

VARIATION DE LA VITESSE  
DANS UN ROC FRACTURÉ

PAR

PAUL GRENIER

DIVISION OF SEISMOLOGY AND GEOMAGNETISM

Earth Physics Branch  
Energy, Mines and Resources Canada  
Ottawa, Canada

Internal Report

1984- 5 (S)

### Introduction

L'existence de fractures dans l'écorce terrestre a des implications importantes dans de nombreux domaines, notamment dans la prédiction des tremblements de terre par effet de dilatation. Il serait, donc, intéressant de pouvoir connaître la morphologie de ces fractures, et ses variations temporelles.

Selon l'article de Crampin, McGonigle et de Bamford (1980) il est possible d'estimer les paramètres des fractures par l'observation de la variation anisotropique de la vitesse des ondes-P. De tel observation ayant été faite sur le site de Charlevoix j'ai été amené à produire un programme qui effectuerait, à partir des équations contenues dans l'article cité plus haut, les graphiques nécessaires à l'estimation de ces paramètres.

J'ai l'intention d'exposer, ici, la structure mathématique et fonctionnelle du programme ainsi que quelque résultats généraux.

### Theorie

Les équations données dans Crampin et al. (1980) sont pour un système de deux fractures verticaux, dont la normal fait un angle  $\alpha$  (1,2) avec le nord, avec le rayon de l'onde d'Azimuth  $\theta$  par rapport au nord, comme indiqué à la figure 1. Les équations sont les suivantes:

Pour l'onde-P;

$$VP = \frac{VPO}{((1-P)/(PRD1 \cdot PRD2)) + P/(PRS1 \cdot PRS2)}$$

ou    VPO = vitesse de l'onde-P dans le roc non fracturé.  
P = concentration en eau (pourcentage d'eau/100)

$$PRD1 = \frac{1}{(1+8\epsilon_1[8(\cos^2(\theta-\alpha_1))-\cos^4(\theta-\alpha_1))/7 + (1+2\cos^2(\theta-\alpha_1))^2/4]/3}^{1/2}$$

$$PRD2 = \frac{1}{(1+8\epsilon_2[8(\cos^2(\theta-\alpha_2))-\cos^4(\theta-\alpha_2))/7 + (1+2\cos^2(\theta-\alpha_2))^2/4]/3}^{1/2}$$

$$PRS1 = \frac{1}{(1+64\epsilon_1[\cos^2(\theta-\alpha_1)-\cos^4(\theta-\alpha_1)]/21)}^{1/2}$$

$$PRS2 = \frac{1}{(1+64\epsilon_2[\cos^2(\theta-\alpha_2)-\cos^4(\theta-\alpha_2)]/21)}^{1/2}$$

ou  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  sont définis comme étant la densité des fractures par:

$$\epsilon = \frac{N \cdot a^3}{V}$$

ou N = Nombre de fractures  
a = Rayon de la fracture  
V = Volume

Ceci pour des fractures circulaires dont le rapport épaisseur/rayon tend vers zéro.

Ils donnaient aussi les équations pour les ondes-S horizontal (SH) et S verticale (SV). Elles sont:

$$VSV = \frac{VSO}{[(1+(16\epsilon_1\cos^2(\theta-\alpha_1))/7 \cdot (1+(16\epsilon_2\cos^2(\theta-\alpha_2))/7)]^{1/2}}$$

$$VSH = \frac{VSO}{((1-P)/(SRD1 \cdot SRD2)) + P/(SRS1 \cdot SRS2)}$$

ou VSO = vitesse de l'onde-S dans le roc non fracturé.

$$SRD1 = \frac{1}{(1+16\epsilon_1[(1-2\cos^2(\theta-\alpha_1))^2/7 + (\cos^2(\theta-\alpha_1)-\cos^4(\theta-\alpha_1))/4])^{1/2}}$$

$$SRD2 = \frac{1}{(1+16\epsilon_2[(1-2\cos^2(\theta-\alpha_2))^2/7 + (\cos^2(\theta-\alpha_2)-\cos^4(\theta-\alpha_2))/4])^{1/2}}$$

$$SRS1 = \frac{1}{(1+16\epsilon_1[1-2\cos^2(\theta-\alpha_1)]^2/7)^{1/2}}$$

$$SRD2 = \frac{1}{(1+16\epsilon_2[1-2\cos^2(\theta-\alpha_2)]^2/7)^{1/2}}$$

Comme on le voit il y a cinq paramètres qui définis la variation anisotropique de la vitesse. Ils sont; l'angle  $\alpha$  (1 et 2) entre la normal au plan et le nord, la densité  $\epsilon$  (1 et 2) des fractures et  $P$  la concentration en eau. J'ai donc conçus le programme pour qu'il produise un maximum de cinq courbes sur le même graphique en variant un des trois paramètres  $\epsilon$  (1 et 2) et  $P$  ou les trois à la fois. Je n'ai pas inclus  $\alpha$  (1 et 2) comme paramètre variable, d'une courbe à l'autre, mais j'ai inclus, dans le programme, une seconde sous-routine qui effectue une variation de  $\alpha_2$  par incrément, variable, de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  degrés. Un exemple des graphiques obtenus est présenté à la figure 2. Remarquez que  $\theta$  varie seulement de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  degrés étant donné que la période est d'au plus  $180^\circ$  degrés.

Les graphiques de la figure 2 sont ceux obtenus dans le cas où l'on a une seule fracture. On remarque que la période de la vitesse (VP) est de  $180^\circ$  degrés pour une faible concentration en eau et l'augmentation de celle-ci fait en sorte que la vitesse devient  $90^\circ$  degrés périodique, tandis que l'augmentation de la densité de la fracture concentre le maximum au centre. Pour ce qui est de SH et SV on voit que, contrairement à  $P$ , la période demeure

90 et 180° degrés respectivement lorsque P augmente. Pour ce qui est d'un système à deux fractures un exemple en est montré à la figure 3. Pour P, on note que, la période demeure 90° degrés, dans la mesure où la deuxième fracture est suffisamment importante. Pour SH la vitesse demeure 90° degrés périodique comme précédemment mais pour SV la situation change, elle devient 90° degrés périodique, ceci pour  $\alpha_2 = 90^\circ$  degrés. Mentionnons qu'un angle  $\alpha_2$  intermédiaire donne une périodicité intermédiaire, et qu'un angle  $\alpha_1$  ne fait que déplacer la courbe, si on garde l'angle entre les deux plans constant. Pour permettre une analyse plus précise de ces résultats préliminaires on avait besoin de données supplémentaires sur le comportement des variables.

