

RÉSISTIVIMÉTRIE MT AVEC TESTS DE STATIONNARITÉ ET DE COHÉRENCE

Guy LAMARQUE*, Jacques THIEL*, Serge GASNIER**

* Laboratoire d'Électronique Signaux Images
Université d'Orléans, BP 6744-45067 Orléans cedex 2

** IRIS Instruments
1 Avenue Buffon, BP 6007-45060 Orléans cedex 2

RÉSUMÉ

Il est possible d'améliorer la mesure de la résistivité apparente du sol par la méthode magnétotellurique grâce à un tri préalable des données (partitionnées en blocs de segments) en cinq étapes : i) élimination des segments avec transitoires après filtrage passe-haut pour atténuer les composantes basse fréquence, ii) élimination des segments non stationnaires pour la variance par bandes de fréquence, iii) élimination des paires de segments non cohérentes, iv) dans chaque bande de fréquence, estimation des auto et inter-spectres par bloc, avec la méthode de Nuttall-Carter, v) élimination des paires de blocs non cohérentes. Basée sur les tests statistiques d'hypothèse, la méthode proposée permet d'apprécier l'amélioration de la qualité de la mesure en fonction du niveau commun des tests.

ABSTRACT

It is possible to improve the apparent ground resistivity measurement using the magneto-telluric method by adding a data sorting procedure in five steps : i) segments with transients elimination after high-pass filtering in order to remove low frequency components, ii) non stationary segments for the variance in frequency band elimination, iii) non coherent pair of segments elimination, iv) auto and cross spectrum estimation on bloc, in each frequency band using the Nuttall-Carter algorithm, v) non coherent pair of bloc elimination. Based on statistical hypothesis tests the present method leads to appreciate the measurement quality improvement as a function of the test level.

1. INTRODUCTION

La méthode magnétotellurique (MT) a été développée, pour les besoins de la prospection minière, à partir des travaux de L. Cagniard [1] qui en a établi la théorie pour un sol stratifié horizontalement. Elle permet de déterminer le profil de résistivité électrique en fonction de la profondeur à partir des enregistrements simultanés des 6 composantes du champ électromagnétique naturel. Depuis une trentaine d'années, les géophysiciens l'utilisent pour connaître la nature des roches qui composent les premiers kilomètres du sous-sol. Cette méthode passive (sans émetteur) utilise des récepteurs portables (elle est donc adaptée aux sites d'accès difficile) mais, en contre-partie, elle est très sensible aux parasites.

A une fréquence donnée, la composante $\rho_{xy}(\omega)$ de la matrice de résistivité d'une couche horizontale (plan xy) a pour expression

$$\rho_{xy}(\omega) = \frac{1}{\omega\mu} \left(\frac{P_{xy}(\omega)}{P_y(\omega)} \right)^2 \quad (1)$$

avec ω : pulsation ($\omega = 2\pi f$),

μ : perméabilité magnétique du milieu,

$P_y(\omega)$: Densité Spectrale de Puissance (DSP) d'une composante magnétique $H_y(t)$ du champ MT dans une direction horizontale (y) quelconque,

$P_{xy}(\omega)$: densité inter-spectrale de $H_y(t)$ et $E_x(t)$, composante électrique du champ MT orthogonale à $H_y(t)$.

La méthode MT est donc équivalente à une méthode d'identification d'un filtre linéaire par estimation de la DSP de ses signaux d'entrée (H_y) et de sortie (E_x) qui doivent être cohérents entre eux. A condition que ces signaux soient stationnaires pour la DSP, les méthodes de Fourier sont les mieux adaptées pour cette estimation car le spectre du champ MT ne présente ni résonance ni anti-résonance. Lorsque les deux hypothèses de stationnarité pour la DSP et de cohérence ne sont pas vérifiées, la méthode MT avec analyse de Fourier n'est donc plus applicable. Cette communication présente une méthode de tri des données sur critères de stationnarité pour la DSP et de cohérence qui permet d'améliorer sensiblement la qualité des résultats jusqu'alors obtenus.

