

INFLUENCE DE L'ANISOTROPIE DES ROCHES SUR LA PROPAGATION DES ONDES GENEREES LORS DE TREMBLEMENTS DE TERRE: LE CAS DE LA FAILLE SAN ANDREAS DANS LA REGION DE PARKFIELD

Denis JONGMANS¹

(9 figures & 1 tableau)

*Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique,
Université de Liège, Bât. B19, 4000 Liège.*

RESUME. L'anisotropie des massifs rocheux conduit à la propagation de deux ondes de cisaillement présentant des vitesses et des polarités différentes. Cette propriété, appelée biréfringence, a été observée lors de l'analyse de signaux de tremblements de terre enregistrés dans un puits (Varian) situé dans la région de Parkfield (Californie) à 1,4 km au NE de la faille San Andreas. Les ondes S polarisées parallèlement à la faille sont plus rapides que celles qui vibrent selon une direction perpendiculaire à la faille. Ce phénomène, qui s'accroît à proximité de la surface, suggère que l'anisotropie dans la région de Parkfield résulte d'une fracturation parallèle à la faille San Andreas. Cette étude basée sur l'analyse de données de tremblements de terre corrobore parfaitement les résultats de Daley et McEvilly (1990) obtenus sur le même site à partir d'une source vibratoire superficielle. Par ailleurs, la polarisation globale des ondes S, qui varie selon la distance épicertrale, a pu être expliquée par une modélisation du jeu cisailant dextre de la faille San Andreas.

MOTS-CLES: Californie, Parkfield, San Andreas, faille, anisotropie, séismes, ondes S, biréfringence.

ABSTRACT. Influence of rock anisotropy on the propagation of waves generated by earthquakes: example of San Andreas fault in the Parkfield region. Anisotropy in rock masses leads to the propagation of two shear waves with different velocities and polarizations. This property, which is generally named shear-wave splitting, has been detected in the Parkfield area (California) from nearby earthquake records in the Varian well located 1.4 km northeast of the trace of the San Andreas fault. S-waves parallel to the San Andreas fault are faster than S-waves polarized perpendicularly to the fault. This phenomenon, which is more apparent near the surface, suggests that anisotropy in the Parkfield area is due to a fracture direction parallel to the San Andreas fault. These results based on earthquake data are consistent with the vibroseis study of Daley and McEvilly (1990) at the same site. On the other hand, the gross S-wave polarization, which varies with epicentral distance, has been explained by modeling the right lateral strike slip of the San Andreas fault.

KEYWORDS: California, Parkfield, San Andreas, fault, anisotropy, earthquakes, S-wave splitting.

1. INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'années, les études de polarisation des ondes de cisaillement générées lors de tremblements de terre ou de campagnes sismique réflexion ont montré l'existence de deux ondes de cisaillement se propageant avec des vitesses et des polarisations différentes. Ce phénomène, appelé biréfringence des ondes S (S-wave splitting), a été abondamment observé dans de très nombreuses régions du monde (Peacock *et al.*, 1988) et est

apparu très sensible à l'anisotropie des roches. Cette anisotropie peut être intrinsèque, c'est-à-dire résulter de la fabrique de la roche elle-même, ou être due à la présence de fissures préférentiellement orientées. L'étude tridimensionnelle des ondes S apparaît donc susceptible d'apporter des informations sur la fissuration en place des massifs rocheux et a connu un grand succès dans l'étude des réservoirs pétroliers (Crampin, 1985). Dans le domaine de la tectonophysique, les observations ont généralement montré que la direction de polarisa-

Tableau 1. Principales caractéristiques des tremblements de terre étudiés: date et heure, localisation de l'épicentre, profondeur de la source et magnitude locale.

N°	DATE a/m/j	TEMPS h/m/s	LATITUDE (°N)	LONGITUDE (°W)	PROF. (km)	ML
1	880325	12h35 45.57	36 00.20	120 34.41	2.60	2.13
2	880404	20h45 47.49	36 17.36	120 24.83	10.26	3.7
3	890129	15h33 35.45	35 58.50	120 32.58	11.86	1.77
4	890328	09h47 26.01	35 56.55	120 30.46	8.15	1.90
5	890802	07h42 32.53	35 55.42	120 28.58	5.65	1.26
6	890806	21h00 27.63	36 00.60	120 34.54	5.26	2.00
7	890807	03h54 42.63	36 00.51	120 34.71	5.41	1.58
8	890808	01h19 06.21	35 55.35	120 28.56	5.36	1.03
9	900125	02h26 53.54	36 01.28	120 35.37	5.71	0.96
10	900125	08h38 16.18	35 56.92	120 30.35	11.91	1.35
11	900131	10h33 02.05	35 55.42	120 28.04	4.67	1.13
12	900131	10h52 43.16	35 55.46	120 28.11	4.55	1.14
13	901204	13h13 59.02	35 56.31	120 29.98	11.82	1.95
14	901204	13h32 25.63	35 56.03	120 30.11	11.88	1.92
15	910304	06h52 15.15	35 56.30	120 29.46	10.55	2.14
20	921028	17h41 30.77	35 55.93	120 28.98	10.58	2.64
21	921028	23h13 12.36	35 55.94	120 28.91	10.01	2.41
22	921103	16h38 17.00	35 59.31	120 32.34	2.54	2.72
23	921103	16h38 59.04	35 59.11	120 32.12	1.19	2.24
24	921114	17h17 09.79	35 55.62	120 28.27	4.65	2.12
25	921116	03h28 37.36	36 01.29	120 35.59	5.15	2.92
26	921208	17h28 49.13	35 44.53	120 18.52	5.91	2.62
27	921208	19h13 04.85	35 44.45	120 18.56	5.61	2.49
28	921211	22h15 33.36	35 48.15	120 21.92	6.24	2.77

l'onde S la plus rapide était perpendiculaire à la direction de la contrainte horizontale minimale (Peacock *et al.*, 1988). Selon ces auteurs, ce phénomène s'explique par l'alignement des micro-fissures et des pores remplis d'eau sous l'effet du tenseur des contraintes actuelles. Des études théoriques (Crampin, 1985) ont par ailleurs montré que, dans un milieu régulièrement fracturé, la direction de vibration de l'onde S la plus rapide est parallèle à l'orientation du réseau principal de fractures. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt de la biréfringence des ondes de cisaillement pour l'orientation de la fracturation et, moyennant certaines hypothèses, du tenseur des contraintes.

La biréfringence des ondes S a été étudiée dans la région de Parkfield (Californie) à partir d'enregistrements de tremblements de terre mesurés à différentes profondeurs dans un puits (Varian) de 1500 m de profondeur. Ce puits, situé à 1,4 km au NE de la faille San Andreas a été foré en 1981 par l'industrie pétrolière. Il a été rouvert et équipé de séismomètres en 1987 (Malin *et al.*, 1987) dans le cadre du projet de prédiction de Parkfield, région test où un tremblement de terre de magnitude ML=6 est attendu dans les prochaines années (Bakun et Lindh, 1985).

