

# INTERPRÉTATION DES ONDES PKP, DE LEURS PRÉCURSEURS ET MULTIPLES OBSERVÉS A BANGUI

GUY VALANCE

Cet article rend compte des travaux de Guy VALANCE, Géophysicien O.R.S.T.O.M., décédé en novembre 1976.

Cette étude a été effectuée, sous la direction de M. CHOUDHURY, au laboratoire de sismologie globale du C.N.R.S. à Strasbourg, sur les données acquises par l'auteur au Centre O.R.S.T.O.M. de Bangui.

L'article ici présenté a été rédigé par C. DORBATH, d'après les notes et les résultats des travaux de Guy VALANCE.

## RÉSUMÉ

Une étude sur l'origine des précurseurs des ondes PKP a été entreprise en utilisant des séismes de distance épacentrale comprise entre  $130^\circ$  et  $160^\circ$  enregistrés par le réseau de stations de Bangui (\*) (République Centrafricaine). On a pu identifier trois branches de précurseurs de  $PKP_{DF}$  pour des distances inférieures à  $140^\circ$ . Ces branches peuvent être prolongées au-delà de  $145^\circ$  en tant que phases intermédiaires entre  $PKP_{DF}$  et  $PKP_{AB}$ . Leurs hodochrones impliquent plusieurs discontinuités dans la zone de transition.

Cette nouvelle série de données ne vient pas à l'appui de la récente hypothèse selon laquelle les précurseurs de PKP seraient des phases diffusées, soit à la frontière noyau-manteau, soit dans les 200 derniers kilomètres du manteau.

## SUMMARY

### INTERPRETATION OF PKP WAVES, OF THEIR PRECURSORS AND MULTIPLES OBSERVED AT BANGUI

*We study the origin of the precursors of PKP waves using earthquakes recorded by stations in Central African Republic, between  $130^\circ$  and  $160^\circ$ . We can identify three travel-time curves of  $PKP_{DF}$  precursors below  $140^\circ$ . These curves are lateral extensions of the intermediate phases observed between  $PKP_{DF}$  and  $PKP_{AB}$  beyond  $145^\circ$ . Their travel-time curves show some discontinuities in the transition zone.*

*These new results do not confirm the hypothesis that PKP precursors are phases scattered at the core mantle boundary or in the lower 200 km of the mantle.*

(\*) Coordonnées géographiques des stations.

Bangui (BNG)	4° 26.1' N	18° 32.8' E
Yongossaba (YOG)	4° 53.5' N	22° 57.9' E
Bakouma (BAK)	5° 34.3' N	22° 55.0' E
Boali (BLI)	4° 51.7' N	18° 00.1' E
Bossako (BSK)	4° 11.1' N	17° 55.2' E

## Introduction

Depuis l'établissement des premiers modèles de vitesse des ondes P dans le noyau proposés par JEFFREYS et BULLEN (1958) et GUTENBERG (1958), différentes hypothèses sur la propagation des ondes du noyau ont été proposées. De nombreuses recherches ont porté plus particulièrement sur les phases de courte période et de faible amplitude précédant la branche  $PKP_{DF}$  aux distances inférieures à  $140^\circ$  et de nombreuses interprétations ont été données de ces phases appelées précurseurs de PKP. Les travaux de GUTENBERG (1958), HAI (1963), BOLT (1964), BUCHBINDER (1971), HADDON et CLEARY (1974) et WRIGHT (1975) utilisent un petit nombre de données, et souvent les mêmes, qui présentent une dispersion importante résultant de la faible amplitude des précurseurs conduisant ainsi à différentes interprétations. L'amélioration des modèles est subordonnée à la sensibilité des enregistrements. Dans les précédents travaux peu d'enregistrements à haute amplification ont été utilisés et les sismogrammes analysés proviennent, pour la plupart, de stations différentes et ce fait peut aussi expliquer la dispersion des durées de propagation.

Dans cette étude, nous avons utilisé les données du réseau des stations sismologiques de centrafricaine. La situation géographique de l'observatoire de Bangui et de ses stations satellites est une des meilleures au monde pour l'enregistrement des phases du noyau. Les séismes des Aléoutiennes, du Japon, des Philippines, de la Nouvelle Irlande, des Nouvelles Hébrides, des Fidji et Tonga, dont les déterminations sont très précises, sont à des distances comprises entre  $110^\circ$  et  $160^\circ$ . En outre sa situation au centre du continent africain autorise une grande amplification.

### 1. Instruments et technique d'enregistrement

Trois sismographes courte période ( $T = 1.053$ ), type APX équipent l'observatoire de Bangui depuis une dizaine d'années. L'enregistreur photographique BELIN fonctionne sur une vitesse de déroulement de 120 mm/min. La courbe d'amplification des composantes courte période est représentée sur la figure 1 A : On remarque que le maximum d'amplification dépasse 600.000 pour une période de 0.6 s. Les temps d'arrivée des phases observées sont lus sur les sismogrammes et reportés dans le bulletin sismique de Bangui. Ainsi un grand nombre de données d'ondes PKP ont été rassemblées avec une précision constante.

D'autre part un système d'enregistrement magnétique est employé à Bangui depuis 1973 avec des sismographes de type WILLMORE ( $T = 2.3$  s). La technique de l'enregistrement comportant un dispositif à seuil est celle décrite par CHOUDHURY et HOURI (1973). La figure 1 B montre la courbe d'amplification relative correspondant à ces enregistrements de courte période.

Dans cette étude nous utilisons également les données des stations temporaires de Yongossaba (YOG), Bakouma (BAK), Boali (BLI) et Bossako (BSK) équipées de ce même dispositif.

Pour les phases PKP, les angles apparents d'incidence à la surface de la terre sont habituellement inférieurs à  $20^\circ$ , en conséquence seules les composantes verticales courte période des sismogrammes ont été analysées et la figure 2 montre quelques exemples de sismogrammes verticaux non filtrés. On remarque le faible niveau du bruit de fond sismique et la grande sensibilité.

### 2. Hodochrone des premières arrivées aux distances $110^\circ$ - $160^\circ$

Tous les temps d'arrivée des premières phases observées sur les enregistrements photographiques depuis 1968 ont été réunis à partir du bulletin sismique de Bangui pour l'intervalle de distance  $110^\circ$ - $160^\circ$ . L'heure origine, l'épicentre, la magnitude et la profondeur du foyer proviennent des bulletins de l'U.S.C.G.S. Les hodochrones portés sur la figure 3 ont été ramenés en surface au moyen des corrections de profondeur des tables de HERRIN (1968). Quand la distance épacentrale augmente à partir de  $110^\circ$  nous remarquons que : de  $110^\circ$  à  $135^\circ$  environ, les premières arrivées peuvent être

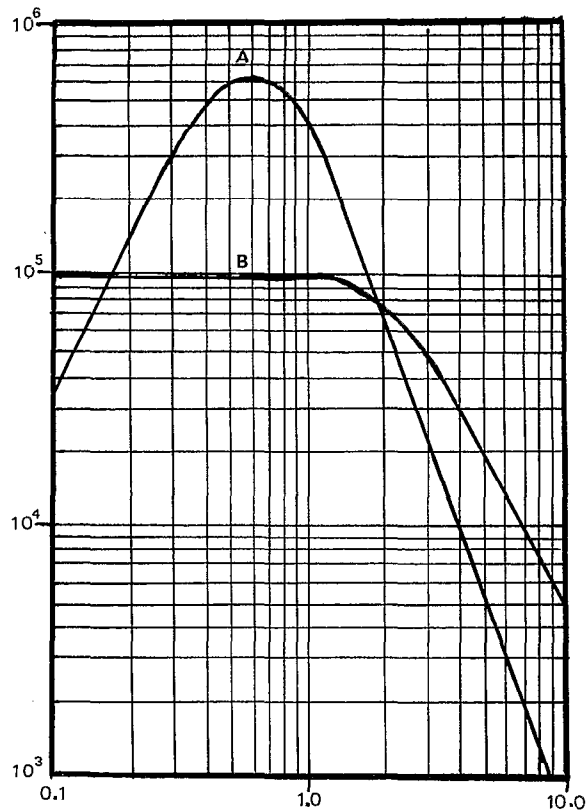


FIG. 1. — Courbes d'amplification des sismogrammes courte période. A : enregistrement photographique ; B : enregistrement magnétique (période en secondes).

identifiées avec évidence à la branche  $PKP_{DF}$  du modèle JEFFREYS-BULLEN, avec un retard d'environ 2 à 2,5 secondes sur la courbe théorique (en pointillés). Une explication de ce retard sera donnée plus loin dans la discussion. Quelques degrés avant  $140^\circ$ , les premières arrivées ont quelques secondes d'avance sur la branche  $PKP_{DF}$  et peuvent être considérées comme des précurseurs ayant des amplitudes importantes. L'identification de la première arrivée est plus discutable aux distances  $140^\circ$ - $145^\circ$ . De cette série de données nous pouvons seulement déduire que plusieurs arrivées apparaissent clairement quelques secondes après la branche  $PKP_{DF}$ , avec de grandes amplitudes, et une de ces phases est en accord avec la branche AB du modèle JEFFREYS-BULLEN. Pour les distances supérieures à  $145^\circ$ , l'identification du premier impetus décelable sur les enregistrements dépend de la magnitude du séisme ; si pour les séismes de forte magnitude, la première arrivée correspond bien au prolongement de la phase  $PKP_{DF}$  pour  $\Delta < 140^\circ$ , pour les séismes de magnitude faible la première arrivée se place sur une deuxième branche qui s'éloigne de  $PKP_{DF}$  quand  $\Delta$  varie de  $145^\circ$  à  $153$ - $154^\circ$ . Le grand contraste entre l'amplitude apparente de  $PKP_{DF}$  et celle de la branche intermédiaire peut expliquer la forme de la figure 3 dans cet intervalle de distances, et la disparition de cette phase intermédiaire au-delà de  $153$ - $154^\circ$  indique la position d'un point particulier de la courbe de propagation des ondes PKP. Ce point situé vers  $153^\circ$  sera explicité dans l'étude des sismogrammes au carré. Au-delà de  $155^\circ$ , on retrouve toujours le retard de 2 à 2,5 secondes entre le modèle de J.-B. et la courbe de propagation observée à Bangui, retard qui ne peut pas être expliqué par une propagation anormale suivant l'azimut, puisqu'il est présent de  $110^\circ$  à  $160^\circ$ .