Avant d'aller plus loin il faut faire quelques précisions sur les données recueillies à Charlevoix car le programme en est fonction. C'était des données sur la variation de la vitesse des ondes-P en fonction du temps plutôt qu'en fonction de l'azimut. C'est à dire que l'on observait les variations de la vitesse à un azimut donné par rapport à un dynamitage précédent. Ceci vient du fait que la variation de la vitesse selon l'azimut, pour un dynamitage donné, n'est pas nécessairement dû seulement aux fractures, elle peut aussi être fonction de la composition différente du roc dans les différentes directions. Mentionnons aussi que la variation observée avait une période de 180° degrés ce qui excluait la possibilité que l'on ait deux fractures avec un angle d'intersection élevé.

Les courbes supplémentaires produites sont; la dérivée partielle relative ( $\partial V_P / V_P$ ) par rapport à la concentration P en eau, la dérivée partielle relative par rapport à la densité  $\rho_1$  de la fracture, le rapport VP/VS ou VS

est la plus grande valeur entre VSH et VSV et aussi la différence entre la première courbe VP1 et les suivante (VP(2,3,4,5)).

La dérivation de l'expression pour VP est assez simple. On obtient:

$$\frac{\partial}{\partial P} VP = \frac{-VPO}{((1-P)/(PRD1 \cdot PRD2) + P/(PRS1 \cdot PRS2))^2} \cdot \left[ \frac{-1}{PRD1 \cdot PRD2} + \frac{1}{PRS1 \cdot PRS2} \right]$$

alors;

$$\frac{\partial VP}{VPO} = \frac{VP}{VPO}^2 \cdot \frac{1}{PRD1 \cdot PRD2} - \frac{1}{PRS1 \cdot PRS2}$$

et

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_1} VP = \frac{[(1-P)(PRS1 \cdot PRS2)^2 \cdot PRD2 \cdot PRD1' + P(PRD1 \cdot PRD2)^2 \cdot PRS2 \cdot PRS1]}{((1-P)PRS1 \cdot PRS2 + P \cdot PRD1 \cdot PRD2)^2} VPO$$

$$\text{ou } PRD1' = \frac{\partial}{\partial \alpha_1} (PRD1) = \frac{-4}{3} (PRD1)^3 \left[ \frac{8(\cos^2(\theta-\alpha_1) - \cos^4(\theta-\alpha_1))}{7} + \frac{(1+2\cos^2(\theta-\alpha_1))^2}{4} \right]$$

$$PRS1' = \frac{\partial}{\partial \alpha_1} (PRS1) = \frac{-32}{21} (PRS1)^3 (\cos^2(\theta-\alpha_1) - \cos^4(\theta-\alpha_1))$$

Un exemple des graphiques obtenus est montré à la figure 4. Pour ce qui est des graphiques VP1-VP(2, 3, 4, 5) et VP/VS un exemple en est montré à la figure 5. A l'aide de ces graphiques on est à même de faire une estimation raisonnable des paramètres. Mais, une ombre au tableau est que l'on a plus d'une solution pour un problème donné.

Un autre fait que l'on a été amené à considérer est que les fractures ne sont pas nécessairement verticaux. Etant donné la symétrie du problème et comme le montre l'argument des cosinus dans les équations citées plus haut on peut supposer que la variation est fonction de l'angle entre le rayon de l'onde et la normal au plan de la fracture dans le plan qui contient ces deux vecteurs. En définissant la direction de la normal, comme montré à la figure 6, on obtient l'angle, qui servira d'argument aux cosinus, comme suit:

$$\begin{aligned}\vec{N} &= \cos\beta \cdot \sin\alpha \hat{x} + \cos\beta \cos\alpha \hat{y} + \sin\beta \hat{z} \\ \vec{VPO} &= VPO(\sin\theta \hat{x} + \cos\theta \hat{y})\end{aligned}$$

Alors l'angle  $\gamma$  est donné par:

$$\cos \gamma = \frac{\vec{N} \cdot \vec{VPO}}{|\vec{N}| \cdot |\vec{VPO}|}$$

$$\cos\gamma = \cos\beta \cdot \sin\alpha \cdot \sin\theta + \cos\beta \cdot \cos\alpha \cdot \cos\theta$$

$$\gamma = \cos^{-1}(\cos\beta \cdot \sin\alpha \cdot \sin\theta + \cos\beta \cdot \cos\alpha \cdot \cos\theta)$$

On peut voir la conséquence de ceci en regardant ce qui se passe, par exemple, quand on a  $\alpha = 0^\circ$  et un angle  $\beta$  quelconque. Auparavant, dans cette situation, l'argument des cosinus ( $\theta-\alpha$ ) variait de  $0^\circ$  à  $180^\circ$  degrés mais avec un angle  $\beta$  l'argument varie, maintenant, de  $\beta$  à  $180^\circ-\beta$  degrés. L'ajout de ceci permet d'être plus réaliste tant qu'à la morphologie des systèmes mais rajoute, encore, d'autre solution à un même problème.

### Conclusion

Comme on l'a vu il y a plusieurs paramètres qui définissent la variation anisotropique de la vitesse des ondes-P, ce qui rend difficile l'évaluation des paramètres. Cependant le comportement général de la fonction, telle la périodicité, sur les variables P et  $\alpha_2$  permet de restreindre le domaine de variation de celle-ci. Par la suite d'autre données géologiques, telle la ligne de pression, permet de mieux orienter l'analyse en définissant les orientations possibles des fractures, tant sur  $\alpha$  que sur  $\beta$ . Après avoir circonscrit le problème, de telle façon, l'analyse en est plus facile et on peut passer à la modélisation elle-même. Il est sûrement difficile d'obtenir des résultats précis de cette analyse mais l'approfondissement de la connaissance que l'on a du système en est, sûrement, très intéressant.

DESCRIPTION DES FIGURES

1. L'orientation des plans et définition des angles utilisés dans les expressions.
2. Un exemple des graphiques obtenus pour l'onde-P et S dans le cas d'une seule fracture. Remarquez que les courbes  $\epsilon_1 = 0,1$   $P = 0,4$  et  $\epsilon_1 = 0,1$   $P = 1,0$  pour VSV sont superposées étant donné que VSV n'est pas fonction de P.
3. Comme en figure deux mais, ici, c'est pour un système à deux fractures. La même remarque s'applique, ici, pour les courbes  $\epsilon_1 = 0,1$   $\epsilon_2 = 0,1$   $P = 0,4$  et  $\epsilon_1 = 0,1$   $\epsilon_2 = 0,1$   $P = 1,0$ .
4. Graphiques obtenus pour les dérivées partielles relatives par rapport à P et à  $\epsilon_1$ .
5. Courbes obtenus de la différence entre la courbe 1 et 2, 1 et 3 de la vitesse des ondes-P ( $VP_1 - VP(2, 3)$ ) et les courbes du rapport VP/VS.
6. Définition de l'orientation d'un plan qui n'est pas vertical.