Les mouvements sismiques enregistrés dans le puits Varian résultent à la fois des effets de source et de propagation. Pour déterminer l'influence de la radiation de la source sismique sur la polarisation des ondes, une modélisation numérique des mouvements générés lors du jeu de la faille San-Andreas a été réalisée et comparée aux données expérimentales recueillies entre 1988 et 1992.

La méthodologie présentée ici dans le cadre californien est susceptible d'être appliquée à n'importe quelle région du monde en vue de mettre en évidence et de quantifier l'anisotropie au sein des roches de la croûte. En Europe occidentale, cette méthode d'investigation pourrait permettre de faire la liaison entre d'une part la fracturation au sein de la croûte supérieure et d'autre part les grandes structures tectoniques et le champ actuel de contraintes.

2. CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

A proximité de Parkfield (fig.1), la faille San Andreas met en contact deux unités géologiques très différentes : le bloc salinien au SW et le complexe franciscain au NE (Sims, 1990). Le bloc salinien, constitué de roches métamorphiques et magmati-

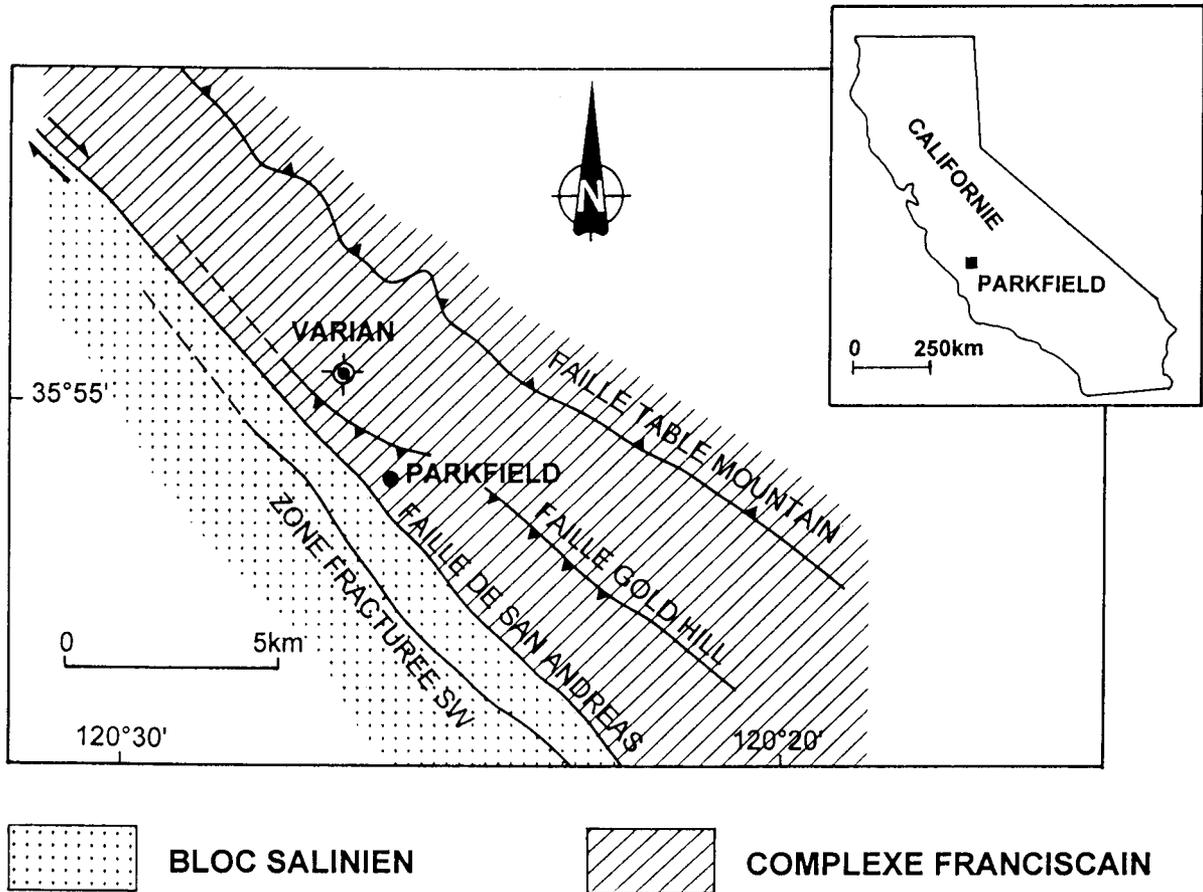


Fig. 1. Carte géologique de la région étudiée (d'après Sims, 1990) reprenant la localisation du puits Varian.

