

**MISE EN OEUVRE ET VALIDATION
D'ANALYSE TEMPS-FREQUENCE.****APPLICATION A UN ENREGISTREMENT DE SEISME.****J. MARS*** et **H.A. PEDERSEN****

* CEPHAG- ENSIEG
Domaine Universitaire, BP 46
38402 Saint-Martin d'Hères Cedex, France

** LGIT OBSERVATOIRE de GRENOBLE
IRIGM, BP 53 X
Grenoble Cedex, France

RÉSUMÉ

De nombreux signaux issus de la mécanique et des machines tournantes ont déjà été traités par des méthodes d'analyse spectrale non stationnaire. L'utilisation de ces méthodes sur des signaux non stationnaires issus de la sismologie ou de la sismique est intéressante à plusieurs titres. Elle permet d'accéder aux paramètres physiques des ondes dispersives et des lois de propagation. Pour cela, nous utilisons des méthodes temps-fréquence ne faisant pas appel à l'analyse de Fourier pour caractériser le contenu des ondes dispersives. Puis nous effectuons un filtrage permettant d'isoler les différents motifs dans cette représentation. Nous présentons une validation de ce traitement sur des données réelles issues d'un séisme.

I) Introduction.

L'analyse spectrale de signaux non-stationnaires requiert la mise en oeuvre de plusieurs méthodes d'analyse [2] faisant toutes appel à la prise en compte du temps comme paramètre de description [6]. Dans cet article, nous présentons plusieurs méthodes : le spectrogramme (TF à court terme), la méthode de "Lagunas" glissante issue de la méthode de Capon (méthode du maximum de vraisemblance normalisée). Cette dernière méthode ne s'appuie pas sur l'analyse de Fourier contrairement au spectrogramme, mais utilise une information a priori quant à la structure possible des signaux analysés. Originellement établie pour des signaux stationnaires, cette méthode est rendue évolutive par un calcul sur une mémoire courte et glissante sur la durée du signal. L'hypothèse de stationnarité locale sur la longueur de mémoire est alors nécessaire. La méthode de Lagunas est un estimateur de fréquence et apporte peu ou pas d'information sur la puissance des raies [9]. Une représentation temps-fréquence des signaux traités par ces méthodes permet de situer les motifs occupés par chacune des composantes, et donc de pouvoir délimiter leur bande passante et leur durée temporelle.

Nous pouvons alors appliquer à ces résultats un filtrage en vue d'isoler chacun des motifs [5]. Cela revient à suivre la fréquence centrale du motif au cours du temps.

Sur un exemple réel issu d'un séisme enregistré par une station située au Danemark, nous avons pu identifier des ondes de surface (ondes dispersives). L'utilisation des différentes méthodes d'analyse spectrale non stationnaires permet d'avoir une estimation de la représentation conjointe en temps et en fréquence. La mise en oeuvre du traitement temps-fréquence et du filtrage selon les motifs présents

ABSTRACT

Non stationary signal processing methods are usually applied to signals obtained from mechanics and rotating machines. The application of these methods to non stationary signals as seismologic or seismic signals allows us to value physical parameters related to the dispersed waves and to the propagation laws. In a first time, we use non related Fourier time-frequency methods in order to characterize the dispersive waves. In a second time, a filtering is applied to the time-frequency representation in order to obtain the individual objects of the representation. The validation of this processing is shown on reel data of a earthquake.

permettra de séparer les ondes de surface.

II) Représentation temps-fréquence.**II-1) LE SPECTROGRAMME**

Le spectrogramme ou Transformée de Fourier à court terme a toujours été la méthode de représentation temps-fréquence la plus familière en raison de sa simplicité et de sa robustesse. Elle correspond à un filtrage du signal indépendant des données. On considère dans ce cas le signal d'observation comme stationnaire sur les différentes fenêtres successives d'analyse à court terme, de telle sorte qu'une analyse spectrale classique soit localement valable sur les segments temporels successifs. Cette méthode est formulée par :

$$\text{TFCT}(n, \nu) = \left| \sum_{k=-N+1}^{N-1} h(k) x(n+k) e^{-2i\pi\nu k} \right|^2$$

où $x(k)$ est le signal temporel, $h(k)$ la fenêtre appliquée au signal et $\text{TFCT}(n, \nu)$ la densité spectrale à l'instant donné.

