

Modélisation d'horizons sismiques à l'aide des algorithmes génétiques

K. SUAREZ^{1,2}, J. SILVA¹, M. DONIAS^{1,3}, D. JEANTET^{1,3}, M. NAJIM^{1,3}

¹IMS (UMR CNRS 5218), Département LAPS - Université Bordeaux 1, 351 cours de la Libération, 33405, Talence cedex, France.

²Departamento de Tecnología Industrial - Universidad Simon Bolivar. Apto. 8900. Baruta, Sartenejas, Venezuela.

³LASIS, 351 cours de la Libération, 33405, Talence cedex, France.

kleydis.suarez@laps.ims-bordeaux.fr, jesus.silva@laps.ims-bordeaux.fr,
marc.donias@laps.ims-bordeaux.fr, dominique.jeantet@laps.ims-bordeaux.fr,
mohamed.najim@laps.ims-bordeaux.fr

Résumé – Dans le contexte de l'analyse des images sismiques, ce travail propose la mise en valeur de structures continues (horizons) par une nouvelle méthode de reconnaissance de formes nommée « approche par correspondance géométrique ». Il s'agit d'une mesure non linéaire de similitude entre vecteurs qui correspondent respectivement, dans notre cas, à un segment particulier et préalablement choisi (horizon de référence) et un segment quelconque de l'image traitée. Le segment dit de référence est représenté par un modèle polynomial estimé à l'aide des algorithmes génétiques. Nous avons ainsi obtenu une carte d'attribut de similitude qui renforce la géométrie de structures géologiques initialement peu visibles sur une image sismique réelle.

Abstract – In the framework of seismic images analysis, this work proposes the enhancement of continuous structures (horizons) by an original method of pattern recognition, called "geometrical matching approach". This proposal operates a nonlinear measurement of similarity between vectors, which in our case correspond respectively to an unspecified segment from the processed image and a particular and beforehand selected segment (referential horizon). The segment indicated as referential is represented by a polynomial model, estimated using genetic algorithms. We thus obtained an attribute map of similarity that improves the geometry of geological structures on real seismic images, initially obscured by noise.

1. Introduction

Les images sismiques sont largement utilisées dans les études de prospection d'hydrocarbures. De nature échographique, elles sont obtenues grâce à la réflexion d'ondes acoustiques, émises depuis la surface, entre les différentes couches de roches du sous-sol. Les variations de densité et de propriété élastique des roches modifient à la fois la vitesse de propagation et l'amplitude de ces ondes qui sont enregistrées puis traitées pour former des volumes de données appelés « images sismiques ». Des hypothèses concernant la profondeur et les propriétés des interfaces entre les différentes couches de roches peuvent notamment être émises à partir de telles images. Les différences de propriété des couches transcrites par les réflexions sismiques forment des structures surfaciques continues fortement marquées, nommées « horizons » et apparaissant sous la forme de lignes sombres ou claires dans les sections (figure 2a), tandis que les ruptures d'horizons caractérisées par un décalage visible d'un ensemble de couches de roches désignent, en première approximation, des failles.

L'analyse de données sismiques pour l'étude du sous-sol est un travail long et difficile qui s'appuie sur l'expertise du géologue qui l'effectue. Les interprétations manuelles sont coûteuses et subjectives. Cette tâche est heureusement facilitée par des techniques informatisées. En particulier, les méthodes de suivi automatique d'horizons sont d'une grande utilité pour l'interprétation structurale des données sismiques. Cependant, elles ont aujourd'hui encore de grandes difficultés à suivre parfaitement les horizons à travers un certain nombre de discontinuités, plus précisément à travers les failles, en raison de la prise en compte inadéquate d'informations locales très perturbées. La plupart des techniques de suivi d'horizons comporte plusieurs étapes, dont la première est généralement une phase de caractérisation. Celle-ci s'articule principalement autour d'une fonction qui traduit la similarité entre horizons. Parmi les fonctions de similitude rapportées dans la littérature, les plus connues sont : a) les mesures de cohérence telles que l'inter-corrélation des amplitudes sismiques locales [1] ou celles formées à partir des valeurs propres de la matrice de covariance [2], b) la modélisation

par réseaux de neurones [3] et c) l'extraction de caractéristiques telles que l'homogénéité [4] ou encore l'entropie [5]. Quelle que soit la méthode employée, le bruit présent dans l'image, notamment autour des failles, limite les performances obtenues. D'autre part, ces méthodes impliquent de nombreux paramètres d'initialisation et un temps de calcul important.