2. STRATÉGIE DE TRI

La mesure de la résistivité du sous-sol peut être perturbée par deux causes principales :

- Un transitoire naturel qui se superpose au champ MT, comme illustré sur la figure 1. Ce cas se produit, par exemple, avec des sifflements qui sont régis par les équations de Maxwell et dont les composantes sont donc cohérentes deux à deux. La sortie est cohérente avec l'entrée mais il n'y a pas stationnarité.

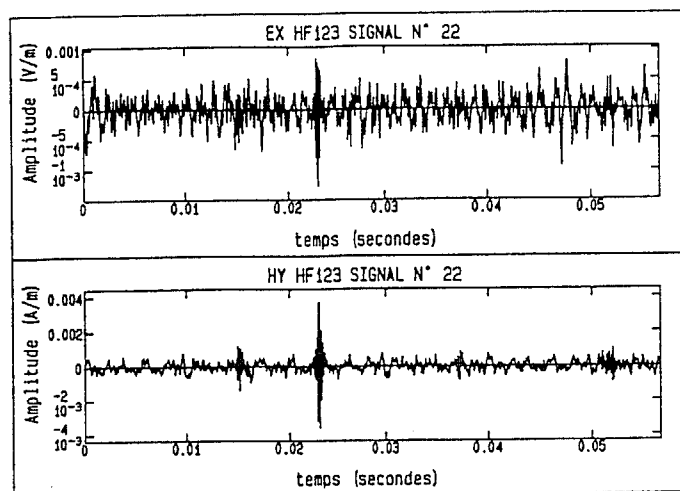


Figure 1 : Exemple de composantes MT en présence de sifflements.

- Un parasite industriel qui se superpose à seulement une composante (électrique ou magnétique), comme le montre la figure 2, ou sur un des capteurs. Les signaux d'entrée et de sortie du filtre peuvent être stationnaires mais ils ne seront pas cohérents dans la gamme de fréquence de la perturbation.

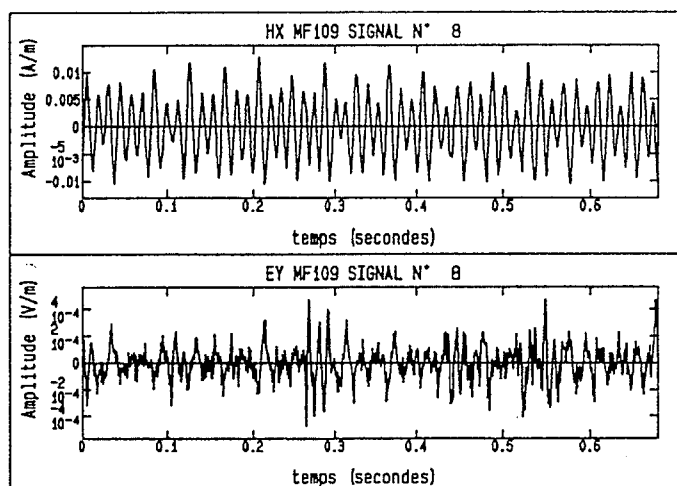


Figure 2 : Exemple de composantes MT avec parasites pseudo-périodiques.

Ces deux types de perturbation faussent complètement la mesure de la résistivité. On constate en effet que l'écart-type des valeurs de résistivité mesurées, sur tous les blocs de données, est très supérieure à celui de l'estimateur. Ceci s'explique par le fait que l'hypothèse d'un filtrage linéaire n'est pas vérifiée (non cohérence) ou que les méthodes de Fourier ne sont pas applicables (non stationnarité pour la DSP). Pour pallier cet inconvénient, les données doivent être analysées aux seuls instants où les deux composantes considérées du champ MT sont stationnaires pour la DSP et cohérentes entre elles.

