

Détection des failles sismiques par processus objet

OLIVIER LAVIALLE¹, BARNA KERESZTES^{1,2}, MONICA BORDA²

¹ Université de Bordeaux, 351 cours de la Libération, 33405 Talence Cedex, France

² Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca, 15 rue C.Daicoviciu, 400020 Cluj-Napoca, Roumanie

olivier.lavialle@ims-bordeaux.fr, barna.keresztes@ims-bordeaux.fr, monica.borda@com.utcluj.ro

Résumé – Dans cet article nous présentons une approche stochastique pour la détection des failles dans les blocs sismiques 3D. Notre méthode s'appuie sur un processus ponctuel marqué multi-2D ; Sur un plan vertical donné, les objets-failles sont modélisés par des courbes de Bézier qui permettent de simuler convenablement des failles normales ou listriques (forme parabolique). Le terme d'attache aux données peut être défini à partir de différents opérateurs de détections de failles classiques, ce qui permet d'ouvrir des perspectives de fusion d'attributs faille. En termes de résultats, la qualité des blocs de sorties montre clairement que certains défauts présentés par les attributs-failles classiques sont gommés par l'utilisation des processus ponctuels.

Abstract – In this paper, a stochastic model for fault detection in 2D sections of seismic blocks is presented. The model is based on a marked point process in which each fault is modeled by a Bezier curve which allows to simulate normal and listric faults (parabolic form). The data term can be defined using different classical fault detectors. Using marked point process allows overcoming the drawbacks which are observed with the direct use of classical fault attributes.

1 Introduction

L'interprétation des blocs sismiques issus de sismique réflexion doit conduire à l'extraction de l'information structurale et stratigraphique. Les géologues recherchent en particulier les continuités et discontinuités spatiales pour extraire les structures géologiques pertinentes. Cette tâche étant lourde et fastidieuse, il est intéressant de développer des procédures semi-automatiques permettant la mise en évidence de certains événements : c'est le cas en particulier de la détection des failles sismiques.

Les principales approches portant sur la détection de faille sont fondées sur le calcul d'attributs sismiques qui mesurent localement la perte de la cohérence (Bahorich et Farmer [2], Marfurt et al. [11]) ou le désordre local (Randen et al. [12], Berthoumieu et al. [3]).

Dans cet article, nous proposons une nouvelle approche pour détecter les failles au sein des sections 2D des blocs sismiques. L'ensemble du processus est donc un processus multi-2D permettant la reconstruction de l'ensemble du réseau de failles présent dans le bloc 3D.

La détection est fondée sur un processus ponctuel marqué (ou processus objet) pour lequel les marques sont des courbes Bézier paramétrées par 3 points de contrôle. Ce type de modèle présente l'avantage d'être en concordance avec les modèles géologiques de failles.

Les processus objet sont maintenant classiquement utilisés pour simuler un ensemble d'événements dans le temps ou dans l'espace. Les applications en analyse d'image ont été initiées par Baddeley et van Lieshout [1]. Dans un passé plus récent, de nombreux travaux ont été conduits autour de l'utilisation de ces modèles, notamment pour des applications en télédétection [14].

Le modèle de faille sera présenté dans la prochaine section. Ensuite, nous aborderons les aspects liés à la simulation du processus objet en introduisant notamment les « attributs failles » qui nous permettront de définir la vraisemblance des objets (attache aux données). Enfin, nous présenterons quelques résultats. Les perspectives données par ce modèle seront discutées et notamment sa capacité à être considéré comme une approche de fusion d'attributs permettant de tirer partie des complémentarités des détecteurs de failles utilisés classiquement.

2 Modèle de faille

Les détecteurs de faille (ou attributs-faille) proposés dans la littérature sont toutes des méthodes qui consistent à détecter les pixels (approche 2D) ou voxel (approche 3D) situés le long des discontinuités présentes dans le bloc sismique. Notre but est de proposer une méthode qui prend en considération la continuité verticale des discontinuités en décrivant la faille comme un seul objet.

Il est bien entendu illusoire d'examiner et de tester la pertinence de l'ensemble des configurations d'objets dans un bloc ; une approche stochastique est, de ce fait, une solution naturelle pour notre application.