Etant irréversible (perte de l'information contenue dans la phase), la méthode du spectrogramme nécessite un compromis entre résolution fréquentielle et temporelle.

II-2) PRINCIPE DE LA METHODE DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE**a) Méthode de Capon**

Le but de la méthode de Capon [3];[7] est de construire un filtre passe-bande autour d'une fréquence ν_k en assurant les deux conditions suivantes :

-a) Le spectre à la fréquence ν_k n'est pas altéré. La puissance de sortie du filtre est égale à la puissance d'entrée



c'est à dire qu'à la fréquence ν_k , la fonction de transfert du

filtre égale l'unité soit $a(\nu_k) = 1$, soit $\underline{A}^H \underline{Z}_k = 1$

où $\underline{A}^T = [A_0, \dots, A_p]$ est la réponse impulsionnelle du

filtre, et $\underline{Z}_k^T = [1, \dots, z_k^{-p}]$ avec $z_k = e^{2i\pi\nu_k \Delta t}$

-b) L'influence des interférences dues aux autres fréquences est minimisée.

Cela se traduit par la puissance $P_{cap} = \underline{A}^H \underline{R}_s \underline{A}$ minimum, et ce à chaque date. \underline{R}_s est la matrice de corrélation du signal de dimension $(p+1)(p+1)$.

La solution de ce problème avec minimisation sous contrainte (coefficient de Lagrange) est :

$$\underline{A}_{cap} = \frac{\underline{R}_s^{-1} \underline{Z}}{\underline{Z}^H \underline{R}_s^{-1} \underline{Z}}$$

et donne la réponse impulsionnelle du filtre de Capon. La puissance de sortie de ce filtre est un estimateur de puissance du signal à la fréquence ν_k .

En généralisant à toutes les fréquences, cet estimateur de puissance s'écrit :

$$P_{cap} = \underline{A}_{cap}^H \underline{R}_s \underline{A}_{cap} = \frac{1}{\underline{Z}^H \underline{R}_s^{-1} \underline{Z}}$$

Dans ce cas, le filtre estimé est adapté au signal à chaque fréquence. Il apparaît clairement que la méthode de Capon est donc un estimateur de puissance du signal à partir de l'estimation de la matrice de corrélation du signal.

b) Méthode de Lagunas

Pour obtenir un estimateur de DSP à partir de Capon, on

normalise la puissance $P_{cap} = \int_{-B_{eq}/2}^{B_{eq}/2} \text{Lag}(n, \nu) |\text{Lag}(n, \nu)|^2 d\nu$ par la bande équivalente du filtre B_{eq} . Si la bande B_{eq} est très

étroite, on considère que le spectre du signal $\text{Lag}(n, \nu)$ est plat dans la bande B_{eq} [8], d'où : $P_{cap} = \text{Lag}(n, \nu) \int_{-B_{eq}/2}^{B_{eq}/2} |\text{Lag}(n, \nu)|^2 d\nu$.

Le spectre s'écrit donc :

$$\text{Lag}(n, \nu) = \frac{P_{CAP}}{\underline{A}^T \underline{A}} = \frac{\underline{Z}^H \underline{R}_s^{-1} \underline{Z}}{\underline{Z}^H \underline{R}_s^{-2} \underline{Z}}$$

L'information spectrale est disponible à la sortie du filtre. Les méthodes Capon et Lagunas, issues de l'analyse spectrale classique, sont rendues "adaptatives" par l'application d'une mémoire glissante le long des données, et nécessitent l'hypothèse de stationnarité locale sur la longueur de la mémoire.

III) Filtrage en temps-fréquence.

L'application des méthodes d'analyse temps-fréquence sur des signaux non stationnaires conduit à une représentation spectrale énergétique faisant apparaître des motifs disjoints dans le plan temps-fréquence, sans qu'il y ait nécessairement une séparation directe ni en temps, ni en fréquence. En supposant connue cette représentation, on cherche alors à isoler les motifs disjoints de façon à caractériser en temps et en fréquence chacun des motifs [5].