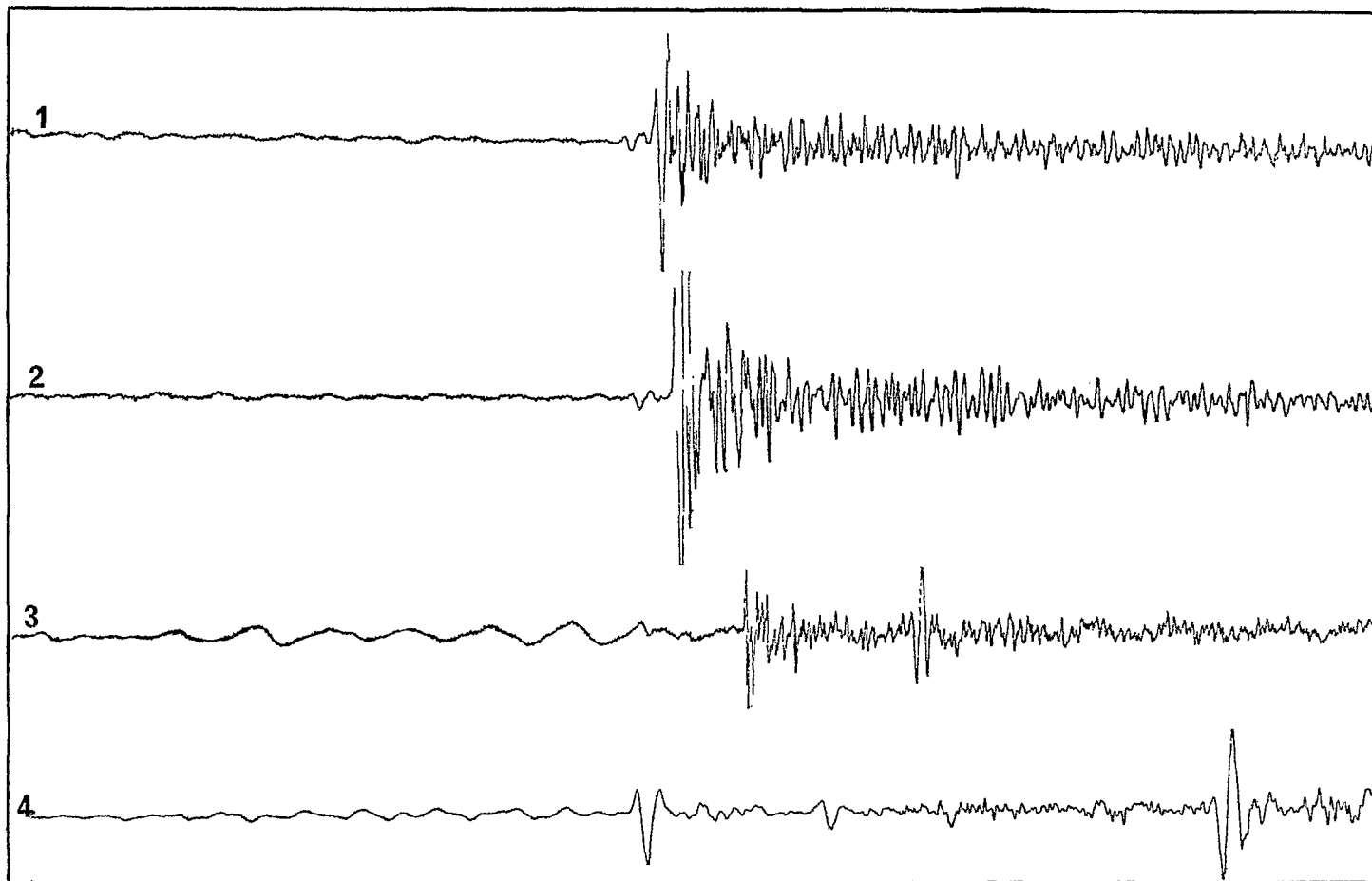


FIG. 2. — Exemples de sismogrammes non filtrés. 1 : séisme du 10 mai 1974 (225 km, 5.3) enregistré à YOG  $\Delta = 146^{\circ},8$  ; 2 : séisme du 10 mai 1974 enregistré à BAK  $\Delta = 147^{\circ},1$  ; 3 : séisme du 1<sup>er</sup> octobre 1975 (556 km, 5.3) enregistré à BNG  $\Delta = 151^{\circ},7$  ; 4 : séisme du 11 avril 1975 (571 km, 5.6) enregistré à BSK  $\Delta = 159^{\circ},1$ .

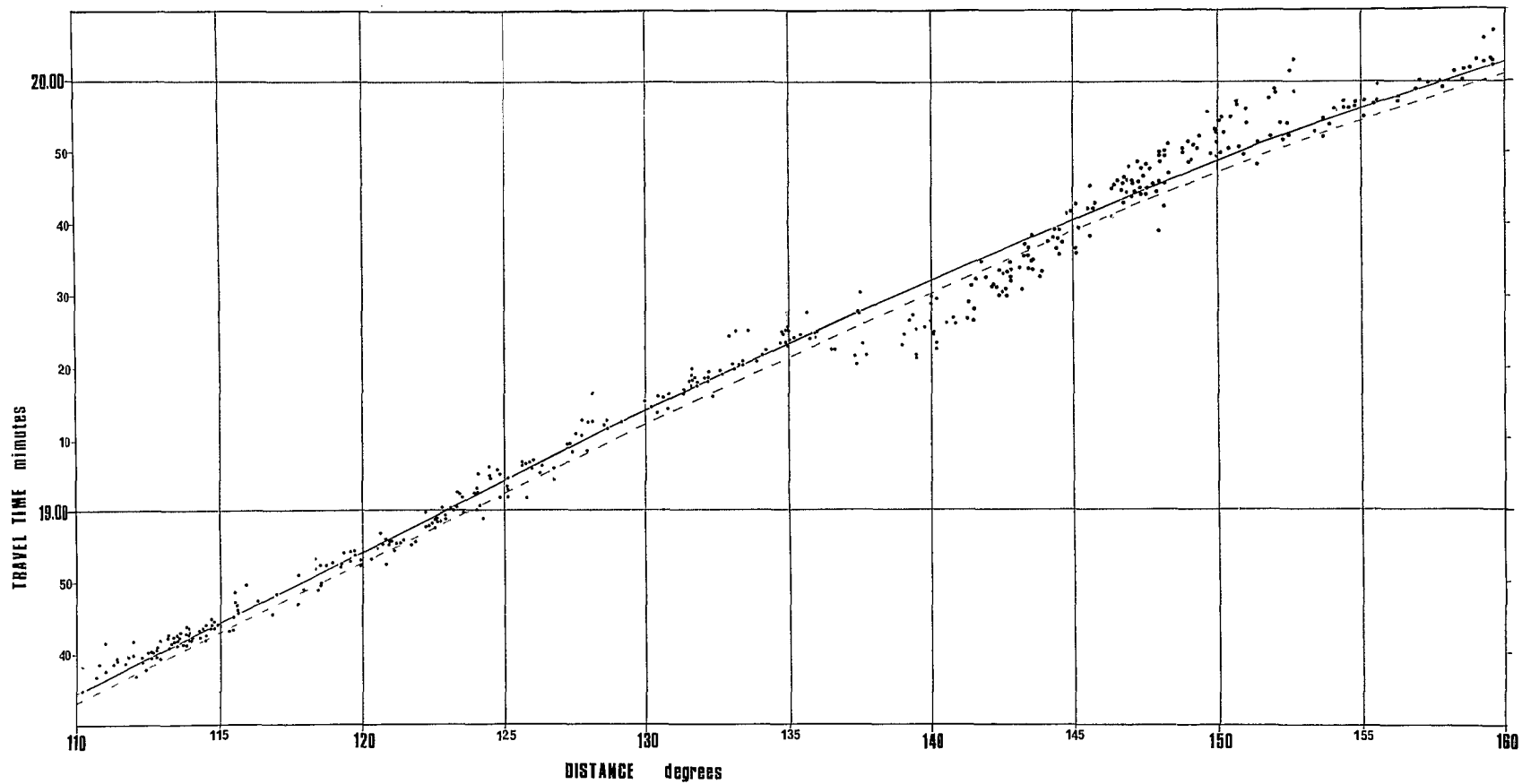


FIG. 3. — Hodochrone des premières arrivées à Bangui aux distances 110°-160°. En pointillé, la branche PKP<sub>D</sub> du modèle de J.-B.

