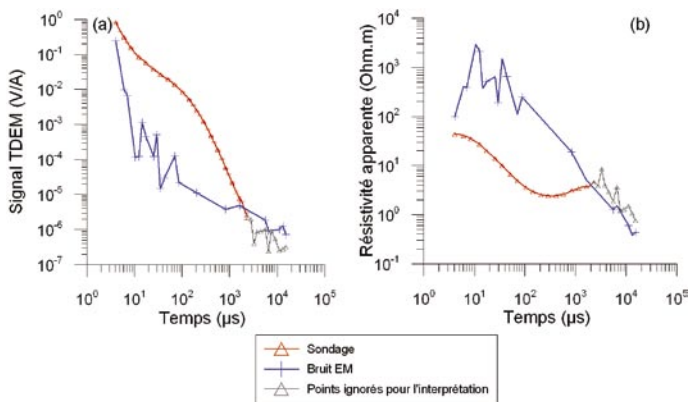
INTERPRÉTATION DES DONNÉES TDEM

De la même manière que pour la section précédente, le but de cette section n'est pas de faire du lecteur un spécialiste de l'interprétation des mesures TDEM. Elle consiste plutôt à indiquer les étapes à suivre et quelques précautions à prendre afin de modéliser correctement les mesures effectuées sur le terrain. Le détail du transfert de fichier du PC de poche à l'ordinateur, leur décryptage pour le logiciel d'interprétation et l'utilisation du logiciel TEM-Res sont décrits dans le manuel de l'utilisateur du TEM-Fast, et ne seront pas abordés dans ce rapport.

PRÉPARATION DES MESURES

Comme illustré dans la section précédente, chaque mesure contient une part non négligeable de bruit, correspondant à de l'information inutile pour l'interprétation. Une fois la mesure effectuée et sa qualité assurée, la première étape de l'interprétation consiste à séparer l'information utile et le bruit.

Pour cela, on peut se baser sur la mesure du bruit EM du site ainsi que sur les barres de dispersion, afin de retirer les points situés sous le niveau de bruit (les points présentant une dispersion importante) ou les points situés dans une partie perturbée du signal. Un exemple de sélection est présenté Figure 2.13.





INTERPRÉTATION

L'interprétation consiste à proposer un premier modèle de répartition de la résistivité électrique en fonction de la profondeur, basé sur des connaissances préalables du terrain, ou de son contexte géologique général. Ce modèle peut ensuite être affiné de manière automatique lors de l'inversion. Une des difficultés de l'interprétation est la prise en compte de l'épaisseur aveugle : il faut définir quel est le premier terrain caractérisé lors de la mesure. La solution idéale pour cela est de disposer de plusieurs sondages, réalisés avec des dimensions différentes sur un même terrain, permettant de couvrir différentes gammes de profondeurs minimales et maximales.

- On commence par interpréter les mesures réalisées avec les petits dispositifs, qui présentent une épaisseur aveugle plus faible, et donc une information sur les premiers terrains plus complète ;
- on interprète ensuite les sondages réalisés avec de grands dispositifs, à partir du modèle défini précédemment, et en fixant les paramètres (résistivité et épaisseur) du premier terrain ;
- on reprend le premier modèle (pour les petits dispositifs) dans lequel on injecte les paramètres du dernier terrain défini par l'interprétation du grand dispositif.

L'utilisation de ces différentes tailles de dispositif permet donc de contraindre les interprétations et de mieux définir la géométrie du site (en particulier celle du premier et du dernier terrain).

RÉSUMÉ

Le TEM-Fast est un appareil de faible encombrement, disposant d’une interface simple à prendre en main, et permettant d’effectuer des sondages rapidement. Lors de son utilisation sur un terrain inconnu, la méthode la plus sûre pour maximiser la qualité des données consiste à effectuer deux mesures préliminaires avec les paramètres présentés dans le tableau 2.4 :

- 1. un sondage de résistivité électrique “classique”, afin d’avoir un aperçu des signaux mesurables sur le site étudié,
- 2. une mesure de bruit électromagnétique pour pouvoir situer ces signaux mesurables par rapport à un éventuel bruit EM.

Paramètre	Signaux mesurables	Bruit EM
Dspositif	Coïncident	Central 2 bobines
Dimensions	TR=REC=25m	TR=25 et REC=25m
Puissance	4A	1A
Temps d’acquisition	9 (maximal)	9 (maximal)
Nombre de Stacks	5	1