L'approche multi-2D présentée consiste à traiter successivement les sections verticales 2D. Nous proposons un parcours sur l'ensemble des « in-lines » et « cross-lines » des blocs (Fig.1).

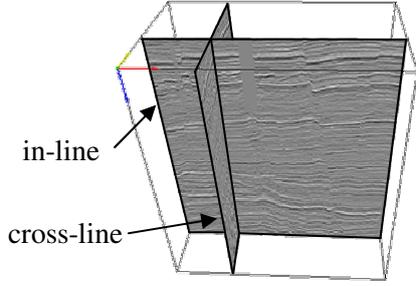


Figure 1. Sections 2D dans les blocs sismiques 3D

D'un point de vue structural, il existe deux catégories de faille [13] (Fig. 2) : les *failles planaires*, dont le pendage (angle vertical) est constant et les *failles listriques*, qui présentent une forme concave en profondeur (pendage variable).

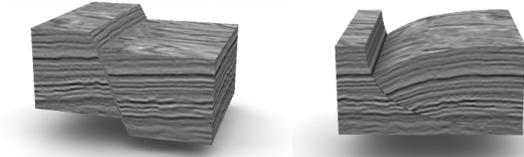


Figure 2. Faille normale et listrique

Pour modéliser ces deux géométries, nous proposons d'utiliser une représentation unique, par courbe de Bézier quadratique. Cette courbe est décrite par la position des deux extrémités P et R et de son point de contrôle C qui permet notamment de définir la courbure de l'objet (fig.3.).

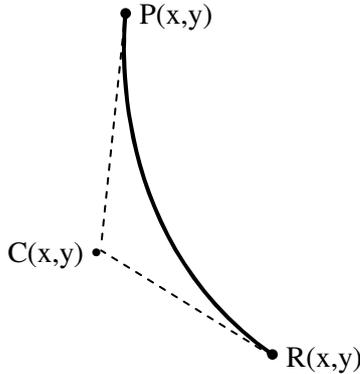


Figure 3. Le modèle d'objet proposé

La courbe est définie par :

$$S(t) = t^2P + 2t(1-t)C + (1-t)^2R \quad | \quad t = [0,1]$$

Nous proposons dans la suite de développer un processus objet au sein duquel les points marqués sont les extrémités supérieures P et les marques correspondantes sont formées des positions des points de contrôles C et R. Finalement chaque courbe est définie dans l'espace objet, sous ensemble de l'espace R^6 .

3 Evolution des processus objet

Nous cherchons à extraire le réseau de failles en utilisant un processus objet. Une fois défini le modèle des objets, nous essayons d'évaluer la probabilité d'une configuration X selon :

$$f(X) \propto f_a(X)\mathcal{L}(X)$$

Le premier terme f_a est le terme a priori qui permet de préciser le type de configuration du réseau recherchée. Ce terme inclut un terme de validité des objets eux-mêmes et un terme lié aux interactions entre objets. Dans notre processus, la validité des objets faille dépend de leur extension verticale L_h (nous privilégions les failles de grande extension), de l'angle α entre les points extrêmes de l'objet, permettant de privilégier les failles verticales et de la courbure $c = q/l$ qui doit être limitée pour simuler des failles réalistes (Fig. 4a).

Le terme d'interaction permet d'éviter une proximité trop grande entre failles en pénalisant les configurations en fonction des zones d'interaction L_d au sein desquelles les failles sont considérées comme très proches (Fig 4b).

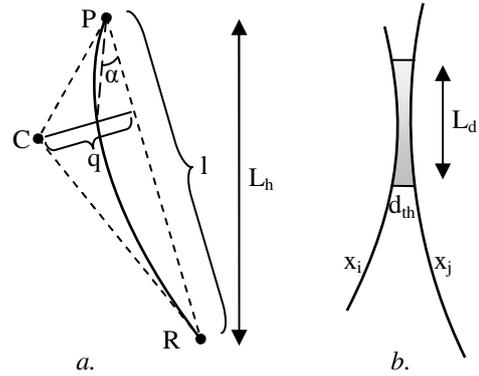


Figure 4. a. Paramètres définissant la validité d'une courbe ; b. interactions entre courbes

Le terme d'attache aux données $\mathcal{L}(x)$ mesure l'adéquation entre le réseau proposé et les failles réellement présentes dans la section. Dans notre cas, son calcul s'appuie sur des attributs utilisés classiquement pour la détection de failles.