BIBLIOGRAPHIE

- Crampin, S., McGonigle, R., et Bamford, D., 1980. Estimating crack parametres from observations of P-wave velocity anisotropy: J. Geophysics, V. 45, No. 3, p. 345-360.
- Dudiansky, B., et O'Connel, R.J., 1976. Elastic moduli of a cracked solid: J. Solids Structures, Vol. 12, p. 81-97.

Fig. 1

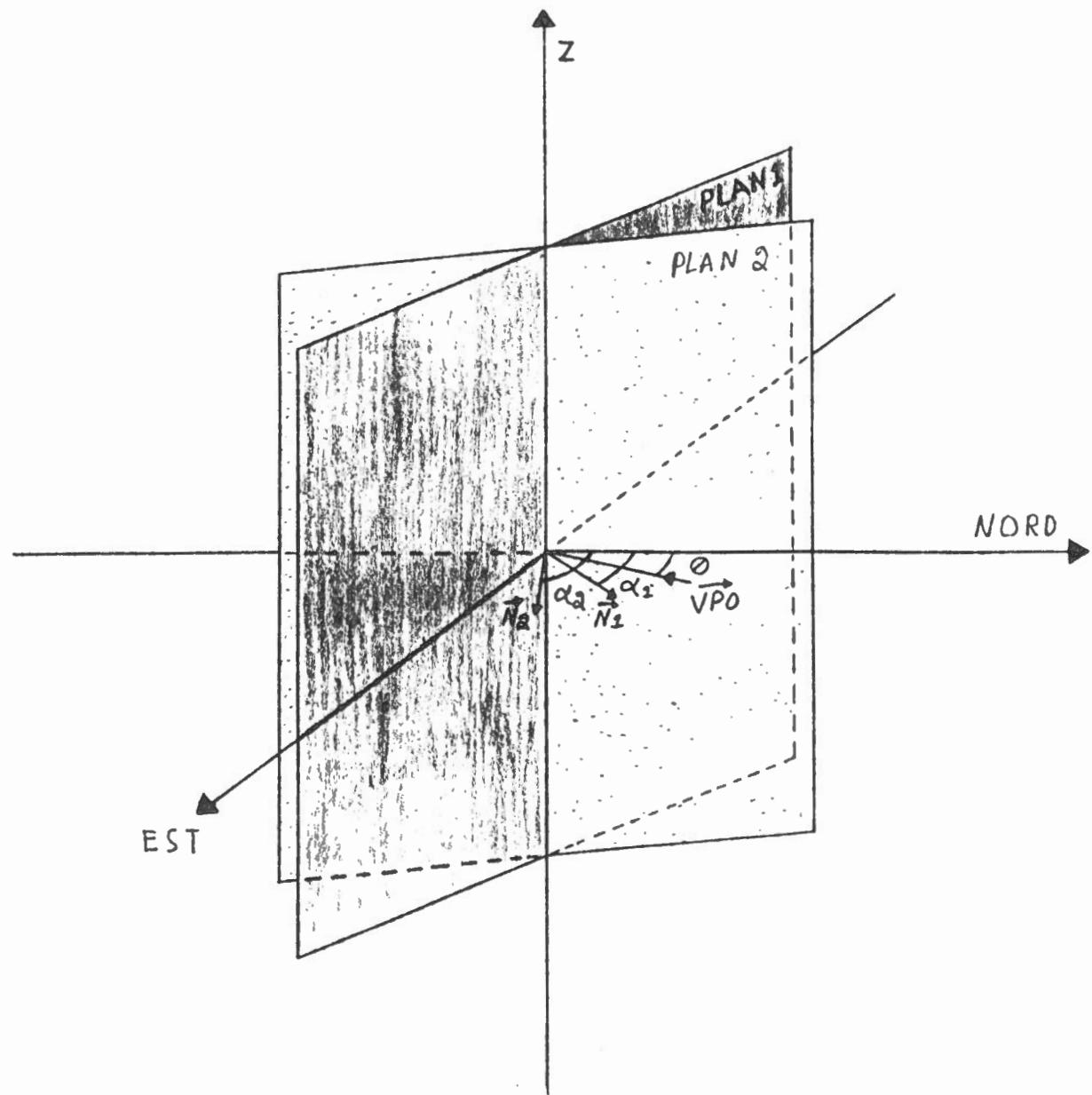
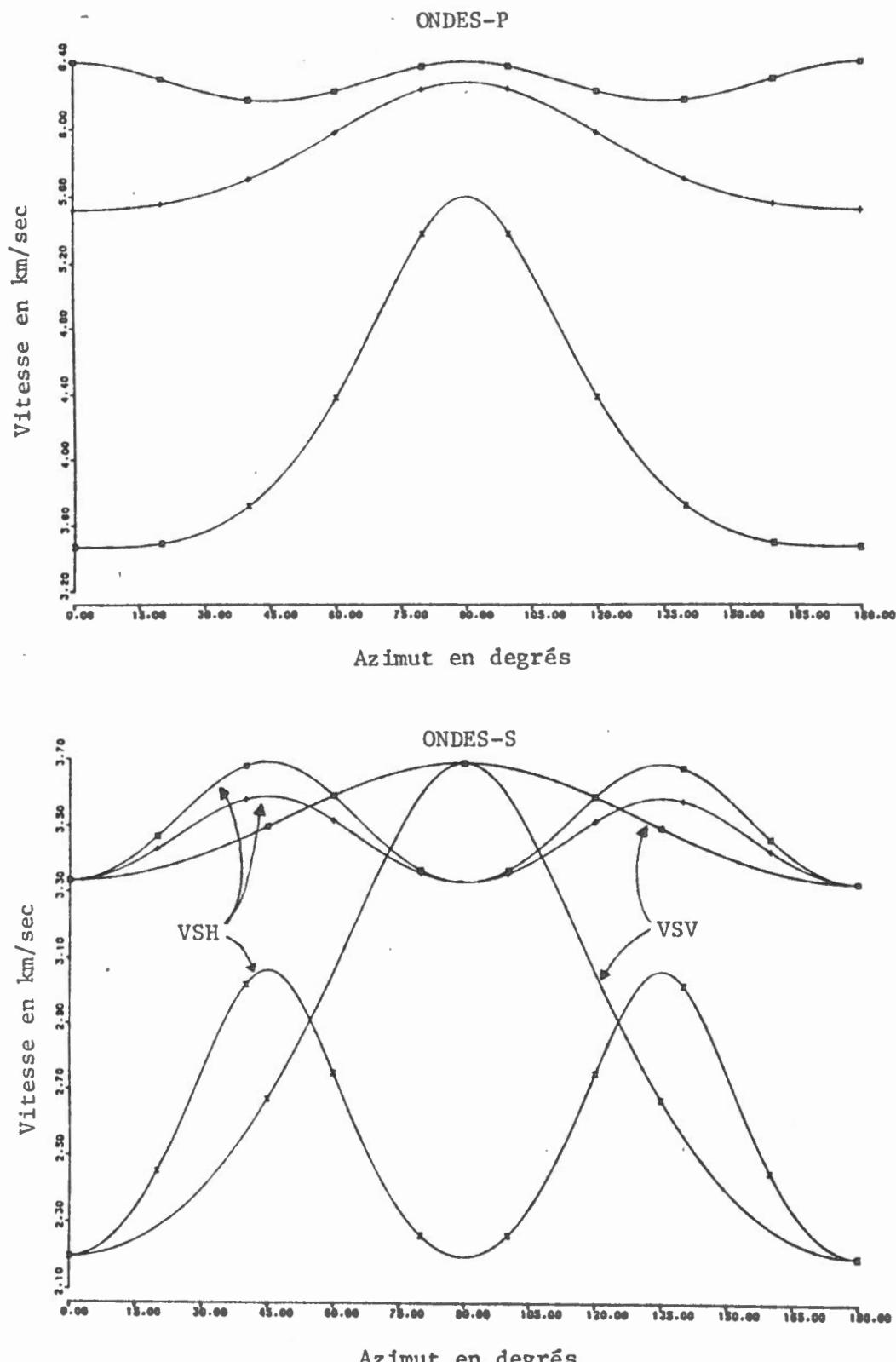