### 3. Phases observées aux distances 145°-160°

Comme on l'a montré dans le paragraphe précédent, l'arrivée de la branche DF se voit clairement sur les sismogrammes et nous pouvons prendre ces arrivées comme référence pour la propagation des autres phases aux distances comprises entre 145° et 160°. L'étude des temps relatifs à la branche DF pour les phases du noyau présente plusieurs avantages. D'abord la différence des temps  $t-tPKP_{DF}$  n'est pas affectée par des erreurs sur l'heure origine des séismes. Ensuite les corrections pour la propagation locale affectent tous les temps d'arrivée de la même façon, de sorte que, par soustraction, cet effet disparaît sur les temps relatifs. Enfin, la correction de temps pour tenir compte de la profondeur du foyer est moindre sur un temps relatif que sur un temps absolu et il n'est pas nécessaire d'introduire des corrections pour les séismes dont la profondeur du foyer est inférieure à 100 km. Pour cette partie de notre travail, nous avons analysé les séismes dont la liste se trouve dans le tableau I. Les enregis-

TABLEAU I

Events	Date	Time			Epicentre		MB	Depth km		Stations
					Lat.	Longt.				
1	1974 Jul 14	18	48	42,9	28,3S	178,1W	5,3	183	149°,2	YOG
2	1974 Jul 14	18	48	42,9	28,3S	178,1W	5,3	183	149°,8	BAK
3	1973 Sept 21	19	28	29,3	26,1S	178,3W	5,6	651	150°,9	BNG
4	1974 Jan 26	23	33	28,7	23,9S	179,2W	5,4	551	151°,4	YOG
5	1975 Oct 01	18	01	06,4	25,2S	178,1W	5,3	556	151°,5	BNG
6	1974 Jun 26	23	33	28,7	23,9S	179,2W	5,4	551	151°,8	BAK
7	1974 May 04	09	10	01,9	24,8S	178,9E	5,2	545	152°,3	BNG
8	1974 Apr 19	07	05	09,1	24,0S	178,5E	5,5	596	152°,5	BNG
9	1975 Aug 23	19	38	13,3	24,8S	179,9E	5,3	488	152°,9	BNG
10	1974 Jun 26	23	33	28,7	23,9S	179,2E	5,4	551	153°,0	BNG
11	1975 Sept 04	23	41	01,1	23,7S	179,2E	5,3	540	153°,2	BNG
12	1975 May 05	14	31	53,1	25,0S	179,1W	5,4	386	153°,3	BNG
13	1975 Aug 23	19	38	13,3	24,8S	179,9E	5,3	488	153°,6	BLI
14	1975 Apr 12	20	49	36,0	25,7S	177,7W	4,9	177	153°,8	BNG
15	1974 Nov 11	06	29	01,1	29,9S	177,6W	5,6	196	155°,2	BNG
16	1974 Oct 21	04	12	29,4	17,9S	178,6W	6,0	602	155°,4	YOG
17	1974 Oct 10	11	22	26,4	21,4S	179,2W	5,5	602	155°,8	BNG
18	1975 Jun 06	01	08	41,1	20,6S	179,2W	5,9	655	156°,3	BNG
19	1974 Aug 10	11	22	26,4	21,4S	179,2W	5,5	602	156°,5	BLI
20	1975 Jun 06	01	08	41,1	20,6S	179,2W	5,9	655	156°,6	BSK
21	1975 Jun 06	01	08	41,1	20,6S	179,2W	5,9	655	157°,0	BLI
22	1974 Oct 21	04	12	29,4	17,9	178,6W	6,0	602	158°,5	BNG
23	1975 Jun 10	09	00	19,1	17,9S	178,4W	5,3	583	158°,6	BNG
24	1975 Apr 11	11	42	46,1	17,7S	178,0W	5,6	571	159°,1	BNG
25	1975 febr 27	18	42	53,7	17,9S	178,6W	5,9	586	159°,3	BLI
26	1975 Apr 11	11	42	46,1	17,7S	178,0W	5,6	571	159°,4	BSK
27	1975 Apr 11	11	42	46,1	17,7S	178,0W	5,6	571	159°,7	BLI

trements magnétiques ont été filtrés par un filtre passe-bas et rejoués avec une vitesse de restitution élevée (250 mm/mn) afin d'avoir une bonne précision sur la détermination des temps. Seuls les séismes profonds ont été conservés pour éviter la contamination par des réflexions en surface entre les phases  $PKP_{DF}$  et  $PKP_{AR}$  observées. Un montage des sismogrammes tenant compte de la variation de la distance épacentrale a été fait en prenant pour ligne de base les temps d'arrivée observés des  $PKP_{DF}$  (fig. 4). La triPLICATION de l'onde PKP se voit avec évidence jusqu'à 160°. Les arrivées intermédiaires peuvent être séparées en deux parties différentes : de 147° à 154° environ, l'arrivée intermédiaire se présente sous forme d'un train d'onde de durée assez grande avec une suite d'oscillations de grandes amplitudes et inversement, au-delà de 154° l'arrivée intermédiaire est représentée par une seule oscillation d'amplitude relative décroissante lorsque  $\Delta$  croît (cf. fig. 5). Ce fait déjà noté dans le

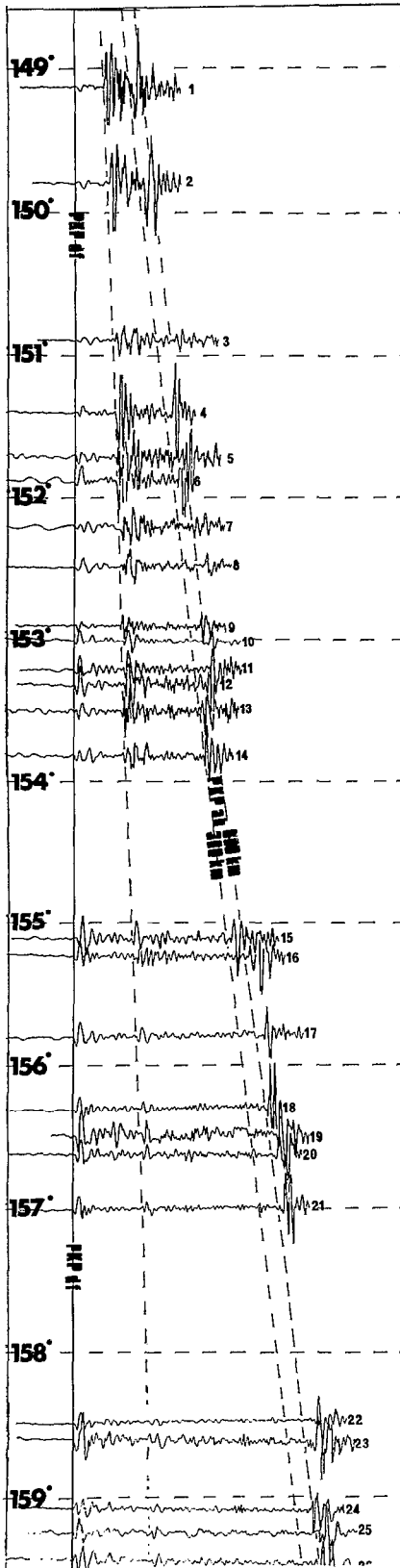


FIG. 4. — Montage de sismogrammes filtrés provenant de séismes profonds dans l'intervalle de distance  $147^{\circ}$ - $160^{\circ}$ . Temps relatifs à la branche DF. Les lignes pointillées représentent les temps relatifs  $t_{PKP_{AB}} - t_{PKP_{DF}}$  pour des foyers à 300 km et 600 km de profondeur.

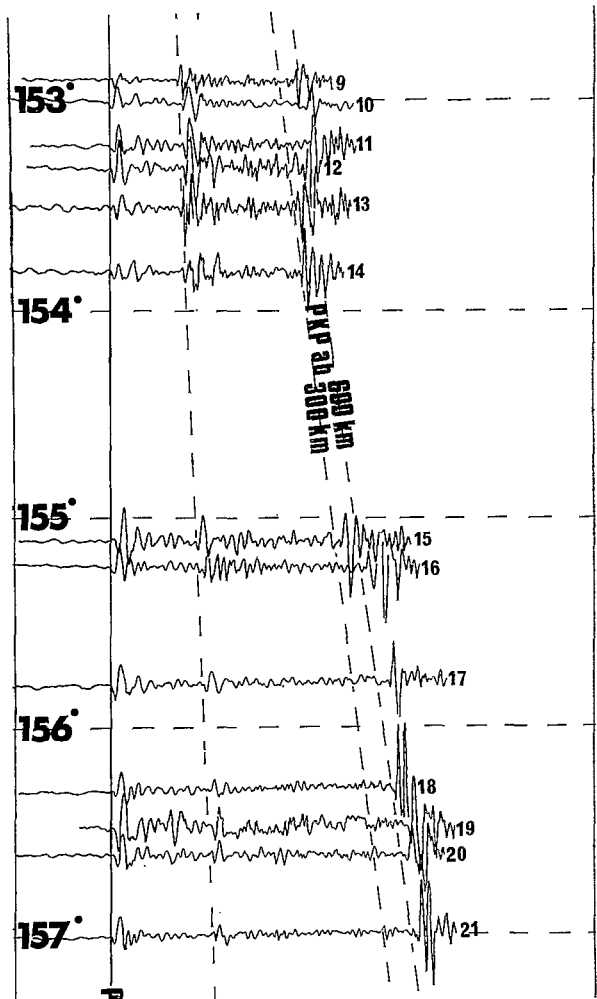


FIG. 5. — Exemples de sismogramme pour  $152^{\circ} < \Delta < 157^{\circ}$  montrant la branche intermédiaire sur des enregistrements courte période.