La stratégie de tri proposée [2] s'appuie sur des tests bilatéraux d'hypothèse [3] de stationnarité pour la moyenne et la variance dans des bandes qui partitionnent la gamme audio fréquence de mesure, ainsi que sur deux tests unilatéraux de cohérence, l'un *a priori* et l'autre *a posteriori*. L'ensemble des

opérations nécessaire au tri des données est résumé sur la figure 3. Chaque composante MT est partitionnée en blocs de 1024 échantillons, soit 32 segments de 32 échantillons. Ces segments sont triés par paires : si un segment est rejeté sur une voie, il l'est automatiquement sur l'autre. Certains segments sont éliminés par un test de dérive après filtrage passe-haut sur la totalité du bloc. Puis la gamme d'analyse est découpée en 4 bandes d'égale largeur fréquentielle. Dans chacune d'elle, un test de stationnarité sur la variance, puis un autre de cohérence, permet d'éliminer certains segments. Un nouveau tri permet d'éliminer, sur chaque bloc, les DSP partielles aux fréquences où il n'y a pas cohérence. On obtient la DSP finale à toute fréquence d'analyse en faisant la moyenne des DSP partielles restantes.

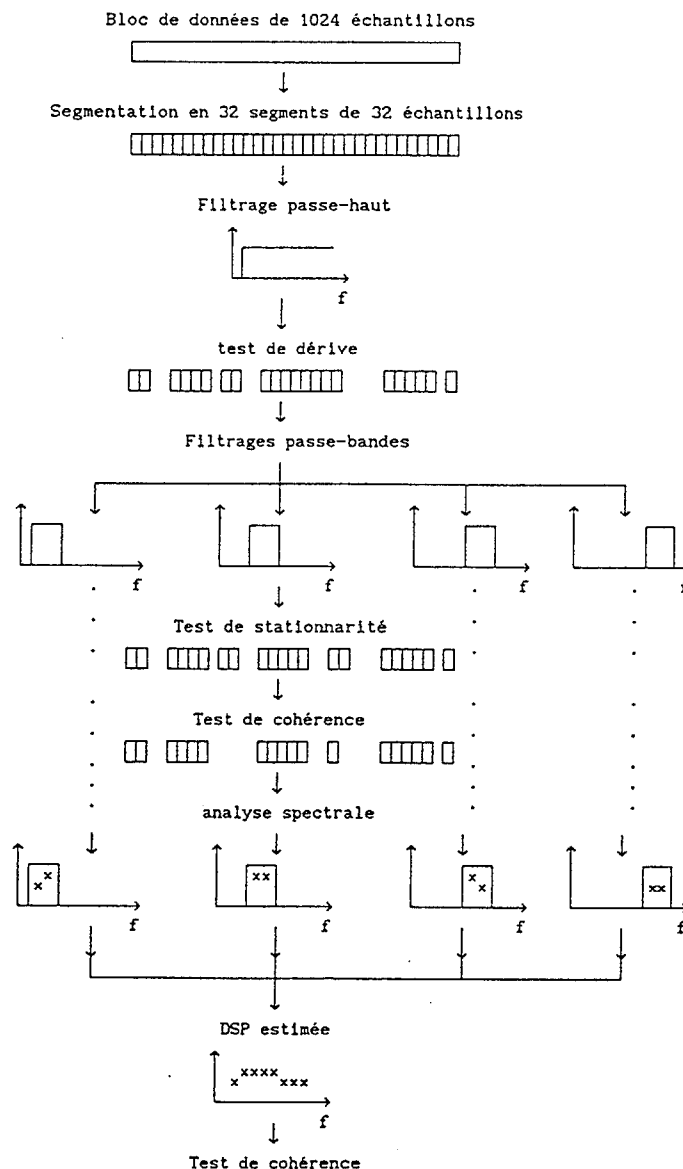


Figure 3 : Méthode de tri des données.