Notre travail a pour objectif de définir un nouvel attribut de similitude qui met en valeur la géométrie des continuités géologiques et qui, par conséquent, facilite la corrélation des horizons. Nous proposons ainsi d'appliquer, au cas des images sismiques, une méthode statistique de reconnaissance de formes dénommée « approche par correspondance géométrique » [6] et récemment développée dans le contexte de signaux 1D.

L'approche par correspondance géométrique comporte deux volets : une phase de modélisation suivie d'une phase de détection. La première phase consiste à déterminer les paramètres d'un modèle polynomial représentant dans notre cas la distribution statistique d'amplitudes d'un segment d'horizon préalablement choisi. Dans la seconde phase, le modèle estimé est utilisé pour analyser l'image dans son ensemble par une procédure de fenêtre glissante : l'évaluation de l'erreur au modèle en tout point de l'image permet d'obtenir une carte d'attribut de similitude non linéaire entre l'horizon modélisé et le voisinage de pixels délimité par la fenêtre d'analyse.

La suite de l'article est organisée en trois parties. Le paragraphe 2 traite de l'approche par correspondance géométrique. Le paragraphe 3 explicite l'application à la modélisation d'horizons sismiques ainsi que les résultats obtenus sur des images réelles tandis que la section 4 résume la contribution et présente brièvement une perspective de poursuite du travail entrepris.

2. Approche par correspondance géométrique

2.1 La carte d'attribut de similitude

L'approche proposée permet de générer une carte d'attribut à partir d'une image sismique I . Chaque pixel de la carte d'attribut est alors associé à une mesure non linéaire de similitude qui exprime une comparaison entre les distributions statistiques d'amplitude des points composant deux segments qui sont respectivement un horizon de référence, préalablement choisi, et le voisinage horizontal du pixel traité : l'image est ainsi analysée ligne par ligne et pixel par pixel à l'aide d'une fenêtre glissante de dimension $1 \times M$ centrée sur le point courant.

Par la suite, nous désignerons par \mathbf{h} et \mathbf{v} le vecteur de forme regroupant respectivement les amplitudes de l'horizon de référence ainsi que celles des segments d'horizons correspondant aux fenêtres d'analyse.

La longueur M de la fenêtre d'analyse dépend étroitement des caractéristiques propres de l'image traitée : la plus grande possible, elle est dans notre cas fortement

limitée par le caractère orienté des images sismiques (figure 2a).

2.2 L'attribut de similitude

Dans la fenêtre d'analyse, l'attribut mesuré $S_{k,l}$ correspond à un critère non linéaire de similitude fondé sur une erreur géométrique e_{Θ} normalisée :

$$S_{k,l} = 1/(1 + e_{\Theta}(\mathbf{v}, \mathbf{w})), \quad (1)$$

où les vecteurs \mathbf{v} et \mathbf{w} représentent respectivement le segment d'horizon analysé et sa réponse à un modèle polynomial (voir formule 3).

Dans cette approche, l'erreur e_{Θ} est une distance de correspondance géométrique [6] qui établit la comparaison des vecteurs \mathbf{v} et \mathbf{w} dans un espace métrique bidimensionnel. Cet espace est décrit par une courbe symétrique fermée et définie par l'équation du cercle de rayon r :

$$e_{\Theta}(\mathbf{v}, \mathbf{w}) = \sum_{i=1}^M (v_i^2 + w_i^2 - r^2)^2. \quad (2)$$