III-1) PRINCIPE DU FILTRAGE

Soit un signal $S(t) = S_1(t) + S_2(t-\tau)$, composé de rampes de modulation. Les deux composantes sont telles qu'elles présentent chacune une pente de modulation égale, et telle que l'une d'entre elles soit décalée en temps. La pente de la première composante a pour équation $f(t) = B/T(t) + f_m$, ou B est la bande passante en fréquence, T la durée temporelle de la composante étudiée. On choisit alors une base de projection telle que :

$$M(t) = F_T(t-T/2) \cdot \cos(\Phi(t))$$

$$M_Q(t) = F_T(t-T/2) \cdot \sin(\Phi(t))$$

avec $F_T(t) = 1$ si $t \geq 0$, et 0 si $t < 0$.

avec $\Phi(t) = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) dt$ la phase instantanée.

Chaque composante s'écrit alors :

$S_i(t) = P_i(t) M(t) - Q_i(t) M_Q(t)$ où $P_i(t)$ et $Q_i(t)$ sont les composantes du signal dans cette base. Le signal initial s'écrit $S(t)$:

$$P_1(t)M(t) - Q_1(t)M_Q(t) + P_2(t-\tau)M(t-\tau) - Q_2(t-\tau)M_Q(t-\tau).$$

Le principe est donc de séparer d'une part $P_1(t)$ et $Q_1(t)$ pour recomposer $S_1(t)$, d'autre part $P_2(t)$ et $Q_2(t)$ pour obtenir $S_2(t)$. Pour cela, on multiplie $S(t)$ par le modèle choisit $M(t)$ et $M_Q(t)$. Dans le produit $S(t).M(t)$ et $S(t).M_Q(t)$ on distingue alors :

- des termes HF correspondant aux termes dont la phase est somme de celle de $S(t)$ et $M(t)$ et $S(t).M_Q(t)$.

- des termes BF, relatifs à $P_1(t)/2$ centrés à la fréquence nulle et de largeur $\Delta\nu_1$ et des termes fonction de $t-\tau$, centrés sur αt et de largeur $\Delta\nu_2$. En appliquant un filtre passe-bas de longueur W on peut donc sélectionner $P_1(t)/2$. Cette séparation sera efficace si $\alpha\tau \geq (\Delta\nu_1 + \Delta\nu_2)/2$.

Si on connaît la loi $f_i(t)$ de la composante que l'on veut isoler, le traitement ne pose aucun problème particulier. La principale difficulté du traitement réside dans le fait que cette loi est généralement inconnue. Pour déterminer le modèle, la solution consiste à utiliser l'information contenue dans la représentation temps-fréquence faisant apparaître les différentes composantes du signal étudié. Au vue de cette représentation, on relève les points du modèle choisi. Ces points n'étant pas régulièrement espacés en temps comme en fréquence, on effectue une interpolation par la méthode des splines cubiques pour obtenir un modèle adéquat.

La méthode de filtrage proposé se résume à 3 étapes importantes :

- Elaboration du filtre.
- Multiplication par M et M_Q .
- Filtrage passe-bas de largeur W.

IV) Applications à des séismes.

Les ondes de surface sont de nature dispersive. En sismologie, l'analyse des ondes de surface permet de déduire la vitesse des ondes transversales en fonction de la profondeur. Ceci nécessite un calcul des courbes de dispersion (vitesse de groupe et/ou vitesse de phase en fonction de la période) de l'onde et ensuite une inversion de ces courbes. Une bonne mesure des courbes de dispersion est ainsi essentielle pour l'interprétation des données. Plus particulièrement, le calcul de vitesse de phase d'une onde de surface mesurée entre deux stations sismologiques longue période (10 - 100 secondes) permet de trouver des informations liées aux paramètres physiques du manteau supérieur au-dessous des deux stations.

Les données traitées dans cette étude proviennent de l'enregistrement d'un séisme superficiel localisé à la verticale des îles Andreev (Archipel des Aléoutiennes), par une station sismologique mobile du réseau NARS situé au Danemark. Une bonne mesure de la vitesse de phase nécessite l'identification des ondes de surface et leur séparation des autres ondes sismologiques.