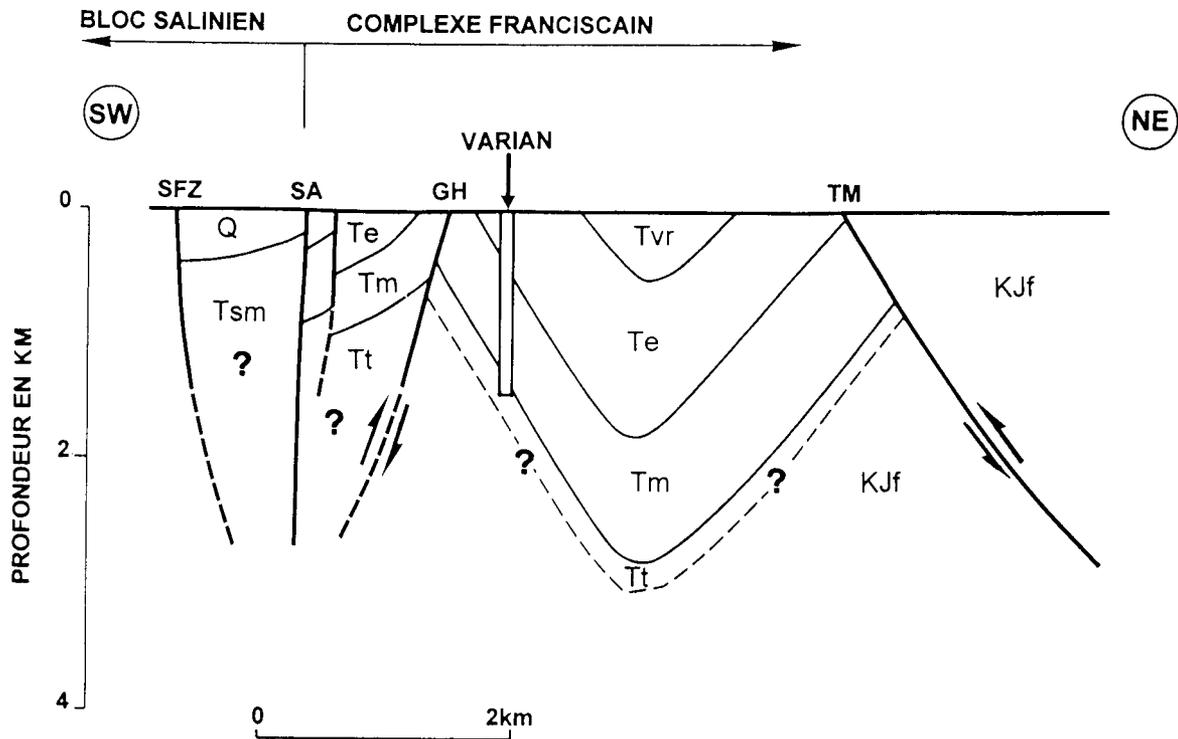


Fig. 2. Coupe géologique NE-SW passant par le puits Varian. SFZ: zone sud fracturée, SA: faille San Andreas, GH: faille Gold Hill, TM: faille Table Mountain, KJf: complexe franciscain, Tt: formation de Tremblor, Tm: formation de Monterey, Te: formation de Etche-goin, Tvr: formation de Varian Ranch, Q: terrains quaternaires, Tsm: formation de Santa Margarita.

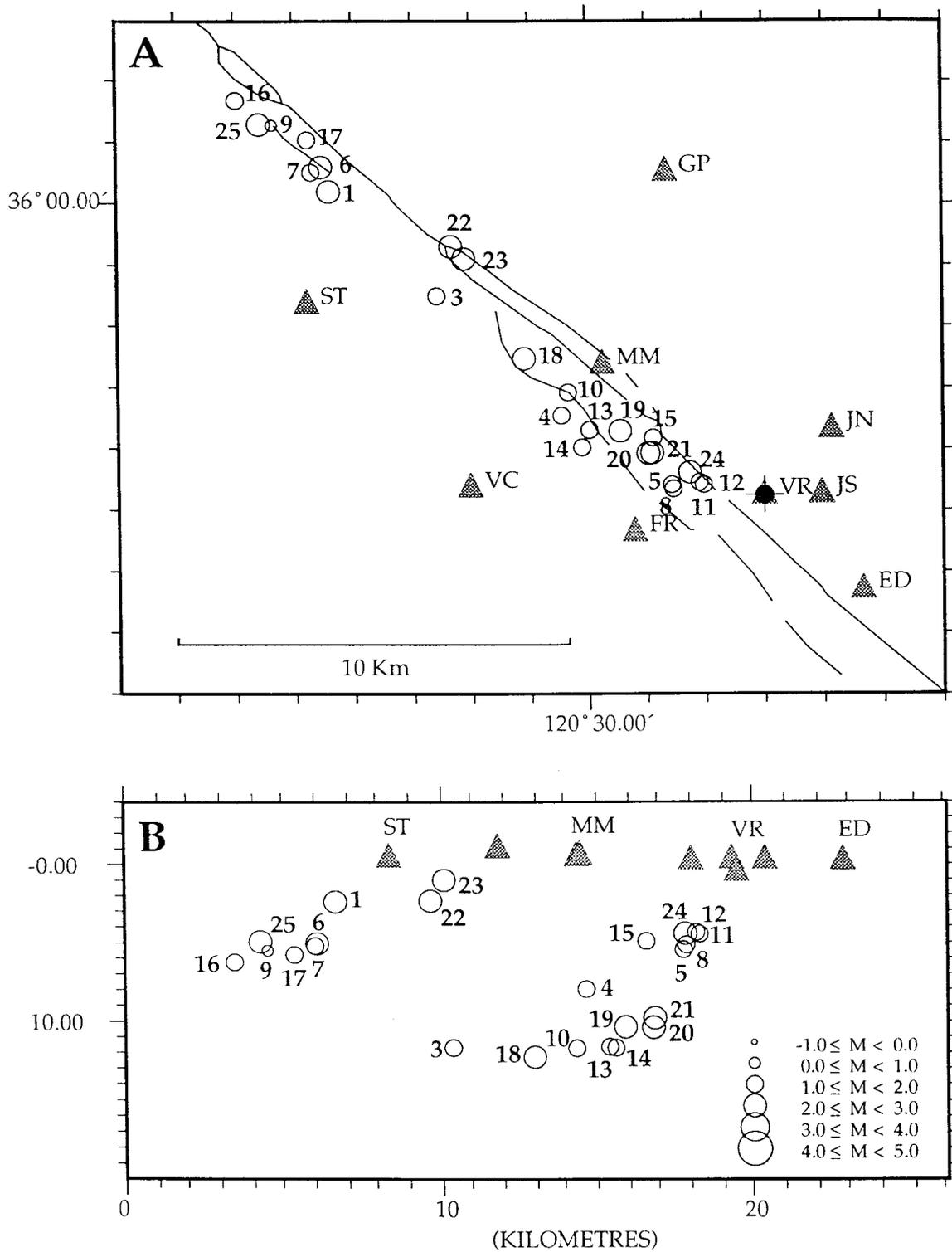


Fig. 3. A: localisation des épicentres des tremblements de terre étudiés avec leur magnitude M .
 B: localisation des hypocentres des tremblements de terre dans le plan vertical de la faille San Andreas.
 Les triangles ombrés représentent les stations sismologiques du réseau de Parkfield qui ont servi à localiser les tremblements de terre.

ques d'âge mésozoïque, est recouvert en discordance par environ deux kilomètres de sédiments tertiaires et quaternaires. D'autre part, le complexe franciscain (Jurassique supérieur-Paléogène), très hétérogène, comporte des schistes bleus, des grauwackes et un olistostrome à matrice argilo-serpentineuse. Dans la région étudiée, il est recouvert par plus d'un kilomètre et demi de sédiments d'âge crétacé supérieur à quaternaire. De lithologie variée (grès à argilite), ces formations surmontant le complexe franciscain sont plissées et forment le synclinal de Parkfield (fig. 2).

Le puits Varian de 1,5 km de profondeur a été foré dans le flanc SW du synclinal de Parkfield (figs. 1 et 2). Sous quelques dizaines de mètres de formations meubles de terrasse et de cônes de déjection (Holocène), il a recoupé des terrains d'âge pliocène à miocène inférieur : les formations de Etche-goin (grès, siltites et conglomérats), de Monterey (mélange de siltites, d'argilites et de grès) de Tremblor (grès et argilite). Au droit du forage, les couches présentent un pendage de 50 à 60 degrés vers le NE. Le synclinal de Parkfield est limité au NE par la faille inverse de Table Mountain qui le met en contact avec les roches du complexe franciscain. Au SW du site de Varian, la tectonique est dominée par le passage de deux failles majeures de direction NW-SE: la faille inverse de Gold Hill à pendage SW et la faille San Andreas, verticale et cisailante dextre. A cet endroit, cette dernière est caractérisée par la présence de plusieurs branches subparallèles. Une campagne de sismique réflexion réalisée dans la région (Louie *et al.*, 1988) suggère que ces failles sont différenciées jusqu'à plusieurs kilomètres sous la surface du sol mais s'anastomosent en profondeur.

