

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2011/144215 A2

(43) Date de la publication internationale
24 novembre 2011 (24.11.2011)

PCT

- (51) Classification internationale des brevets : *G01V 1/36* (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale : PCT/DZ2011/000003
- (22) Date de dépôt international : 17 avril 2011 (17.04.2011)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité : 100292 20 mai 2010 (20.05.2010) DZ
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : ENTREPRISE NATIONALE DE GEOPHYSIQUE - ENAGEO- FILIALE DU GROUPE SONATRACH [DZ/DZ]; BP 140, Hassi Messaoud, 30500 Ouargla (DZ).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **CHEGROUCHE, Farid** [DZ/DZ]; Rue Djeddi Ahmed, B.P. 52, Ouled Fayet, 16102 Alger (DZ). **BABAIA, Foudil** [DZ/DZ]; B.P. 140, Hassi Messaoud, 30500 Ouargla (DZ). **MENDER, Mourad** [DZ/DZ]; B.P. 140, Hassi Messaoud, 30500 Ouargla (DZ). **BENCHABANA, Chouaib** [DZ/DZ]; B.P. 140, Hassi Messaoud, 30500 Ouargla (DZ). **GUERCHAOU, Atman** [DZ/DZ]; Batiment 39 A N° 4, Cité Ibn Khaldoun, 35000 Boumerdès (DZ).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD FOR ATTENUATING HARMONIC NOISE IN VIBROSEIS BY MEANS OF REFERENCED TIME-VARIANT FILTERING

(54) Titre : MÉTHODE D'ATTÉNUATION DU BRUIT HARMONIQUE EN VIBROSISMIQUE PAR FILTRAGE TEMPS-VARIANT AVEC RÉFÉRENCE

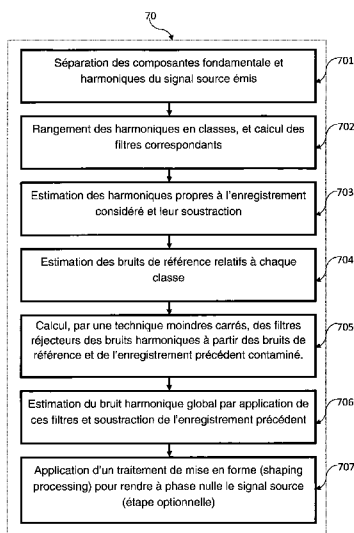


Figure 3

- 701... Separation of the fundamental and harmonic components of the emitted source signal
702... Ordering of the harmonics into classes and calculation of the corresponding filters
703... Estimation of the harmonics specific to the recording in question and subtraction thereof
704... Estimation of the reference noises relative to each class
705... Calculation, using a least squares method, of the harmonic noise rejecting filters from the reference noises and the preceding contaminated recording
706... Estimation of the global harmonic noise by application of said filters and subtraction of the preceding recording
707... Application of a shaping processing in order to adjust the source signal to zero phase (optional step)

(57) Abstract : The invention relates to a method for improving the quality of vibroseismic data, particularly vibroseismic data acquired in slip-sweep mode, by estimation and attenuation of the different harmonic components (see fig. 3). Said components are estimated from the Ground-Force signal using a separation technique with two options, namely least squares or time-frequency, both of which are adapted to the component to be extracted, and the noise is subdivided into classes. The harmonics specific to the recording in question are calculated and subtracted. Finally, the reference noises relative to each class are calculated and re-estimated using a multiple input/output method with dynamic management of the frequency band, which can be achieved using one of three options: global, cascade or multi-reference, followed by subtraction from the contaminated recording. The data quality is improved by means of appropriate source signal shaping.

(57) Abrégé : Méthode d'amélioration de la qualité des données vibrosismiques, particulièrement celles acquises en mode slip-sweep, par estimation et atténuation des différentes composantes harmoniques (voir fig. 3). On estime ces composantes à partir du signal Ground-Force, par une technique de séparation à deux options, moindres carrés, ou temps-fréquence, toutes deux adaptées à la composante à extraire et on subdivise ce bruit en classes. On calcule les harmoniques propres à l'enregistrement considéré et on procède à leur soustraction. On calcule enfin les bruits de référence relatifs à chaque classe et on procède à leur ré-estimation par une méthode à entrées/sorties multiples avec prise en charge dynamique

[Suite sur la page suivante]

WO 2011/144215 A2



NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

- relative à l'identité de l'inventeur (règle 4.17.i)
- relative au droit du déposant de demander et d'obtenir un brevet (règle 4.17.ii)
- relative au droit du déposant de revendiquer la priorité de la demande antérieure (règle 4.17.iii)
- relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)

Publiée :

- sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

Titre de l'invention

Méthode d'atténuation du bruit harmonique en vibrosismique par filtrage temps-variant avec référence

5

Domaine technique auquel se rapporte l'invention

La présente invention décrit une méthode d'amélioration de la qualité des données vibrosismiques. Elle concerne particulièrement l'atténuation des distorsions harmoniques appelées ici bruit harmonique, généré lors du processus d'acquisition des données en sismique pétrolière lorsqu'une source vibratoire est utilisée.

10

Etat de la technique antérieure

15

La méthode vibrosismique consiste à émettre un signal modulé en fréquences où la bande fréquentielle balayée $[f_1, f_2]$ est connue. Le signal émis, appelé sweep, est transmis dans le sol par le biais d'une plaque métallique appelée base plate, sise à l'extrémité inférieure du système vibrosismique, puis réfléchi au niveau des interfaces géologiques, pour être enfin capté en surface afin de former le signal sismique, appelé trace.

20

Pour raison de productivité, différentes méthodes ont été conçues et mises en œuvre ces dernières années, parmi lesquelles on trouve la méthode slip sweep. Cette dernière consiste à émettre une séquence de signaux, un vibreur commençant un nouveau sweep avant que le sweep précédent ne soit terminé.

25

Le temps entre deux sweeps consécutifs appelé slip-time, contrôle la productivité. Plus il est pris court, plus on gagne en productivité. En procédant ainsi, le slip-time n'est pas suffisamment long pour prévenir une interférence entre le bruit harmonique et l'enregistrement précédent. Ce phénomène s'aggrave si ce paramètre est pris trop court par rapport à la longueur du sweep.

30

En méthode conventionnelle, la corrélation par le sweep de référence ou sweep pilote, donne une image des harmoniques, dans le cas d'utilisation d'un up-sweep

($f_2 > f_1$), située dans les temps négatifs par rapport au temps zéro du signal. L'élimination est alors réalisée en prenant comme signal la partie causale de la trace corrélée.

Pour la méthode slip-sweep, comme les harmoniques d'un tir contaminent l'enregistrement précédent, elles ne peuvent donc être éliminées de la même manière que dans le cas de la méthode conventionnelle.

Afin de résoudre ce problème, un grand nombre de travaux ont été consacrés à l'étude, à l'estimation et à l'atténuation des distorsions harmoniques. Ces travaux englobent des techniques d'acquisition ou de traitements informatiques spécifiques orientés tous vers l'atténuation de ces distorsions.

On donne ci-après, une liste non exhaustive de références relatives aux travaux réalisés, ayant pour objectif l'étude et l'atténuation des harmoniques en vibrosismique :

- Sheriff.A.J. & KIM.W.H., (1970). "The effects of Harmonic Distortion in the Use of Vibratory Surface Sources. Geophysics, 35, 234-246.
- Okaya.D, et al, (1992), "Removing vibratory-induced correlation artifacts by filtering in frequency-uncorrelated time space", Geophysics, Vol 57 n°7, 916-926.
- Rozemond.H.J, (1996), "Slip Sweep Acquisition, 66th Annual International Meeting SEG, Expanded Abstracts, 64-67.
- Ras.P et al, (1999), "Harmonic distortion in slip sweep records, 69th SEG Annual Meeting.

Ainsi que les brevets d'invention suivants :

US 4 159 463, US 4 982 374, US 5 550 786, US 6 418 079, US 6 603707, US 6 665 619, US 6 766 256 B2, US 7 050 356, UK 2 447 236, WO 2004/ 031806, WO 2007/130551.

30

Dans les documents WO 2004/ 031806 et UK 2 447 236, leurs auteurs présentent chacun, une méthode d'atténuation des harmoniques dans les données

slip sweep basée sur le calcul du rapport spectral composante harmonique globale sur composante fondamentale et obtenu par estimation des fonctions poids spectraux réduits et son application pour l'estimation du bruit harmonique et sa soustraction.

5 Les deux méthodes peuvent poser un problème de représentativité du filtre : en effet, l'évaluation des harmoniques reposant sur un seul opérateur, pourrait être imprécise, à cause de la nature du signal source (non-stationnarité). La contribution (le poids) de chaque harmonique change d'une trace à une autre, l'estimation de l'opérateur à partir de plusieurs traces non-corrélées (gamme
10 d'offsets), est représentatif de la signature de cette gamme d'offsets, les mesures des GFs ne sont pas entièrement représentatives de la signature des traces lointaines, tout cela fait qu'un opérateur unique calculé de la sorte ne permet pas d'obtenir une estimation précise des harmoniques.

La seconde méthode présente une solution au problème de chevauchement des
15 harmoniques avec la composante fondamentale du tir précédent, éludé par la première méthode, basée sur une calibration du bruit harmonique estimé à l'extérieur de l'intervalle de chevauchement, mais ne résout pas entièrement le problème de représentativité du filtre pour les mêmes raisons que
20 précédemment.

But de l'invention

Comparativement aux méthodes antérieures, qui négligent la variation de l'opérateur d'estimation du bruit harmonique en fonction de l'offset, cette invention
25 propose une méthode d'atténuation du bruit harmonique qui apporte des améliorations dans l'estimation de ce bruit par la mise en œuvre de techniques fines de décomposition du signal émis et d'un nouveau procédé d'atténuation qui utilise une version filtrage temps-variant avec référence et à bande limitée
30 dynamique.

Présentation de l'essence de l'invention

La présente invention se fixe comme objectif d'estimer les différentes composantes harmoniques et de les atténuer, que ce soit sur les données vibrosismiques en général ou bien sur les données slip-sweep en particulier,

5 L'invention tire sa particularité de présenter une grande flexibilité dans le traitement du bruit harmonique réel, grâce à une technique à entrées/sorties multiples d'extraction de bruit avec référence et prise en charge dynamique de la bande fréquentielle. Elle est capable, entre autres, de prendre en charge :

10 - l'atténuation du bruit harmonique propre à un enregistrement donné et en particulier, la composante sub-harmonique.

- l'atténuation du bruit harmonique, indifféremment par rapport à la nature de la loi d'émission des fréquences (up-sweep, down-sweep, linéaire, non-linéaire, ...etc.)

15 - une amélioration des données enregistrées, indépendamment de la technique d'acquisition utilisée en vibrosismique, par une mise en forme du signal source, dans les données corrélées.