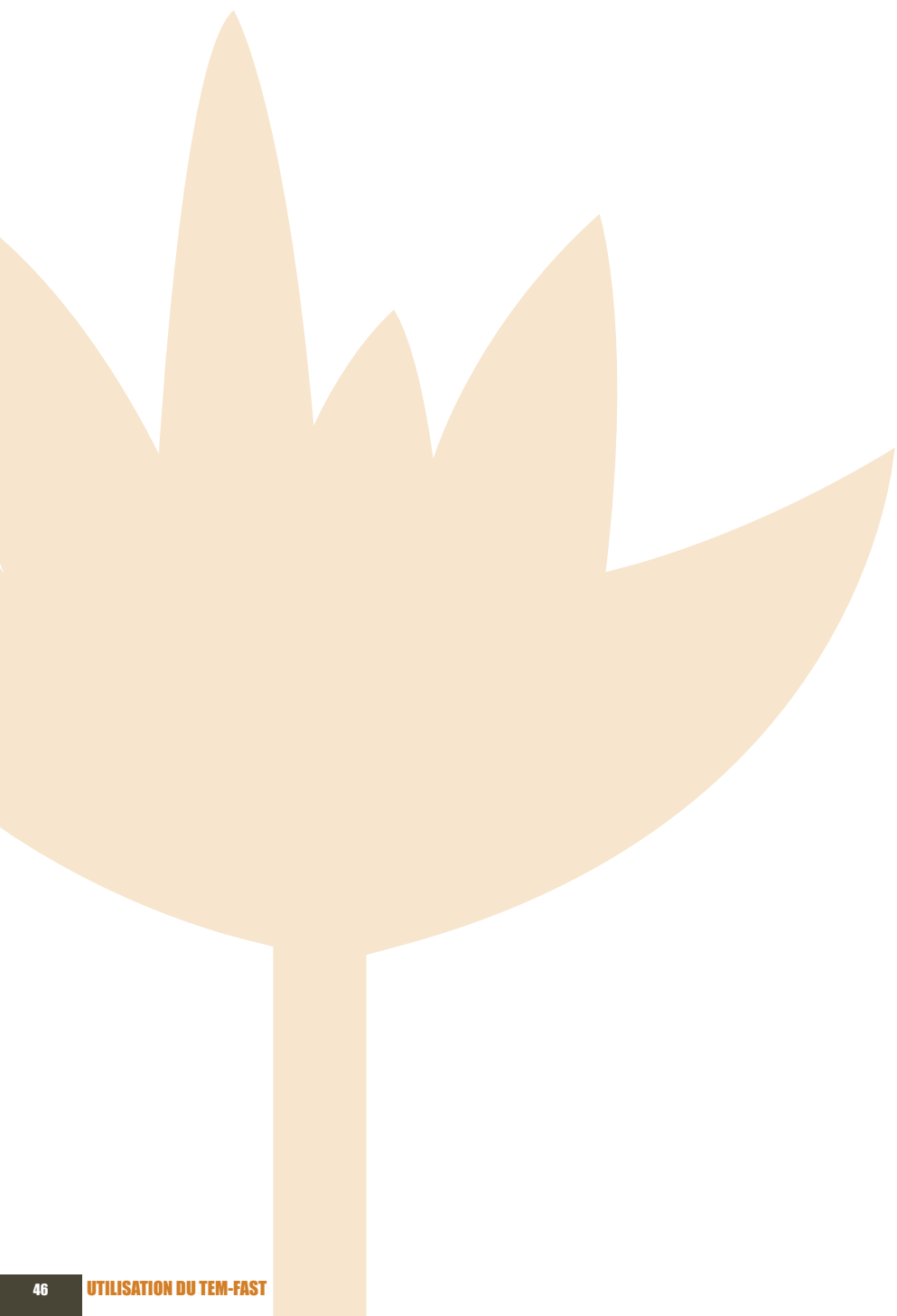
Tableau 2.4 - Résumé des paramètres des premières mesures.

Ces deux mesures peuvent ensuite être répétées avec différentes tailles de bobines, courants d’injection et nombre de stack, afin de définir le jeu de paramètres optimum du site. Le dispositif coïncident peut être utilisé par défaut. Dans le cas où l’on suspecte un effet perturbateur, le dispositif central peut être utilisé pour comparer les résultats.

Tout ceci permet :

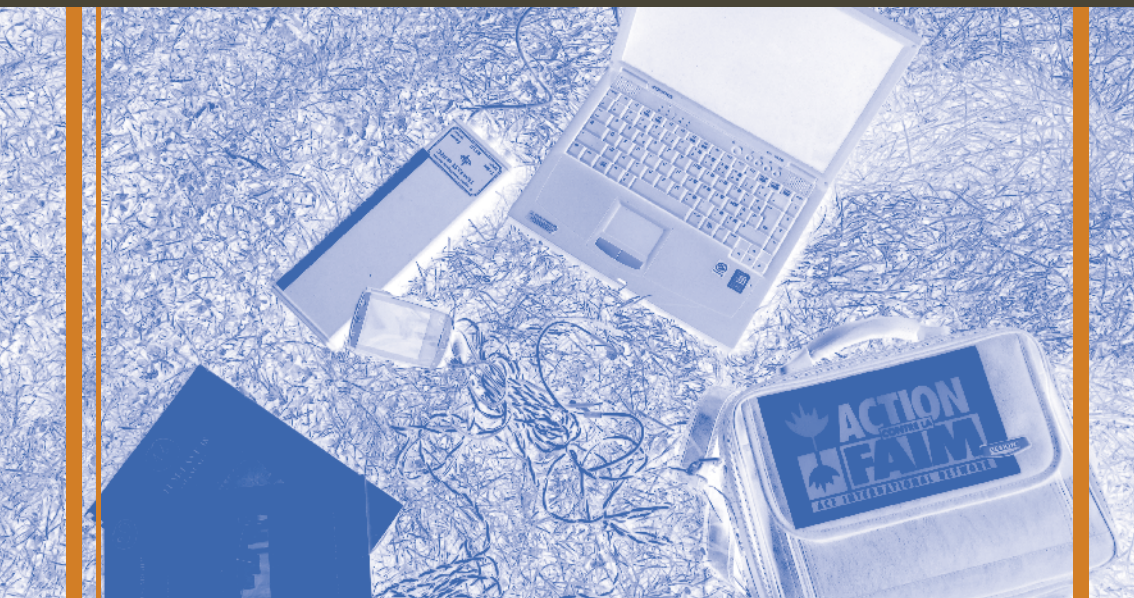
- d’élargir les gammes des profondeurs minimales et maximales d’investigation,
- de confirmer ou d’infirmer la présence d’effets perturbateurs, qui s’exprimeront plus avec certaines configurations que d’autres (en fonction du type de dispositif et de sa taille)
- de s’affranchir d’éventuelles hétérogénéités 2D de résistivité,
- de contraindre les interprétations des petits dispositifs avec celles des grands, et vice versa.