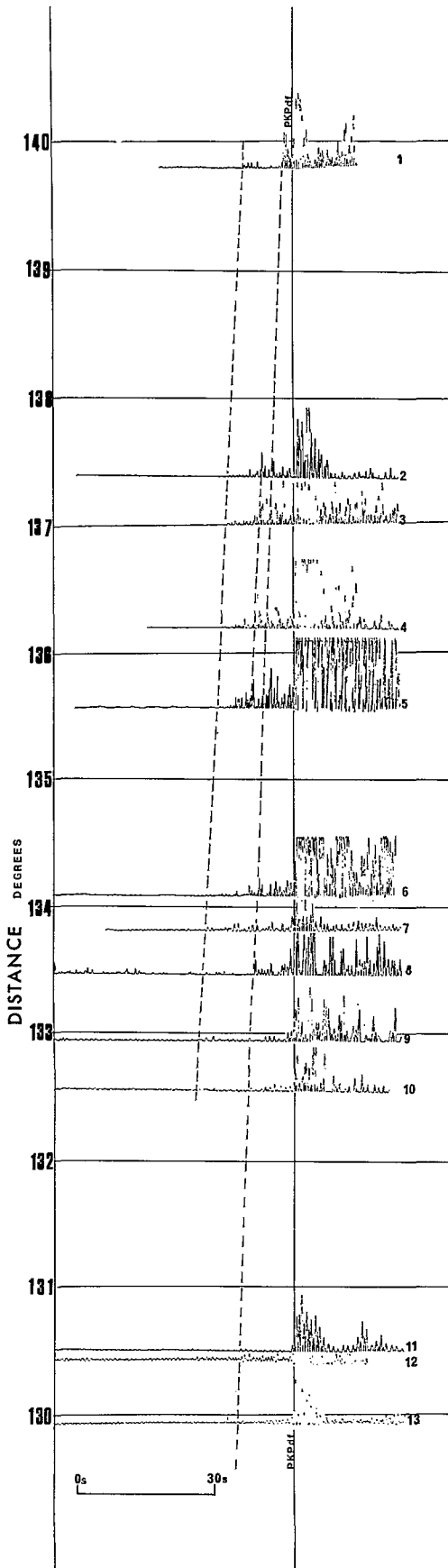


TABLEAU II

Events	Date	Time			Epicentre		MB	Depth km		Sta- tions
		h	m	s	Lat.	Longt				
1	1973 Feb 21	14	42	23,4	39,6S	176,6E	5,1	38	139°,7	BNG
2	1974 Jun 23	06	20	50,3	7,0S	155,8E	5,5	70	137°,5	BNG
3	1975 Jul 21	02	38	57,1	6,9S	155,4E	6,2	58	137°,0	BNG
4	1975 Jul 20	23	24	22,0	6,6S	154,6E	6,3	64	136°,2	BNG
5	1972 Apr 16	23	32	10,2	5,1S	154,2E	6,0	409	135°,6	BNG
6	1974 Jun 27	07	46	11,9	4,7S	152,6E	6,1	70	134°,1	BNG
7	1973 Mar 14	11	25	46,7	4,3S	152°,2E	5,8	64	133°,8	BNG
8	1974 Mar 09	20	14	28,3	7,5S	156°,2E	5,4	45	133°,4	YOG
9	1972 Sept 03	06	31	21,6	5,1S	151,3E	5,4	45	132°,9	BNG
10	1974 Aug 13	15	03	14,7	5,3S	150°,5E	5,5	33	132°,4	BNG
11	1974 Jun 22	08	12	47,5	22,1S	113,6W	5,9	33	130°,5	BNG
12	1974 Oct 16	17	30	34,7	6,3S	148,4E	5,7	70	130°,4	DLI
13	1975 Feb 27	14	23	59,3	6,1S	148,2E	5,9	78	129°,9	BNG

FIG. 6. — Sismogrammes au carré pour  $130^\circ < \Delta < 140^\circ$ . Temps relatifs à la branche  $PKP_{DF}$



paragr. 2 nous conduit à conclure que jusque vers  $154^\circ$  environ nous sommes en présence d'arrivées intermédiaires multiples (quelques secondes séparent les différentes ondes) et qu'au-delà cette multiplicité cesse pour donner une phase unique présente jusqu'à  $160^\circ$ . On peut aussi remarquer que le temps relatif de propagation pour les phases intermédiaires est peu affecté par la profondeur du foyer et par conséquent la correction de profondeur sur ces phases est voisine de celle employée pour la phase DF. Quant à la dernière arrivée, son identification avec la phase  $PKP_{AB}$  de JEFFREYS-BULLEN est justifiée par le bon accord entre les données expérimentales et les deux courbes théoriques (traits pointillés) représentant  $tPKP_{AB}$ - $tPKP_{DF}$  d'après les tables de J.-B. pour les profondeurs de foyer de 300 et 600 km.

Les résultats obtenus par la même méthode sur les sismogrammes pour  $\Delta < 140^\circ$  ne sont pas si clairs car dans l'intervalle de distances  $130^\circ$ - $140^\circ$  la première arrivée de la phase DF est mélangée avec les précurseurs et la détermination de la ligne de base sur les enregistrements est très discutable.

TABLEAU III

Events	Date	Time			Epicentre		MB	Depth km		Station
		h	m	s	Lat.	Longt.				
1	1974 May 15	02	03	46,1	30,7S	179,6W	5,3	227	146°,6	YOG
2	1974 May 15	02	03	46,1	30,7S	179,6W	5,3	227	147°,2	BAK
3	1974 May 28	02	55	50,9	31,8S	179,4W	5,0	450	147°,4	DNG
4	1972 Oct 26	23	48	34,4	14,3S	167,2E	5,4	157	147°,6	BNG
5	1973 Mar 17	04	57	12,7	19,4S	169,4E	6,0	194	147°,9	BNG
6	1974 Jul 14	18	48	42,9	28,3S	178,1W	5,3	193	149°,8	BAK
7	1973 Sept 21	19	28	29,3	26,1S	178,3W	5,6	651	150°,9	BNG
8	1974 Jun 26	23	33	28,7	23,9S	179,2W	5,4	551	151°,4	YOG
9	1975 Oct 01	18	01	06,4	25,2S	178,6W	5,3	556	151°,5	BNG
10	1974 Jun 26	23	33	28,7	23,9S	179,2W	5,4	551	151°,9	BAK
11	1974 May 04	12	47	28,3	24,8S	178,9E	5,2	545	152°,2	BNG
12	1974 Apr 04	07	05	09,1	24,0S	178,5E	5,4	386	152°,4	BNG
13	1975 Aug 23	19	38	13,3	24,8S	179,9E	5,3	488	152°,8	BNG
14	1974 Jun 26	23	33	28,7	23,9S	179,2E	5,4	551	153°,1	BNG
15	1975 May 05	14	31	53,1	25,0S	179,1W	5,4	386	153°,3	BNG
16	1975 Aug 23	19	38	13,3	24,8S	179,9E	5,3	488	153°,5	BLI
17	1975 Apr 12	20	49	36,0	25,7S	177,7W	4,9	177	153°,8	BNG
18	1974 Oct 21	04	12	29,4	17,9S	178,6W	6,0	602	155°,2	YOG
19	1974 Jul 08	11	22	26,4	21,4S	179,2W	5,5	602	156°,0	BNG
20	1975 Jun 06	01	08	41,1	20,6S	179,2W	5,9	655	156°,4	BNG
21	1974 Jul 08	11	22	26,4	21,4S	179,2W	5,5	602	156°,6	BLI
22	1975 Jun 06	01	08	41,1	20,6S	179,2W	5,9	655	156°,7	BSK
23	1975 Jun 06	01	08	41,1	20,6S	179,2W	5,9	655	157°,1	BLI
24	1974 Oct 21	04	12	29,4	17,9S	178,6W	6,0	602	158°,5	BNG
25	1975 Jun 10	09	00	19,1	17,9S	178,4W	5,3	583	158°,6	BNG
26	1974 Dec 24	02	40	31,3	15,4S	177,1W	5,1	374	161°,2	BNG
27	1974 Jun 04	04	14	15,9	15,9S	175,1W	6,0	276	162°,3	BNG

