SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU
SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

DETERMINATION DES TEMPS D'ARRIVEE EN SISMOLOGIE EXPLOSIVE PAR ANALYSE ENERGETIQUE ENTRE LES PASSAGES A ZERO DU SIGNAL

D. ABOUTAJDINE, Z.E.A. AMRI, M. NAJIM et J.G. POSTAIRE

Laboratoire d'Electronique et d'Etude des Systèmes Automatiques
Faculté des Sciences B.P. 1014 Rabat - Maroc

RESUME

En sismologie explosive, la détermination des temps d'arrivée des ondes reflèchies permet de connaître la structure géologique de la croûte terrestre.

Si on ne peut formuler d'hypothèses particulières sur le signal et sur les caractéristiques du bruit , il est possible d'utiliser l'énergie du signal sismique pour détecter l'arrivée de chaque onde. En effet le passage du front d'une onde est caractérisé par un accroisement de l'énergie suivi d'une diminution progressive correspondant à l'attenuation des mouvements du sol.

L'utilisation d'une fenêtre glissante pour calculer cette énergie apporte un effet de lissage qui peut atténuer , sinon masquer de faibles arrivées.

Afin de minimiser ce phénomène, le signal est découpé en "demi-excursions" correspondant aux mouvements du sol entre deux passages à zéro consecutifs de la trace sismique.

Le calcul de l'énergie mise en jeu dans les différentes "demi-excursions" constituant le signal fournit une représentation fine des variations de l'énergie reçue par le sismomètre.

La détermination des intervalles où cette energie a tendance à croître permet de détecter des arrivées d'ondes superposées dans le domaine temporel.

Les résultats obtenus en analysant des signaux recueillis au cours de campagnes d'exploration du sous-sol Marocain montrent l'interêt de cette méthode simple et précise.

SUMMARY

In explosion seismology, the determination of the arrival time of the reflected waves provides a means for mapping the geological structure of the earth's crust. Without any particular assumption on the signal and the noise, it is possible to use the signal energy to detect each arrival. Indeed, the passing over of the head of waves is characterized by an increasing energy phase, followed by a deceasing phase, corresponding to the attenuation of the movement of the ground.

The smoothing effect of the classical sliding window method for computing this energy does not allow the detection of waves overlapping on the time domain. To minimize this smoothing phenomena, the signal is described by elements called "half excursion cycles" which consist of that part of the waveform between consecutive zero crossings.

These "half-excursions cycles" are analyzed as to their energy. This procedure provides an accurate description of the variations of the energy received by the seismometer . The identification of the ascending and descending phases of this energy yields the determination of the arrival time of the different waves constituing the composite seismic signal.

The analysis of field data recorded in Morocco shows the effectiveness of the procedure.

DETERMINATION DES TEMPS D'ARRIVEE EN SISMOLOGIE EXPLOSIVE PAR ANALYSE ENERGETIQUE ENTRE LES PASSAGES A ZERO DU SIGNAL

INTRODUCTION

Notre connaissance de la structure de la croûte terrestre est en grande partie le fruit des techniques de la sismologie explosive. Ces techniques sont basées sur la détermination des temps de propagation des ondes sismiques, provoquées par une explosion, entre le point de tir et une série de récepteurs placés à la surface du sol (1). L'énergie libérée par l'explosion de faibles charges de dynamite se propage dans le sous-sol. Les ondes sismiques ainsi engendrées sont partiellement réfléchies vers la surface par les interfaces situées entre les couches géologiques caractérisées par des propriétés acoustiques différentes (cf.Figure 1).

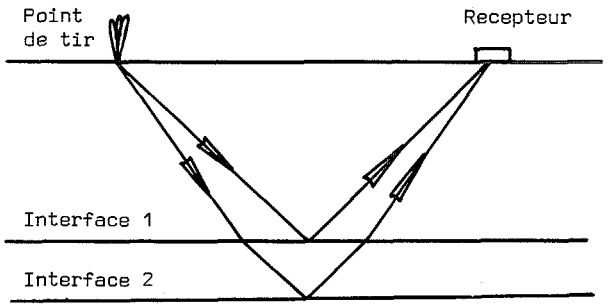

Figure 1 - Reflection des ondes sismiques provoquées par une explosion.

La détermination des différences de temps entre l'instant de tir et les instants d'arrivée des ondes sismiques sur une série de sismomètres placés en ligne droite permet d'établir un schéma de la structure géologique du sous-sol.