L’interprétation des mesures TDEM passe avant tout par une étape de séparation de l’information utile et du bruit. L’idéal est de disposer de plusieurs mesures effectuées avec des bobines de tailles différentes afin de maximiser l’information sur les premiers et derniers terrains.



Chapitre 3

EXEMPLE D'APPLICATION





EXEMPLE D'APPLICATION EN MILIEU CÔTIER

PRÉSENTATION DU CONTEXTE

Une prospection TDEM été réalisée au Sri Lanka, sur le site du village de Navalady, à deux kilomètres au Nord-Est de la ville de Batticaloa (*Figure 3.1*). Le village de Navalady (7.741171°N , $81.704573^{\circ}\text{E}$) est un village de pêcheurs, situé sur une barre sableuse de 500 mètres de large, entre l'océan et le lagon.

Situé aux premières lignes lors de l'arrivée du tsunami du 26 décembre 2004, ce village été entièrement détruit. Par la suite, sa reconstruction a été limitée par l'instauration d'une zone inconstructible sur les deux cent premiers mètres de côte. La majorité des habitants ont préféré changer de lieu d'habitation pour des raisons pratiques, ou par peur de retourner sur place. Le site se présente comme un village dévasté et quasiment désert (*Figure 3.2*), avec de nombreuses maisons détruites, ainsi que quelques maisons habitées en bord de lagon.



Figure 3.1 - Localisation du site de Navalady

A Navalady, l'alimentation en eau douce est réalisée à l'aide de puits captant un aquifère peu profond (2 mètres). Afin de se préparer à un retour massif de déplacés dans ce village et une exploitation massive de cet aquifère, Action Contre la Faim a décidé de cartographier l'extension de cet aquifère, et de quantifier les volumes d'eau exploitables. S'agissant d'un milieu sableux, avec des intrusions salines (reportées par les villageois dans certains de leurs puits), l'utilisation du TDEM était tout à fait justifiée dans ce cas.



© Johan Hoareau

Figure 3.2 - Aperçu du site de Navalady

CHOIX DES PARAMÈTRES DE SONDAGE

Les paramètres des sondages sont choisis en se basant en premier lieu sur le contexte du site, puis sur le résultats de tests. La cible est un aquifère peu profond, dont le toit ne pourra être vu précisément qu'avec des bobines de faibles dimensions. De plus, la présence d'intrusions salines garantit des signaux forts, donc une possibilité de travailler avec un courant d'injection faible. Suivant le protocole présenté dans la section 4, les deux premiers sondages (signal mesurable et bruit EM) sont présentés Figure 3.3.

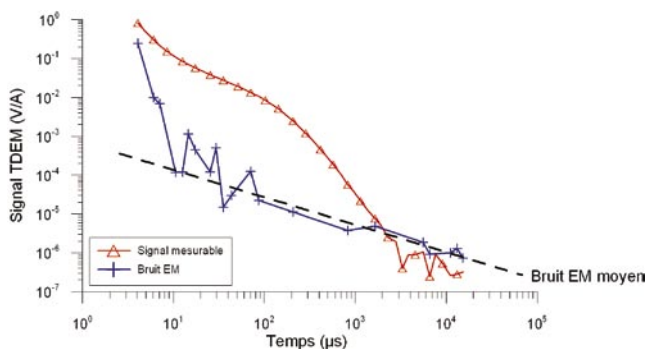


Figure 3.3 - Premiers tests effectués sur le site de Navalady.

Le niveau de signal est fort et le bruit EM réduit au bruit instrumental.



Les résultats de ces deux premiers sondages permettent d'observer que le niveau de signal est fort, et le bruit inexistant dans notre intervalle de mesure. Ce même test a été répété avec des bobines plus petites (5m, 12.5m) et plus grandes (50m, 100m) et avec un courant d'injection de 4A. Si les bobines plus petites se sont révélées insuffisantes pour mesurer un signal correct, l'information gagnée avec les bobines plus grandes n'était pas suffisante pour justifier leur utilisation systématique sur ce site. L'utilisation d'un courant de 4A n'étant pas non plus justifiée, la configuration présentée (Tableau 3.1) s'est donc révélée être le meilleur compromis.

Paramètre	Mesures à Navalady
Dsipoitif	Coïncident
Dimensions	TR=REC=25m
Puissance	1A
Temps d'acquisition	9 (maximal)
Nombre de Stacks	10

Tableau 3.1 - Paramètres retenus pour les mesures à Navalady.

Quarante deux sondages TDEM ont été effectués sur ce site entre l'océan et le lagon afin de dresser un profil de résistivité électrique. Afin de maximiser la résolution, ce profil a été réalisé avec des bobines semi-chevauchantes (Figure 3.4).

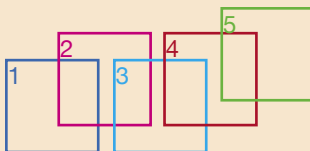


Figure 3.4 - Bobines semi-chevauchantes

RÉSULTATS

La localisation des sondages est présentée Figure 3.5. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 3.6 et 3.7.

L'utilisation du TEM-Fast pour établir un profil de résistivité électrique a permis de mettre en évidence une intrusion saline importante, située à dix mètres de profondeur. Ceci a également permis de délimiter la lentille d'eau douce, cible de cette étude. Une zone de mélange (Eau saumâtre) a également pu être mise en évidence de façon très claire. Ces résultats ont pu être confirmées à l'aide de mesures de conductivité dans les piézomètres, qui ont permis de retrouver les différentes eaux (salée, saumâtre, douce) aux endroits et profondeurs annoncées.