Fig. 2



Symbol + pour:  $\epsilon_1 = 0.100 \quad P = 0.40$

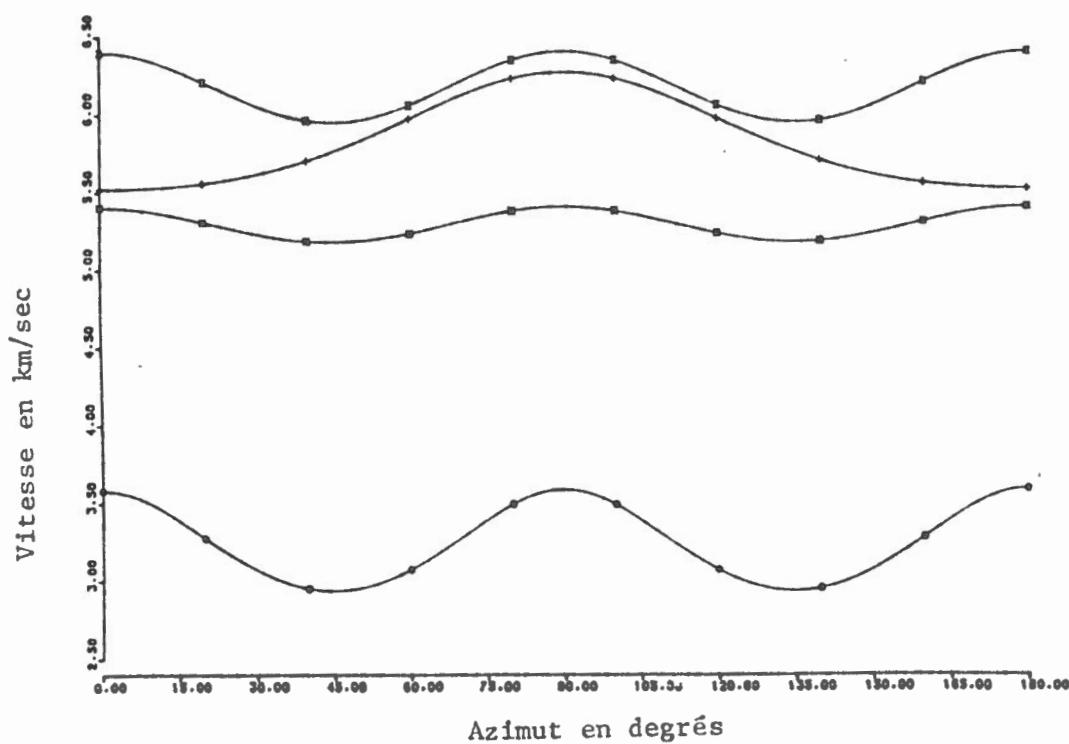
\*  $\epsilon_1 = 0.100 \quad P = 1.00$

$\times \quad \epsilon_1 = 0.800 \quad P = 0.40$

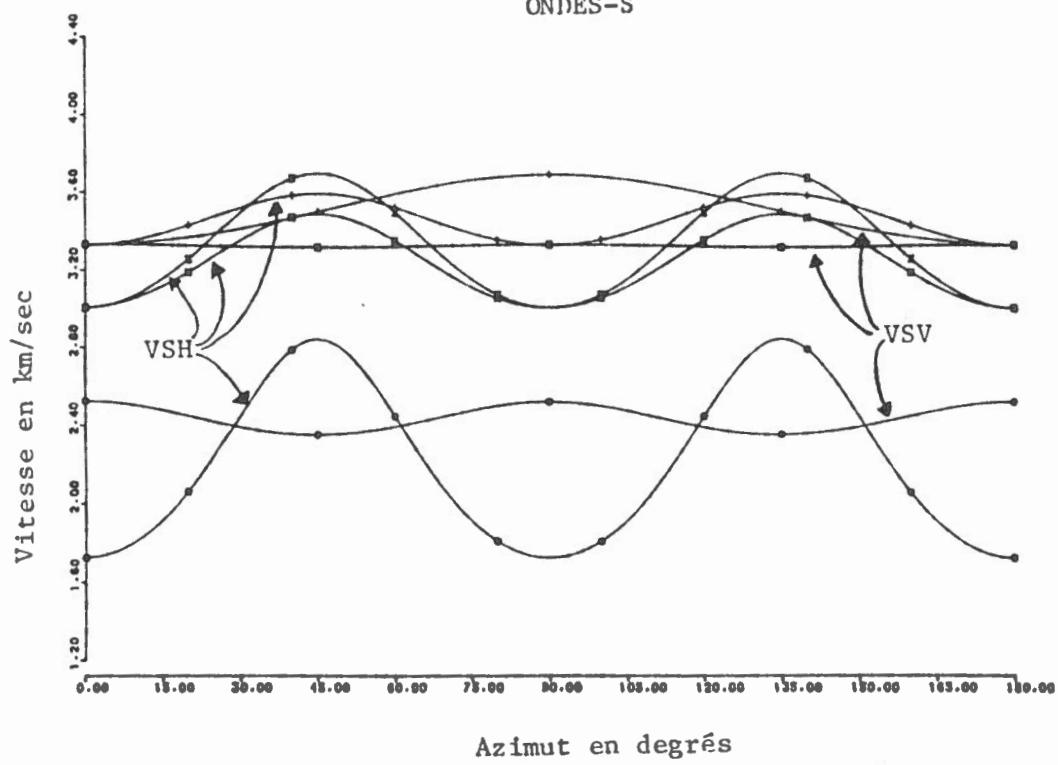