Pour de telles expériences, les sismomètres, sensibles aux mouvements du sol dans trois directions, sont localisés le long des profils d'environ 300 Km de longueur.

Pour connaître la structure du sous-sol avec une bonne précision, il faut en général au moins 24 sismomètres, voire davantage. Pour un seul tir, cela représente 72 signaux enregistrés sur lesquels l'analyste doit renconnaître visuellement les arrivées successives des différentes ondes sismiques.Ces dépouillements, très longs et fastidieux, ne peuvent être confiés qu'à un expert en sismologie.

Il est donc intéressant de développer des méthodes systématiques d'analyse de ces enregistrements. Les méthodes de déconvolution ont apporté un grand progrès vers l'automatisation de cette analyse.

Cependant,qu'il s'agisse de la convolution prédictive (2),de ladéconvolution homomorphique (3) ou de la déconvolution déterministe, elles ne peuvent être appliquées que sous des hypothèses de linearité du modèle.

D'autre part s'agissant de la déconvolution prédictive, on suppose que l'onde provoquée par l'explosion est à phase minimum. La méthode de déconvolution homomorphique permet de s'affranchir de cette hypothèse. Toutefois son succés dépend du bon degré de séparabilité existant entre la fonction de reflexivité et l'onde sismique sur le cepstre (4). La troisième méthode basée sur la notion de convolution, la déconvolution deterministe ne fait pas appel à des hypothèses particulières. Par contre elle nécéssite un enregistrement direct de cette onde, qui ne peut être envisagé qu'en sismologie marine.

D'autres approches du problème de la détermination des temps d'arrivée des différentes ondes sismiques peuvent être envisagées en utilisant l'analyse des variations de la puissance du signal enregistré (5).
Sans formuler d'hypothèses particulières sur le modèle de la croûte terrestre, le sismologue sait que le passage du front d'une onde s'accompagne d'une augmentation,souvent brutale,de la puissance reçue par le sismomètre suivie par une atténuation en général plus lente. Ainsi l'arrivée de chaque onde peut être localisée au début de chaque phase ascendante de la puissance du signal enregistré.

Les techniques classiques de calcul de la puissance du signal sur une fenêtre glissante conduisent,pour les applications considérées, à des résultats souvent médiocres, Une nouvelle méthode d'analyse de la puissance des signaux reçue par les sismomètres est proposée dans cet article. Cette puissance est calculée sur des intervalles de temps variables, délimités par les passages à zéro successifsdu signal. Une telle procédure permet de réduire la taille de la fenêtre utilisée pour calculer la puissance,sans que s'accroisse pour autant sa variabilité en fonction du temps.

Cette approche plus fine que l'approche classique permet de déterminer les temps d'arrivée avec une bonne précision,comme en témoignent les résultats de l'analyse présentés à la fin de cet article.

ANALYSE ENERGETIQUE D'UN SIGNAL SISMIQUE

Il parait naturel de caractériser l'évolution dynamique de signaux non stationnaires, comme les signaux sismiques, par l'analyse de la puissance P(t) calculée sur une fenêtre glissante, telle que :

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_{t}^{t+T} X^2(\tau)\, d\tau$$

L'analyste s'attend ainsi à retrouver dans la fonction P(t), les variations des propriétés énergétiques du signal en fonction du temps. Cependant, cette analyse nécéssite beaucoup de précautions, surtout au niveau du choix de la largeur T de la fenêtre glissante. Si T est trop petit, P(t) fluctuera très rapidement, suivant

fidélement les variations de l'amplitude du signal sismique lui-même. Si T est trop grand, le phénomène de lissage dû à l'intégration masquera les variations de la puissance du signal et la fonction P(t) ne sera d'aucune utilité.

Le principal intérêt de ce type d'analyse est de détecter sur le signal total qui dure plusieurs minutes la partie correspondante à l'arrivée groupée des différentes ondes sismiques. En effet, le temps qui sépare la première arrivée de la dernière ne dépasse pas en général 2 à 3 secondes. Ces arrivées sont tellement rapprochées qu'il arrive couramment que le front d'une onde atteigne le sismomètre avant que l'amplitude des variations du sol dûes à la précédente se soit notablement attenuée.

En définissant une "demi-excursion" du signal comme la portion de signal séparant 2 passages à zéro successifs, l'analyste ne dispose souvent, pour détecter les arrivées, que de 3 ou 4 "demi-excursions".

Des événements aussi rapprochés interdisent l'utilisation d'une fenêtre glissante de largeur fixe pour calculer la puissance du signal, même en y incorporant une fonction de pondération comme cela est suggéré dans (6).