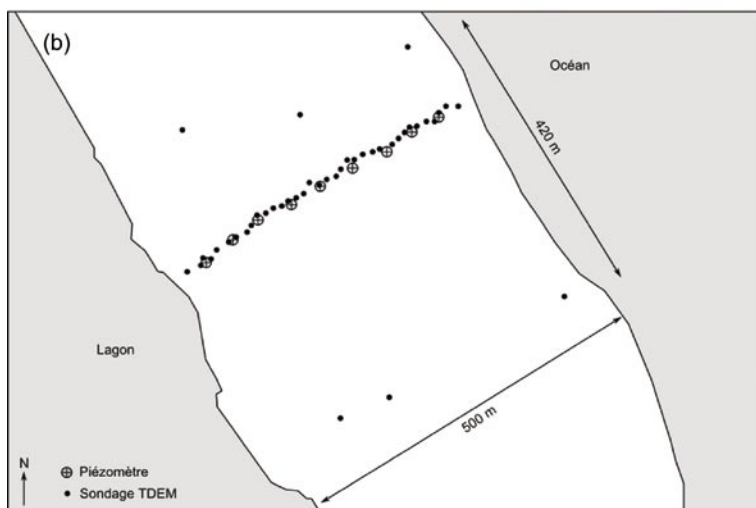


Figure 3.5 - En (a) : vue aérienne du village de Navalady (source : Google Earth) et en (b) : représentation schématique du site et des points importants. Les piézomètres sont disposés tout les 50 mètres entre l'océan et le lagon. Les sondages TDEM ont été alignés sur ces piézomètres.

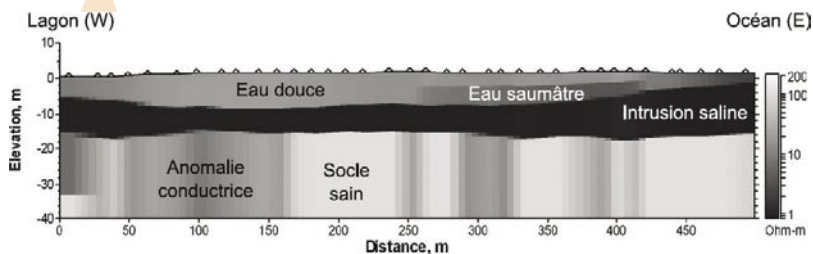


Figure 3.6 - Profil 2D de résistivité électrique. Ce profil met en évidence une intrusion saline très marquée (en noir) située sous une lentille d'eau douce (gris clair), et au dessus d'un socle sain. Quelques anomalies conductrices apparaissent dans ce socle sain, pouvant correspondre à des fractures. Ces mesures ont pu être confirmées par des mesures de conductivité dans les piézomètres situés le long du profil.



Figure 3.7 - Première estimation de l'extension de la lentille d'eau douce à Navalady au bout de deux jours de prospection TDEM.

Exemple d'application en zone de socle

GÉNÉRALITÉS

Les “aquifères de socle” sont constitués de roches cristallines, d’origine plutonique (granites) et métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes). De manière générale, ces roches présentent des résistivités fortes et des teneurs en eau faibles, ce qui limite grandement l’efficacité du TDEM. En effet, en l’absence de contraste de résistivité, le signal mesurable est faible, et les données acquises dans ces zones présentent généralement difficilement exploitables.

La partie superficielle de ces aquifères de socle est souvent constituée d’une couverture altérée (altérites) qui permet de stocker les eaux souterraines de façon significative (Figure 3.8). Cette zone présente généralement des teneurs en eau et en argile plus fortes que la zone altérée et le socle (fracturé et sain) qu’elle recouvre. Ces teneurs fortes lui confèrent une résistivité électrique plus faible.

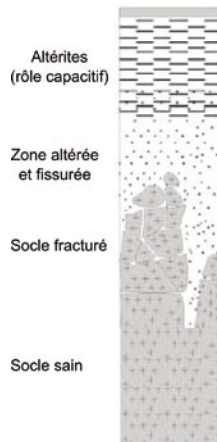


Figure 3.8 - Structure générale des aquifères de socle
modifié d’après Vouillamoz et al. (2005)

Ce contraste de résistivité rend cette zone d’altérites repérable lors d’un sondage TDEM : le signal détecte un terrain conducteur, puis les formations résistantes, dans lesquelles il finit par se “noyer” (dans le cas le plus courant où il n’y pas de terrain conducteur profond sous le socle). Sachant que dans ces zones, les cibles de prospections hydrogéologiques sont les fractures du socle (qui permettent d’acheminer l’eau vers les ouvrages de captage) et les zones altérées bien développées (qui permettent de stocker l’eau), le TDEM peut être utilisé pour repérer ces zones d’altérites.



MODE OPÉRATOIRE

Dans ces zones où les signaux sont faibles, il est nécessaire d'adopter une configuration qui puisse maximiser le rapport signal sur bruit :

- une (ou des) bobine(s) de taille importante,
- un courant d'injection fort,
- un temps de mesure maximal,
- un grand nombre de stack.

Cependant, l'emploi d'un grand dispositif peut s'avérer inadapté dans le cas où l'épaisseur d'altérite est faible, voire inexistante (dans le cas où cette couche d'altérite a été décapée). Il est encore une fois recommandé d'effectuer au même endroit plusieurs sondages avec différentes tailles de dispositif afin de maximiser l'information.

EXEMPLES DE RÉSULTATS OBTENUS

La figure 3.9 présente les résultats de trois sondages réalisés en zone de socle en Inde. Les trois sondages présentent des amplitudes de signal faibles, et se noient rapidement dans le bruit EM. Cependant, il est possible de tirer quelques conclusions.

- le sondage n°1 présente un niveau de signal fort comparé aux signaux n°2 et n°3 ;
- en termes de résistivité apparente, ceci correspond à une résistivité apparente plus faible au droit du sondage n°1, donc des formations en présence plus conductrices.