#### 4. Résultats des sismogrammes au carré

Les séismes dont la liste figure dans le tableau I ont d'abord été filtrés avec un filtre passe-bande, et ces données filtrées ont été élevées au carré. La technique consistant à élever au carré permet de renforcer fortement le contraste entre le bruit de fond et les arrivées de petits événements, en particulier les précurseurs de  $PKP$  pour  $\Delta < 140^\circ$ . Les traces au carré sont assemblées dans la figure 6 en prenant une ligne de base en accord avec l'arrivée de  $PKP_{DF}$  et l'hypothèse de plusieurs précurseurs est bien soutenue par ces données. Une première arrivée, caractérisée par une faible amplitude apparaît à  $132^\circ 5$ , 20 secondes avant  $PKP_{DF}$  et s'étend jusqu'à  $140^\circ$ ; la courbe de propagation est une droite. Quelques secondes après, arrive une deuxième onde bien marquée avec une amplitude plus grande, dans l'intervalle  $136^\circ 5$ - $140^\circ$ , et enfin une troisième onde avec une amplitude faible jusqu'à  $130^\circ$ ,

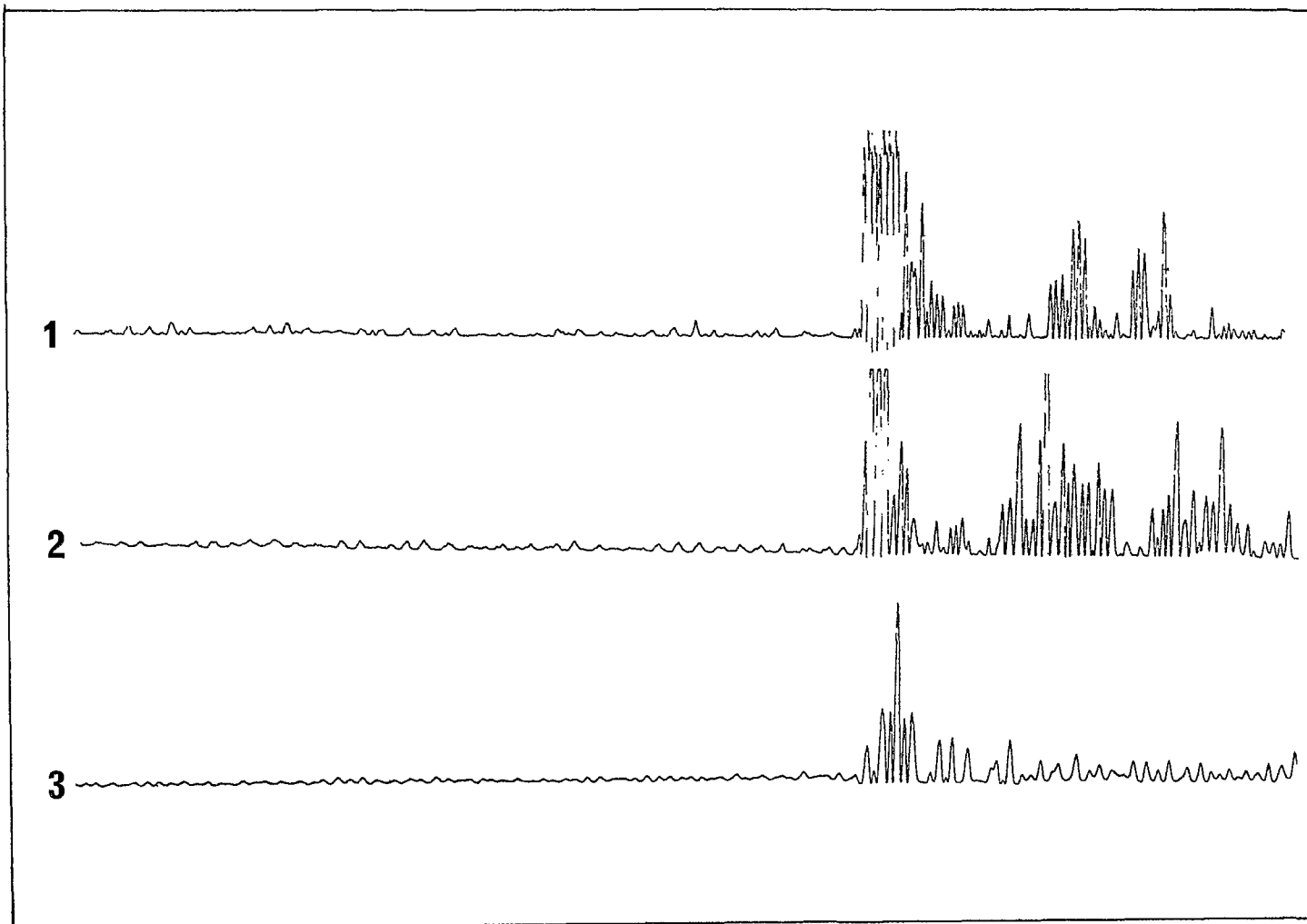


FIG. 7. — Sismogrammes au carré pour  $\Delta < 125^\circ$ . 1 : séisme du 23 juin 1974 (107 km, 5.4) enregistré à BNG  $\Delta = 124^\circ, 1$  ; 2 : séisme du 16 août 1974 (46 km, 5.7) enregistré à BNG  $\Delta = 122^\circ, 4$  ; 3 : séisme du 14 août 1974 (56 km, 5.4) enregistré à YOG  $\Delta = 120^\circ, 4$ .

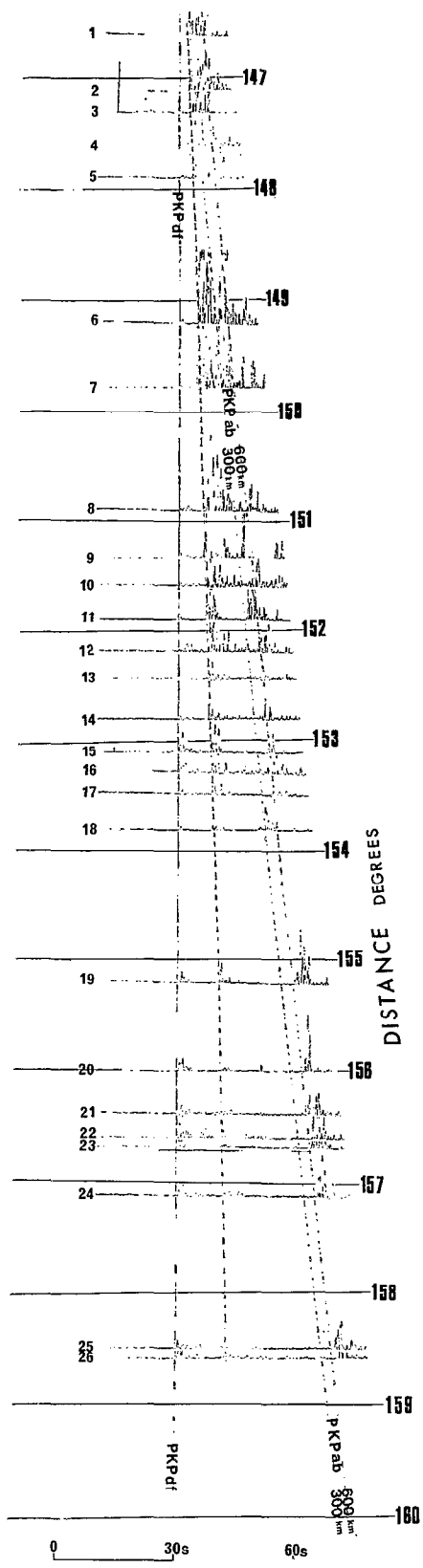


FIG. 8. — Montage de sismogrammes au carré pour  $147^{\circ} < \Delta < 162^{\circ}$  (séismes profonds). Temps relatifs à PKP<sub>DF</sub>. En pointillé les temps relatifs PKP<sub>AB</sub>-PKP<sub>DF</sub> tirés des tables de J.-B. pour des foyers profonds de 300 km et de 600 km.

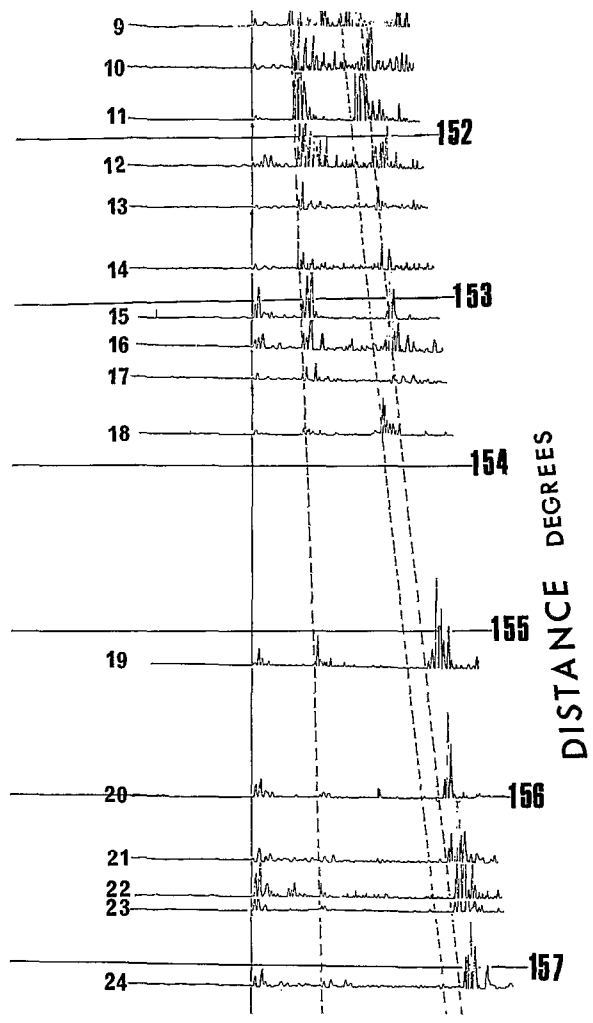


FIG. 9. — Exemples de sismogrammes au carré pour  $152^{\circ} < \Delta < 159^{\circ}$  montrant la branche des phases intermédiaires.