et pour:  $\alpha_1 = 0.0^\circ \quad \alpha_2 = 0.0^\circ$

$VPO = 6.4 \text{ km/sec} \quad VSO = 3.7 \text{ km/sec}$

## ONDES-P



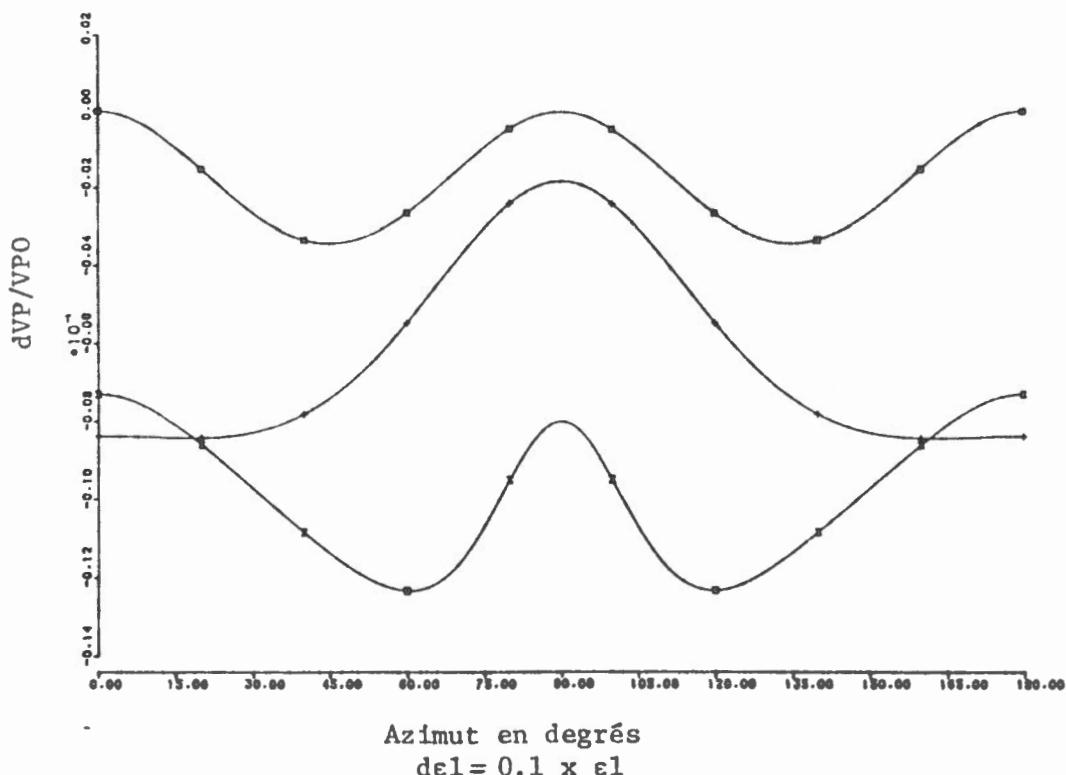
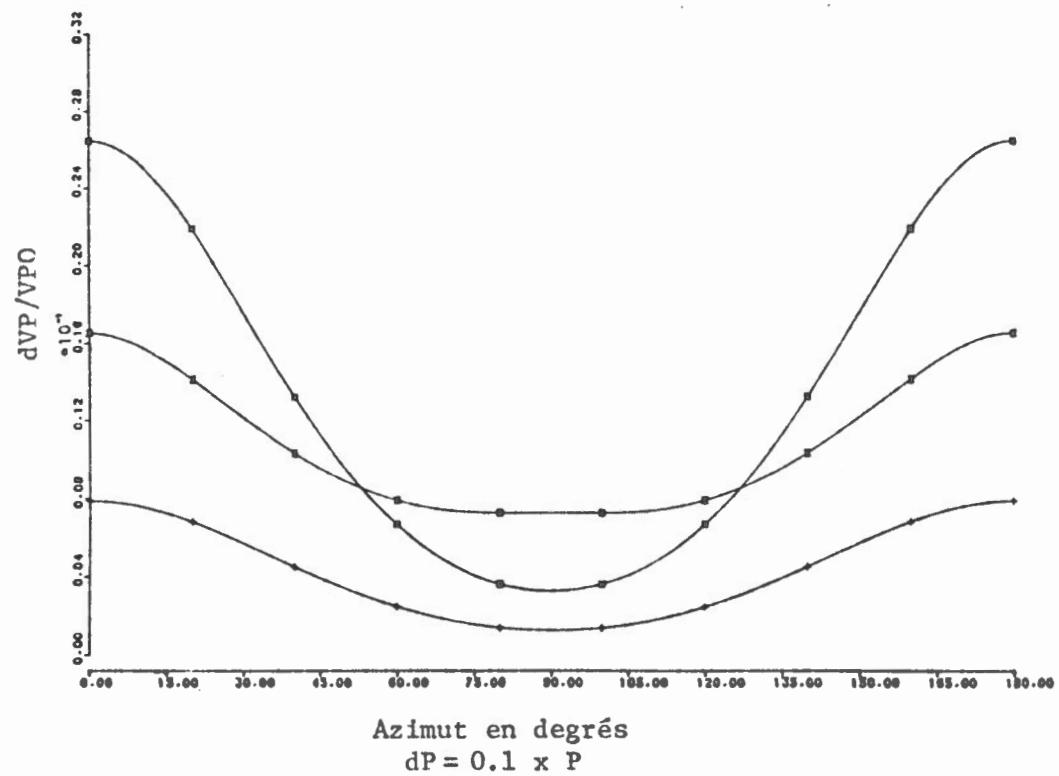
## ONDES-S