Le sondage n°1 a été réalisé en aval d'un bassin versant (dans une zone de dépôt importante), le n°2 dans une zone intermédiaire et le n°3 sur le socle affleurant. Ceci est cohérent avec les mesures : le signal le plus fort (n°1) correspond à une épaisseur d'altérites plus importante, alors que le signal le plus faible (n°3) correspond à une zone sans altérite.

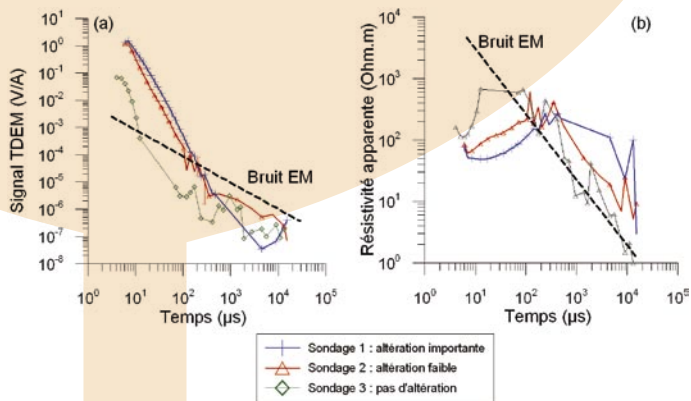


Figure 3.9 - Sondages TDEM en zone de socle en Inde. Le sondage n°1 est réalisé à l'exutoire d'un bassin versant, donc une zone de dépôt où l'épaisseur des altérites est importante. Le sondage n°2 est réalisé sur le versant, avec une épaisseur plus faible, et le sondage n°3 au sommet du bassin, sur le socle affleurant (sans altérites).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Comparée aux méthodes plus classiques de sondages électriques, la méthode TDEM présente de nombreux atouts. Elle se distingue notamment par sa rapidité de mesure, sa très bonne caractérisation des milieux conducteurs et son mode opératoire plus simple, qui permettent son utilisation dans des contextes où les sondages électriques peuvent être très difficiles à réaliser. Le point faible de cette méthode réside dans son efficacité limitée dans les zones très résistantes, et sa faible résolution sur les premiers mètres du sol. Ceci peut s'avérer particulièrement gênant dans le cas où la cible à étudier est un aquifère superficiel peu épais en zone de socle par exemple.

Parmi les appareils TDEM disponibles sur le marché, le TEM-Fast est un appareil de faible encombrement, permettant de réaliser des sondages de résistivité électrique jusqu'à une centaine de mètres de profondeur (en fonction du milieu étudié). Dans le cadre de missions d'Action contre la Faim, cet appareil a pu être testé dans différents milieux, afin d'en définir ses possibilités et ses limites.

En milieu côtier, le TEM-Fast est très performant pour délimiter l'extension des intrusions salines et localiser les aquifères d'eau douce. Son efficacité est plus limitée en zone de socle, où elle dépend surtout de la présence de la couverture d'altérite. Dans l'ensemble, cet appareil s'est révélé très simple à prendre en main, et a permis d'acquérir rapidement des résultats de qualité.

En fonction du milieu étudié, certaines configurations se sont révélées plus adaptées que d'autres. Le tableau 3.2 présente pour deux milieux différents une possibilité de configuration utilisable. En arrivant sur un site d'étude, les premiers sondages peuvent être réalisés avec la configuration proposée pour ce type de site. En fonction des résultats obtenus, cette configuration peut être adaptée ou bien maintenue telle quelle.

Paramètre	Zones côtières	Zones de socles
Dspositif	Coïncident	Coïncident
Dimensions	TR=REC=25m	TR=REC=50m
Puissance	1A ou 4A	A
Temps d'acquisition	9 (maximal)	9 (maximal)
Nombre de Stacks	5	15

Tableau 3.2 - Configuration possible en fonction du milieu étudié.



QUELQUES RAPPELS ET RECOMMANDATIONS

1. Il est impératif de réaliser une mesure de bruit EM sur chaque terrain étudié, afin de pouvoir situer les signaux mesurés par rapport à ce bruit EM.
2. Dans le cas où l'amplitude du signal mesuré est faible, la solution la plus simple consiste à augmenter l'intensité du courant injecté, puis la taille de la bobine d'émission.
3. Il est conseillé de bien relever (sur un cahier) toutes les sources potentielles de perturbations sur le terrain : clôtures, transformateurs, lignes électriques, constructions métalliques... Ceci permet d'écarter les mesures suspectes lors de l'interprétation.
4. Afin de réaliser les tests de manière confortable, deux personnes minimum sont nécessaires pour l'installation de la bobine sur le sol.
5. Développée pour la prospection de minerai, la méthode TDEM est particulièrement performante pour décrire les milieux conducteurs, et plus généralement les milieux présentant de forts contrastes de résistivité électrique. Son efficacité est réduite en présence de formations uniquement résistantes.
6. La profondeur maximale d'investigation dépend du temps pendant lequel le signal TDEM est mesurable et interprétable dans la bobine de réception, temps dépendant de l'amplitude du signal sur le site étudié. Cette profondeur est théoriquement la même en dispositif coïncident et en dispositif central, et dépend du milieu étudié.
7. Le dispositif coïncident peut être utilisé de manière standard. L'utilisation du dispositif central doit être réservée aux cas où un phénomène perturbateur est suspecté.
8. L'utilisation de bobines de faible taille (moins de 25 mètres de côté) doit être réservée aux cas où les formations en présence sont très conductrices. On privilégiera l'utilisation de grandes bobines (50m et plus) en milieux résistants.

Chapitre 4

ANNEXES





Annexe A

LISTE DE COLISSAGE DU TEM-FAST

Le document suivant provient de la documentation technique éditée par AEMR.

Il décrit la liste de colissage du TEM-Fast.