La méthode que nous proposons consiste à déterminer la puissance mise en jeu durant chaque "demi-excursion" du signal. Cette puissance caractérise le signal compris entre les deux passages à zéro successifs définissant chaque "demi-excursion". Cette puissance est en fait égale à la puissance moyenne P_{moy} d'un signal périodique S_p dont les demi périodes seraient identiques, au signe près, à la "demi-excursion" considérée (cf. Fig. 2). On peut donc interpréter la puissance mise en jeu durant une "demi-excursion" comme la puissance moyenne d'un mouvement fictif du sol, périodique, identique au mouvement réel durant la "demi-excursion" considérée. Cette puissance moyenne ne dépend pas de la taille de la fenêtre utilisée pour la calculer. Elle ne dépend que des caractéristique du signal entre les passages à zéro.

Dans le contexte de l'implantation sur calculateur, c'est-à-dire dans le cas de signaux discrets, un passage à zéro peut être situé à l'instant t_n tel que:

$$\text{signe}(x(t_n)) \neq \text{signe}(x(t_{n-1}))$$

Dans ces conditions, si t_n et t_m sont les instants de 2 passages à zéro consécutifs, la puissance du signal durant la "demi-excursion" (t_n, t_m) sera définie par :

$$P(n,m) = \frac{1}{t_m - t_n} \sum_{i=n}^{m} x^2(t_i)$$

Il faut toutefois noter que le bruit, ainsi qu'une composante continue éventuelle, peuvent avoir des effets désastreux sur la détermination des passages à zéro. Il convient donc, avant d'échantillonner le signal sismique, d'utiliser un filtre passe bas pour ne laisser passer que les fréquences propres aux signaux sismiques (7).

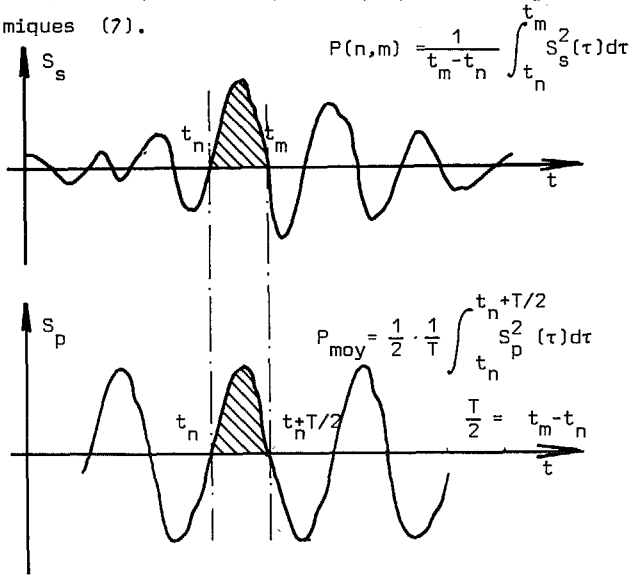

Figure 2 - Identité de la puissance du signal sismique sur une "demi-excursion" et de la puissance moyenne du signal périodique associé.

Après échantillonnage, la composante continue pourra être éliminée par centrage du signal autour de sa valeur moyenne. La figure 3 montre un signal sismique et la puissance correspondante P(n,m) calculée entre les passages à zéro successifs.

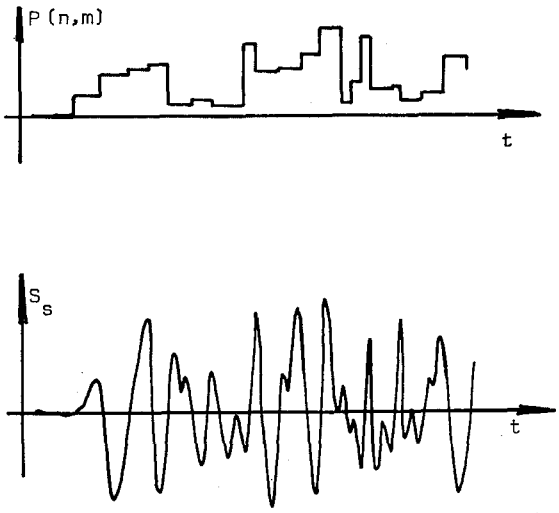

Figure 3 - Signal sismique et variations de l'énergie calculée sur les "demi-excursions".