Symbole + pour:	$\epsilon_1 = 0.100$	$\epsilon_2 = 0.001$	$P = 0.40$
* pour:	$\epsilon_1 = 0.100$	$\epsilon_2 = 0.100$	$P = 0.40$
X pour:	$\epsilon_1 = 0.100$	$\epsilon_2 = 0.100$	$P = 1.00$
o pour:	$\epsilon_1 = 0.500$	$\epsilon_2 = 0.500$	$P = 0.40$

et pour:  $\alpha_1 = 0.0^\circ$        $\alpha_2 = 90.0^\circ$   
 $VPO = 6.4 \text{ km/sec}$        $VSO = 3.7 \text{ km/sec}$

Fig. 4



Symbol + pour:  $\epsilon_1 = 0.100$        $P = 0.40$

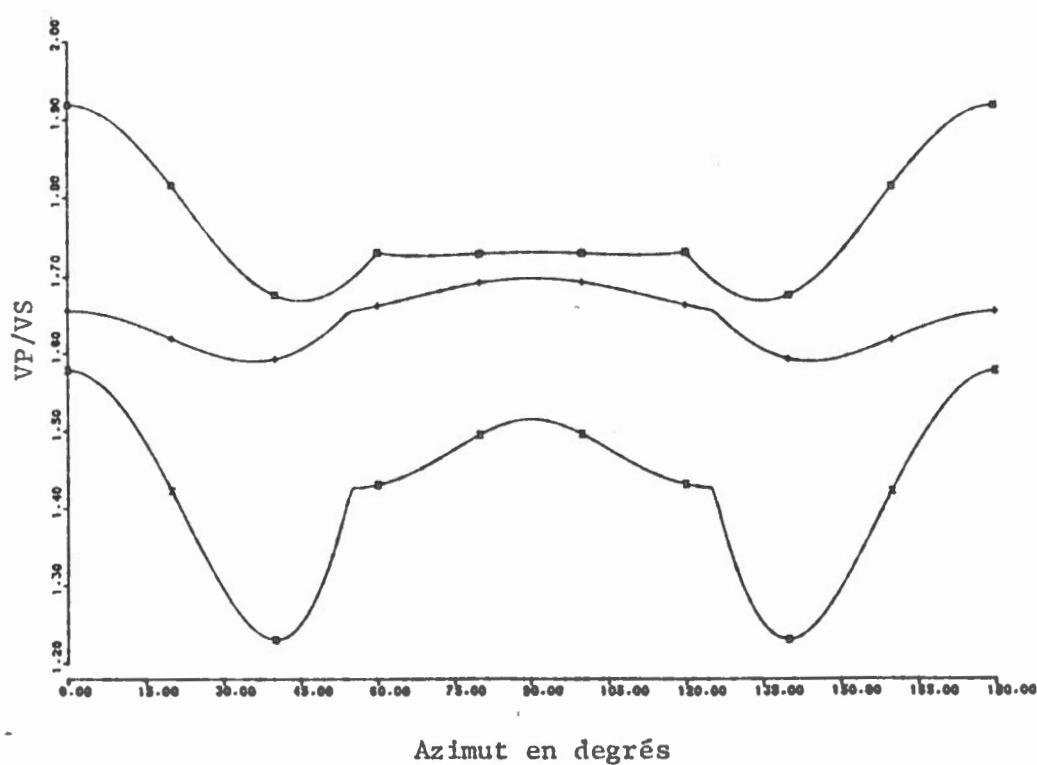
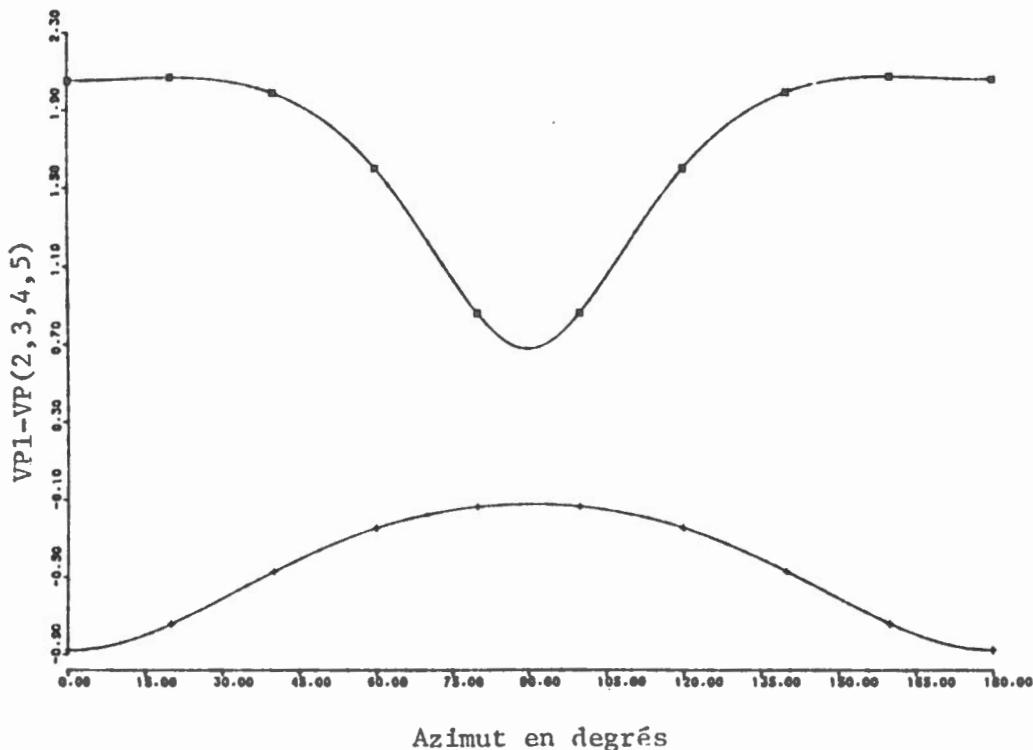
\*       $\epsilon_1 = 0.100$        $P = 1.00$