3. PROCÉDURES DE TRI

La première étape a pour but de rejeter la majorité des transitoires après les avoir isolés par un test de dérive de la moyenne (*run test*) sur des segments jointifs de longueur

appropriée. Si les segments sont trop longs, de durée supérieure à quelques périodes du transitoire, aucune dérive n'est détectée. A l'inverse, s'ils sont trop courts, il y a systématiquement une dérive. Dans notre cas, la plupart des transitoires sont isolés par le test de dérive sur des segments jointifs de 32 échantillons. Ceci est illustré sur la figure 4 où les débuts des segments sont repérés par des rectangles et où les segments éliminés sont repérés par des traits horizontaux.

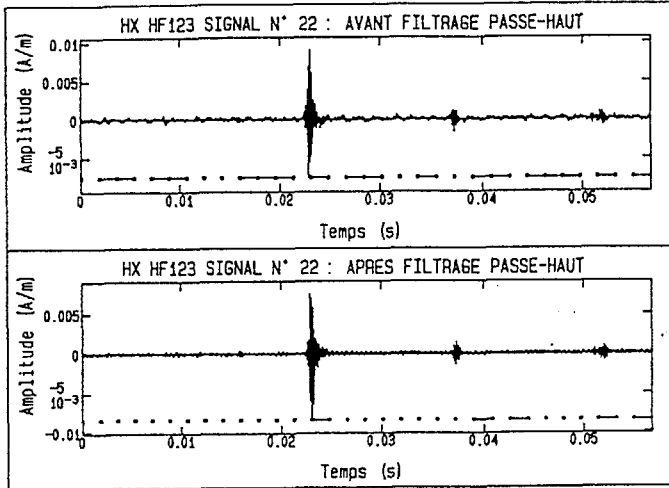


Figure 4 : Test de dérive sur un signal réel (sifflement).

Dans le cas des signaux MT sur lesquels nous avons appliqué cette méthode, il a été nécessaire de faire précéder le test par un filtrage passe-haut sur les composantes, afin de supprimer les dérives très lentes. La fréquence de coupure de ce filtre doit être la plus faible possible pour disposer du maximum de fréquences d'analyse. L'intérêt de ce prétraitement est illustré sur les figures 4 et 5. Sur les courbes du haut, la composante magnétique est perturbée par un signal quasi-périodique d'origine industrielle, ce qui rend impossible toute mesure de résistivité puisque pratiquement tous les segments sont rejetés par le test. Après filtrage passe-haut (courbes du bas) la quasi-totalité des segments est acceptée par ce même test. A la suite de ce premier tri, et après centrage, les segments restants ne comportent plus de composante déterministe et il devient possible de tester la stationnarité pour la DSP.

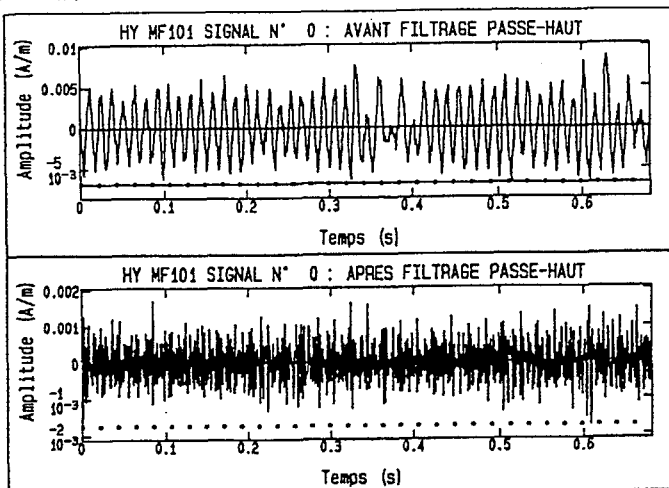


Figure 5 : Test de dérive sur un signal réel (signal périodique).