Enoncé des figures

20 L'invention est illustrée dans ce qui suit par de figures référencées de 1 à 10, qui en éclairent certains aspects :

- La figure 1 donne le dispositif d'acquisition en méthode vibrosismique, où le signal source est généré de façon séquentielle par les dispositifs vibrosismiques S^i et captés par les géophones G^k .

25 - La figure 2 donne un exemple d'enregistrement slip-sweep avant et après l'opération de corrélation avec le sweep pilote. Dans a), on donne l'enregistrement avant corrélation, appelé enregistrement mère, contenant quatre enregistrements successifs. Sur le coté gauche, on trouve la représentation dans le domaine F-T de cet enregistrement, où le signal
30 émis est formé d'un sweep distordu, contenant deux harmoniques. En b), l'opération corrélation par le sweep théorique, donne quatre

enregistrements successifs similaires à ceux qu'on obtiendrait par acquisition vibrosismique conventionnelle.

- La figure 3 donne l'organigramme de la méthode objet de l'invention.
- La figure 4 explique la technique d'extraction des composantes harmoniques du signal émis, par filtrage adapté. L'illustration montre le cas de l'extraction d'une composante donnée contenue dans un sweep distordu.
- La figure 5 explique la technique d'extraction adaptée des composantes harmoniques, contenues dans le signal émis, dans le domaine F-T. L'illustration montre le cas de l'extraction d'une composante donnée contenue dans un sweep distordu.
- La figure 6 donne le schéma global d'estimation et de soustraction du bruit harmonique, version globale, conformément aux étapes e) et f). Le filtre recherché est calculé par minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre le signal sismique contaminé et la sortie de ce filtre lorsqu'on applique le bruit de référence relatif au bruit harmonique, à l'entrée (figure 6.a). Ensuite, le signal débruité est déterminé par soustraction de ce bruit du signal contaminé (figure 6.b).
- La figure 7 donne l'organigramme de la version en cascade. La figure 7.a donne l'ossature du filtre optimal de réduction du bruit harmonique pour un ordre de composante harmonique donnée. La figure 7.b explique la technique d'élimination en cascade de toutes les harmoniques contenues dans le signal contaminé.
- La figure 8 donne l'organigramme de la version référence-multiple. La figure 8.a donne l'ossature du filtre optimal de réduction du bruit harmonique pour l'ensemble des composantes harmoniques d'entrée. La figure 8.b explique la technique d'élimination de toutes les harmoniques contenues dans le signal contaminé.
- La figure 9 montre un exemple d'atténuation du bruit harmonique par la version globale sur un des enregistrements où l'on a représenté

respectivement les données brutes, les données traitées et enfin le bruit estimé par la technique.

- La figure 10 montre un exemple d'atténuation du bruit harmonique par les versions globale et cascade, où les résultats sont illustrés dans le domaine F-T. L'exemple révèle comment la version cascade atténue de manière progressive les différences composantes du bruit harmonique.

Description détaillée de l'invention

Généralités

Comme montré dans la figure 1, l'unité Décodeur installée sur le camion source, reçoit un signal émis 1 par l'unité Encodeur installée sur l'unité de contrôle et d'acquisition, qui déclenche le générateur du sweep pilote. Ce signal est converti en variation de pression d'huile puis en vibration mécanique qui est alors appliquée au sol par l'intermédiaire de la base-plate 2.

Les signaux $s^1(t)$, $s^2(t)$, ..., $s^N(t)$ 3 émis par les différents camions sources S^1 , S^2 , ..., S^N 4, sont réfléchis au niveau des interfaces géologiques 5, pour être captés en surface par un ensemble de géophones G^1 , G^2 , ..., G^M , 6, pour former le signal sismique, qui sera par la suite échantillonné puis stocké sur support numérique au niveau de l'unité de contrôle et d'acquisition 7.

Dans la figure 2a, on montre le cas où quatre camions source travaillant ensemble, ont transmis dans le sol et de façon séquentielle, quatre signaux $s^1(t)$, $s^2(t)$, $s^3(t)$ et $s^4(t)$, identiques et de longueur SL. Ces signaux, modulés en fréquences et suivant une loi de variation fréquentielle linéaire positive, sont délivrés avec un décalage ST, qui représente le slip-time, donnant ainsi un enregistrement unique très long, appelé enregistrement mère 8, qui englobe quatre enregistrements individuels avec recouvrement.

Le résultat de la corrélation 9 de l'enregistrement mère par le sweep pilote, représenté dans la figure 2b, illustre la séparation en 4 enregistrements de longueur LT, qui feront par la suite l'objet du traitement proposé par l'invention. La figure 2c montre l'image F-T de l'enregistrement mère. Chaque enregistrement

correspond à trois composantes : fondamentale **10** + deux harmoniques **11**.
On notera, entre autres, l'interférence de la composante fondamentale d'un tir avec la première harmonique du tir suivant.

5 Filtre optimal

Le filtrage optimal consiste à trouver le filtre qui permet, pour une entrée $x(t)$, qui représente dans ce qui suit le signal référence, d'obtenir en sortie une réponse $y(t)$ la plus proche possible d'une réponse désirée $d(t)$, au sens des moindres carrés.

Ce filtre est solution de l'équation matricielle suivante :

10

$$\mathbf{R}_{x,x} \bullet \mathbf{H} = \mathbf{r}_{d,x} \quad (1)$$

où $\mathbf{R}_{x,x}$ est la matrice d'autocorrélation du signal de référence $x(t)$, \mathbf{H} le vecteur filtre optimal $h(t)$ et $\mathbf{r}_{d,x}$ le vecteur intercorrélacion signal désiré $d(t)$ -signal de référence $x(t)$.

15

Dans ce cas, la sortie s'écrira :

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (2)$$

20 On peut, également, utiliser l'algorithme adaptatif suivant pour les signaux non-stationnaires :

$$\mathbf{H}^{(k+1)} = \mu \mathbf{r}_{x,d} + (1 - \mu \mathbf{R}_{x,x}) \bullet \mathbf{H}^{(k)} \quad (3)$$

où le facteur de convergence μ doit satisfaire la condition :

25

$$0 < \mu < 2/\lambda_{\max} \quad (4)$$

avec λ_{\max} la valeur propre maximale de la matrice $\mathbf{R}_{x,x}$.

30

Filtre d'estimation du bruit harmonique à partir du modèle de la trace sismique

Appelons $x^k(t)$ le signal enregistré par l'un des géophones G. Ce signal est le résultat de la convolution du signal $s^k(t)$ émis au niveau de la base plate de la source S^k (signal GF), par la fonction de réflectivité $r(t)$ du terrain, qui représente la succession chronologique des coefficients de réflexion des différentes interfaces géologiques rencontrées :

$$x^k(t) = s^k(t)*r(t) + n(t) \tag{5}$$

avec

$$s^k(t) = s_1(t) + s_2(t) + \dots + s_n(t) \tag{6}$$

où $s_1(t)$ est la composante fondamentale supposée être très proche du sweep pilote enregistré $p(t)$, $s_2(t)$, $s_3(t)$, ..., $s_n(t)$ les composantes harmoniques 2,3,...,n, contenues dans le sweep émis et $n(t)$ le bruit aléatoire additif.

Après corrélation par le sweep pilote, et en négligeant la composante relative au bruit aléatoire $n(t)\otimes p(t)$, le signal enregistré devient :

$$z^k(t) = s_1(t)\otimes p(t)*r(t) + s_2(t)\otimes p(t)*r(t) + s_3(t)\otimes p(t)*r(t) + \dots + s_n(t)\otimes p(t)*r(t)$$

où \otimes : désigne l'opération de corrélation. (7)

$z^k(t)$ est un signal non-causal du fait que la corrélation par le sweep de référence donne, dans le cas d'utilisation d'un up-sweep, une image des harmoniques $s_i(t)\otimes p(t)$ pour $i > 1$, située dans les temps négatifs par rapport au temps zéro du signal. Le système d'enregistrement délivre une trace corrélée causale. En procédant ainsi, une grande partie de l'énergie harmonique est éliminée, car la trace corrélée obtenue est alors égale à:

$$y^k(t) = z^k(t)U(t) \approx s_1(t)\otimes p(t)*r(t) \tag{8}$$

30

où $U(t)$ désigne la fonction échelon-unité ou fonction d'Heaviside.

Afin de réaliser le filtrage avec référence, on propose dans cette invention, une nomenclature des harmoniques à extraire sous forme de sous ensembles, appelés classes, pouvant être formées par combinaison :

- de la composante sub-harmonique.
- 5 - des composantes harmoniques d'ordre entier.
- des composantes harmoniques d'ordre fractionnaire

L'algorithme proposé consiste à déterminer le filtre optimal qui, à partir de la composante fondamentale, $s_1(t) \otimes p(t) * r(t)$, donne par application la classe $b(t)$ désirée.

Considérons le cas où $b(t) = s_i(t) \otimes p(t) * r(t)$ (9)

désigne l'harmonique d'ordre i .

Le filtre recherché désigné par H , satisfait l'équation matricielle :

15 $R_{y^k y^k} \bullet H = r_{b,y^k}$ (10)

où $R_{y^k y^k}$ est la matrice d'autocorrélation de la composante fondamentale $y(k)$ et r_{b,y^k} le vecteur intercorrélacion signal fondamental-bruit harmonique.

Or, en valeurs, on a :

20 $R_{y^k y^k}(t) = R_{s_1.s_1}(t) * R_{p.p}(t) * R_{r.r}(t)$ (11a)

$r_{b,y^k}(t) = r_{s_i.s_1}(t) * R_{p.p}(t) * R_{r.r}(t)$ (11b)

Ce qui permet de réécrire l'équation précédente du filtre, à l'aide uniquement des composantes du GF, fondamentale et harmonique d'ordre i :

25 $R_{s_1.s_1} \bullet H = r_{s_i.s_1}$ (12)

Pour le calcul du filtre H , on peut utiliser l'algorithme de Wiener-Levinson. Le bruit harmonique d'ordre i estimé sera donné par :

30 $b_i(t) = y^k(t) * h(t)$ (13)

La version non causale de ce filtre aboutit à une équation de convolution

$$R_{s1.s1}(t)*h(t) = R_{si.s1}(t) \quad (14)$$

5 qui admet dans le domaine fréquentiel, une solution égale au rapport des densités spectrales.

L'algorithme décrit précédemment, présente l'avantage de traiter les harmoniques, une par une, ou par bloc. Le bruit estimé sera ensuite soustrait de la trace elle-
10 même et des traces du point de tir précédent.

Décomposition du GF par filtre adapté :

Afin de calculer le filtre optimal, il est nécessaire de décomposer le signal émis en ses composantes fondamentale et harmoniques (équation 6).

15 La figure 4 montre l'exemple de l'extraction de la composante fondamentale contenue dans un sweep distordu à deux harmoniques.