X       $\epsilon_1 = 0.800$        $P = 0.40$

et pour:  $\alpha_1 = 0.0^\circ$        $\alpha_2 = 0.0^\circ$

$V_{p0} = 6.4$  km/sec     $V_{s0} = 3.7$  km/sec

Fig. 5



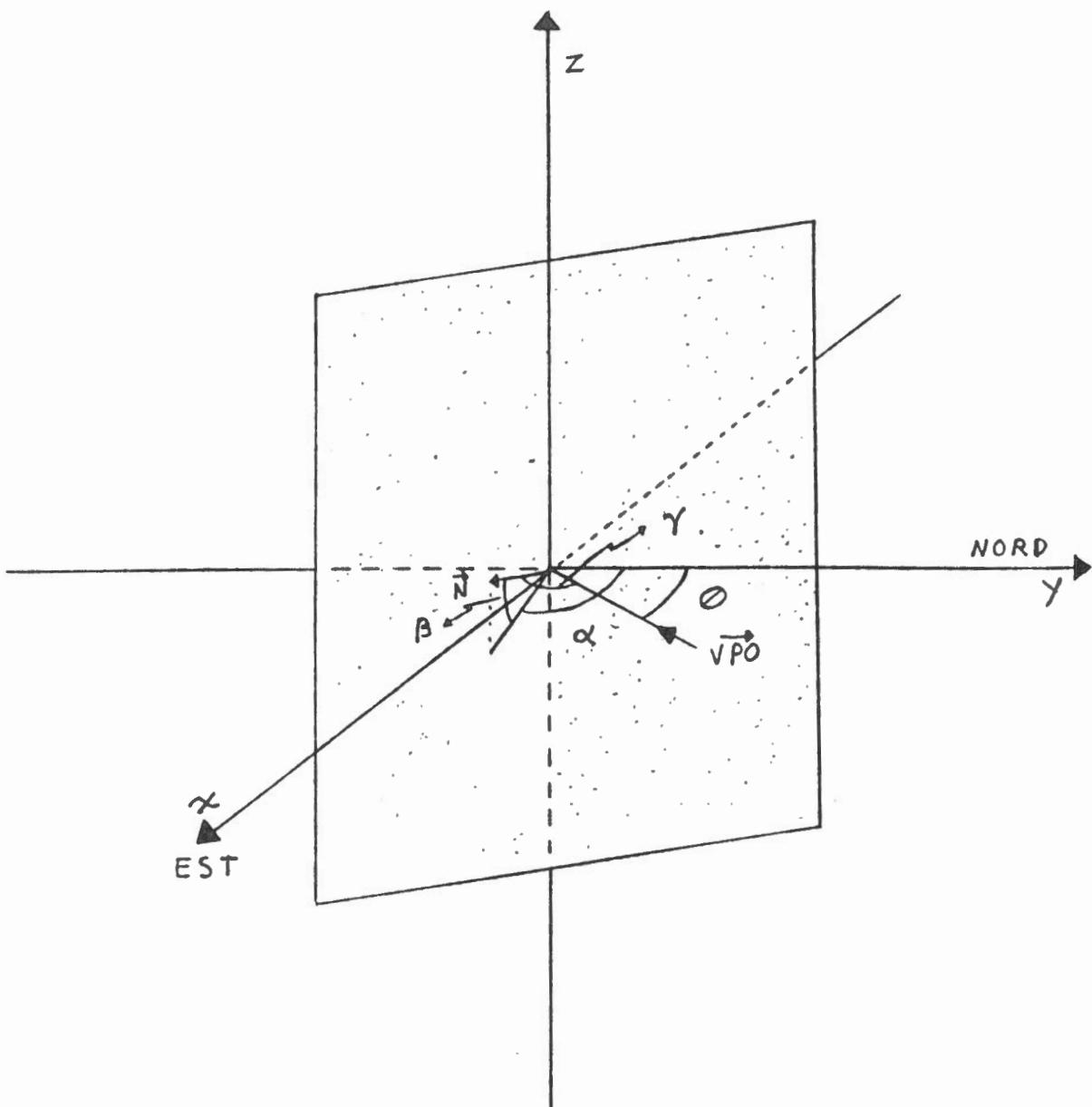
Symbol + pour:  $\epsilon_1 = 0.100 \quad P = 0.40$

\* pour:  $\epsilon_1 = 0.100 \quad P = 1.00$

X pour:  $\epsilon_1 = 0.800 \quad P = 0.40$

et pour:  $\alpha_1 = 0.0^\circ \quad \alpha_2 = 0.0^\circ$   
 $VPO = 6.4 \text{ km/sec} \quad VSO = 3.7 \text{ km/sec}$

Fig. 6



PROGRAM CRACKVE(INPUT,OUTPUT,TAPES=INPUT)

C CE PROGRAMME CALCUL LES VITESSES DES ONDES "P" ET "S" POUR  
 C UN SYSTEME A DEUX CRAQUES POUR EN FAIRE UN GRAPHIQUE.  
 C IL Y A DEUX CHIUX PRINCIPAL;  
 C SUIT B=0 ALORS LE PRUGRAMME FAIT UN BALAYAGE SUR ALPHAZ  
 C DE 0 A 90 DEGRES, PAR INCREMENT EGAL A "PAS",  
 C POUR UNE VALEUR UNIQUE DES AUTRES PARAMETRES.

C SOIT B DIFFERENT DE 0 ALORS LE PRUGRAMME TRACERAS "N" COURBE  
 C SUR LE MEME GRAPHE POUR "N" VALEURS DIFFERENTES  
 C D'UN PARAMETRE SPECIFIER PAR LA VALEUR DE "B".

C C'EST A DIRE QUE SI;

C B=1 ALORS ON PEUT DUNNE N (NC6) VALEUR A E1

C B=2 ALORS ON PEUT DUNNE N (NC6) VALEUR A E2

C B=3 ALORS ON PEUT DUNNE N (NC6) VALEUR A P

C B=4 ALORS ON PEUT DUNNE N (NC6) VALEUR A E1,E2,P

C LES DONNEES D'ENTRE DOIVENT ETRE DISPOSE COMME SUIT;

C - SCALE FACTEUR FORMAT(F7.5)

C - B FORMAT(I1)

C - E1 FORMAT(5F6.3) SI B=1 OU 4 SI NON (F6.3)

C - E2 FORMAT(5F6.3) SI B=2 OU 4 SI NON (F6.3)

C - P FORMAT(5F5.2) SI B=3 OU 4 SI NON (F5.2)

C - ALPHA1,ALPHA2,VPO,VSO,DE,DP FORMAT(2F7.2,4F5.2)  
 C SI B DIFFERENT DE ZERU

C ALPHA1,PAS,VPU FORMAT(F7.2,I3,F5.2)

C - BE1,BE1 FORMAT(2F7.2)

C REM: IL Y A UN DEFAUT POUR VPO ET VSO.