La seconde étape considère globalement les segments restants de chaque bloc. Un test de dérive sur la variance devrait être réalisé à chaque fréquence afin qu'une non stationnarité pour la DSP à une fréquence donnée ne soit pas masquée par des non stationnarités à d'autres fréquences. En pratique, les opérations de tri sont réalisées dans seulement quatre bandes de fréquence d'égale largeur et équiréparties entre la fréquence de coupure du filtre passe-haut et la fréquence de Nyquist. Le nombre de bandes choisi résulte d'un compromis entre des filtres trop étroits, délicats à synthétiser et qui alourdiraient les calculs, et des filtres trop larges qui ne permettraient pas de discriminer les domaines fréquentiels de non stationnarité. Afin de ne pas rejeter un bloc uniquement parce que quelques-uns de ses segments ont une variance trop différente des autres, on élimine ces segments par paires avec un algorithme itératif lorsque le test est négatif. A chaque itération on supprime les deux segments qui ont des valeurs extrêmes de variance, la plus forte et la plus faible, et on procède ainsi jusqu'à ce que le test soit positif. Ce tri supplémentaire permet de ne conserver des signaux MT que les segments sans dérive qui forment des blocs stationnaires pour la variance dans chaque bande de fréquence, c'est-à-dire pour la DSP. Si ce processus itératif est toujours négatif jusqu'au 8 derniers segments, ceux-ci sont rejetés.

Il convient de s'interroger sur la validité d'un tel tri qui, à notre connaissance, n'a encore jamais été proposé. N'a-t-on pas tendance à rendre stationnaire n'importe quel signal en supprimant des segments jusqu'à ce que le test de stationnarité soit positif ? Notre réponse est que le test de stationnarité n'est nullement faussé par les tris que nous avons introduit car ceux-ci n'agissent pas directement sur le nombre de séquences mesurées pour le *run test*. Parfois même, ce nombre est modifié de façon défavorable ! D'autre part, d'un point de vue physique, il nous semble raisonnable d'éliminer dans un signal aléatoire ses parties non stationnaires pour la DSP avant d'en faire une analyse spectrale. En marge de cet argument, on peut d'ailleurs noter que notre tri permet de supprimer les segments de début et/ou fin d'un transitoire qui n'auraient pas été éliminés par le test de dérive car leurs variances sont très grandes par rapport à celles des segments voisins. La méthode de tri que nous proposons apporte donc une réelle amélioration par rapport au test de stationnarité classique.

La troisième étape est un tri supplémentaire, dans chaque bande de fréquence, sur un critère de cohérence. La mesure de la fonction de cohérence entre les deux composantes analysées permet d'apprécier si les équations de Maxwell sont vérifiées, c'est-à-dire si ces deux composantes sont celles du champ MT, exclusivement. Cependant, la fonction de cohérence étant définie à partir des estimations des auto et inter-spectres, il faut réaliser la meilleure estimation possible de ces derniers pour disposer d'une indication fiable de la qualité de la mesure. Pour chaque couple de segments, la fonction de cohérence est estimée par une méthode du périodogramme très sommaire où chaque fréquence harmonique correspond à la fréquence centrale d'une bande (segments de 8 échantillons, fenêtre de Papoulis et recouvrement de 50%). Un couple de segments est rejeté lorsque la valeur estimée de la fonction de cohérence, à cette fréquence centrale, est inférieure à un certain seuil prédéterminé. Ce test de cohérence sur chaque segment permet de ne conserver pour l'analyse spectrale que des segments vérifiant *a priori* les deux hypothèses de stationnarité pour la DSP et de cohérence.



A partir de la quatrième étape on retrouve le schéma classique d'une estimation de la résistivité par la méthode MT, à la seule différence que les données sont toujours traitées par bandes de fréquence. Les auto et inter-spectres sont estimés par une méthode de Fourier sur des blocs de 8 segments. La méthode mixte de Nuttall-Carter [4] a été retenue car elle permet d'obtenir, sans recouvrement, les mêmes performances statistiques qu'avec un périodogramme de Welch avec recouvrement de 62 %. En effet, il est exclu de faire recouvrir les segments qui, après tri, ne sont plus jointifs.

La dernière étape consiste à estimer, à partir des auto et inter-spectres, la fonction de cohérence *a posteriori* (après tri des segments) de manière plus précise, c'est-à-dire sur des blocs de 8 segments et à chaque fréquence d'analyse. La résistivité est alors calculée, sur chaque bloc, aux seules fréquences où la fonction de cohérence est supérieure à un certain seuil. Finalement, la résistivité apparente du sol est obtenue, à toutes les fréquences d'analyse, en faisant la moyenne des résistivités partielles disponibles.