L'algorithme utilisé, consiste à déterminer un filtre $g(t)$ **51** qui, à partir du signal de référence **52**, p_i d'ordre i , donne par application la composante harmonique d'ordre i du signal GF **54**, en prenant le GF **56** comme signal désiré, l'erreur **58**

20

étant représentée par les autres composantes, soit à résoudre:

$$R_{p_i.p_i} \bullet G = r_{p_i.s} \quad (15)$$

avec

$$25 \quad p_i(t) = a(t) \cdot \cos(i \cdot \phi(t)) \quad (16)$$

où $a(t)$ et $\phi(t)$ désignent respectivement l'enveloppe et la phase instantanée du sweep pilote $p(t)$. Les références **53**, **55**, **57** et **59** donnent, pour une meilleure illustration, les images F-T respectives des références **52**, **54**, **56** et **58**.

30 Cette formulation est adaptée à des signaux stationnaires, cependant les signaux vibrosismiques (sweeps) sont non-stationnaires. Pour le calcul du filtre G , une version du filtre Wiener-Levinson à temps-variant a été alors implémentée. Elle

consiste à travailler sur le signal par fenêtre glissante pour estimer la composante recherchée.

On peut, également, utiliser l'algorithme adaptatif suivant :

$$5 \quad \mathbf{G}^{(k+1)} = \mu \mathbf{r}_{pi.s} + (1-\mu)\mathbf{R}_{pi.pi} \bullet \mathbf{G}^{(k)} \quad (17)$$

où le facteur de convergence μ vérifie la condition $0 < \mu < 2/\lambda_{max}$, avec λ_{max} la valeur propre maximale de la matrice $\mathbf{R}_{pi.pi}$.

10 Décomposition du GF par STFT

Pour la décomposition des composantes du sweep émis, on propose une deuxième variante basée sur la séparation des différentes composantes du sweep dans le domaine F-T, qui nécessite l'utilisation d'une transformation F-T réversible et offrant une bonne résolution. Pour ce faire, on utilisera la transformation STFT (Short Time Fourier Transform). On notera toutefois que cette variante ne se limite pas uniquement à l'usage de la transformation STFT, et peut être appliquée en utilisant toute transformation répondant aux critères cités dans ce paragraphe.

Dans la figure 5, on explique le procédé de séparation et d'extraction des différentes composantes dans le signal émis $s(t)$.

20 Le signal **61** est transformé dans le domaine F-T à l'aide de la transformation STFT:

$$S(t, f) = \int s(u)\psi(t-u)\exp(-2\pi ifu)du \quad (18)$$

où $\psi(t)$ est une fenêtre adaptée au signal et centrée en t . la transformation STFT inverse est égale à :

$$25 \quad s(t) = \frac{1}{\psi(0)} \int S(t, f)\exp(2\pi ift)dt \quad (19)$$

Sur l'image en amplitude $|S(t, f)|$ appelée spectrogramme **62**, on applique un masque $M^i(t, f)$ ou fenêtre bidimensionnelle **63**, adapté à la composante d'ordre i **64** qu'on voudrait séparer puis extraire, le terme phase étant conservé tel quel.

Cette technique présente l'avantage de permettre un calcul du masque de façon automatique, sans avoir besoin de l'expression mathématique de la fréquence instantanée ni des paramètres du sweep pilote, ce calcul se faisant uniquement à partir du sweep pilote enregistré **65** et l'ordre de l'harmonique désirée.

5

Le filtre de séparation de l'harmonique d'ordre i dans le domaine F-T est donné par la formule suivante :

$$M^i(t, f) = \sin \left(\frac{\pi}{2} \times \left[\text{clip}_{[0-1]} \left(\frac{1}{\lambda} \times \frac{|S_{P_i}(t, f)|}{\max(|S_{P_i}(t, f)|)} \right) \right]^\mu \right) \quad (20)$$

où :

10

$S_{P_i}(t, f)$: STFT du signal de référence d'ordre i

Clip : Fonction d'écrêtage

λ : Seuil d'écrêtage compris entre 0 et 1.

μ : Régulateur de rampe, positif.

15 La composante harmonique $s_i(t)$ d'ordre i du signal émis **66** est donnée alors par l'équation :

$$s_i(t) = \text{STFT}^{-1} [M^i(t, f) \times \text{STFT}[s(t)]] \quad (21)$$

20 La figure 5 montre l'exemple de l'extraction de la composante fondamentale contenue dans un sweep distordu.

Cette étape d'extraction à deux options, présente la particularité, grâce aux variantes proposées dans les algorithmes de calcul, d'être bien adaptée aux signaux modulés en fréquences de type sweep. En outre, elle permet d'extraire les différentes composantes, dans un schéma en cascade, ou le signal GF pris
25 comme signal désiré, est réadapté par soustraction de la composante estimée dans la phase précédente, ce qui rend la discrimination entre la nouvelle composante à extraire et le reste, plus aisée.

Filtrage par méthodes à entrées/sorties multiples :

Lors de la propagation et à cause de non stationnarité du sweep il peut exister un phénomène de distorsion non stationnaire qui rend le signal émis utilisé pour le traitement différent du signal dans la trace (variation en fonction du temps sur la même trace et en fonction de l'offset) par conséquent les filtres calculés de manière conventionnelle à partir des GFs ne sont pas entièrement représentatifs de toutes les traces.

Le signal enregistré au niveau de vibrateurs, utilisé dans le calcul du filtre, ne représente pas fidèlement le vrai signal émis pour la raison essentielle suivante :

- L'utilisation d'un signal moyen de plusieurs vibrateurs représentant le même point de tir, comme signal émis, qui élude les imprécisions dues à:
 - Un manque de répétitivité dans le signal émis.
 - Une réflectivité différente pour chaque vibrateur du même groupe.

Par conséquent, l'utilisation du GF comme signal émis, peut donner une estimation du bruit $b(t)$, imprécise où une simple soustraction laissera un résidu, qui peut être parfois très énergétique par rapport au signal utile, particulièrement pour la composante HF de ce résidu.

Dans cette invention, on propose une soustraction adaptative appliquée à chaque ordre d'harmonique séparément, c'est à dire harmonique par harmonique avec prise en charge dynamique de la bande fréquentielle. Ceci est justifié par le fait que les distorsions négligées, diffèrent d'une harmonique à une autre, et le traitement proposé permet d'éliminer efficacement, le bruit désiré $\hat{b}(t)$ de la trace précédente $\hat{y}_{k-1}(t)$, soit :

$$\hat{y}^{k-1}(t) = y^{k-1}(t) + \hat{b}(t)$$

avec

$\hat{y}^{k-1}(t)$: la trace contaminée par les bruits harmoniques de la trace $y^k(t)$

$y^{k-1}(t)$: la trace débruitée.

$\hat{b}(t)$: le bruit harmonique provenant de la trace $y^k(t)$ du point de tir suivant.

L'algorithme proposé consiste à déterminer le filtre optimal $w(t)$ qui, à partir de la classe harmonique $b(t)$ comme bruit de référence, donne par application, un signal qui représente fidèlement les distorsions harmoniques $\hat{b}(t)$.

- 5 Selon l'équation (1), Le filtre recherché désigné par \mathbf{W} , satisfait l'équation matricielle :

$$\mathbf{R}_{b,b} \bullet \mathbf{W} = \mathbf{r}_{b,\hat{y}} \quad (22)$$

- où $\mathbf{R}_{b,b}$ est la matrice d'autocorrélation du bruit de référence et $\mathbf{r}_{b,\hat{y}}$ le vecteur
10 d'intercorrélation bruit de référence-signal contaminé. Donc, la trace débruitée devient :

$$y^{k-1}(t) = \hat{y}^{k-1}(t) - b(t) * w(t) \quad (23)$$

- Pour le calcul du filtre \mathbf{W} , une version du filtre Wiener-Levinson à temps-variant
15 avec bande passante à limitation dynamique, a été implémentée. Elle consiste à travailler sur le signal par fenêtre glissante pour estimer le bruit.

On peut, également, utiliser l'algorithme adaptatif suivant :

$$\mathbf{W}^{(k+1)} = \mu \mathbf{r}_{b,\hat{y}} + (1 - \mu \mathbf{R}_{b,b}) \mathbf{W}^{(k)} \quad (24)$$

20

où le facteur de convergence μ doit satisfaire la condition $0 < \mu < 2/\lambda_{\max}$, avec λ_{\max} la valeur propre maximale de la matrice $\mathbf{R}_{b,b}$.

Manière dont l'invention est susceptible d'application

25

Dans le cas d'enregistrements slip-sweep corrélés, la méthode objet de cette invention, réalise l'atténuation du bruit harmonique en 7 étapes **70** :

Pour ce faire, et dans le cas d'enregistrements slip-sweep corrélés, la technique objet de cette invention, procède à l'atténuation du bruit harmonique en 7 étapes :

30

- 1) On procède de façon fine à la séparation **701** des composantes fondamentale et harmoniques dans le signal source émis, soit par une méthode moindres carrées ou bien par une méthode temps-fréquences, toutes deux adaptées.
- 5 2) On procède au rangement **702** des harmoniques extraites sous forme de sous ensembles, appelés classes puis au calcul des filtres correspondants.
- 3) On procède à l'estimation des harmoniques propres **703** à l'enregistrement considéré et leur soustraction.
- 4) On estime les bruits de référence **704** relatifs à chaque classe dans le
10 signal émis à partir du signal obtenu dans l'étape 3).
- 5) On calcule, par une méthode à entrées/sorties multiples, les filtres réjecteurs **705** des bruits harmoniques à partir des bruits de référence obtenus dans l'étape 4) et l'enregistrement précédent contaminé (dans le cas d'un up sweep).
- 15 6) On applique ces filtres pour estimer le bruit harmonique global **706** qui sera soustrait de l'enregistrement précédent afin d'obtenir le signal non bruité.
- 7) On peut appliquer, comme option, à la trace fondamentale, un traitement de mise en forme (shaping processing) **707** pour rendre à phase nulle, le signal source.

20

L'algorithme proposé, en subdivisant les composantes du bruit harmonique en classes, tel que décrit précédemment, permet de traiter les harmoniques, une par une, ou par bloc, selon l'une des trois options suivantes :

25

- 1- option globale
- 2 - option cascade
- 3 - option multi-référence

L'option globale illustrée par les figures 6a et 6b, consiste à :

30

- 1) Constituer une classe unique renfermant l'ensemble des composantes harmoniques significatives.

- 2) Estimer le bruit harmonique de référence correspondant à la classe considérée.
- 3) Calculer le filtre optimal d'estimation du bruit harmonique
- 4) Appliquer ce filtre sur le bruit de référence pour estimer le bruit harmonique, puis soustraire le résultat, des données contaminées enregistrées et corrélées.