Check list of the equipment

I. Transmitter, receiving block with the standard battery in single case (main unit)
(see the figure in page 1)



II. Peripheral units, cables and manuals

1. Cable for connection of the main unit with 1-loop antenna
2. Charging device with cable
3. Extra sockets for antennas (8 pieces) and battery clips
4. RS 232 cable for connection of the main unit with a Notebook
5. Cable to connect the main unit with iPAQ PC through connector 15
6. Test - coil
7. Cable for connection of the external battery "Power 24V".

8. Cable for connection of the external battery "Power 12V"
9. Cable for connection of the main unit with 2-loop antenna
10. Antenna cable 25×25 m (2×50 m)
11. iPAQ PC
12. Manual for iPAQ PC
13. Socket for iPAQ PC
14. Charger for iPAQ PC
15. Cable to connect iPAQ PC with the main unit via connector 5
16. USB cable for iPAQ
17. Dongle
18. Manual for TEM-RES software
19. Antenna cable L=100 m length and 1 mm² section

III. CD with software

IV. Bag for transportation and keeping of the device



Annexe B

Description du TEM-Fast

Le document suivant provient de la documentation technique éditée par AEMR.

Il décrit le TEM-Fast et ses atouts par rapport d'autres équipements.

What is tem-fast 48 system?

TEM-FAST 48 is the new instrument in family of portable geophysical tools developed by the AEMR Ltd. company. In a channel of the chosen strategy it is "simple - fast - robust" system. The new tool, as well as its predecessors, is intended for electromagnetic researches of massifs of rocks within the limits of first 300-500 m based on TEM technology.

The main areas of application :

- search of mineral deposits;
- hydro-geological researches;
- geological researches, previous to construction of buildings;
- ecological researches;
- archaeology and special searches of unique targets;
- monitoring of dangerous geological and engineering objects;
- research of rock samples.

In spite of the fact that in the geophysical market as minimum dozen of EM and TEM of tools with similar area of application is submitted, the family TEM-FAST occupies stable positions in the field of small depths researches.

What are the advantages of TEM-Fast?

- There is no tool, which in a complete set, including antennas, battery and PC, needs in such small case and weighed 5 kg.
- There is no competitor with opportunities to receive the information simultaneously about the first meters, and about depths in hundreds meters.
- Application of a field PC allows TEM-FAST to see and to estimate results of soundings directly in field conditions and if necessary to correct the process of measurements.
- There are no competing TEM devices capable provide robust work in urban streets and industrial areas at levels of noise in the receiver in volt and more.
- Due to easy rearrange algorithms of work, TEM-FAST guarantees qualitative results even in the most adverse conditions.
- Any of TEM competitors do not provide so high efficiency and cost efficiency of researches as TEM-FAST.

TEM-FAST originally was developed within the framework of the international program MARS-94" and intended for installation on landed Martian module with the purpose of TEM sounding of a

surface “of a red planet”. It is natural that by development the increased requirements to reliability of the tool in extreme conditions were set. All these qualities have inherited all “terrestrial” variants of TEM-FAST.

So, for example TEM-Fast 48:

- has increased crashworthiness;
- provides stable results of measurements at sharp changes of temperature (till to 3°C/minute);
- provides measurements in a completely automatic mode in current practically of unlimited time;
- equipped with the system of auto-calibrating and testing, tracing a correctness of work of the device during measurements.

Among the features TEM-FAST 48 favorable distinguishing it from the competitors is the possibility to allocate following.

TEM-FAST 48 uses for creation of sounding magnetic field a special sequence of unipolar rectangular current pulses with ratio a pulse/pause = 3/1. Such form of pulses provides at registration of long slow processes in well conducting media the minimal



Annexe C

Caractéristiques techniques du TEM-Fast

Le document suivant provient de la documentation technique éditée par AEMR.

Il décrit le TEM-Fast et ses atouts par rapport d'autres équipements.

TECHNICAL SPECIFICATION TEM FAST 48HPC

The transmitter

Time of turning off the current's pulse (TR=REC, I=1 A) (μs)	
TR=25m	< 3
TR=50m	< 8
TR=100m	< 20
- The amplitude of current's pulses (A) is (selective)	1, 4
- Ratio pulse/pause (time range = 1-6)	3/1
- Active resistance of load * (Ohm)	0 - 20
- Inductance of a load (I=1A) (H)	< 0.01

The receiver

- Frequency band (MHz)	> 4
- Allowable constant voltage at input (mV)	-2 + 5
- Number of automatically registered delays	48
- Suppression of industrial noise 50/60 Hz (dB)	> 60
- Internal noise** (RMS- root mean square, μV)	
(Stack =20, TR=REC, I=1A, resistance at input r = 2-8 Ohm)	1
- Dynamic range*** (max /min) (μV)	107/1(0.1)
- Systematic errors**** (%)	1
- Measured parameters:	
E.M.F./CURRENT	V/A
Errors of measurements	V/A
- Allowable types of measuring antenna's configurations:	
One-loop with the sizes of antennas (m)	0.01×0.01 up to 400×400
"loop-in-loop" - size of a TR-loop (m)	500×500
size of a REC-loop	REC<TR/2 with Amplifier=ON
Optimum configuration - one loop by the size (m)	18×18 - 100×100
Time of measurements (Stack = 1) min/max (sec)	18 / 30

Power consumption

- Standard internal battery	12V, 2000 mAh
- Maximum number of soundings with standard battery: (I = 1A, Stack = 10)	> 50
- Consumption in a mode - "sleep" (μA)	1
- Average consumption in a mode - "work I = 1A" (mA)	350