Le vecteur \mathbf{w} contient la réponse d'un modèle polynomial évalué sur \mathbf{v} . Ainsi, pour un vecteur d'amplitudes $\mathbf{v} = [v_i, i = 1 \dots M]$ composé de M pixels, le vecteur $\mathbf{w} = [w_i, i = 1 \dots M]$ est défini par :

$$w_i = \sum_{n=0}^p a_n v_i^n, \quad (3)$$

où p est le degré du polynôme et $a = [a_0, a_1, \dots, a_p]$ est le vecteur des coefficients polynomiaux. Ces paramètres sont estimés à partir de l'horizon de référence à l'aide des algorithmes génétiques présentés dans la section suivante. Le polynôme associé au vecteur a modélise la distribution statistique des amplitudes présentes dans l'horizon de référence, selon une loi métrique non linéaire (formule 2).

2.3 Estimation paramétrique par des algorithmes génétiques

L'horizon de référence est représenté par un modèle polynomial qui est estimé par une méthode de moindres carrés dont la fonction à minimiser correspond à un critère d'erreur non linéaire (formule 2). L'estimation à mettre en œuvre s'apparente à une méthode d'ajustement de courbe et plus particulièrement au « circle fitting ». Dans le cas de courbes simples, la littérature suggère de réaliser l'estimation paramétrique par des méthodes de régression. Cependant, celles-ci sont applicables uniquement si la loi d'erreur est linéaire pour tous les paramètres. Pour des fonctions d'erreur plus complexes, il est possible de procéder par essai-erreur pour se rapprocher d'une solution qui n'est, par ailleurs, pas nécessairement unique [7]. De ce fait, notre approche peut efficacement s'appuyer sur l'utilisation des algorithmes génétiques (AG) en tant que méthode globale d'estimation et d'optimisation paramétrique. Ceux-ci sont en effet particulièrement adaptés pour la minimisation de fonctions non linéaires [8].

La première étape de la mise en œuvre des AG consiste en la génération d'une population aléatoire de vecteurs de coefficients polynomiaux de taille (degré) variable. Chaque individu de la population traitée est alors une solution candidate au modèle polynomial recherché. L'aptitude de chaque individu à répondre au mieux au problème d'optimisation proposé est définie par une grandeur appelée « fitness ». Les AG font évoluer la population initiale selon des règles probabilistes portant sur les valeurs de fitness. A chaque génération, les individus associés aux valeurs de fitness les plus élevées sont ainsi reproduits tandis que les autres sont éliminés. La phase de reproduction consiste à choisir, dans la population courante, deux individus différents et caractérisés par des valeurs suffisamment élevées de fitness. Assimilés à des parents, une opération mathématique appelée « croisement » les combine afin de produire une génération « fille » de solutions possibles, c'est-à-dire de nouveaux vecteurs de coefficients polynomiaux. D'autres opérations interviennent dans la phase de reproduction telle que la mutation et la migration [8]. La nouvelle génération ainsi créée remplace les individus ayant les valeurs de fitness les plus basses. Les AG sont mis en œuvre jusqu'à ce qu'au moins un individu ait atteint un fitness suffisant et fixé a priori (97% dans notre cas).

Pour cette approche, le critère de similitude (Eq. 1) appliqué sur l'horizon de référence décrit directement l'expression du fitness. Soit $\mathbf{h} = [h_u, u = 1 \dots L]$ le vecteur des amplitudes de l'horizon sismique de référence, le fitness est défini par:

$$fitness = \frac{1}{1 + \left(\sum_u (h_u^2 + (\sum_p a_p h_u^p)^2 - r^2)^2 \right)}, \quad (4)$$

où p et $a = [a_0, a_1, \dots, a_p]$ sont respectivement l'ordre et les paramètres du modèle à estimer (voir formule 3). Cette expression fournit des valeurs de fitness normalisées sur l'intervalle $[0,1]$.

Il est important de noter que l'ordre des valeurs d'amplitude définissant le vecteur \mathbf{h} n'est pas pris en compte dans la modélisation. Ce n'est pas à proprement dit l'horizon qui est modélisé, mais uniquement la distribution de ses amplitudes. La longueur L de l'horizon sismique de référence doit ainsi être déterminée en fonction de la représentativité du phénomène à étudier.