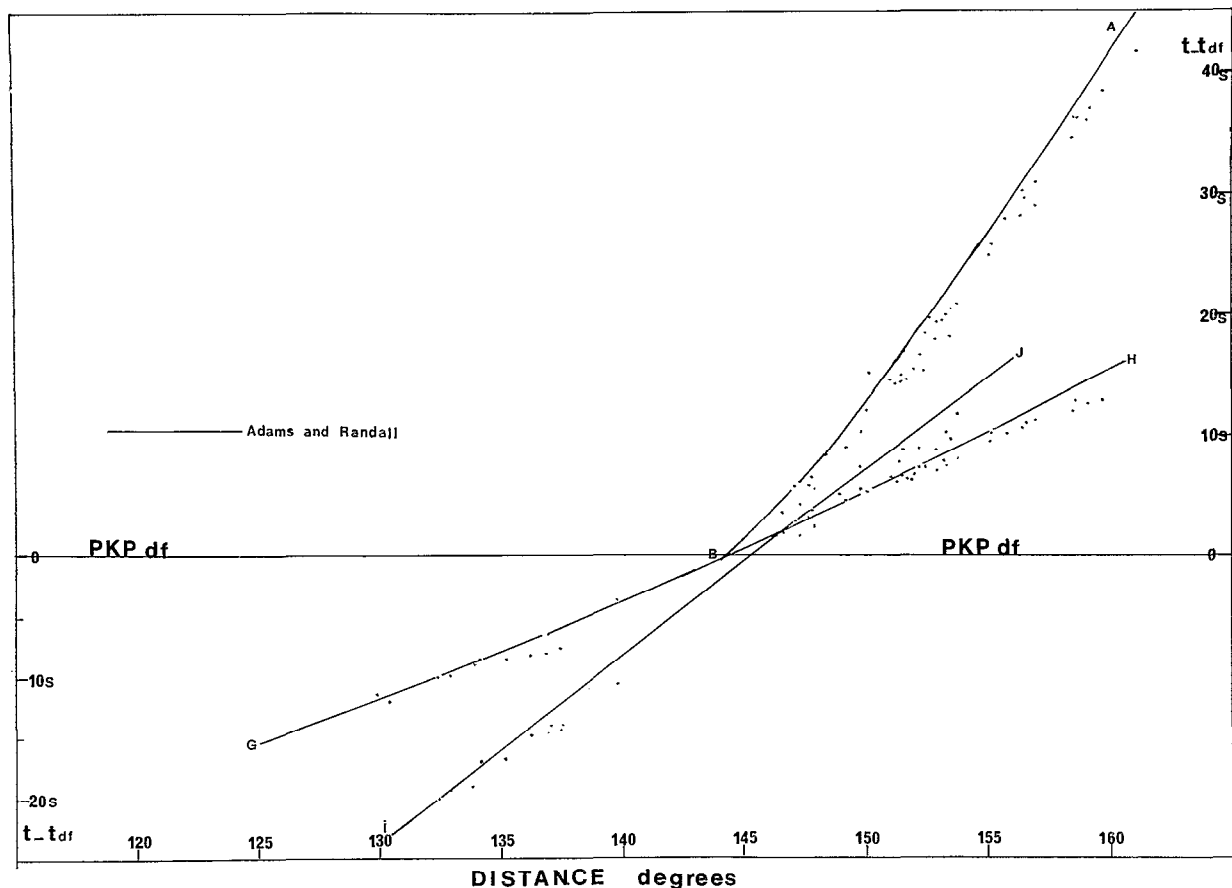


FIG. 10. — Temps relatifs à  $PKP_{DF}$  des observations de BNG pour foyer en surface. Les lignes figurent les branches IJ et GH du modèle de ADAMS et RANDALL.

12 secondes avant  $PKP_{DF}$ . Nous n'avons pas assez de données aux distances  $125^{\circ}$ - $130^{\circ}$ , mais en tenant compte des travaux de BERTRAND et CLOWES (1974), BOLT (1968) et ADAMS et RANDALL (1964), ces dernières arrivées de précurseurs peuvent être prolongées jusqu'à  $125^{\circ}$ . Aux distances inférieures, on ne voit pas avec évidence de précurseurs sur les sismogrammes au carré (cf. fig. 7). Aussi nous proposons, pour les précurseurs de PKP, trois branches caractéristiques déduites de nos observations : de  $133^{\circ}$  à  $140^{\circ}$ , un premier précurseur d'amplitude très faible, suivi par une deuxième arrivée de grande amplitude entre  $136^{\circ}$  et  $140^{\circ}$ , et, une ou deux secondes plus tard, une troisième phase de  $125^{\circ}$  à  $140^{\circ}$ .

Les données dont la liste se trouve dans le tableau III ont également été analysées sur sismogrammes élevés au carré, et les résultats prévus (paragr. 2) sont en bon accord avec la forme de la figure 8. L'équivalent de trois précurseurs pour  $\Delta < 140^{\circ}$  se voit clairement sur la courbe de propagation de la phase intermédiaire. En effet plusieurs arrivées se succèdent dans un temps très court jusque vers  $153^{\circ}$ - $154^{\circ}$  environ, pour donner ensuite une seule phase intermédiaire jusqu'à  $160^{\circ}$ , et ce changement d'aspect notable correspond à la disparition des deux premiers précurseurs présents aux distances inférieures (fig. 9).

Ainsi les figures 4, 6 et 8 permettent de bien définir les ondes du noyau, et il est possible de mesurer les temps de propagation relatifs sur des restitutions à grande vitesse. Pour les foyers profonds, les mesures de temps relatifs  $tPKP_{AB} - tPKP_{DF}$  sont corrigées, pour tenir compte de la

profondeur du foyer, des corrections tirées des tables de HERRIN (1968) et toutes les données expérimentales d'ondes PKP sont portées sur la figure 10. Nos observations sont très proches du modèle proposé par ADAMS et RANDALL et les branches IJ et GH sont, de tous les modèles existants, celles qui correspondent le mieux aux données.

### 5. Discussion des recherches antérieures sur les précurseurs de PKP

Nous étudierons d'abord l'hypothèse de diffusion de CLEARY et HADDON (1972), reprise dans un article récent par WRIGHT (1975). Dans ces travaux, l'origine des précurseurs n'est pas due à des discontinuités de vitesse dans la zone de transition mais produite par la diffusion d'ondes P par des irrégularités à la frontière noyau-manteau (CMB) ou dans les 200 derniers kilomètres du manteau. Les premières arrivées des ondes diffusées sont limitées par une courbe de temps minimum (fig. 11)

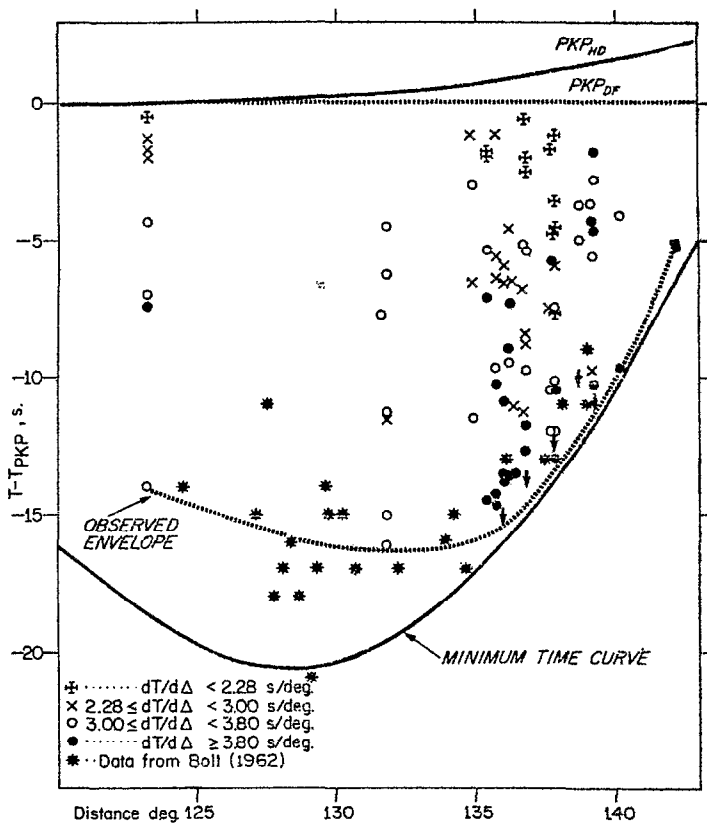


FIG. 11. — Courbe des temps minima dans l'hypothèse de dispersion des données de précurseurs tirées de WRIGHT (1975).