Other characteristics

Operation with IBM - compatible PC with standard port RS 232, DOS or Windows 95/98 or Palmtop PC with OS Windows CE	
Weight (kg)	1.5
Size (mm)	103×27×310
Operating temperature range	-20° - + 65° C
Change of temperature (°C / minute)	3
Power of protection of the case of the device	IP15 (65)

** see tab. 2-2 of the description. Max inductance at output/input - 5mH*

*** see window " Functions " , "Diagnoses" , "Real voltage" of the system interface: [E (on-off) < 1]*

**** see function "Zone " in the system interface, 0.1μV-with Amplifier=ON and "loop in loop" style.*

***** are measured on models of thin metal plates: comparison of settlement and experimental data.*



Table des figures

1.1	Boucle de courant induite dans le sol juste après la coupure	13
1.2	Boucles de courant induites dans le sol aux instants suivants	13
1.3	Exemple de sondage TDEM	14
1.4	Agencements possibles pour le dispositif de mesure	15
1.5	Intensités, théorique et réelle, du courant dans la boucle d'émission	16
1.6	Notion de signal mesurable	18
1.7	Ajustement du modèle sur les données de terrain	20
1.8	Exemple de modèles équivalents	20
2.1	TEM-Fast 48HPC	28
2.2	Fenêtre de configuration du TEM-Fast	29
2.3	Échantillonnage du signal par les fenêtres temporelles	31
2.4	Illustration de la configuration de base	33
2.5	Mesure du bruit EM	34
2.6	Un exemple de mesures	36
2.7	Intervalle de fonctionnement du TEM-Fast	37
2.8	Bruit de fonctionnement de l'appareil	37
2.9	Bruit EM sur un site	38
2.10	Intervalle de dispersion	38
2.11	Exemple de niveau de signal faible	39
2.12	Exemple d'induction parasite	41
2.13	Sélection des points utilisés pour l'interprétation	43
3.1	Localisation du site de Navalady	48
3.2	Aperçu du site de Navalady	49
3.3	Premiers tests effectués sur le site de Navalady	49
3.4	Bobines semi-chevauchantes	50
3.5	Vue aérienne du village de Navalady	51
3.6	Profil 2D de résistivité électrique sur le site de Navalady	52
3.7	Estimation de l'extension de la lentille d'eau douce à Navalady	52
3.8	Structure générale des aquifères de socle	53
3.9	Sondages TDEM en zone de socle en Inde	54

Liste des tableaux

2.1	Indices temporels du TEM-Fast	30
2.2	Paramètres de la configuration de base	33
2.3	Paramètres de la mesure de bruit	35
2.4	Résumé des paramètres des premières mesures	45
3.1	Paramètres des mesures à Navalady	50
3.2	Configurations de départ	55



Références bibliographiques

Auken E. (1995). 1D Time-Domain Electromagnetic Interpretation over 2D/3D Structures. In *SAGEEP Meeting, Orlando, Florida*, pp. 329–337.

Buselli G. (1982). The effect of near-surface superparamagnetic material on electromagnetic measurements. *Geophysics* 47 (9), pp. 1315–1324.

Descloîtres M. (1998). *Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) : application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap Vert) et du Piton de la Fournaise (La Réunion)*. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France.

Descloîtres M., Guérin R., Albouy Y., Tabbagh A. et Ritz M. (2000). Improvement in TDEM sounding interpretation in presence of induced polarization. A case study in resistive rocks of the Fogo volcano, Cape Verde Islands. *Journal of Applied Geophysics* 45, pp. 1–18.

Fitterman D. V., Deszcz-Pan M. et Stoddard C. E. (1999). Results of time-domain electromagnetic soundings in Everglades national park, Florida. *Rapport Technique* 99-426, U.S. Geological Survey.

Goldman M., Gilad D., Ronen A. et Melloul A. (1991). Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method. *Geoexploration* 28, pp. 153–174.

Goldman M., Rabinovich B., Rabinovich M., Gilad D., Gev I. et Shirov M. (1994). Application of NMR-TDEM method in groundwater exploration in Israel. *Journal of Applied Geophysics* 31, pp. 27–52.

Guérin R., Descloîtres M., Coudrain A., Talbi A. et Gallaire R. (2001). Geophysical surveys for identifying saline groundwater in the semiarid region of the central Altiplano, Bolivia. *Hydrological Processes* 15, pp. 3287–3301.

Hoareau J., Guérin R., Vouillamoz J.-M. et Vithanage M. (2006). The use of Transient Electro-Magnetism method to localize saline water intrusion in Sri Lanka. In *32nd WEDC International Conference*.

Jørgensen F., Sandersen P. B. E. et Auken E. (2003). Imaging buried Quaternary valleys using the transient electromagnetic method. *Journal of Applied Geophysics* 53, pp. 199–213.

Kafri U. et Goldman M. (2005). The use of the time domain electromagnetic method to delineate saline groundwater in granular and carbonate aquifers and to evaluate their porosity. *Journal of Applied Geophysics* 57, pp. 167–178.

Krivochieva S. (2002). *Application des méthodes électromagnétiques transitoires à la prospection des aquifères profonds*. Thèse de Doctorat, Département Des Génies Civil, Géologique Et Des Mines - Ecole Polytechnique De Montréal, Canada.

McNeill J. D. (1990). Use of electromagnetic methods for groundwater studies. Ward, S.H., ed., *Geotechnical and Environmental Geophysics: Society of Exploration Geophysicists*, IG5 1, pp. 191–218.