3. Modélisation d'horizons

3.1 Estimation du modèle de l'horizon de référence

Afin d'obtenir un modèle suffisamment représentatif, l'image sismique traitée est préalablement redressée [9]. Ceci permet de disposer de plages horizontales consécutives de pixels appartenant à un même horizon. Le segment d'horizon \mathbf{h} dit de référence, choisi par un spécialiste (géologue) en fonction du phénomène d'intérêt

à caractériser, se compose de L pixels (figure 1b). Le segment $\mathbf{h} = \{h_1 \dots h_L\}$ constitue le vecteur de forme utilisé pour l'estimation du modèle polynomial de l'horizon par les AG selon la méthode décrite dans la section 2.3.

Afin de garantir la convergence de l'estimation du modèle, le vecteur de forme \mathbf{h} est normalisé sur l'intervalle $[-r, r]$ avec $r=1$ (rayon du cercle unitaire). Les paramètres requis par les AG pendant l'estimation du modèle polynomial sont regroupés au sein du tableau 1.

3.2 Résultats

La méthode de correspondance géométrique décrite a été appliquée à des images sismiques réelles (figure 2).

Le segment d'horizon utilisé pour estimer le modèle polynomial, extrait d'une image redressée, est représenté sur la figure 1a. La longueur L de ce segment d'horizon est de 110 pixels. Le polynôme obtenu dans ce cas précis est de degré 11. D'autres polynômes ont été estimés en faisant varier la longueur initiale du segment d'horizon de référence. Il a été constaté que leur degré variait fortement en fonction de la complexité des horizons choisis.

Comme le montre les figures 2a et 2b, la mise en œuvre de cette méthode met en évidence les continuités des couches sédimentaires, notamment dans le cas de régions fortement bruitées (voir agrandissements).

Le résultat est une carte d'attribut de similitude, non linéaire, dans laquelle les valeurs élevées indiquent une forte correspondance géométrique.

TAB. 1 : paramètres de l'algorithme génétique

Paramètres	Value
Population	100
Taux de mutation	3%
Taux de migration	3%
Type de croisement	Single-point
Sélection de parents	Elitisme
Condition d'arrêt : valeur de	0.97
Fitness finale	

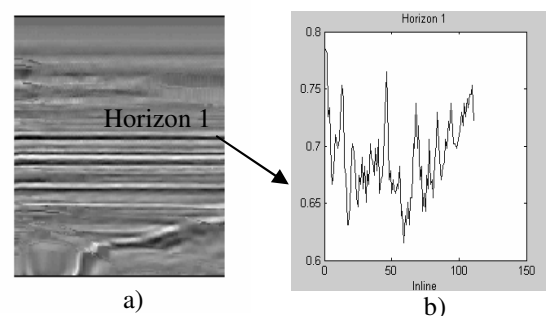


FIG. 1 : a) Segment d'horizon dans une section sismique redressée. b) Signal d'horizon employé pour l'estimation du modèle polynomial.

4. Conclusion

L'attribut de similitude présenté permet de modéliser la distribution statistique des amplitudes d'un horizon par un polynôme de degré moyen. Ce modèle permet d'établir une comparaison non linéaire entre horizons qui s'adapte à leur caractère fortement non stationnaire. L'attribut proposé rend plus évidentes la visibilité et la géométrie des structures géologiques en renforçant l'homogénéité des horizons. Cette caractéristique peut être efficacement exploitée pour la caractérisation d'horizons notamment dans des applications de suivi. Une étude future portera sur l'utilisation conjointe de plusieurs modèles correspondant à des horizons de référence orientés. Ceci permettra l'utilisation de fenêtres d'analyse plus étendues et de caractériser des phénomènes de plus grande échelle.

5. Remerciements

Le travail exposé dans cet article a été réalisé en collaboration avec le laboratoire commun CNRS LASIS (Laboratoire d'Analyse des Signaux et Images Sismiques) qui a notamment fourni les signaux traités.