IV-1) REPRESENTATION TEMPS-FREQUENCE

L'acquisition temporelle étudiée a une durée de 3584 secondes, soit 896 points au pas d'échantillonnage de 4 s (figure 2a). Le début de l'enregistrement correspond à un temps d'arrivée de 1941 secondes. La distance, correspondant approximativement à une arrivée du trajet direct de l'onde de surface entre l'épicentre du séisme et la station d'enregistrement, est de 7957 kilomètres. Les résultats de cette étude seront présentés sur un diagramme vitesse de groupe (km/s) - période (sec) et non pas sur une image temps-fréquence classique. Cette procédure permettra de comparer nos résultats, aux images issues d'un traitement classique en sismologie permettant de retrouver la vitesse de groupe (méthode du filtrage multiple [4]). Cette méthode consiste à filtrer le spectre du signal initial par un filtre gaussien afin de sélectionner les ondes de fréquences proches de la fréquence centrale du filtre. L'enveloppe du signal filtré est retrouvée en calculant le module du signal analytique correspondant. La vitesse de groupe est alors liée au temps d'arrivée du maximum de l'enveloppe. Cette technique appliquée sur les données présentées met en évidence sur un diagramme vitesse de groupe-période deux composantes parallèles ayant le même contenu fréquentiel (figure 1). La composante principale a pour caractéristiques une vitesse de groupe maximale de 3.8 km/s pour la période 80 s et une vitesse de groupe minimale de 3.5 km/s pour la période 20 sec. Cet ensemble de paramètres permet d'identifier l'onde comme étant une onde de surface. La deuxième composante ayant des vitesses de groupe moins élevées est très intéressante, car elle peut correspondre à une arrivée retardée de l'onde de surface. Cette arrivée caractériserait dans ce cas un trajet différent du trajet direct, correspondant à une distance supplémentaire de 400 km.

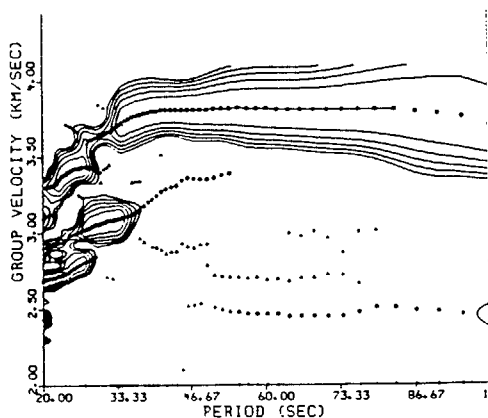


Fig 1: FILTRAGE MULTIPLE

En utilisant la méthode du spectrogramme sur une fenêtre d'apodisation de durée 252 secondes (63 points), et de type Kaiser-Bessel d'ordre 4 nous obtenons des résultats insuffisants quant à la reconnaissance des deux composantes (figure 3). Par contre l'application de la méthode de Lagunas sur les données initiales nous permet de retrouver de façon précise les deux composantes de l'onde dispersive (figure 4).

Les paramètres physiques identifiés sont identiques à ceux trouvés par la méthode du filtrage multiple. La méthode de Lagunas a été appliquée en utilisant un ordre de 8 sur une mémoire de 63 points.

IV-2) RESULTAT DU FILTRAGE

A partir de ces résultats, notre objectif consiste à caractériser et séparer chacune des composantes. Pour cela, nous déterminons deux modèles construits à partir du suivi de chacune des composantes recherchées. La fréquence instantanée des deux modèles après interpolation est présentée sur les figures 5-a et 5-b. Les modèles 1 et 2 correspondent respectivement au trajet retardé et au trajet direct. Les figures 2-b et 2-c représente la contribution temporelle du filtrage des données initiales par chacun des modèles. Le résultat de la méthode de Lagunas sur la différence "données initiales-modèle 1" (figure 6-a), nous permet de caractériser la représentation spectrale énergétique de l'onde de surface correspondant au trajet direct. Le même processus appliqué sur la différence entre données initiales et modèle 2 (figure 6-b) conduit à une caractérisation de l'onde de surface retardée. Une séparation des deux trajets a donc pu être réalisée.

V) Conclusion.

L'utilisation des méthodes temps-fréquence non basées sur l'analyse de Fourier a permis de mettre en évidence la présence de plusieurs ondes de surface dispersives sur des données sismologiques. La construction de modèles, à partir des images obtenues est ainsi facilitée. L'application d'un filtrage dans le plan temps-fréquence selon les modèles choisis permet de caractériser et de séparer chacune des ondes. Cette technique validée par ailleurs sur des simulations, fournit de sérieux espoirs quant à la séparation d'ondes dispersives sismiques et sismologiques, et permettra sans doute de mesurer des vitesses de phase de façon précise.

VI) Bibliographie.