L'option en cascade illustrée par les figures 7a et 7b, est une méthode multicouches (multi-layers) avec réadaptation de l'entrée, qui consiste à :

- 1) Extraire et de manière individuelle, toutes les composantes significatives pour constituer les classes de référence 1 à n-1 correspondantes.
- 2) Estimer les bruits harmoniques de référence correspondants à chaque classe considérée.
- 3) Calculer le filtre optimal d'estimation du bruit harmonique de la 1^{ère} classe.
- 4) Appliquer ce filtre sur le bruit de référence correspondant pour estimer le bruit harmonique, puis soustraire le résultat, des données contaminées enregistrées et corrélées.
- 5) Prendre comme données contaminées le résultat de l'étape 4) et réitérer les étapes 3) à 4) jusqu'à élimination de toutes les composantes harmoniques des classes 1 à n-1.

L'option multi-référence illustrée par les figures 8a et 8b, est une méthode d'atténuation des interférences à entrées multiple (multi-inputs interference canceling), qui consiste à :

- 1) Extraire et de manière individuelle, toutes les composantes significatives afin de constituer les classes de référence correspondantes.
- 2) Estimer les bruits harmoniques de référence correspondants à chaque classe considérée.

- 3) Constituer une classe de référence, formée par les $n-1$ classes placées en cascade et dans l'ordre naturel.
- 4) Calculer le filtre optimal d'estimation du bruit harmonique correspondant à la référence construite précédemment.
- 5) Appliquer ce filtre sur les bruits de référence pour estimer les bruits harmoniques, puis soustraire les résultats, des données contaminées enregistrées et corrélées.

Réduction des harmoniques propres à l'enregistrement considéré :

10 Dans certains cas, la composante sub-harmonique (harmoniques d'ordre $k < 1$) est énergique. Leur temps d'occurrence étant positif, les bruits relatifs à la composante sub-harmonique de l'arrivée première, vont se superposer sur le signal utile (réflexions).

De plus, l'estimation du bruit harmonique, (équation 7), nécessite la disponibilité de la composante fondamentale de la trace corrélée, qui est supposée être la dernière trace enregistrée ou la trace déjà débruitée.

Ceci suppose que les traces corrélées dans une acquisition conventionnelle ne contiennent pas de bruit harmonique. Bien qu'une grande partie de ce bruit ait été éliminé par troncature de la partie non causale de la trace, (équation 8), il en subsiste toujours une fraction dans la trace. Une meilleure estimation des bruits harmoniques affectant le point de tir précédent, peut être faite à partir de la vraie composante fondamentale de la trace sismique. La procédure de débruitage consiste à estimer le bruit harmonique en appliquant à la trace corrélée, un filtre H calculé à l'aide de la classe contenant, entre autres, la composante sub-
20 harmonique. Le bruit estimé est ensuite soustrait pour obtenir la composante fondamentale optimisée.

Le traitement mise en forme du signal ou shaping processing

Ce traitement consiste à rendre le signal source dans les données corrélées, à phase nulle en utilisant le filtre $h(t)$ qui a permis, à partir du signal pilote enregistré
30 $p(t)$, d'extraire la composante fondamentale dans le signal GF. En convoluant, les enregistrements corrélés obtenus avec ce pilote comme signal source originel, par

ce filtre, on obtient des données où le signal source est alors égal à l'autocorrélation de la composante fondamentale du signal GF. De la même façon, les données où le signal source est égal à l'autocorrélation du signal pilote, sont facilement calculables.

5

Les revendications

1. Méthode d'amélioration de la qualité des données vibrosismiques, particulièrement celles acquises en mode slip-sweep, par atténuation du bruit harmonique, en estimant les différentes composantes harmoniques par des méthodes à entrées/sorties multiples, dont les entrées sont les composantes harmoniques de référence et les sorties les composantes harmoniques adaptées au bruit réel, avec prise en charge dynamique de la bande fréquentielle et mise en forme appropriée du signal source, dans ces données.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que les méthodes à entrées/sorties multiples donnent à partir des bruits harmoniques de référence de la trace actuelle et la trace précédente contaminée comme entrées, les bruits harmoniques réels et la trace précédente filtrée comme sorties.
3. Procédé selon les revendications 1 et 2, caractérisé en ce que le bruit harmonique est subdivisé en classes, correspondant aux bruits harmoniques de référence comme entrées et aux bruits harmoniques réels comme sorties et pouvant être formées par combinaison :
- de la composante sub-harmonique.
 - des composantes harmoniques d'ordre entier.
 - des composantes harmoniques d'ordre fractionnaire.
4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que les méthodes à entrées/sorties multiples d'estimation du bruit harmonique et sa soustraction de l'enregistrement précédent contaminé, peuvent être réalisées en utilisant une parmi les trois versions temps-variant proposées : globale, cascade et référence-multiple.

5. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que la procédure de soustraction temps-variant version globale estime et enlève, de manière globale, le bruit relatif à la classe renfermant l'ensemble des composantes harmoniques.
- 5 6. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que la procédure de soustraction temps-variant version cascade est une méthode multicouches (multi-layers) avec réadaptation de l'entrée qui estime et enlève, un par un, et de manière récursive les bruits relatifs à chaque classe considérée.
- 10 7. Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que la procédure de soustraction temps-variant version référence-multiple est une méthode d'atténuation des interférences à entrées multiple (multi-inputs interference canceling) qui estime et enlève, de manière globale, le bruit relatif à l'ensemble des classes considérées simultanément.
- 15
8. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que l'estimation des bruits de référence relatifs à chaque classe se fait par convolution de la composante fondamentale de la trace actuelle et du filtre correspondant à la classe, ou bien par multiplication des spectres de cette composante et du filtre dans le domaine
- 20 fréquentiel.
- Le calcul dans le domaine temporel des filtres correspondants est fait en résolvant l'équation suivante :

$$R_{s_1, s_1} * H = r_{s_1, s_1}$$

- 25 où : R_{s_1, s_1} est la fonction d'autocorrélation de la composante fondamentale du signal émis et r_{s_1, s_1} la fonction d'intercorrélacion composante fondamentale-classe harmonique du signal émis.
- Ces filtres peuvent aussi être calculés dans le domaine fréquentiel.

9. Procédé selon les revendications 3 et 8, caractérisé en ce que l'extraction des composantes fondamentale et harmoniques du signal émis, peut se faire selon l'une des deux méthodes proposées :

- Filtrage temps-variant avec référence
- 5 - Transformation dans le domaine F-T.

10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que les références p_i utilisées pour l'extraction dans les deux options, sont basées sur le sweep pilote enregistré, avec $p_i(t)$ le signal de référence d'ordre i , écrit comme suit :

10

$$p_i(t) = a(t) \cos(i \cdot \phi(t))$$

où $a(t)$ et $\phi(t)$ représentent respectivement l'enveloppe et la phase instantanée du sweep pilote enregistré $p(t)$.

15

11. Procédé selon les revendications 9 et 10, caractérisé en ce que le filtre optimal temps-variant avec référence, recherché, qui, à partir du signal p_i , donne par application la composante harmonique d'ordre i du signal émis $s(t)$, satisfait l'équation :

20

$$\mathbf{R}_{p_i, p_i} \bullet \mathbf{G} = \mathbf{r}_{p_i, s}$$

où : \mathbf{R}_{p_i, p_i} est la matrice d'autocorrélation du signal de référence et $\mathbf{r}_{p_i, s}$ le vecteur intercorrélant signal de référence - signal émis.

25 12. Procédé selon les revendications 9 et 10, caractérisé en ce que l'image dans le domaine F-T d'une composante donnée à extraire, est obtenue par application, sur l'image globale du signal émis, d'un masque ou fenêtre bidimensionnelle (F, T) adapté de façon automatique à cette composante, et ce, quelle que soit sa nature.

30

Pour une composante d'ordre i , ce masque est donné par la formule suivante :

$$M^i(t, f) = \sin\left(\frac{\pi}{2} \times \left[\text{clip}_{[0,1]} \left(\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{|S_{p_i}(t, f)|}{\max(|S_{p_i}(t, f)|)} \right) \right]^\mu\right)$$

où $S_{p_i}(t, f)$: STFT du signal de référence d'ordre i

5 Clip : Fonction d'écrêtage

λ : Seuil d'écrêtage compris entre 0 et 1.

μ : Régulateur de rampe, positif.

Ce masque est appliqué sur le spectrogramme du signal, la composante phase étant gardée sans modification.

10

13. Procédé caractérisé en ce que l'estimation du bruit harmonique propre à l'enregistrement considéré est mise en œuvre par l'application à la trace corrélée, d'un filtre H calculé à l'aide de la classe contenant, entre autres, la composante sub-harmonique. Le bruit estimé est ensuite soustrait pour obtenir la composante fondamentale de la trace.

15

14. Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce que la trace fondamentale peut aussi subir un traitement de mise en forme (shaping processing) pour rendre à phase nulle, le signal source dans la trace.