Les mesures *in situ* de contraintes au sein de la croûte le long de la faille San Andreas ont montré que la contrainte horizontale maximale compressive est actuellement orientée perpendiculairement à la trace de la faille (Zoback *et al.*, 1987) et non selon une direction de 30 à 45° comme le prévoit le critère de Coulomb dans un matériau homogène. Cette orientation du tenseur actuel des contraintes explique le soulèvement des chaînes côtières et les plissements et failles inverses d'orientation NW-SE jalonnant la faille San Andreas. Dans la région étudiée, les failles de Gold Hill et de Table Mountain ainsi que le synclinal de Parkfield constituent un exemple de ce phénomène. D'un autre côté, de très nombreuses données indiquent que la faille San Andreas est une faille cisailante dextre pure avec un rejet horizontal de plusieurs centaines de km. Cet apparent paradoxe semble résulter de l'hétérogénéité de la croûte et de la présence d'une zone de faible résistance le long de la faille qui réoriente lo-

calement le champ de contraintes régionales (Zoback *et al.*, 1987).

3. ETUDE DES MOUVEMENTS SEISMQUES DANS LE PUIT VARIAN A PARKFIELD

Entre mars 1988 et décembre 1992, plus de 200 tremblements de terre ont été enregistrés par des séismomètres triaxiaux placés à 0 m, 23 m, 298 m, 572 m et 938 m de profondeur. Pour cette étude, seuls ont été retenus les événements présentant un rapport signal sur bruit suffisant. Le tableau 1 reprend la liste de ces séismes ainsi que leurs principales caractéristiques. La localisation de la plupart des épencentres est montrée à la figure 3. A l'exception de l'événement 2, ils sont tous situés sur la faille San Andreas. A partir des valeurs d'orientation des capteurs, les deux composantes horizontales du mouvement ont subi une rotation en vue de les faire coïncider avec la direction parallèle (H1) et perpendiculaire (H2) à la faille San Andreas.

Les séismogrammes correspondant au tremblement de terre n°11 sont présentés à la figure 4. Il s'agit d'un tremblement de terre superficiel (4,67 km de profondeur) dont l'épicentre est situé à moins de 2 km du site de Varian. En raison du caractère très impulsif de cet événement, les ondes réfléchies par la surface libre sont clairement visibles, en particulier sur les signaux mesurés à 298 m de profondeur. La figure 5 reprend les mêmes signaux fenêtrés sur les ondes S avec les diagrammes de polarisation correspondants. Ces derniers consistent à tracer une composante horizontale (H2) en fonction de l'autre (H1). Les mouvements de particules observés dans le plan horizontal se caractérisent par des changements brutaux de polarité, typiques de la biréfringence des ondes S. Les arrivées des ondes S les plus rapides et des ondes dédoublées sont indiquées par des flèches. Le délai temporel entre les deux ondes dépend des propriétés anisotropes du milieu le long du trajet des ondes. Au fur et à mesure qu'elles se propagent vers la surface (fig. 5), les ondes subissent une rotation de leur polarisation, qui traduit l'hétérogénéité de la croûte entre 938 m de profondeur et la surface. A 938 m de profondeur, le premier mouvement des ondes S est parallèle à la faille San Andreas tandis que l'onde dédoublée plus lente est polarisée perpendiculairement à la même faille.

Pour tenter de déterminer l'importance de l'anisotropie, les diagrammes de polarisation (ondes S) d'une série de tremblements de terre ont été examinés. A proximité de la surface du sol, les ondes S subissent des interférences importantes avec d'autres types d'ondes (primaires, converties, réflé-

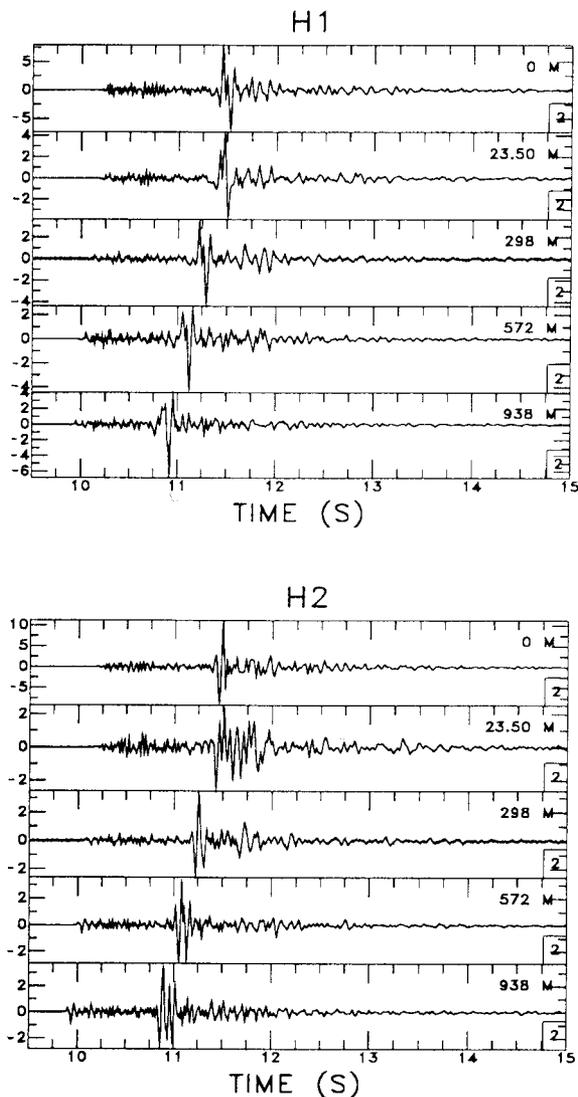


Fig. 4. Séismogrammes du tremblement de terre n° 11. H1: direction parallèle à la faille San Andreas. H2: direction perpendiculaire à la même faille.

chies...) et l'étude de la biréfringence doit être limitée aux ondes dont l'angle d'incidence est inférieure à une valeur d'angle critique dépendant des propriétés du milieu (Booth et Crampin, 1985). En pratique, les enregistrements de 7 événements (4, 5, 10, 11, 15, 20 et 21) pour lesquels la profondeur de la source est sensiblement supérieure à la distance épacentrale ont pu être utilisés. Pour les sept séismes, la polarisation de la première onde S est presque linéaire tandis que la seconde onde S présente un diagramme de polarisation plus complexe (voir, par exemple, fig. 5). De plus, l'onde S la plus rapide apparaissant à 938 m de profondeur est toujours polarisée parallèlement à la direction de la faille San Andreas, contrairement à l'onde dédoublée qui est généralement orientée perpendiculairement à la trace de la faille. Pour estimer les effets d'anisotropie, nous avons reporté les différences de temps d'arrivée entre les deux ondes en fonction de la distance source-récepteur (fig. 6). Pour chaque tremblement