- [1] J. ALLEN, L.A. RABINER, "Unified Approach to Short Time Fourier Analysis and Synthesis". Proc IEEE, 65 n°11, 1977, pp 1558-1564.
- [2] L. BONDANT, J. MARS et N. MARTIN, "Analyse spectrale de signaux non-stationnaires par des méthodes Temps-Fréquence : Fourier, Wigner-Ville lissée, AR et Lagunas évolutifs, méthodes hybrides". 1er congrès Français d'acoustique. Colloque de physique, Colloque C2, Tome 51, n°2, Février 1990, pp 725-728.
- [3] J. CAPON, "High-resolution frequency wavenumber spectrum analysis", Proc. IEEE, 57, 1969, p. 1048-1418.
- [4] A.M. DZIEWONSKIE, A.L. HALES, "Numerical analysis of dispersed seismic waves". Methods in Computational Physics, Vol 11, Academic Press, 1972.
- [5] H. FARGETTON, F. GLANGEAUD et G. JOURDAIN, "Filtrage dans le plan Temps-Fréquence. Caractérisation de signaux UBF et du milieu magnétosphérique". Extrait des annales des Télécommunications. Tome 3, n°3-4, 1979.
- [6] P. FLANDRIN, "Représentations Temps-Fréquence des signaux non stationnaires". Thèse d'état, INPG Grenoble, 1987.
- [7] R.T. LACOSS, "Data adaptive spectral analysis methods" : Geophysics, 36, 1971, p. 661-675.
- [8] M.A. LAGUNAS-HERNANDEZ et A. GASULL-LLAMPADAS, "An improved maximum likelihood method for power spectral density estimation". Proc. IEEE, Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol ASSP-32, n°1, feb 1984 .
- [9] J. MARS, N. MARTIN, J.L. LACOUME et M. DUBESSET, "Analysis of signal over short time windows". Sous presse à Signal Processing.