20

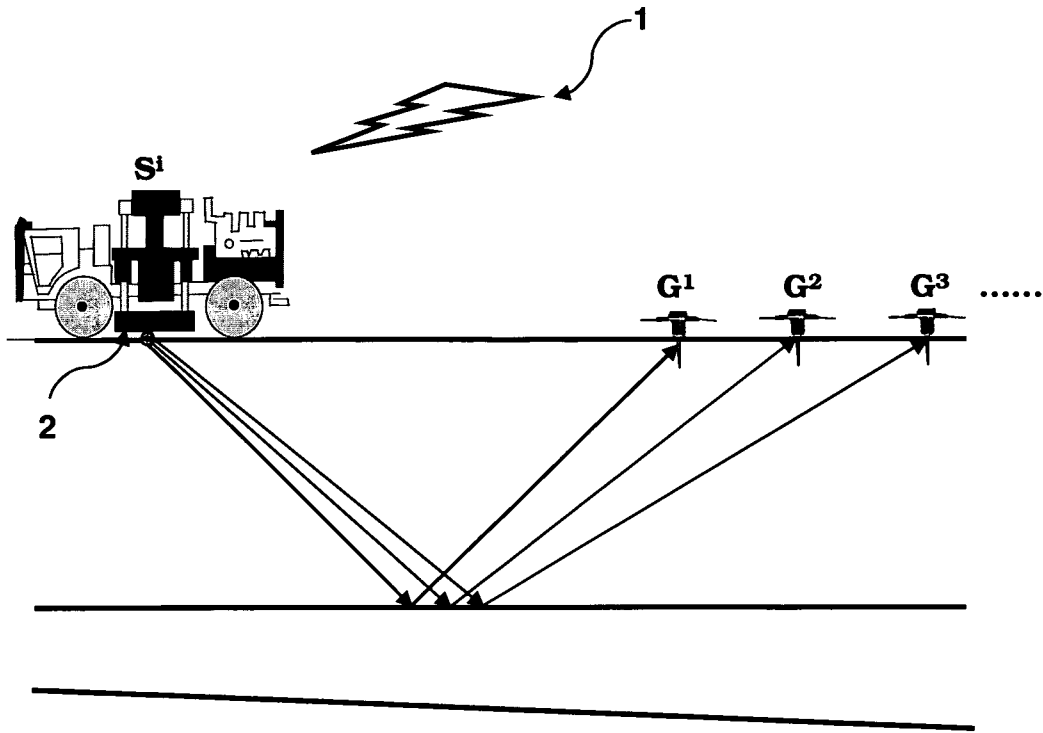


Figure .1a

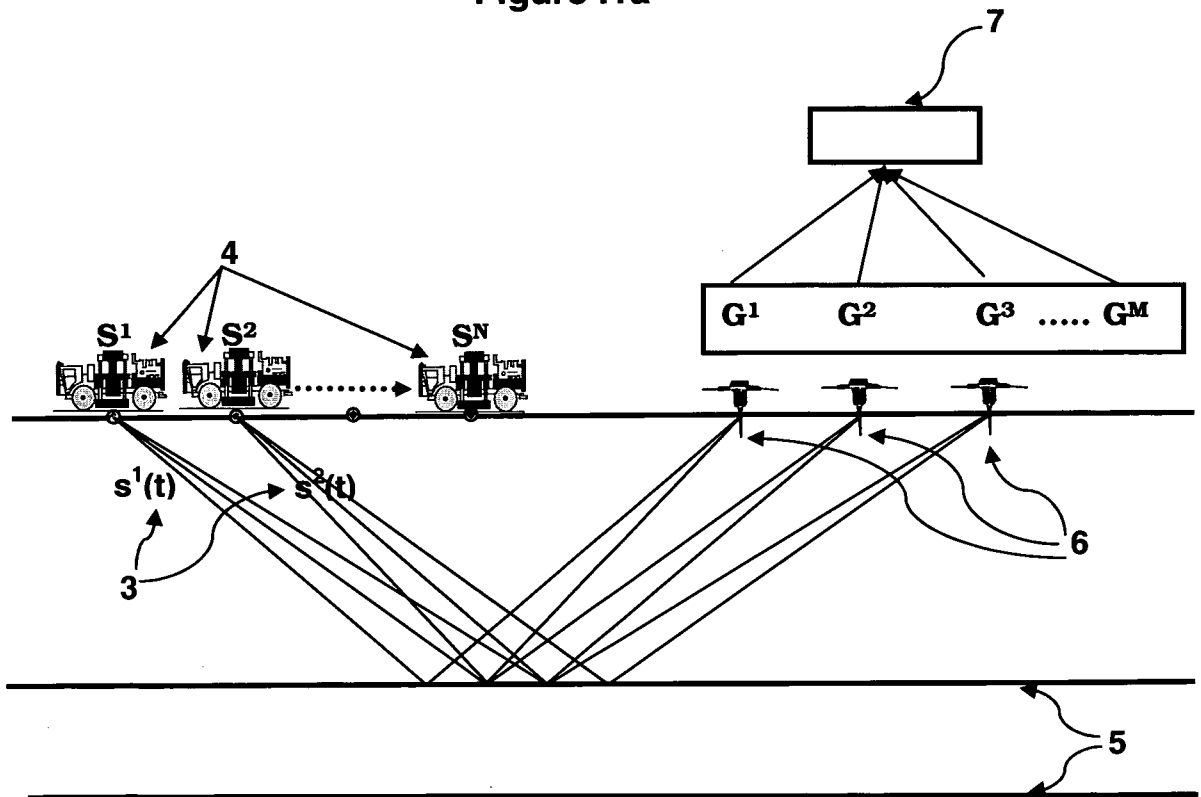


Figure .1b

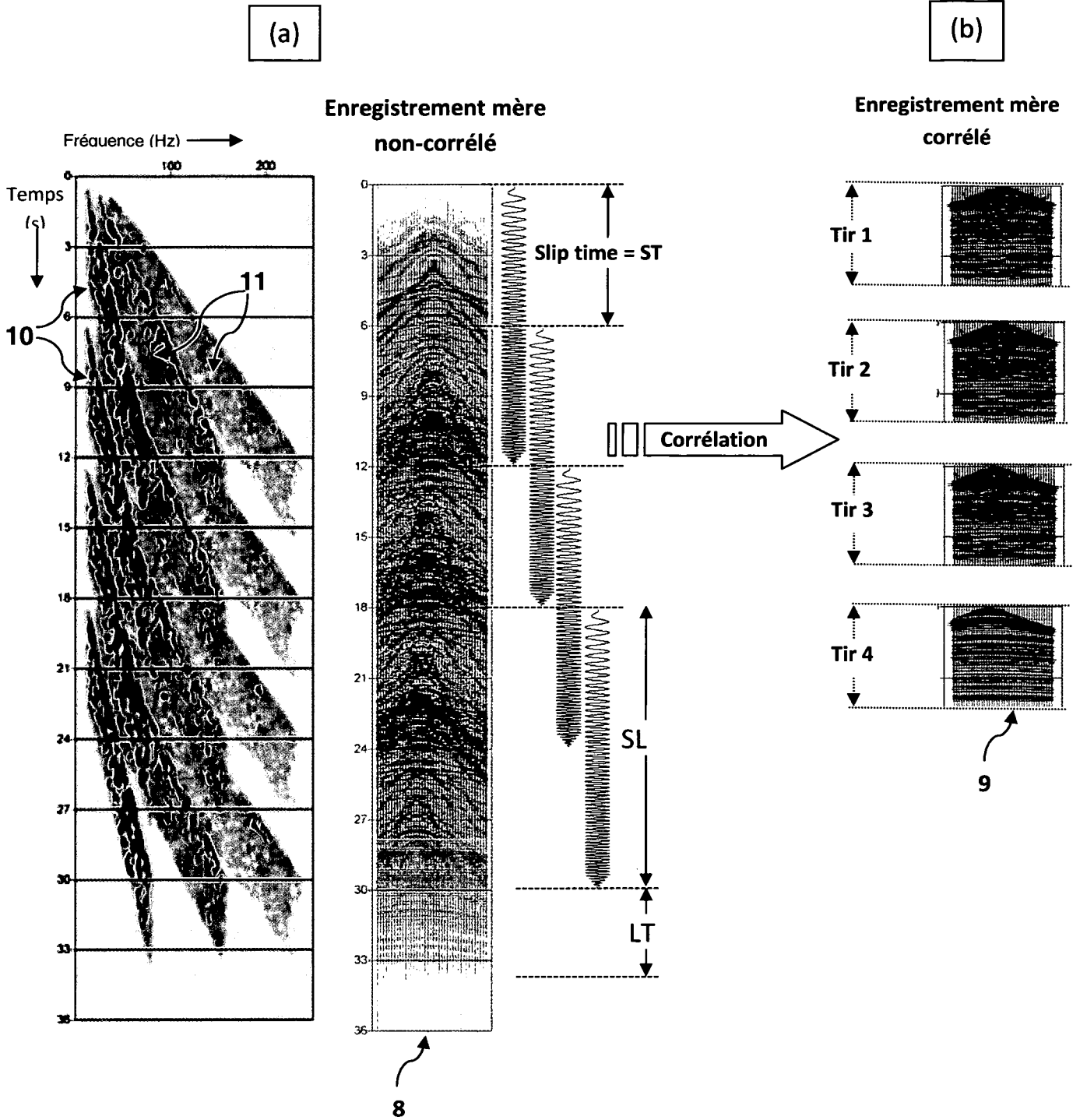


Figure .2

70

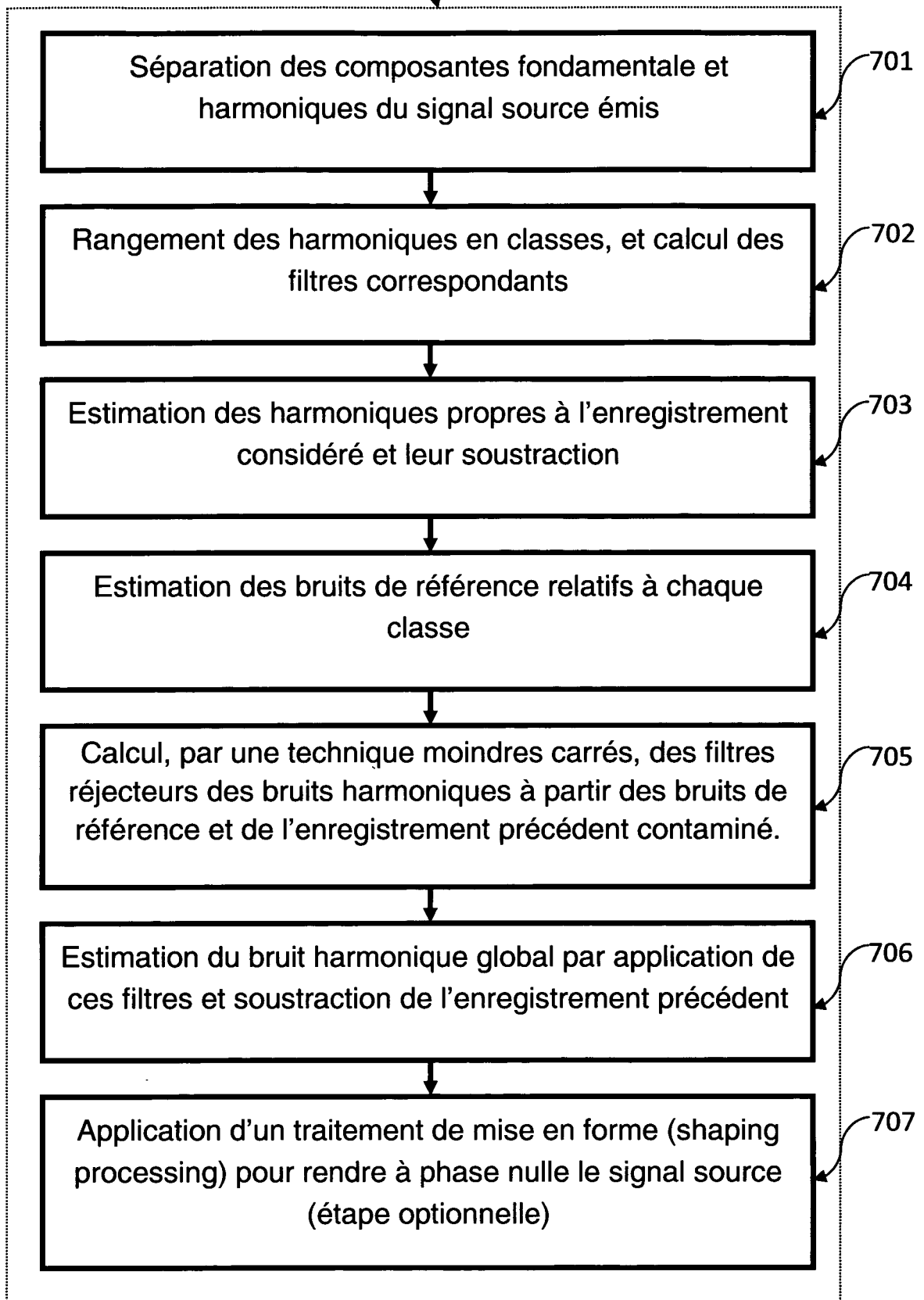