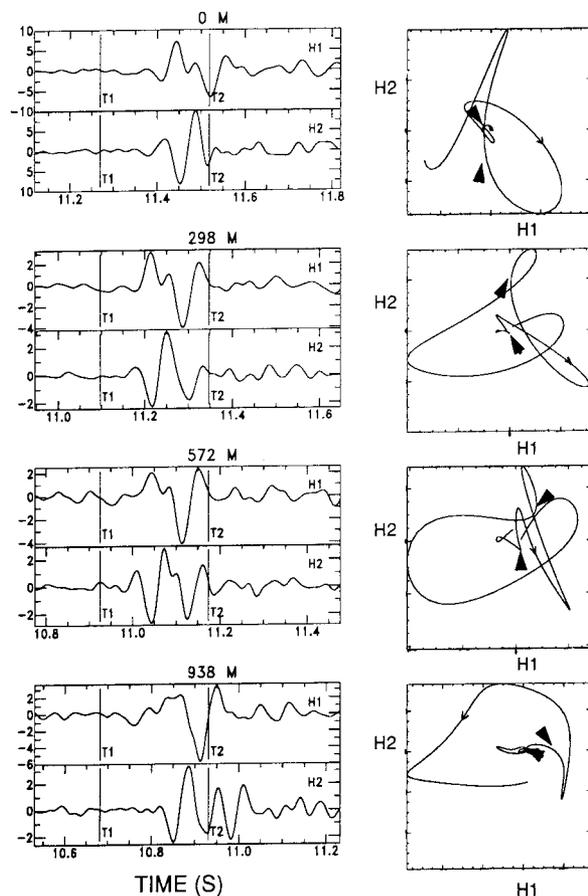


Fig. 5. Séismogrammes et diagrammes de polarisation du tremblement de terre n°11 aux profondeurs 0 m, 298 m, 572 m et 938 m. Les diagrammes de polarisation sont tracés entre les temps T1 et T2 indiqués sur les séismogrammes.

de terre, le délai augmente plus ou moins régulièrement le long du puits Varian avec un gradient d'environ 0,1 s par kilomètre. D'un autre côté, l'ensemble des données observées à 938 m de profondeur indique un taux de croissance de 0,01 seconde par kilomètre (à l'exception du séisme 10). Cette dernière valeur est du même ordre de grandeur que celles trouvées par Peacock *et al* (1988) dans la région d'Anza (Californie du sud) le long de la faille San Jacinto pour des stations installées sur les affleurements granitiques d'un grand batholite. Par contre, le gradient à proximité de la surface (premier kilomètre) apparaît en moyenne 10 fois supérieur, résultant sans doute d'une fracturation plus ouverte.

Dans la région de Parkfield, Daley et McEvilly (1990) ont réalisé une étude VSP (Vertical Seismic Profiling) en utilisant les capteurs suspendus dans le puits Varian et une source d'ondes S en surface. Ils ont également mis en évidence une biréfringence très nette des ondes S dans les terrains superficiels et ont trouvé que la vitesse de propagation des ondes polarisées perpendiculairement à la faille est plus faible que celle des ondes vibrant parallèlement

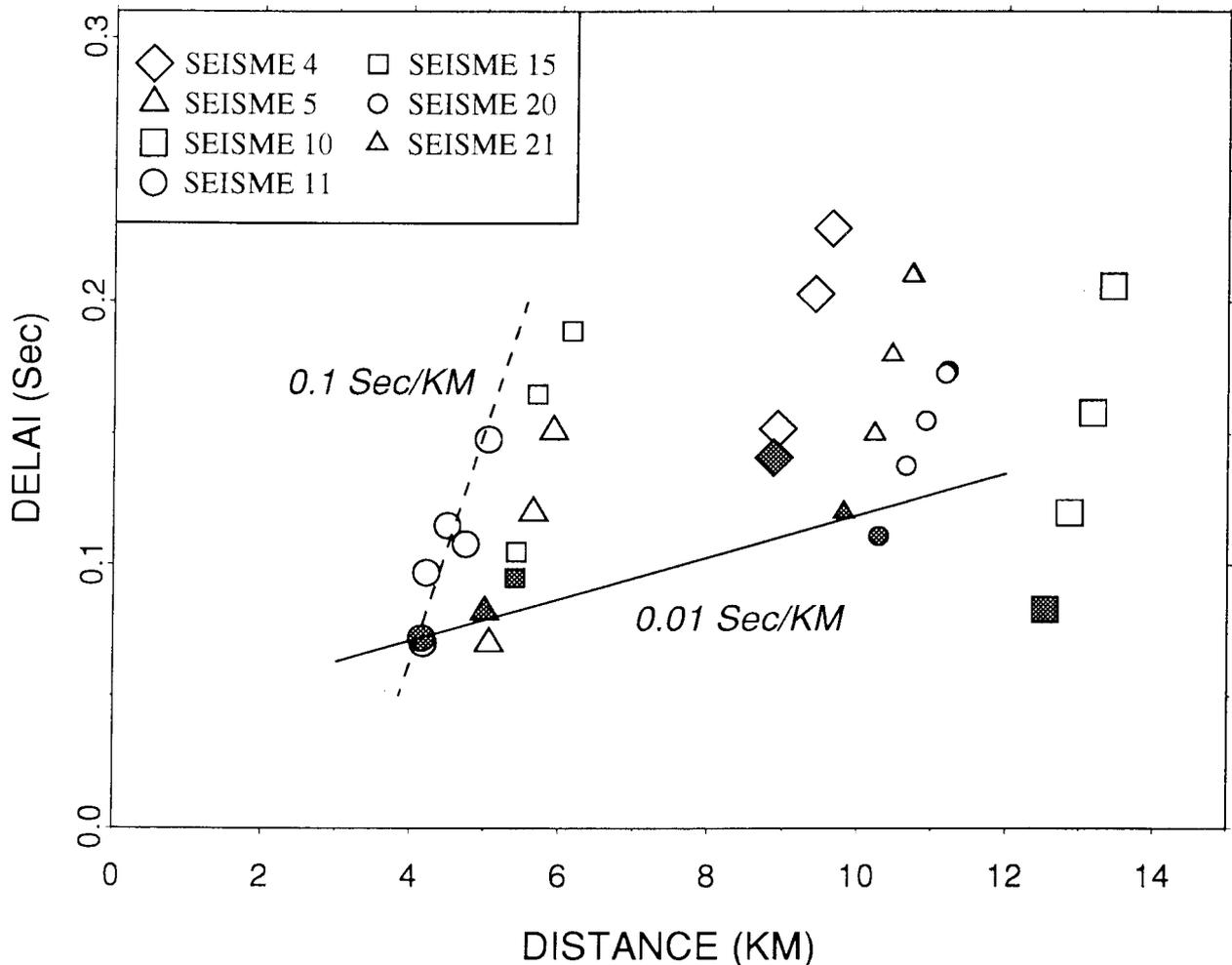


Fig. 6. Diagramme reprenant, pour les tremblements de terre n° 11, 5, 15, 4, 21, 20 et 10, le délai entre les deux ondes S biréfringentes en fonction de la distance source-récepteur. Les symboles ombrés correspondent aux mesures réalisées à 938 m de profondeur.