Fig 2 - a : Data initial

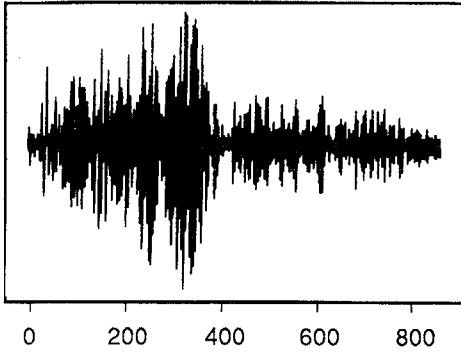


Fig 2 - b : Filtrage 1

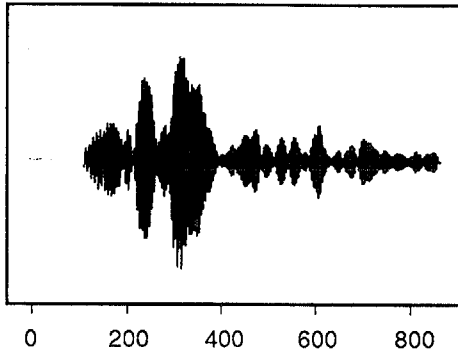


Fig 2 - c : Filtrage 2

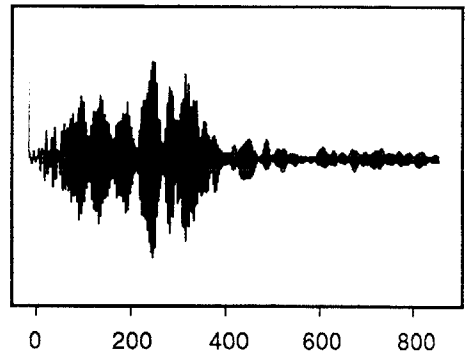


Fig 3 DATA INITIAL : SPECTROGRAMME

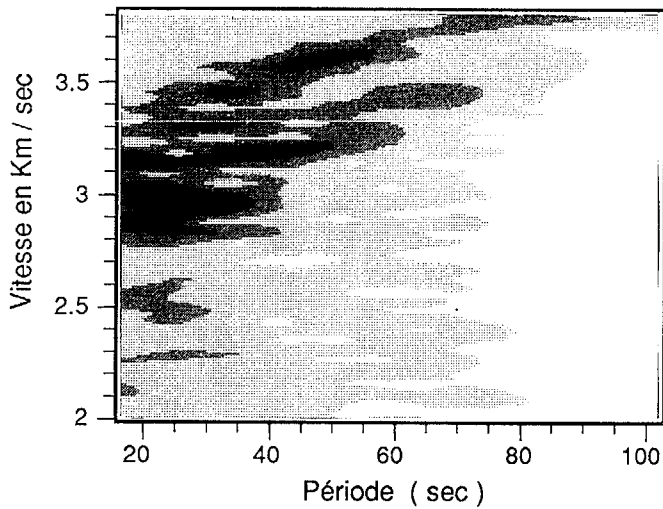


Fig 4 DATA INITIAL : LAGUNAS

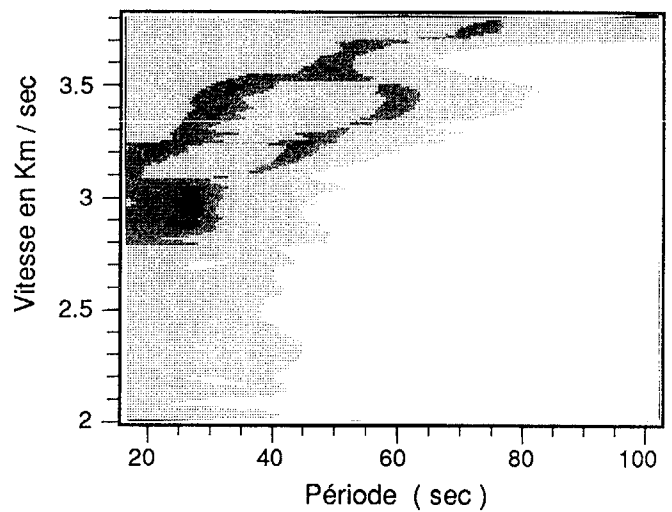


Fig 5 - a MODELE 1 : Fréq. instantanée

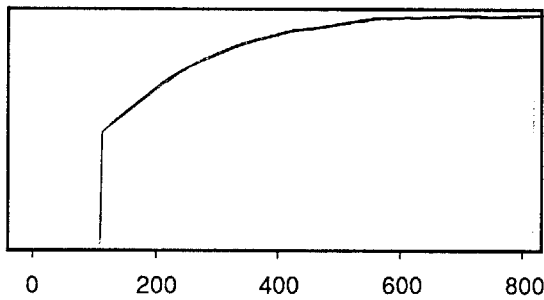


Fig 5 - b MODELE 2 : Fréq. instantanée

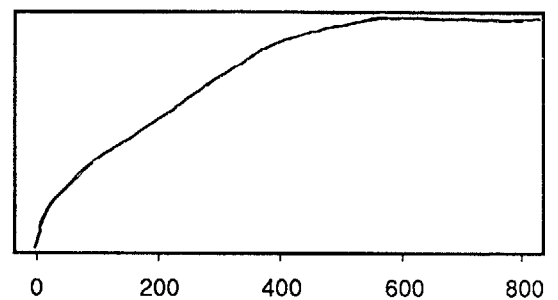


Fig 6 - a DIFFERENCE INITIAL - MODELE 1 LAGUNAS

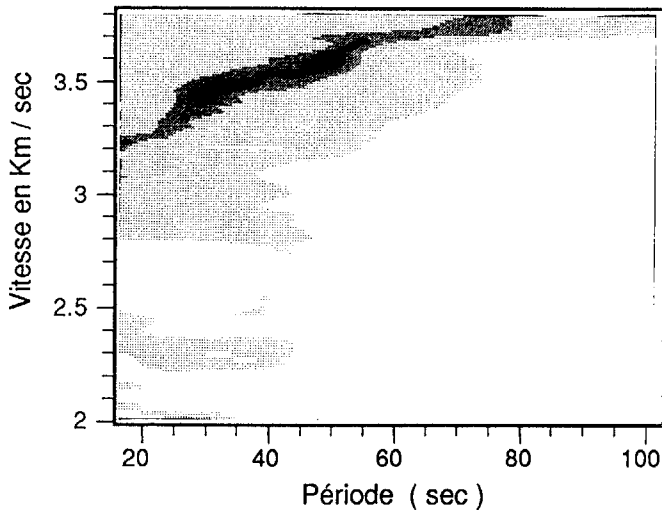


Fig 6 - b DIFFERENCE INITIAL - MODELE 2 LAGUNAS