Figure .3

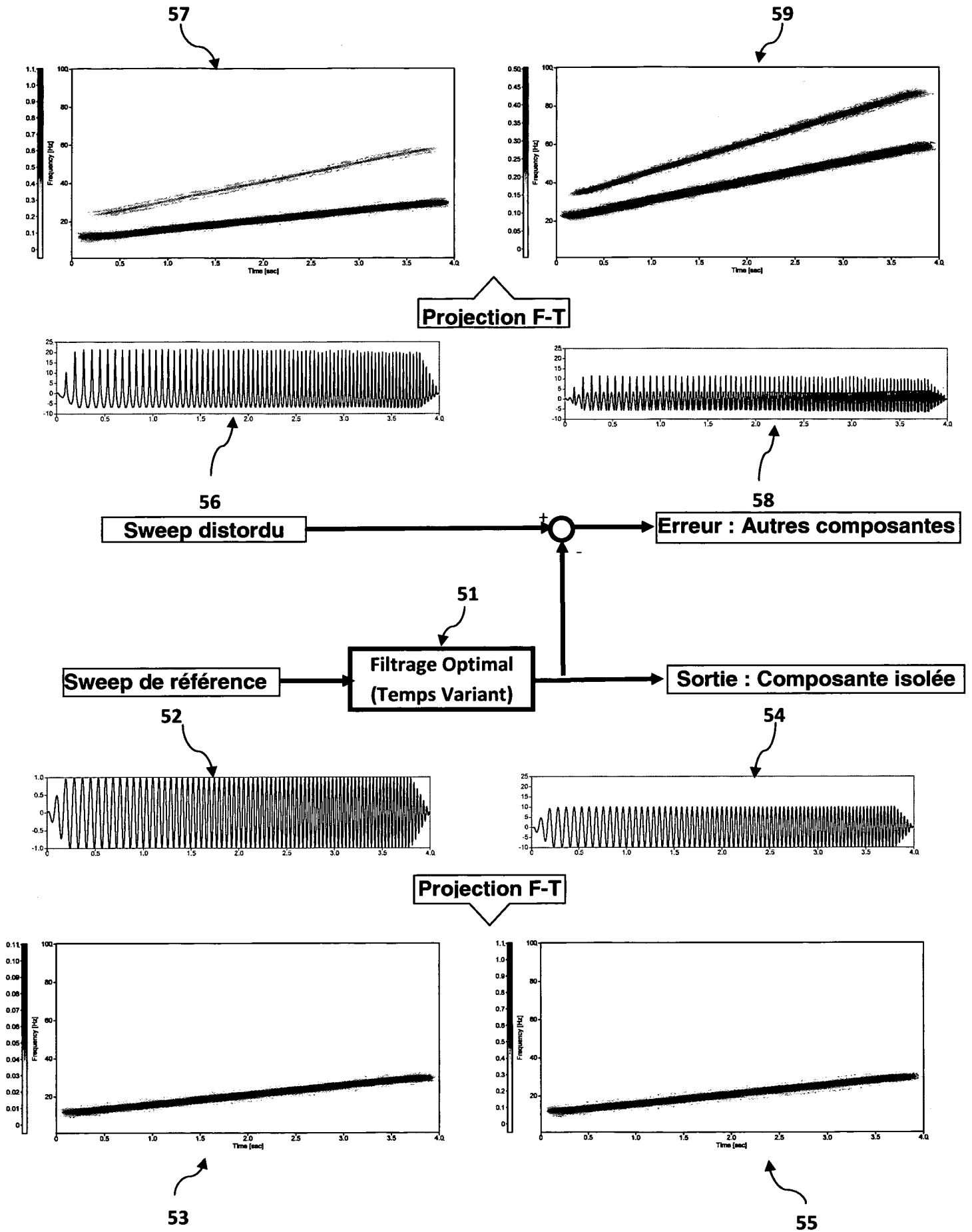


Figure.4

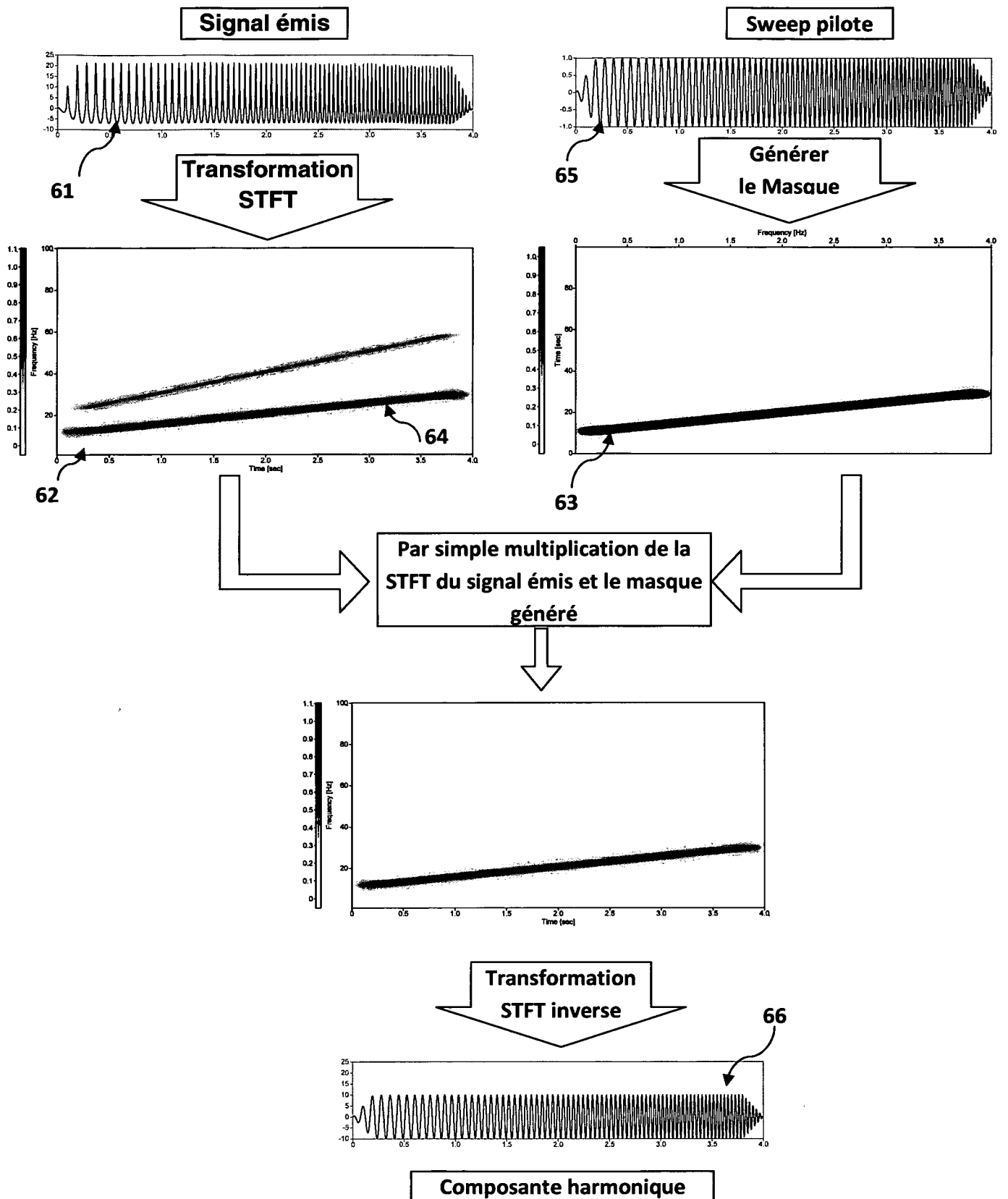


Figure .5

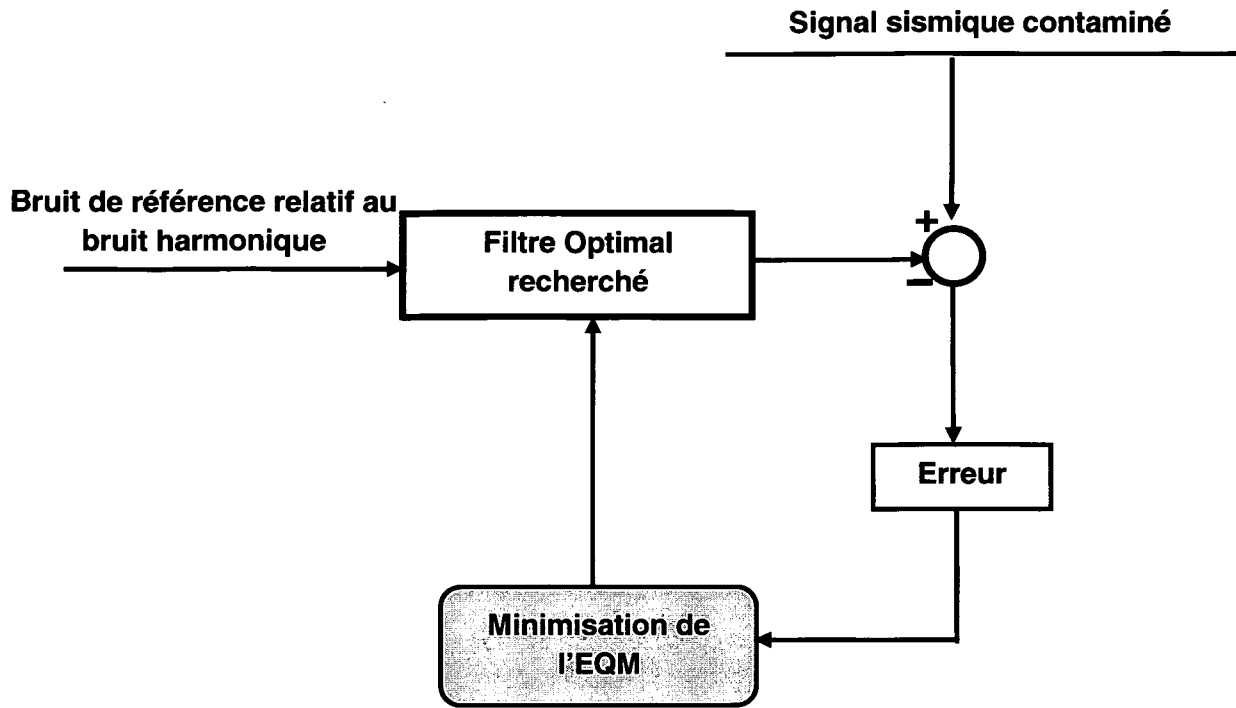


Figure .6a

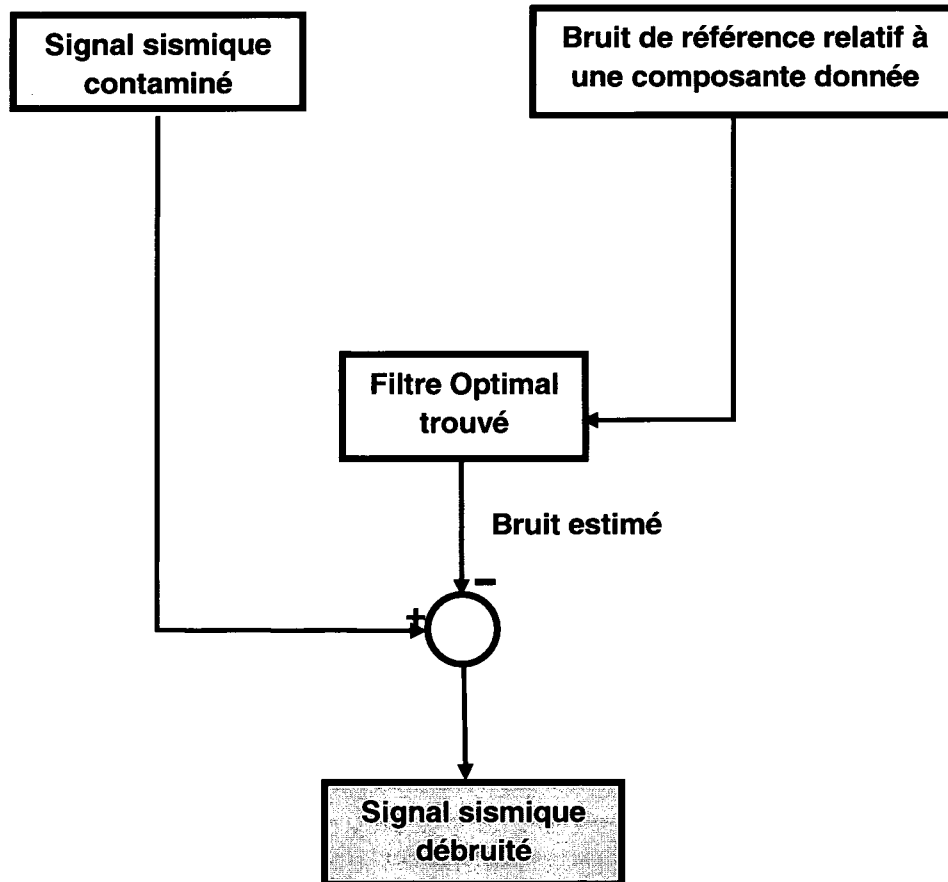