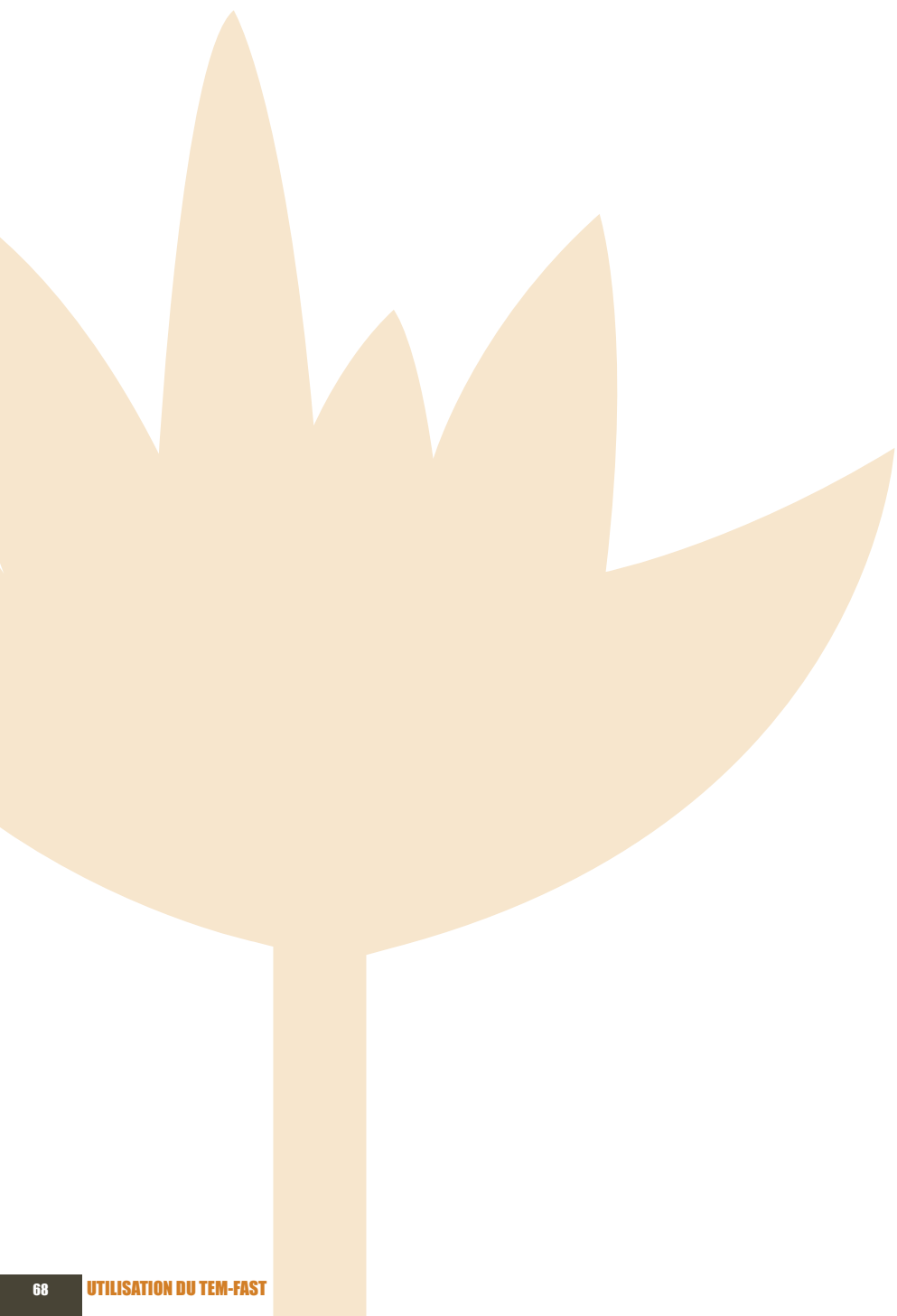
McNeill J. D. (1994). Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding (Technical Note TN-27). *Rapport technique*, Geonics Limited.

Nabighian M. N. et Macnae J. C. (1991). Time domain electromagnetic prospecting methods. In M. Nabighian (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, Volume 2, Chapitre 6, pp. 427–520. Society of Exploration Geophysicists.

Spies B. R. (1989). Depth of investigation in electromagnetic sounding methods. *Geophysics* 54 (7), pp. 872–888.

Spies B. R. et Frischknecht F. C. (1991). Electromagnetic sounding. In M. Nabighian (Ed.), *Electro-magnetic Methods in Applied Geophysics*, Chapitre 5, pp. 285–425. Society of Exploration Geophysicists.

Vouillamoz J.-M., Descloîtres M., Toe G. et Legchenko A. (2005). Characterization of crystalline basement aquifers with MRS : comparison with boreholes and pumping tests data in Burkina Faso. *Near Surface Geophysics* 3, pp. 205–213.





ACF - INTERNATIONAL

CANADA

7105 Rue St-Hubert, Bureau 105
H2S 2N1 Montréal, QC, Canada
E-mail: info@actioncontrelafaim.ca
Tel : +1 514 279 4876
Fax : +1 514 279 5136
www.actioncontrelafaim.ca

ESPAGNE

C/Caracas 6, 1°
28010 Madrid, España
E-mail: ach@achesp.org
Tel : +34 91 391 53 00
Fax : +34 91 391 53 01
Web : www.accioncontraelhambre.org

ETATS-UNIS

247 West 37th, Suite #1201
New York, NY 10018 USA
E-mail: info@actionagainsthunger.org
Tel : +1 212 967 7800
Fax : +1 212 967 5480
www.actionagainsthunger.org

FRANCE

4 rue Niepce
75662 Paris, cedex 14, France
E-mail: info@actioncontrelafaim.org
Tel : +33 (0) 1 43 35 88 88
Fax : +33 (0) 1 43 35 88 00
Web : www.actioncontrelafaim.org

ROYAUME-UNI

First Floor, rear premises,
161-163 Greenwich High Road
London, SE10 8JA, UK
E-mail : info@aahuk.org
Tel : +44 208 293 6190
Fax : +44 208 858 8372
Web : www.aahuk.org