DETERMINATION DES TEMPS D'ARRIVEE EN SISMOLOGIE
EXPLOSIVE PAR ANALYSE ENERGETIQUE ENTRE LES
PASSAGES A ZERO DU SIGNAL

ANALYSE DES VARIATIONS DE LA PUISSANCE

Les instants d'arrivée des ondes sismiques seront connus s'il est possible de déterminer les intervalles de temps où la fonction P(n,m) est croissante. En effet, comme il a déjà été mentionné plus haut, le début de chaque phase ascendante de la puissance du signal indique l'arrivée du front d'une onde.
Soit P_i, i=1,2,3... la série des puissances calculées sur les demi-excursions adjacentes constituant le signal. Considérons la serie ΔP_i des différences définies par

$$\Delta P_i = P_i - P_{i-1}$$

avec : $P_o = 0$

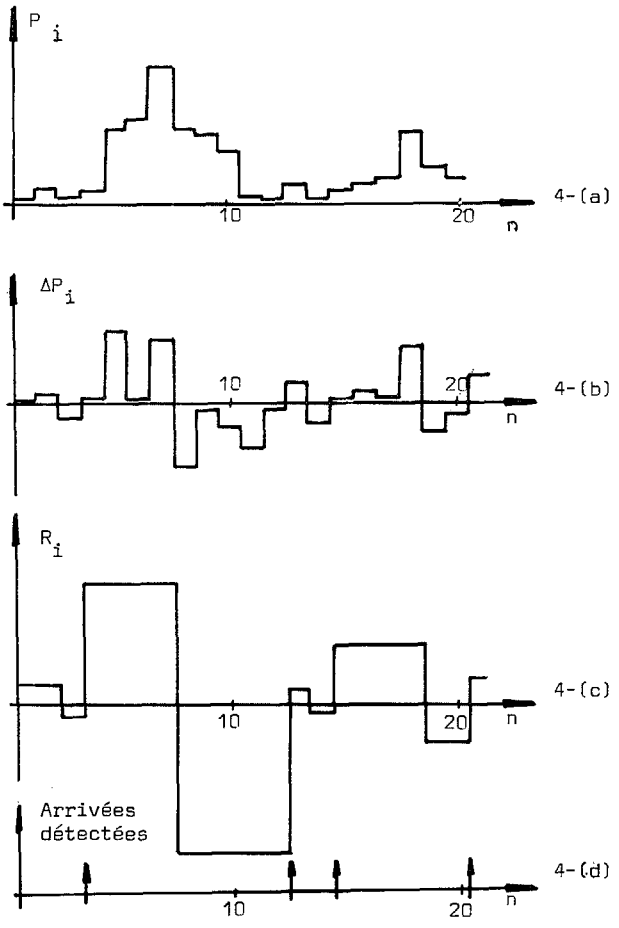

Figure 4- Détermination des temps d'arrivée par analyse de la série des puissances P_i.

La figure 4-(a) montre une série de puissances P_i et la figure 4-(b) la série des ΔP_i correspondants

Les intervalles ascendants et descendants de la puissance sont définis comme les suites ininterompues de valeurs de ΔP_i positives et negatives (cf.Fig.4-(b).

Si q_j indique la position du $j^{ème}$ changement de signe, l'amplitude des variations dans les intervalles ascendants ou descendants, notés A_j, peut être définie par :

$$A_j = \sum_{i=q_{j-1}}^{i=q_j} \Delta P_i$$

A_1 est obtenu à partir de cette définition si on suppose que $q_o = 1$.
Les amplitudes de variations dans les intervalles à variation monotone peuvent être considerées comme une fonction de temps R_i définie par :

$$R_i = A_i \quad \text{pour} \quad i \in \{q_{j-1}, q_j\}$$

Cette fonction R_i permet de reconnaître les intervalles où la puissance croît et ceux où elle décroît. La figure 4-(c) représente cette fonction R_i. Chaque front positif de ce signal correspond au commencement d'une phase ascendante de la puissance et permet d'identifier l'arrivée d'une onde sismique.(cf.Fig.4-(d)).

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET CONCLUSIONS

La procédure proposée a été simulée sur calculateur PDP 11/34 et son efficacité a été testée sur des données sismiques recuellies au Maroc par le Département de Physique de Globe de la Faculté des Sciences de Rabat.