Figure .6b

Bruit de référence relatif à une
composante donnée

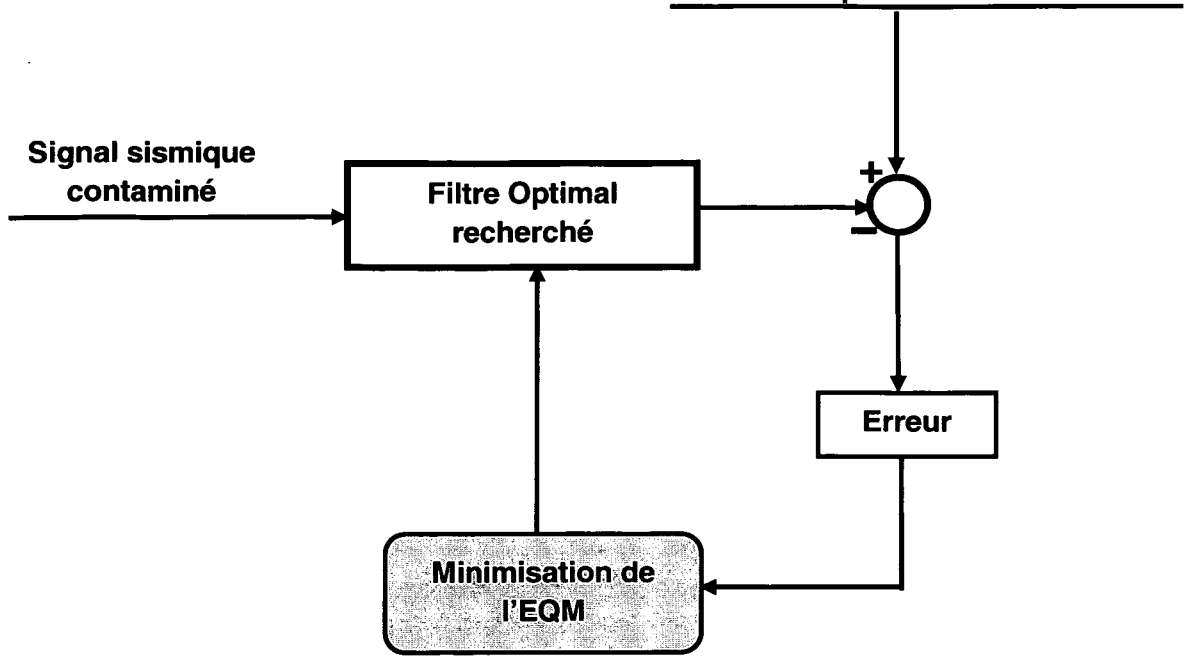


Figure .7a

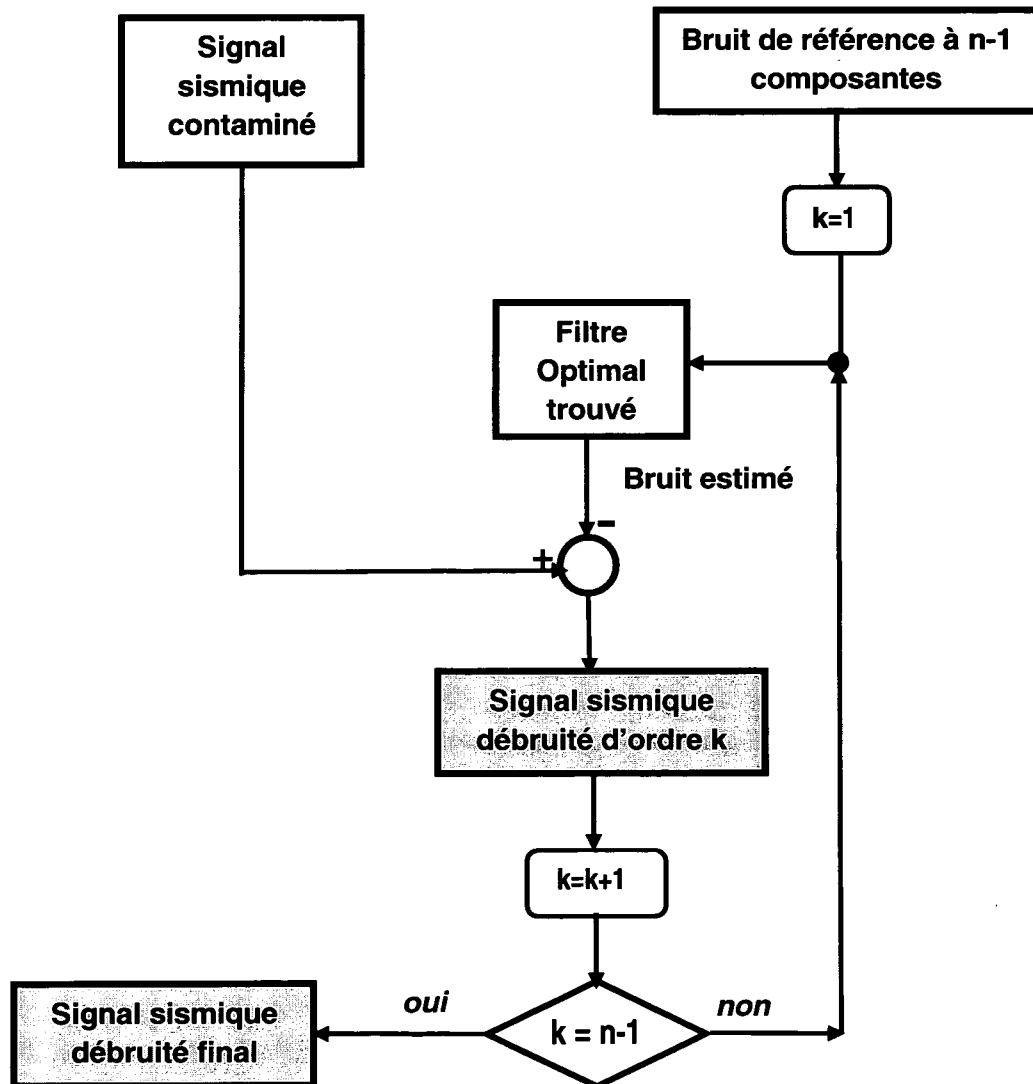


Figure .7b