à la faille. D'après Daley et McEvilly, ces résultats peuvent être expliqués par un simple modèle de fractures verticales alignées parallèlement à la faille San Andreas. Le degré d'anisotropie, qui semble augmenter lorsqu'on se rapproche de la faille, indique le rôle prépondérant de cette dernière et de la direction de cisaillement sur le phénomène. Pour une source localisée à 365 m du puits Varian en direction de la faille San Andreas, ils ont déterminé un taux de croissance du délai entre les deux ondes S de l'ordre de 0.1 s/km entre 400 et 1200 m de profondeur.

Ces résultats, basés sur l'analyse de signaux générés par une source superficielle, sont remarquablement concordants avec ceux obtenus dans cette étude à partir de l'analyse de tremblements de terre le long de la faille San Andreas. Cette cohérence renforce l'idée que la biréfringence des ondes S observée à Parkfield est conditionnée par le jeu de la faille San Andreas et la fracturation parallèle qui lui est associée. La polarisation de l'onde S la plus rapide fournit dans ce cas l'orientation de la fracturation et non la direction de la contrainte

horizontale maximale qui, à proximité de la faille, lui est perpendiculaire.

L'étude de la biréfringence s'est intéressée aux phases d'ondes S les plus rapides, qui ne sont pas généralement les plus énergétiques. Les mouvements du sol dus aux ondes S - qui sont souvent les plus critiques en génie parasismique- résultent de l'influence combinée de la source sismique et des effets de propagation. La figure 7 présente les diagrammes de polarisation - sur une fenêtre de 1 seconde - correspondant à 15 tremblements de terre du tableau 1. De fortes différences dans la polarisation du mouvement apparaissent entre les divers séismes. De façon schématique, les tremblements de terre les plus proches (5, 8, 11, 12, 15 et 24) sont caractérisés par un mouvement important principalement orienté parallèlement à la faille San Andreas (selon H1). Lorsque la distance épacentrale augmente, les diagrammes de polarisation (événements 1, 9, 18, 19, 20 et 21) deviennent dominés par un mouvement perpendiculaire à la faille. A des distances intermédiaires, certains séismes sont caractérisés par des diagrammes de polarisation pré-

sentant les deux directions (événement 4) ou aucune orientation prépondérante (événements 10 et 14). Ces observations vont être interprétées à partir de simulations numériques des mouvements engendrés par la faille San Andreas.

4. SIMULATION NUMERIQUE DES MOUVEMENTS ENGENDRES PAR LA FAILLE SAN ANDREAS

Dans la région de Parkfield, la plupart des mécanismes au foyer des tremblements de terre enregistrés sont compatibles avec un cisaillement pur le long d'une faille verticale (Nishioka et Michael, 1990). En vue de comprendre les diagrammes de polarisation de la figure 7, les mouvements engendrés par le jeu de la faille San Andreas ont été simulés numériquement par la méthode des nombres d'ondes discrets (Bouchon, 1981). Cette technique permet de calculer de manière exacte le champ d'ondes rayonné par une source ponctuelle de mécanisme donné, ici une faille coulissante dextre verticale, dans un milieu plan stratifié. Outre la compréhension des diagrammes de polarisation expérimentaux, le but de la simulation est de tester l'influence de divers paramètres tels que la profondeur et la présence d'une couche atténuante superficielle. La radiation d'une source située à 5 km de profondeur a été modélisée pour les configurations suivantes :

- un demi-espace élastique homogène isotrope ($V_p= 6,2$ km/s, $V_s=3,6$ km/s) et des récepteurs triaxiaux placés à 1 km de profondeur,

- un demi-espace élastique homogène isotrope et des récepteurs triaxiaux placés en surface,

- un demi-espace élastique surmonté d'une couche atténuante isotrope ($Q_p=Q_s=20$) de 900 m d'épaisseur. Les vitesses de propagation dans le demi-espace et la couche atténuante sont identiques. Les récepteurs triaxiaux sont placés à 1 km de profondeur.

Les séismogrammes synthétiques calculés selon un profil perpendiculaire à la trace de la faille et situé à 4 km de l'épicentre sont présentés à la figure 8 pour ces trois configurations tandis que les diagrammes de polarisation reprenant l'ensemble du signal dans le plan X-Y sont tracés à la figure 9. L'examen de ces figures permet de tirer les conclusions suivantes.

- Quelle que soit la configuration, le mouvement principal à une distance X suffisamment importante de l'épicentre est un mouvement horizontal perpendiculaire à la trace de la faille. Ce phénomène a été observé en pratique à de nombreuses reprises lors de grands séismes californiens comme ceux de Parkfield (Aki, 1968), Imperial Valley (Archuleta, 1982) et Coyote Lake (Bouchon, 1982). A faible distance de l'épicentre par contre, le mouvement tend à devenir parallèle à la trace de la faille.

- Dans le cas d'un demi-espace homogène, le mouvement mesuré à 1 km de profondeur est plus complexe que celui en surface en raison des phénomènes de réflexion sur la surface libre. Les diffé-