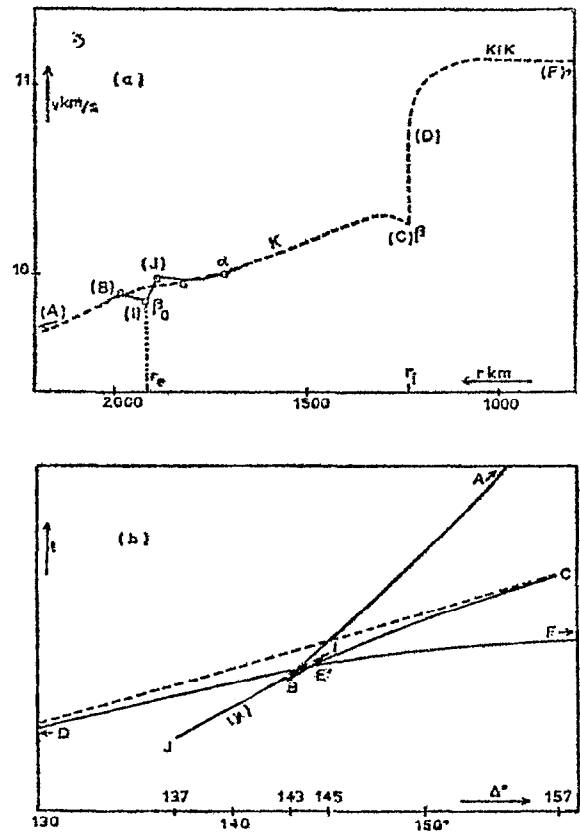


FIG. 12. — Distribution de vitesse et hodochrone des précurseurs entre 137° et 140°. Modèle de HAÏ.

qui part du point focal B (143°) jusqu'à 114°, devant la phase PKP<sub>DF</sub>. Cette courbe représente l'hodochrone d'ondes diffusées produites par le point d'émergence de la caustique PKP à la frontière noyau-manteau. L'allure des précurseurs est un train d'onde avec de petites émergences dans une superposition incohérente d'ondes diffusées sur le CMB. Cette première interprétation est en opposition avec nos données pour lesquelles les arrivées cohérentes définissent trois branches de précurseurs de PKP entre 130° et 140°. D'autre part, l'hypothèse de diffusion ne peut expliquer l'observation de

phases intermédiaires entre les branches DF et AB pour  $\Delta > 145^\circ$ . Ces phases intermédiaires sont équivalentes aux précurseurs aux distances supérieures à  $145^\circ$ . De plus les arrivées prévues par la courbe des temps minimum pour  $\Delta < 120^\circ$  n'ont jamais été vues sur nos enregistrements ni dans les travaux précédemment publiés.

Par contre, beaucoup de recherches ont montré que les précurseurs fournissent des informations sur les propriétés de la partie inférieure du noyau externe : BOLT (1964) propose une brusque réfraction due à un saut de vitesse dans la zone de transition et explique les précurseurs par une branche GH; HAI (1963) propose une branche diffractée par la caustique PKP ou une discontinuité de faible gradient aux environs de 4380 km pour les premiers précurseurs aux distances comprises entre  $137^\circ$  et  $143^\circ$  (fig. 12). Les précurseurs ont aussi été interprétés comme des réflexions ou des réfractions sur plusieurs couches épaisses de quelques centaines de kilomètres dans le noyau externe (HUSEBYE et MADARIAGA (1970)). La figure 13 montre l'hodochrone des phases du noyau d'ADAM et RANDALL;

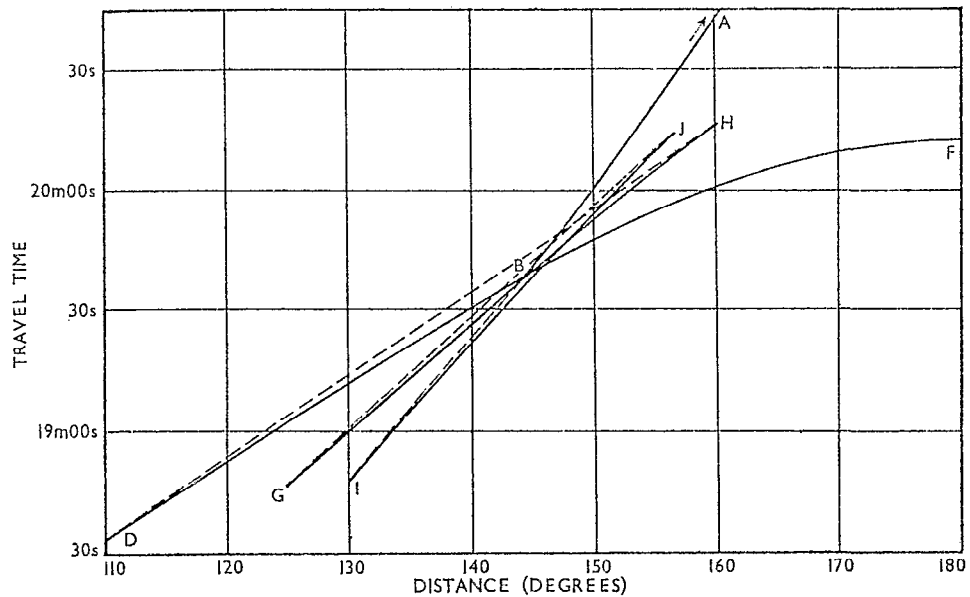


FIG. 13. — Hodochrone des phases du noyau. Modèle d'ADAMS et RANDALL.

c'est un des modèles qui correspond le mieux à nos données. Ce modèle est caractérisé par une zone de transition à deux couches; un premier saut de vitesse à une profondeur de 4390 km est responsable de la branche IJ des premiers précurseurs, un deuxième saut à 4790 km produit une seconde arrivée (branche GH). Les temps relatifs à la phase  $PKP_{DF}$  déduits de ce modèle sont montrés dans la figure 9; l'accord avec les observations est bon, si ce n'est la position relative de AB et la longueur de la branche IJ mais ces différences sont moindres qu'avec les autres hodochrones.

## 6. Distribution de vitesse des ondes P dans le noyau externe

En partant du modèle de vitesse de JEFFREYS-BULLEN, nous avons introduit des perturbations en accord avec les résultats expérimentaux. Les limites de ces perturbations sont fixées par les conditions suivantes :

— Les ondes P sont brutalement réfractées sur le CMB et la profondeur atteinte par le rai est toujours inférieure à 3800 km. Donc l'étude des ondes PKP ne fournit pas d'informations sur la partie extérieure du noyau.

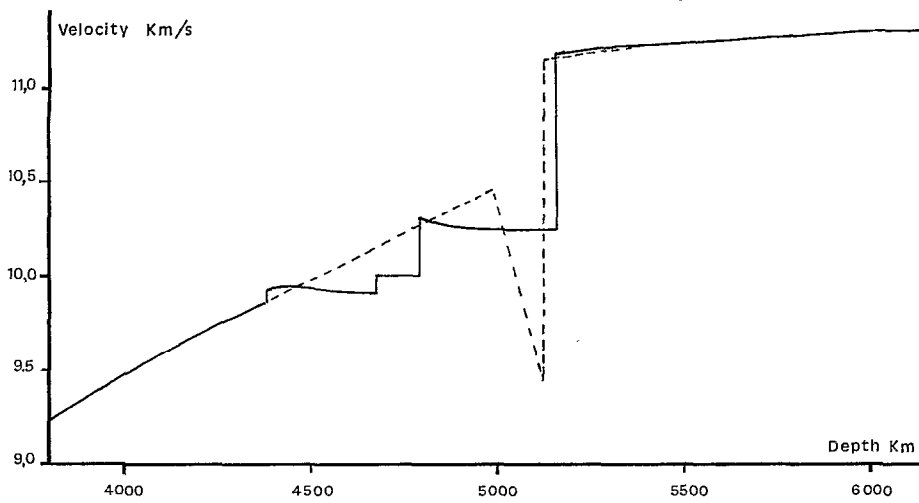


FIG. 14. — Modèle de vitesse proposé pour le noyau. En pointillé le modèle de J.-B.