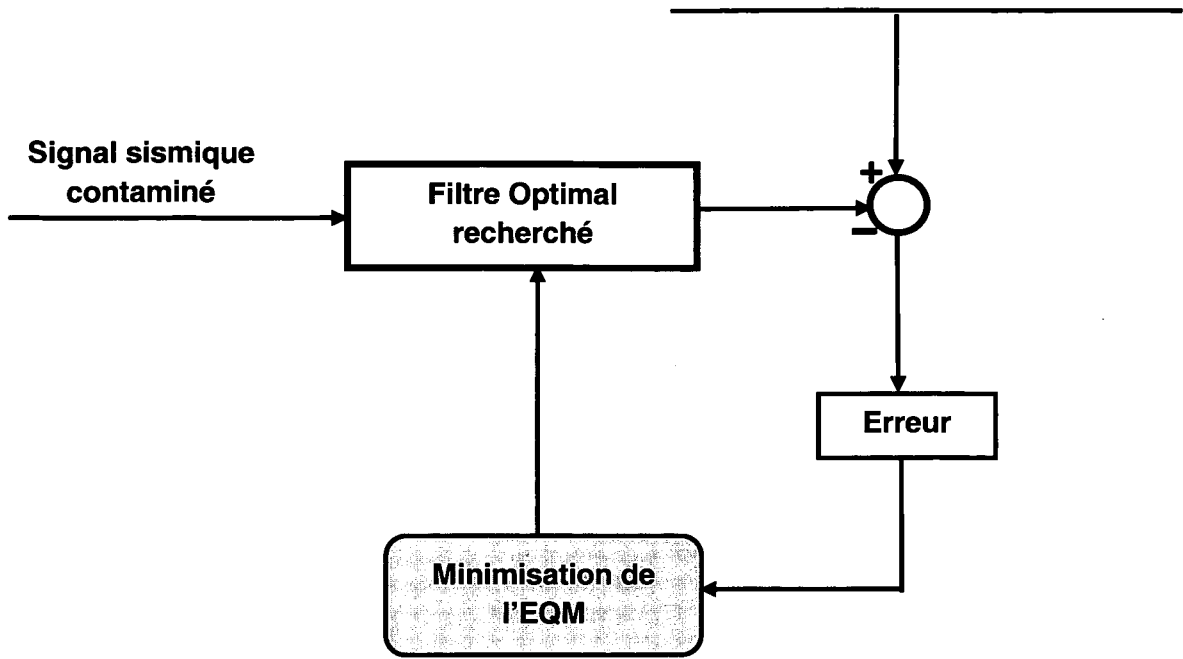


Figure .8a

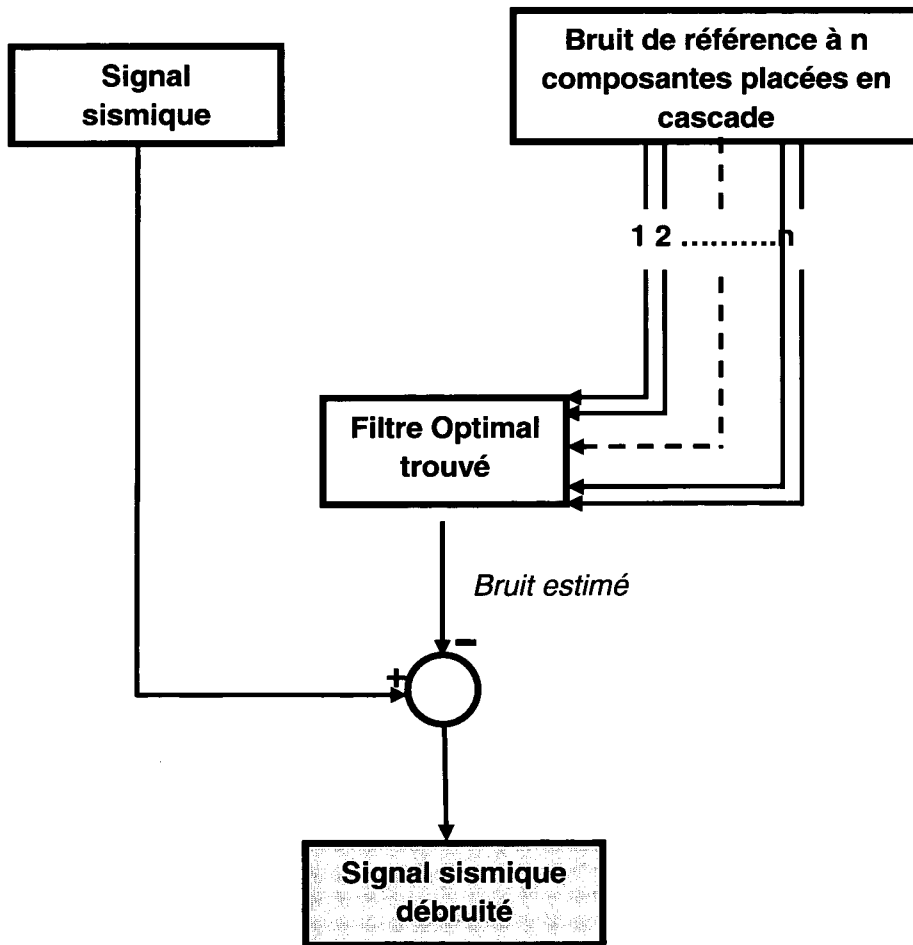


Figure .8b

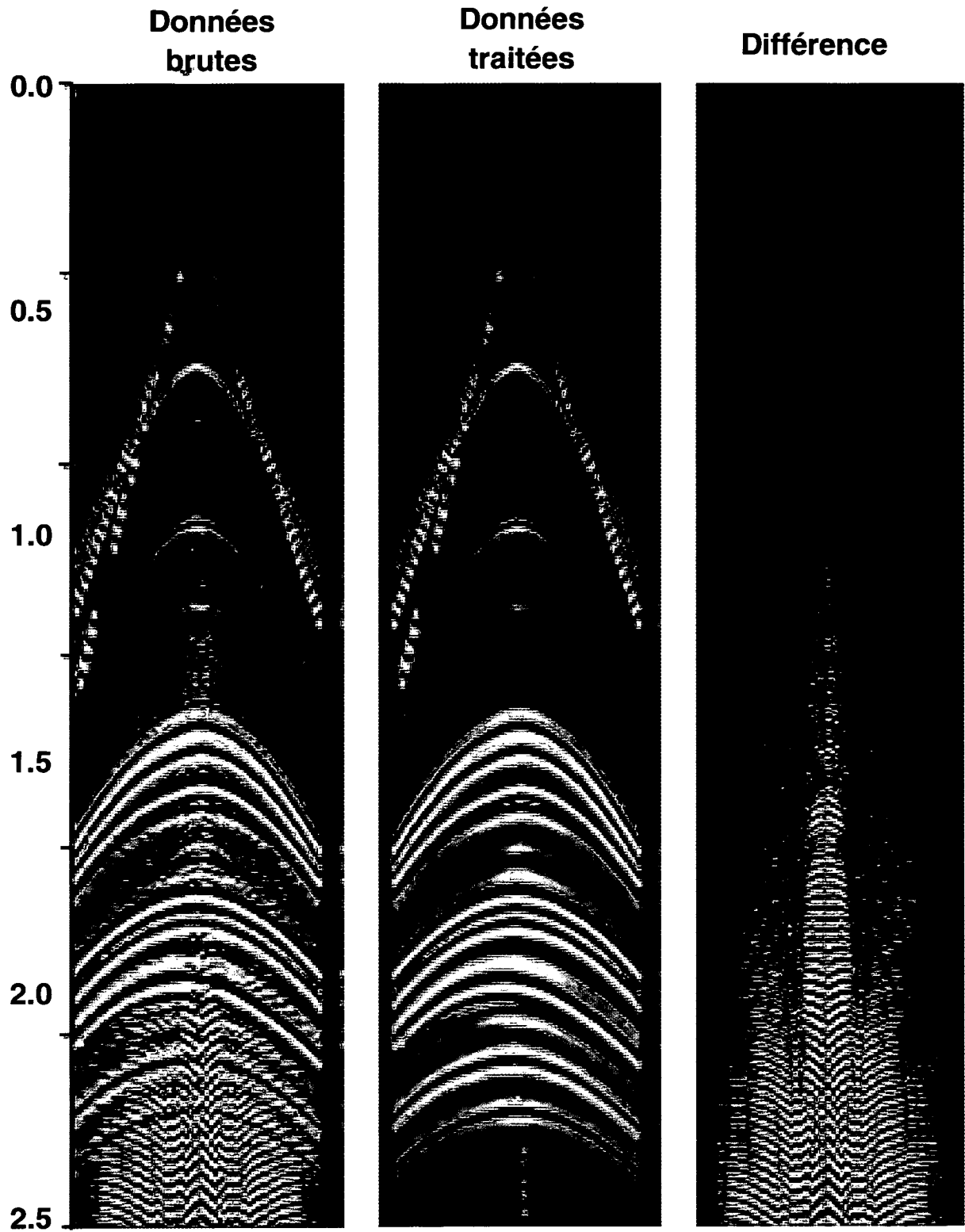


Figure .9

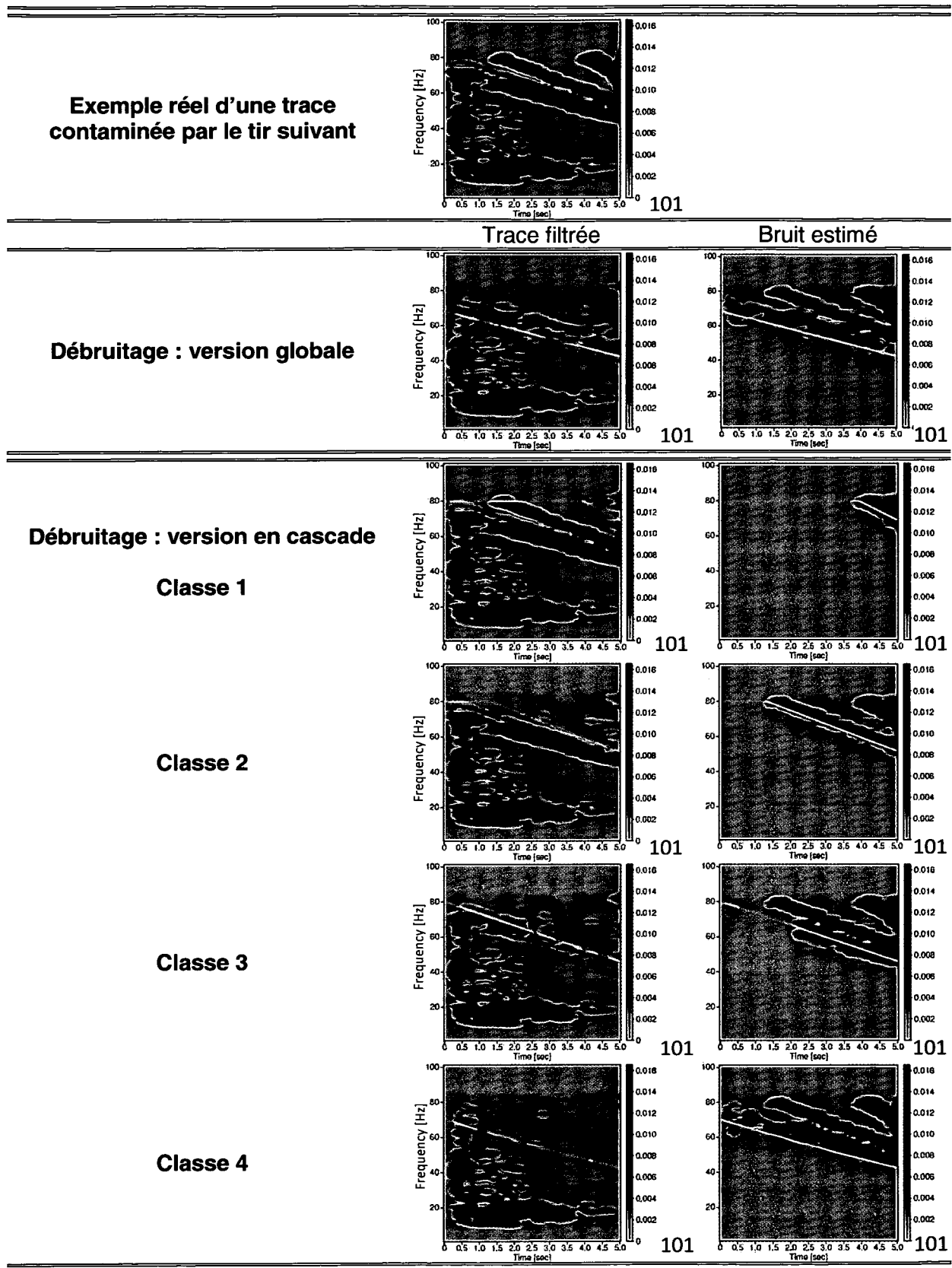


Figure 10