Nous proposons d'utiliser respectivement la mesure de cohérence de Gersztenkorn [7], le désordre du gradient proposé par Bahorich [2] ainsi que l'attribut fault-max proposé par Donias [5]. La vraisemblance calculée le long d'un objet dépend de la mesure de la confiance que chaque pixel de l'objet soit un pixel « faille ». Pour augmenter la sélectivité du terme d'attache aux données, la robustesse du modèle au bruit et l'apparition de fausses détections, chaque objet est divisé en n sous-objets S_i , la vraisemblance finale étant mesurée comme le produit des vraisemblances élémentaires $A(p)$:

$$\mathcal{L}(x) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{l_i} \sum_{p \in S_i} A(p)$$

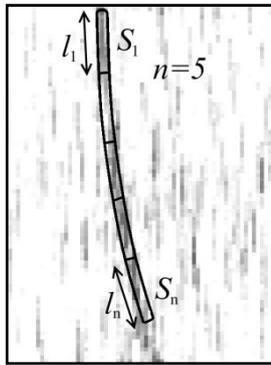


Figure. 5. Calcul de l'attache aux données

4 Simulation du processus ponctuel

Le processus est simulé par un algorithme MCMC à sauts réversibles [8]. Plus spécifiquement, nous utilisons l'algorithme Metropolis-Hastings-Green [9] pour simuler la chaîne de Markov.

Tableau 1. Algorithme MHG

A partir d'une configuration x_t :

- On choisit le noyau de transition Q_i d'une façon aléatoire
- La nouvelle configuration est générée $y = Q_i(x_t, \cdot)$
- Le rapport d'acceptation de la transition est :

$$R = \frac{f(y, x_t)}{f(x_t, y)}$$

- La nouvelle configuration est acceptée avec une probabilité : $\alpha = \min(1, R)$

Les transitions proposées reposent sur un ensemble de mouvements élémentaires :

- naissance d'un objet
- mort d'un objet
- mouvement simple :
 - translation d'un objet
 - translation d'un point
 - changement de longueur
- fusion de deux courbes
- division d'une courbe en deux parts.

Ces noyaux de transition ont été choisis dans le but d'assurer et d'accélérer la convergence de la chaîne. Chaque transition a une transition symétrique permettant d'assurer la réversibilité de la chaîne et par là même sa convergence.

Les mouvements simples sont utilisés pour optimiser la position et la forme des courbes, la fusion et division pour assurer que chaque faille est décrite par un seul objet.

Pour empêcher le système de se bloquer dans un minimum local d'énergie, la méthode de recuit simulé est utilisée. Une température t est attachée au système, et tend vers 0 au fur et à mesure du déroulement du

processus. En utilisant un rapport d'acceptation $R^{\frac{1}{t}}$, le système se déplace aisément dans l'espace des solutions et permet d'opter pour des configurations localement non optimale. En fin de processus, le modèle se fige et les mauvaises configurations sont progressivement pénalisées.

5 Résultats

Dans chaque section, un processus ponctuel classique conduit à une réponse binaire donnant la configuration du réseau de faille. La réponse souhaitée par les géologues et classiquement proposée par les détecteurs de faille est plutôt une aide à la décision et à l'interprétation au travers d'un opérateur non binaire. Pour répondre à cette contrainte, nous proposons d'associer à chaque objet un niveau de gris fonction de sa vraisemblance.

Une autre solution permettant de lisser le résultat et d'obtenir ainsi une détection moins binarisée consiste à itérer le processus un nombre donné de fois sur l'ensemble du bloc (10 passes dans le cas illustré dans cet article).