Références

- [1] M. S. Bahorich and S. L. Farmer. 3-D Seismic Discontinuity for Faults and Stratigraphic Features, *The Leading Edge*, 14(10), pp. 1053-1058, 1995.
- [2] A. Gersztenkorn and K.J. Marfurt, Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3D structural and stratigraphic mapping, *Geophysics*, 64, pp. 1468-1479, 1999.
- [3] P. Albert, M. Warner, and D. Lister, Artificial Neural Networks for simultaneous multi Horizon tracking across Discontinuities, SEG, Canada, 2000.
- [4] A. Alam and P. Caragounis. Advances in 3D seismic fault interpretation. In 56th Mtg. Eur. Assoc. Expl. Geophys., Extended Abstract, 1994.
- [5] I. Cohen and R.R. Coifman. Local discontinuity for 3D seismic data. *Geophysics*, 67(6), pp. 1933-1945, 2002.
- [6] K. Suarez, J. Silva, Y. Berthoumieu, P. Gomis, and M. Najim, ECG Beat Detection Using a Geometrical Matching Approach. *IEEE Trans. on Biomed. Eng.*, 54(4), 2007.
- [7] W. Gander, G.H. Golub, and R. Strebler, Least square fitting of circles and ellipses, *BIT* 34, pp. 558-578, 1994.
- [8] D.E. Goldberg. *Genetic Algorithms*. Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [9] J. Lomask and J. Claerbout. Flattening without picking. *SEP-112*, pp. 141-150, 2002.

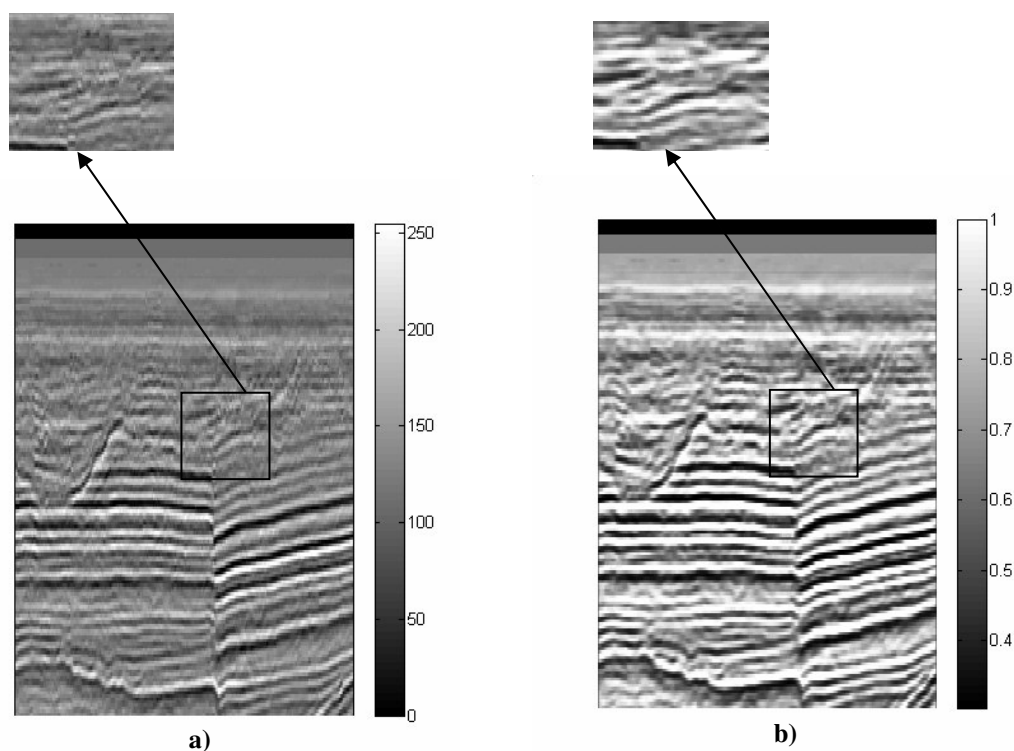


FIG. 2 : a) Image sismique (section) originale. b) Carte d'attribut de similitude selon le critère de correspondance géométrique. Les extraits agrandis correspondent à une région particulièrement bruitée.