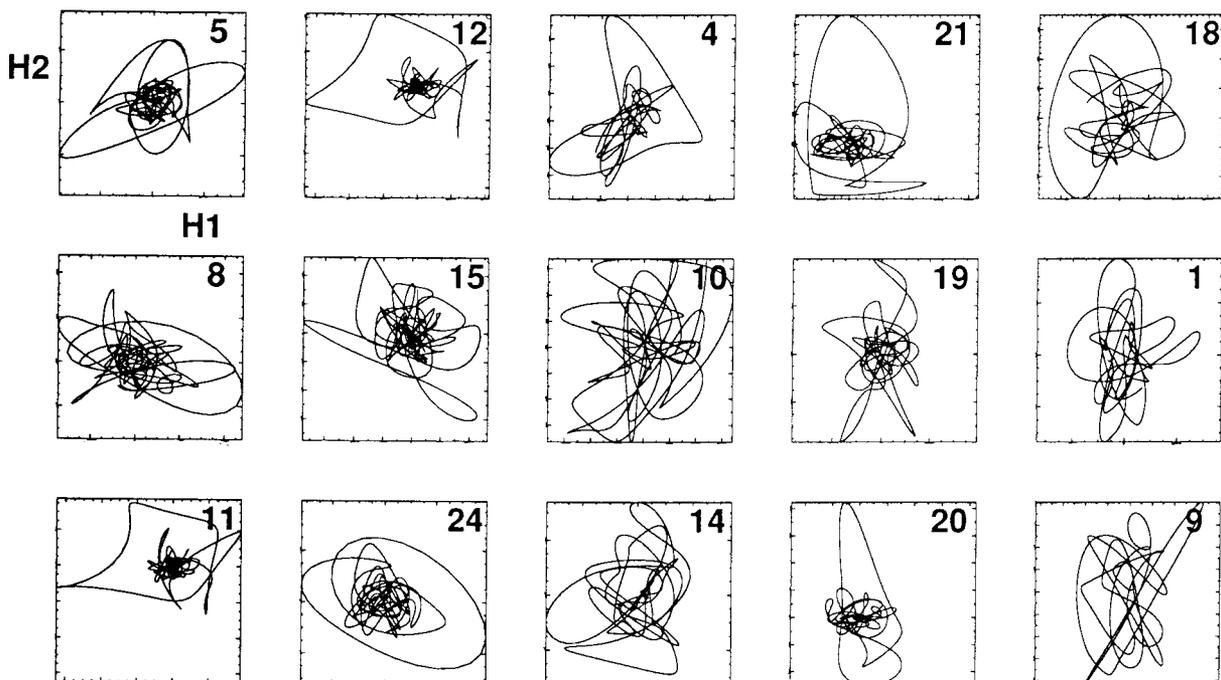


Fig. 7. Diagrammes de polarisation (H2-H1) de 15 tremblements de terre sur une fenêtre temporelle de 1 seconde. H1: direction parallèle à la faille San Andreas. H2: direction perpendiculaire à la même faille.

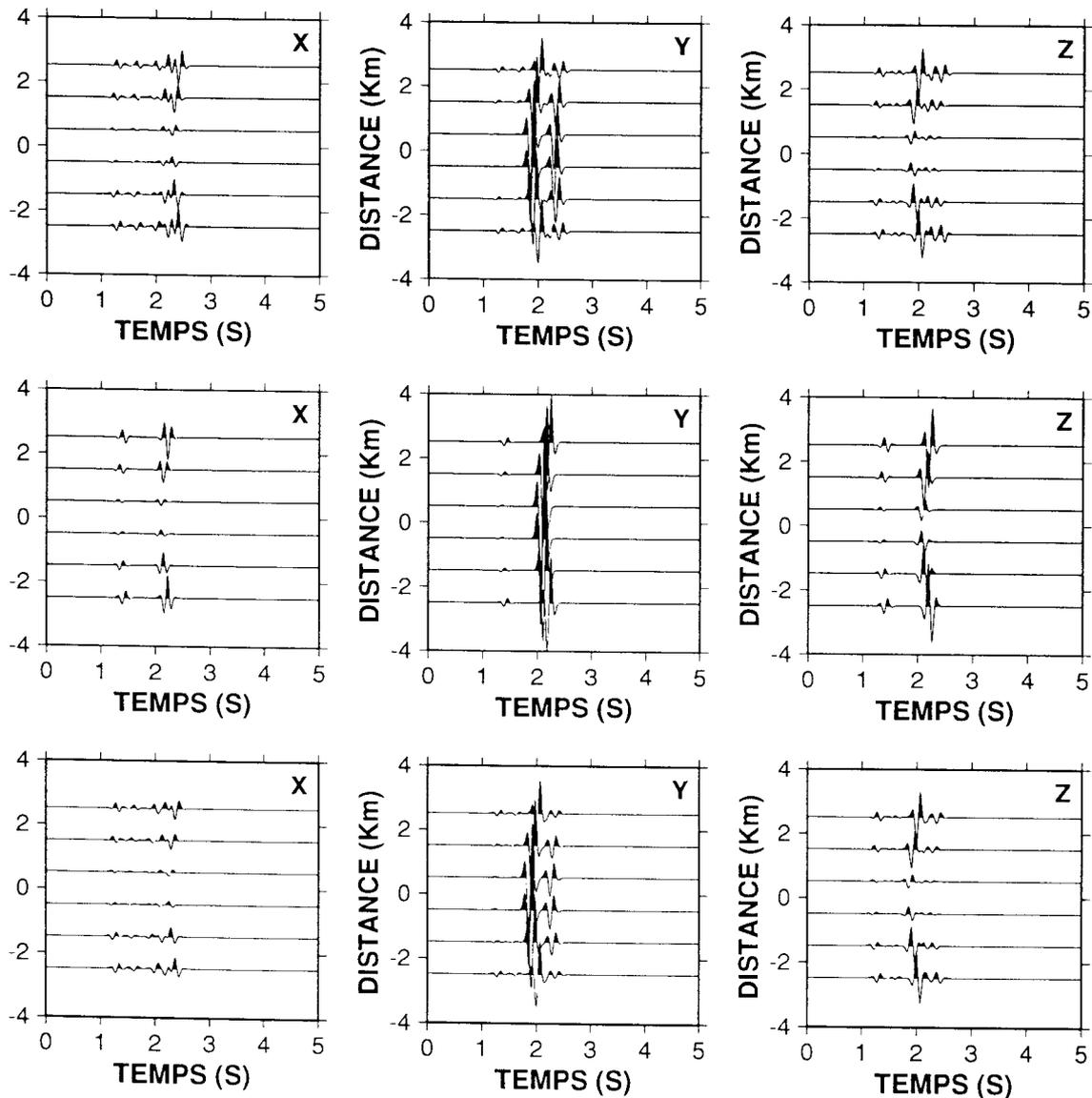


Fig. 8. Séismogrammes synthétiques selon les trois directions X, Y et Z où X représente la direction parallèle à la trace de la faille, Y la direction perpendiculaire et Z la verticale. Le signal source est un Ricker de 5 Hz de fréquence. Les séismogrammes sont calculés pour X = 4 km et Y variable.

rences de polarité entre mouvements incident et réfléchi sont très clairement visibles sur les diagrammes de polarisation. Ces différences tendent à s'estomper avec la distance.

- L'introduction de l'atténuation dans les couches superficielles entraîne essentiellement un amortissement relatif des réflexions dont le trajet est plus long que celui des ondes directes. Sur les diagrammes de polarisation, cet effet se marque par des mouvements de particules quasi linéaires.

- Aux distances épicentrales considérées lors de l'étude des mouvements dans le puits Varian (quelques km), aucune onde S rapide n'apparaît polarisée parallèlement à la faille San Andreas. Le même résultat a été obtenu pour un milieu stratifié.