4. RÉSULTATS

Tous les tests d'hypothèses précédents sont réalisés au même niveau. L'utilisateur a donc un seul et unique paramètre à régler - le niveau commun à tous les tests - de façon à satisfaire un unique critère de qualité de la mesure - le rapport maximum entre l'écart-type de l'estimateur et l'écart-type estimé des résultats de mesure. Un niveau nul ramène aux conditions de mesure des appareils actuellement commercialisés. Malgré les tests supplémentaires, la procédure proposée est donc très simple d'emploi sur le terrain et peut être utilisée en complément des mesures classiques de cohérence *a posteriori* disponibles sur tous les résistivimètres.

La figure 6 présente, en trait pointillé, la courbe de résistivité classiquement obtenue (sans test) et, en trait plein, la courbe obtenue après tri des données avec le niveau de test 2.5 %. Les valeurs triées diffèrent de plusieurs ordres de grandeur des valeurs non triées malgré le faible niveau utilisé. Ces écarts sont autant d'indicateurs probants de l'efficacité de la nouvelle méthode que nous proposons pour mesurer la résistivité par la méthode MT.

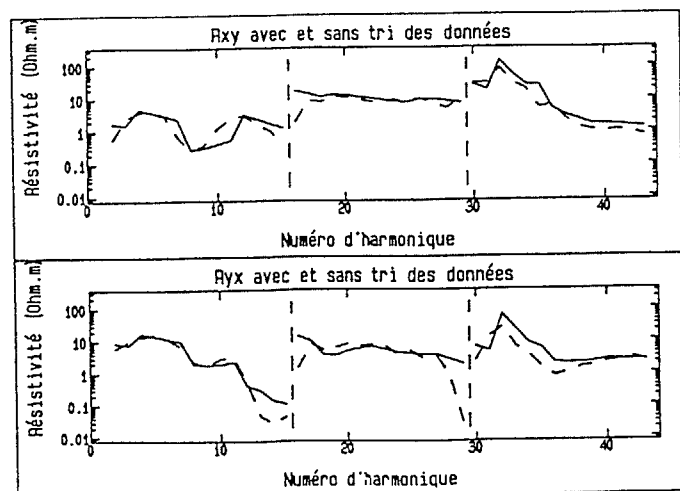


Figure 6 : Courbes de résistivité avec et sans tris.

5. CONCLUSION

La procédure de tri présentée ici permet d'améliorer sensiblement la mesure de la résistivité apparente du sol par la méthode MT en limitant l'analyse aux seuls instants où les signaux sont stationnaires pour la DSP et cohérents entre eux. La méthode MT n'étant qu'un cas particulier d'identification d'un filtre linéaire, cette procédure de tri peut également s'appliquer à d'autres domaines. Cependant, dans le cas de données incertaines, il faut disposer de longs enregistrements car le nombre de segments rejetés peut être très important. Ceci n'est nullement un problème en MT puisque les mesures se déroulent en temps réel *in situ* sans limitation de durée. Pour l'expérimentateur, une exigence de qualité de mesure aura pour seule conséquence une augmentation de la durée des enregistrements.

RÉFÉRENCES

1. CAGNIARD L., *Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting*, Geophysics, Vol. 18, N°3, 1953, P 605-635.
2. LAMARQUE G., *Contribution à la mesure in situ et en temps réel de la résistivité du sol par la méthode magnétotellurique*, Thèse de docteur de l'université d'Orléans, 1992.
3. BENDAT J. S., PIERSOL A. G., *Random data : analysis and measurement procedures*, Wiley-Interscience, 1971.
4. NUTTALL A. H., CARTER G. C., *Spectral estimation using combined time and lag weighting*, Proceedings of the IEEE, Vol. 70, N°9, September 1982, P 1115-1125.