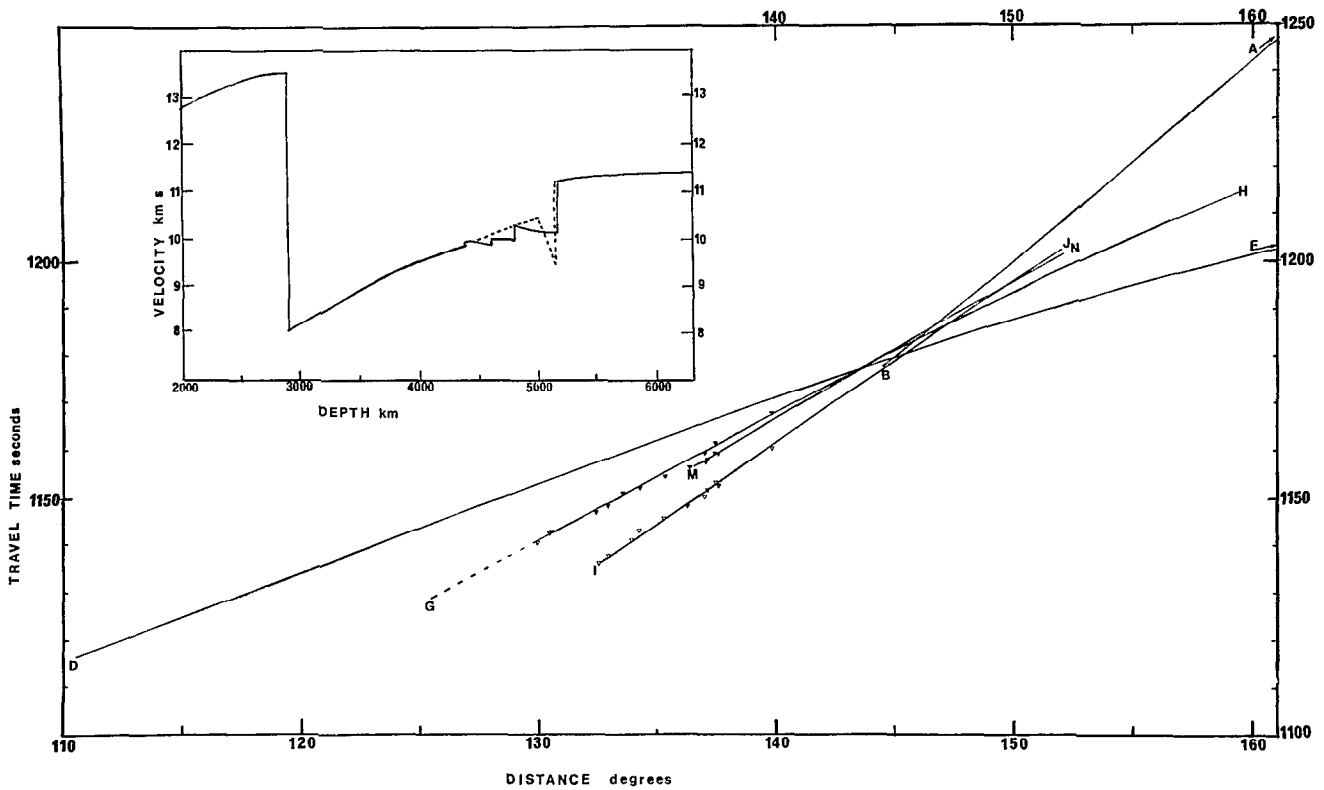


FIG. 15. — Hodochrone correspondant au modèle de vitesse proposé pour un foyer en surface.  $\nabla$  = précurseur de faible amplitude pour  $\Delta < 140^\circ$ ;  $\blacktriangledown$  = précurseur de grande amplitude.

— Le bon accord entre nos observations et le modèle de J.-B. pour la phase PKP<sub>AB</sub> implique qu'il n'est pas nécessaire de perturber le modèle avant 4300 km de profondeur.

— Le retard de 2,0 à 2,5 secondes entre les PKP<sub>DF</sub> observées et le modèle de J.-B. (fig. 3) peut être expliqué soit par un temps de propagation dans le noyau externe en moyenne inférieur à celui du modèle, soit par une frontière noyau externe-graine au-dessous de 5120 km. Cette seconde proposition est confirmée par l'extension au-delà de 160° de la dernière phase intermédiaire.

— Le début et la fin des hodochrones des précurseurs (132°-133°-136°-137°-153°-154° et 160°) donnent des informations sur la profondeur des discontinuités des zones de transition.

En tenant compte de ces limites, plusieurs perturbations au modèle de J.-B. ont été introduites dans un programme d'ordinateur et après de nombreux essais nous avons obtenu une distribution de vitesse (fig. 14) et l'hodochrone associé (fig. 15) en accord avec les données observées sur les sismogrammes au carré. Cette distribution de vitesse des ondes P montre trois accroissements rapides de la vitesse à la frontière du noyau interne :

Un premier saut de vitesse de 0,06 km/s à 4384 km de profondeur produit une branche réfléchie BI. Le point B à  $\Delta = 144^\circ$  n'est pas considéré comme un point focal mais comme le départ du rai réfléchi et les grandes amplitudes de la branche AB aux distances 144°-148° s'expliquent par le gradient de vitesse dans cette partie du noyau. La réfraction du rai commence au point I ( $\Delta = 132^\circ$ ,  $p = 3,502$  s/o), et les ondes réfractées (branche IJ) s'arrêtent au point IJ ( $\Delta = 153^\circ$ ,  $p = 2,989$  s/o) par une deuxième augmentation de la vitesse. Ce saut de 0,1 km/s, à une profondeur de 4675 km, explique la branche réfléchie JM et le début de la réfraction au point M ( $\Delta = 136^\circ$ ). La branche MN représente la propagation dans cette seconde couche épaisse de 115 km. La branche réfractée MN s'arrête à N ( $\Delta = 153^\circ$ ) sur un saut de vitesse de 0,30 km/s qui crée une branche retour réfléchie NG ( $G : \Delta = 125^\circ 5$ ,  $p = 2,675$  s/o). Dans cette troisième couche, les ondes réfractées ont pour hodochrone GH avec le point H à  $\Delta = 160^\circ$  et  $p = 2,06$  s/o.

La frontière noyau externe-noyau interne est à 5160 km de profondeur et un saut de vitesse de 1,02 km/s lui est associé; les ondes du noyau interne débutent au point D ( $\Delta = 110^\circ$ ,  $p = 1,876$  s/o) et se prolongent jusqu'à 180°.

### Conclusion

Nous avons proposé un modèle de vitesse dans le noyau terrestre établi uniquement à partir de temps de propagation d'ondes mesurés sur les enregistrements du réseau de Bangui. Un plus grand nombre de données serait nécessaire pour mieux définir l'emplacement et la valeur des sauts de vitesse, et nous espérons que des enregistrements supplémentaires aux trois stations télésismiques autour de Bangui donneront les valeurs des paramètres  $dT/d\Delta$  des précurseurs. Cette nouvelle série de données sur les ondes PKP montre, grâce à la grande sensibilité des enregistrements, que l'origine des précurseurs et des phases équivalentes pour  $\Delta > 145^\circ$  s'explique mieux par une structure fine de la distribution de vitesse dans la zone de transition que par une diffusion d'ondes P à la frontière noyau-manteau ou dans les 200 derniers km du manteau.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M. le 26 juillet 1979.*



## BIBLIOGRAPHIE

- ADAM (R. D.) and RANDALL (M. J.), 1964. — The fine structure of the earth's core. *Bull. seismiol. Soc. Amer.*, 54 : 1299-1313.
- BERTRAND (A. E. S.) and CLOWES (R. M.), 1974. — Seismic array evidence for a two layer core transition zone. *Phys. Earth Planet. Int.*, 8 : 251-268.
- BOLT (B. A.), 1964. — The velocity of seismic waves near the earth's center. *B.S.S.A.*, 51 : 191-208.
- BOLT (B. A.), 1968. — Estimation of PKP travel times. *B.S.A.A.*, 58 : 1305-1324.
- BUCHBINDER (G. G. R.), 1971. — A velocity structure of the earth's core. *B.S.S.A.*, 61 : 429-456.
- BULLEN (K. E.), and HADDON (R. A. W.), 1972. — Some recent work on earth models with special reference to core structure. *Geophys. J. r. ast. Soc.*, 34 : 31-38.
- CHOUDHURY (M. A.) and HOURI (A.), 1973. — A low cost observatory tape recorder. *B.S.S.A.*, 63 : 877-884.
- CLEARY (J. R.) and HADDON (R. A. W.), 1972. — Seismic wave scattering near the core-mantle boundary : a new interpretation of precursors to PKP. *Nature.*, 240 : 549-551.
- DOORNBOS (D. J.) and HUSEBYE (E. S.), 1972. — Array analysis of PKP phases and their precursors. *Phys. Earth Planet. Int.*, 5 : 387-399.
- GUTENBERG (B.), 1958. — Wave velocity in the earth's core. *Bull. seismiol. Soc. Amer.*, 48 : 301-314.
- HADDON (R. A. W.) and CLEARY (J. R.), 1974. — Evidence for scattering of seismic PKP waves near the mantle-core bandary. *Phys. Earth Planet. Int.*, 8 : 211-234.
- HAÏ (N.), 1963. — Propagation des ondes longitudinales dans le noyau terrestre. *Ann. Geophys.*, 19 : 285-346.
- HERRIN (E.), 1968. — Seismological tables for P phases. *B.S.S.A.*, 58 : 1238-1240.
- HUSEBYE (E.) and MADARIAGA (R.), 1970. — The origin of precursors to cove waves. *Bull. seismiol. Soc. Amer.*, 60 : 939-952.
- JEFFREYS (H.) and BULLEN (K. E.), 1958. — Seismological tables. British Association for the advancement of science Gray Milne.
- KOVACH (R. L.) and GLOVER (P.), 1968. — Travel times of PKP in the range 115°-140°. *Geophys. J.*, 15 : 367-376.
- PAYO (G. S.) and BATH, 1964. — Core phases and inner-core boundary. *Geophys. J.*, 8 : 496-513.
- WRIGHT (C.), 1975. — The origin of short period precursors to PKP. *B.S.S.A.*, 65 : 765-786.