La comparaison des figures 7 et 9 indique que si on accepte certaines différences dues aux incerti-

tudes sur la structure géologique et aux effets de propagation dans des milieux hétérogènes, la polarisation des mouvements observés peut globalement être expliquée par le mécanisme de la faille San Andreas. Selon la distance épicentrale, cette dernière génère des ondes vibrant parallèlement ou perpendiculairement à la faille (fig. 9). A cette influence de la radiation de la source, se superposent des phénomènes de réflexion et de diffraction qui peuvent compliquer les diagrammes de polarisation, particulièrement aux distances intermédiaires.

5. CONCLUSIONS

L'étude des séismes enregistrés dans le puits Varian a permis de mettre en évidence la biréfringence des ondes S résultant de l'anisotropie à proxi-

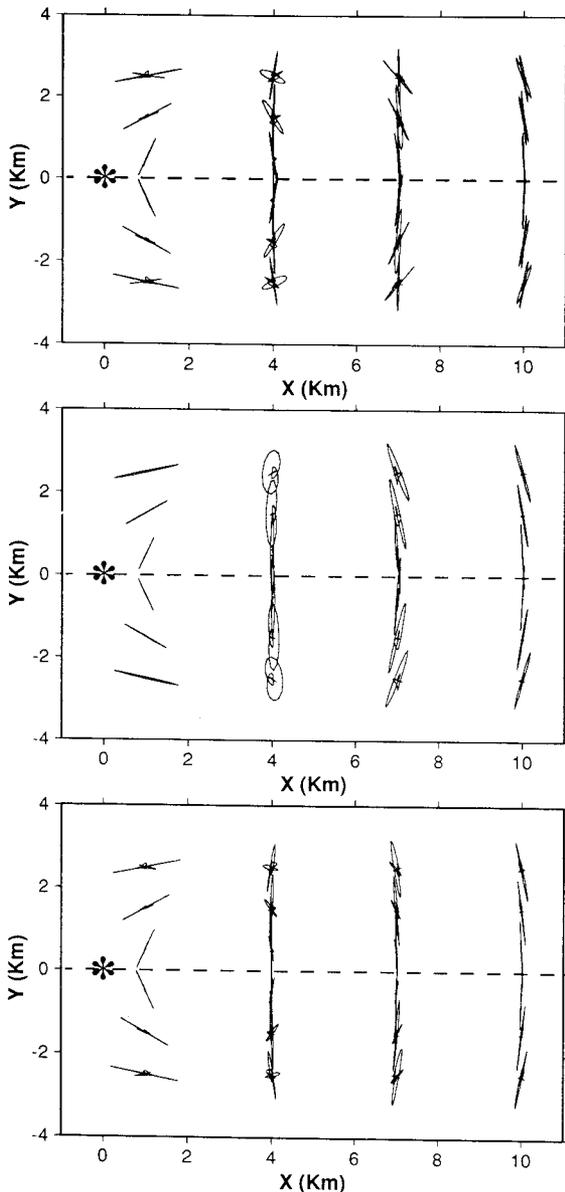


Fig. 9. Diagrammes de polarisation (plan X-Y) des séismogrammes synthétiques calculés pour les trois configurations (voir texte).

mité de la faille San Andreas. Les ondes S polarisées parallèlement à la faille se propagent plus rapidement que les ondes S vibrant perpendiculairement à la faille. Ces résultats renforcent l'idée (Daley et McEvilly, (1990) que l'anisotropie observée dans la région de Parkfield est contrôlée par le mécanisme de la faille San Andreas et est due à la présence d'une fracturation verticale parallèle à la faille. A 938 m de profondeur, le délai entre les deux ondes augmente avec un taux de 0.01 s/km tandis qu'à proximité de la surface ce taux est dix fois plus important, traduisant sans doute une fracturation plus ouverte.

Après les deux premières ondes, le mouvement global des ondes S, mesurées à la base du puits Varian, semble essentiellement contraint par l'effet

de la source et a pu être simulé numériquement. A faible distance épacentrale, les ondes les plus énergétiques sont polarisées parallèlement à la faille tandis qu'à une distance de quelques kilomètres le mouvement est orienté perpendiculairement.

Ces observations montrent l'intérêt de l'utilisation de la biréfringence des ondes S en tectonophysique puisqu'il s'agit d'une des rares méthodes permettant de déduire l'anisotropie des massifs rocheux et d'orienter la fracturation éventuelle.

6. REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée lors d'un séjour au Département de Géologie de l'Université de Duke (Caroline du Nord) et je remercie le Professeur P.E. Malin pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et fourni les données du puits Varian. Cette collaboration a été rendue possible grâce à la bourse OTAN P10-90.21.61.

7. BIBLIOGRAPHIE

- AKI, K., 1968. Seismic displacements near a fault. *J. Geophys. Res.*, 72: 5359-5376.
- ARCHULETA, R., 1984. A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake. *J. Geophys. Res.*, 89: 4559-4585.
- BAKUN, W.H. & LINDH, A.G., 1985. The Parkfield, California, Earthquake Prediction Experiment. *Science*, 229: 619-624.
- BAKUN, W. H. & McEVILLY, T.V., 1984. Recurrence models and Parkfield, California, earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 89: 3051-3058.
- BOUCHON, M., 1981. A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71: 959-972.
- BOUCHON, M., 1982. Rupture mechanism of the Coyote Lake earthquake of August 6, 1979 inferred from near-field data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72: 745-757.
- CRAMPIN, S., 1985. Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting. *Geophysics*, 50: 142-152.
- DALEY, T.M. & McEVILLY, T.V., 1990. Shear-wave anisotropy in the Parkfield Varian Well VSP. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80: 857-869.
- LOUIE, J.N., CLAYTON, R.W. & LEBRAS, R.J., 1988. Three dimensional imaging of steeply dipping structure near the San Andreas fault, Parkfield, California. *Geophysics*, 53: 176-185.
- MALIN, P.E., McEVILLY, T.V. & MOSES, T., 1987. Cooperative UCSB-UCB-USGS recovery & instrumentation of the 5150 ft Varian A-1 well as a geophysical observatory. *EOS*, 68: 1357.
- NISHIOKA, G.K., & MICHAEL, A.J., 1990. A detailed seismicity study of the middle mountain zone at Parkfield, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 81: 577-588.
- PEACOCK, S., CRAMPIN, S. & BOOTH, D.C., 1988. Shear wave splitting in the Anza seismic gap, Southern California: Temporal variations as possible precursors. *J. Geophys. Res.*, 93: 3339-3356.
- SIMS J.D., 1990. Geologic map of the San Andreas fault zone in the Parkfield 7.5 minute quadrangle, Monterey and Fresno Counties, California. *U.S. Geol. Surv. Misc. Field Stud. Map, MF-2015.*