Enfin, notre approche étant une approche multi-2D opérée sur les sections verticales, il est important de garantir la continuité de la réponse en regardant le bloc sur des coupes horizontales (time slice). Dans le but d'améliorer cette continuité, nous proposons d'initialiser le processus au niveau de chaque section par la configuration sélectionnée sur la section précédente. Cette initialisation améliore quelque peu la continuité de la réponse, celle-ci étant avant tout assurée par l'approche itérative de la détection qui évite une réponse binarisée non nécessairement consistante en 3D.

La figure 6 permet d'illustrer l'efficacité de notre approche.

Pour chacun des 3 « attributs faille » utilisés, le bloc issu d'un calcul direct de l'attribut est présenté (à gauche). Chaque attribut possède certains inconvénients ; les plus marquants sont le fait que les attributs « cohérence » et « désordre du gradient » répondent beaucoup sur les zones de forts gradients, entraînant une discrimination relativement mauvaise sur les sections verticales entre zones faillées et non faillées. L'attribut « fault-max » conduit à des détections de fausses continuités liées à la taille de la fenêtre d'analyse.

Les blocs obtenus au travers de notre approche par processus objet et utilisant ces mêmes attributs comme attache aux données sont présentés en vis-à-vis (à droite). Comme attendu, le processus objet permet d'améliorer les continuités de réponse et diminue les fausses détections.

6 Conclusion et perspectives

L'approche que nous proposons permet d'améliorer les résultats de détection de faille dans les blocs sismiques. En outre, elle peut ouvrir des perspectives en

termes de fusion d'attributs : il est en effet tout à fait possible de proposer une attache aux données fondée sur la fusion en amont de plusieurs attributs. Dans [10], nous avons exploré une première solution sur un modèle d'objet plus simple à partir d'un opérateur de somme symétrique [15].