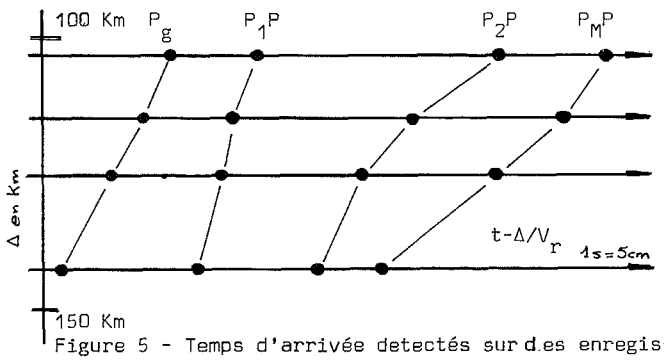

Figure 5 - Temps d'arrivée detectés sur des enregistrements effectués sur 4 sismographes placés le long d'un même profil.

La figure 5 représente les résultats de l'analyse obtenus sur 4sismogrammes enregistrés le long d'un profil de 280 Km, reliant Khouribga à Imintanout dans le sud du Maroc.

Afin d'exploiter de tels signaux, le sismologue a l'habitude de réaliser un assemblage vertical des enregistrements. Il trace en abscisse la distance entre l'enregistreur et le point de tir. D'autre part, tous les enregistrements sont représentés en temps réduit , c'est-à-dire que les ordonnées représentent la quantité $t-\Delta/V_r$, où Δ est la distance du sismographe considéré au point de tir et où V_r est une vitesse moyenne de propagation, dite vitesse de réduction, généralement prise égale à 6 Km/s .

Les résultats présentés sur la figure 5 correspondent à un sous-sol formé de 3 couches de sédiments aux interfaces desquelles se refléchissent les ondes notées P_1P, P_2P et P_MP. L'onde P_g est une onde non réfléchie, directement transmise à l'enregistreur par la partie supérieure de la croûte terrestre (cf. Figure 6).

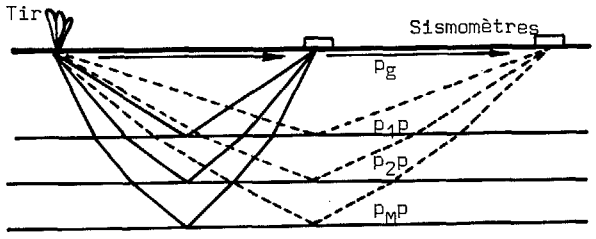

Figure 6 - Trajets des ondes sismiques pour une structure geologique à 3 couches.

Les temps d'arrivée déterminés par la procédure proposée, correspondent à ceux determinés par les sismologues avec un écart absolu toujours inférieur à 0,1 secondes. Il faut toutefois noter que sur la base des enregistrements analysés, cette technique présente un risque de fausse détection de l'ordre de 10% par rapport aux résultats obtenus par les experts(8).

La procédure proposée apporte donc au geophysicien un outil puissant de traitement, nécessitant un faible temps de calcul par rapport aux méthodes de déconvolution, et donnant une précision du même ordre de grandeur que celle obtenue par les experts en sismologie. Cependant il est actuellement encore difficile de déterminer le gain de temps obtenu par un analyste pour tracer le diagramme"temps-distance" de la figure 5 avec l'aide de cette procédure implantée sur calculateur .

Il est toutefois raisonnable de penser que ce travail sera accompli en un temps réduit, le rôle de l'analyste se limitant à la vérification visuelle de la validité des détections.

REFERENCES

/1/ M.H.P. Bott
The interior of the earth
E. Arrold - London (1974).

/2/ K.L. Peacock et S. Treitel
Predictive Déconvolution : Theory and Practice
Geophysics vol.34,n°2 pages 156-169. Avril 1969

/3/ T.J. Ulrych
Applications of homomorphic deconvolution
to seismology
Geophysics, vol.36,pages 650-660. Aout 1971

/4/ V.K. Arya et H.D. Holden
Deconvolution of Seismic Data : An overview
IEEE Geoscience Electronics . GE 16;n°2 pages 95-98
Avril 1978

/5/ Aboutajdine et Al...
Arrival Time Determination in Explosion Seismology
Int. Conf. on Digital Signal Processing
Florence (Italie) Sept. 1978

/6/ R.W. Shafer et L.R. Rabiner
Digital Representation of Speech Signals
Proc. of the IEEE, vol.63,n°4 pages 662-667
Avril 1975

/7/ J. Coulomb et G. Jobert
Traité de geophysique interne
Masson et Cie - Paris 1973

/8/ D. Bensari
Connaissance géophysique du Maroc
Thèse d'Etat, Février 1978, Grenoble France.