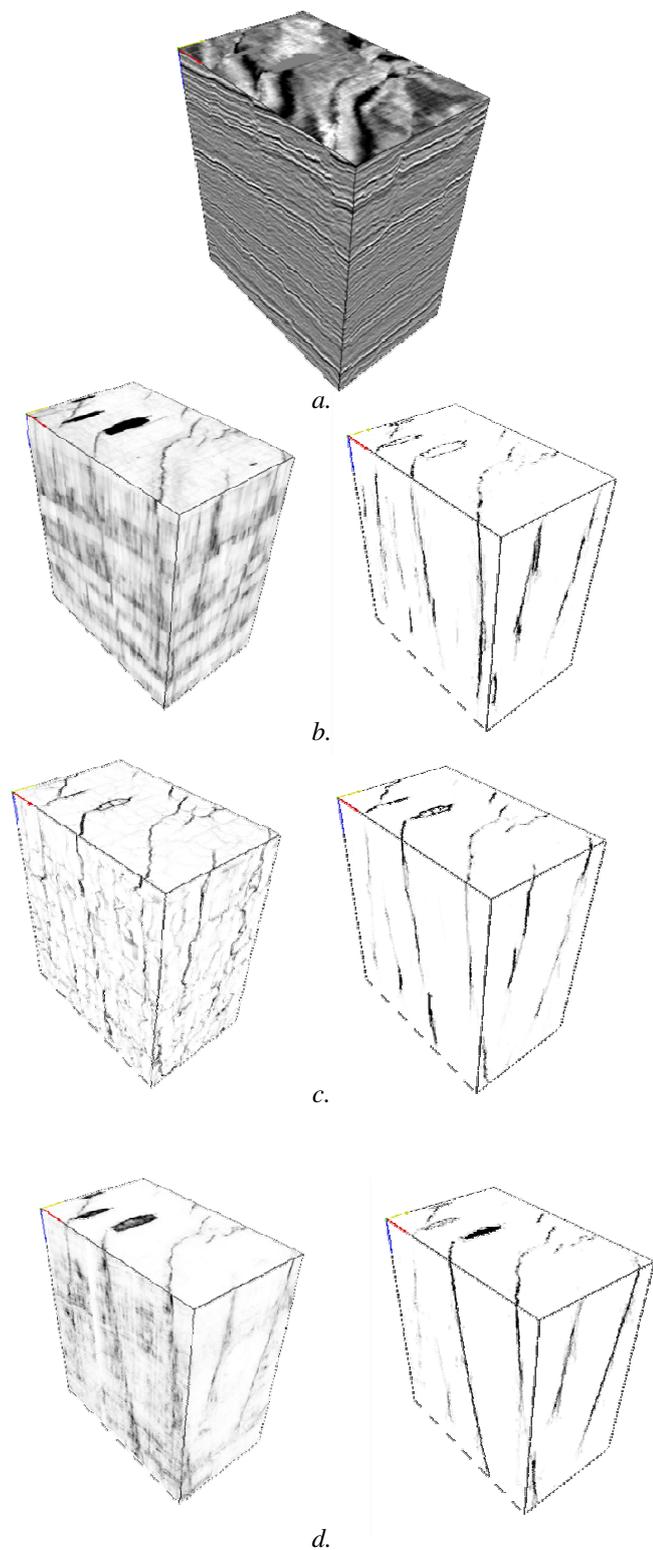


Figure 6. Résultats de l'application du processus objet fondé sur différents types d'attache aux données ; a. bloc sismique original b. cohérence c. fault-max d. désordre du gradient à gauche: bloc attribut original ; à droite : bloc résultant du point process.

Remerciements

Les auteurs remercient le groupe Sismage de TOTAL pour leur soutien pour ce projet.

REFERENCES

- [1] Baddeley, A.; van Lieshout, M.N.M. 1993: Stochastic geometry models in high-level vision. *Statistics and Images*, 1: 231-256.
- [2] Bajorich M. and Farmer S., 1995, The coherence cube: *The Leading Edge*, 14, pp. 1053-1058.
- [3] Berthoumieu Y., Donias M., David C., Guillon S., Keskes N., 2006, Geometrical model based method for fault detection, *proceedings of ISCCSP, Marrakech March 2006*
- [4] Bigün J., Granlund G.H., 1987, Optimal orientation detection of linear symmetry, *Proc. IEEE Int. Conf. on Comp. Vision, London*, pp. 433-438
- [5] Donias M., 1999, Caractérisation de champs d'orientations par analyse en composantes principales et estimation de la courbure, *PHD Thesis - University of Bordeaux*,
- [6] Donias M., David C., Laviolle O., Berthoumieu Y., Guillon S., Keskes N. 2007, New Fault Attribute Based on a Robust Directional Scheme *Geophysics*, 72, 4, pp 39-46.
- [7] Gersztenkorn, A., and K. J. Marfurt, 1999, Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping, *Geophysics*, 64, 1468-1479.
- [8] Geyer C.J., Moller J. 1994, Simulation and likelihood inference for spatial point process. *Scandinavian Journal of Statistics, Series B*, 21, pp.359-373
- [9] Green P.J. 1995, Reversible jump MCMC computation and Bayesian model determination, *Biometrika* 82, pp.711-732
- [10] Keresztes B., Laviolle O., Borda M., 2008, Multiple Support based seismic attributes, *IEEE IGARSS, Boston July 2008*
- [11] Marfurt K.J., Sudhakar V., Gersztenkorn N.A., Crawford K.D., Nissen S.E., 1999, Coherency calculations in the presence of structural dip: *Geophysics*, 64, pp.104-111.
- [12] Randen T., Mosen E., Signer C., Abrahamsen A., Hansen J.O., Saeter T., Schlaf J., Sonneland A., 2000, Three-dimensional texture attributes for seismic data analysis: 70th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophysics, *Expanded Abstracts*, pp. 668-671.
- [13] Ramsay, J.G., Huber, M.I., Lisle, R.: *The Techniques of Modern Structural Geology*, vol 2. Academic Press 1987
- [14] Stoica R., Descombes X., Zerubia J., 2000, Markov Point Process for Road Extraction in Remote Sensed Images, *INRIA Techn. Report 3923*
- [15] Tupin F., Maître H., Mangin J.F., Nicolas J.M., Pechersky E. 1998, Detection of linear features in SAR images: application to road network extraction, *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 36, 2, pp. 434-453