C ILS SONT; VPO=6.0 , VSO=VPO/SURT(3)

C UN PRESUME QUE LE VECTEUR VPO EST DANS  
 C LE PLAN NORD-EST ET L'AZIMUTH EST L'ANGLE  
 C QUE FAIT CELUI-CI AVEC LE NORU.

C POUR CE QUI EST DU VECTEUR NORMAL AU  
 C PLAN DE LA CRAQUE; ALPHA1(1,2) EST L'ANGLE  
 C ENTRE LA PROJECTION DE LA NORMAL SUR LE  
 C LE PLAN NORD-EST ET LE NORD. TANDIS QUE  
 C BETA(BE1,BE2) REPRESENTE L'ANGLE ENTRE  
 C LA NORMAL ET SA PROJECTION DANS LE PLAN  
 C NORD-EST.

C DE EST LA FRACTION DE E1 QUE L'ON VEUT COMME DIFFERENTIEL  
 C POUR LE GRAPHE DE LA DERIVER DE VP .SI ELLE EST EGALE  
 C A ZERO LE GRAPHE N'EST PAS PRODUIT.

C DP EST LA FRACTION DE P QUE L'ON VEUT COMME DIFFERENTIEL

C  
 C REAL SC,E1(5),E2(5),P(5),ALPHA1,ALPHA2,VPO,VSO,DE,DP,  
 +BE1,BE2

C INTEGER B,PAS,N,I

C READ(5,10) SC

```
10 FURMAT(F7.5)
  READ(5,20) B
  20 FURMAT(I1)

C   CALL PLOTS(BUF,L)
  CALL FACTOR(SC)
  CALL PLUT(4.0,-33.0,-3)

C DETERMINATION DU PARAMETRE VARIABLE ET DE LES VALEURS.

C   IF(B.EQ.0) GOTO 210
  IF(B.NE.1) GOTO 70
  READ(5,30)(E1(I),I=1,5)
  30  FURMAT(5F6.3)
  READ(5,40) E2(1)
  40  FURMAT(F6.3)
  READ(5,50) P(1)
  50  FURMAT(F5.2)
  CALL NOMB(E1,N)
  IF(N.EQ.0) GOTO 280
  DO 60 I=2,N
    E2(I)=E2(1)
    P(I)=P(1)
  60  CONTINUE
  GOTO 170

C   70 IF(B.NE.2) GOTO 120
  READ(5,40) E1(1)
  READ(5,30) (E2(I),I=1,5)
  READ(5,50) P(1)
  CALL NOMB(E2,N)
  IF(N.EQ.0) GOTO 280
  DO 110 I=2,N
    E1(I)=E1(1)
    P(I)=P(1)
  110 CONTINUE
  GOTO 170

C   120 IF(B.NE.3) GOTO 165
  READ(5,40) E1(1)
  READ(5,40) E2(1)
  READ(5,150) (P(I),I=1,5)
  150 FURMAT(5F5.2)
  CALL NOMB(P,N)
  IF(N.EQ.0) GOTO 280
  DO 160 I=2,N
    E1(I)=E1(1)
    E2(I)=E2(1)
  160 CONTINUE
  GOTO 170

C   165 IF(B.NE.4) GOTO 280
  READ(5,30) (E1(I),I=1,5)
  READ(5,30) (E2(I),I=1,5)
  READ(5,150) (P(I),I=1,5)
  CALL NOMB(E1,N)
  IF(N.EQ.0) GOTO 280
```

```
C
170 READ(5,180)ALPHA1,ALPHA2,VPO,VSO,DE,DP
    READ(5,180)BE1,BE2
180 FORMAT(2F7.2,4F5.2)
C
IF(VPO.NE.0) GOTO 190
    VP0=6
190 IF(VSO.NE.0) GOTO 200
    VSO=VPO/1.73205
200 CALL GRAPH1(E1,E2,P,ALPHA1,ALPHA2,VPO,VSO,N,B,DE,DP,
    +           BE1,BE2)
    GOTO 300
C
C      VARIATION SUR ALPHA2
C
210 READ(5,40)E1(1)
    READ(5,40) E2(1)
    READ(5,50) P(1)
    READ(5,250) ALPHA1,PAS,VPO
    READ(5,180)BE1,BE2
250 FORMAT(F7.2,I3,F5.2)
C
IF(VPO.NE.0) GOTO 260
    VP0=6
260 CALL GRAPH2(E1(1),E2(1),P(1),ALPHA1,PAS,VPO,BE1,BE2)
    GOTO 300
C
280 PRINT 290
290 FORMAT(*1*,5X,*ERROR IN THE DATA*)
C
300 CALL PLUT(0.0,0.0,999)
    STOP
    END
```

```

C
      SUBROUTINE GRAPH1(E1,E2,P,ALPHA1,ALPHA2,VPO,VSO,N,B,DE,UP,
      BE1,BE2)
C
C  CE SUUS-PROGRAMME EFFECTUE LES GRAPHES POUR B DIFFERENT DE 0
C
      REAL E1(5),E2(5),P(5),ALPHA1,ALPHA2,VPO,VSO,C21(181),
      +C22(181),C41(181),C42(181),PRD1,PRD2,PRS1,PRS2,SRD1,
      +SRD2,SRS1,SRS2,Y1,Y2,Y(184),X(184),S(5),V1(910),
      +V2(910),V3(910),V4(910),DPRD,DPRS,DI,W1,Q2,DE,DP,
      +BE1,BE2,VS(1820)
      INTEGER N,I,J,K,L
      DATA S/3,11,12,1,2/
C
      CALL CALC2C4(C21,C41,C22,C42,ALPHA1,ALPHA2,BE1,BE2)
C
C  P-WAVE GRAPHE
C
      CALL PLOT(0.0,3.5,-3)
      CALL PLOT(0.0,11.0,-3)
      CALL SYMBOL(1.0,7.0,0.4,18HVELOCITY IN KM/SEC,90.0,18)
      CALL SYMBOL(5.0,5.9,0.4,18HAZIMUTH IN DEGREES,0.0,18)
      CALL SYMBOL(6.0,15.0,0.6,6HP-WAVE,0.0,6)
      CALL PLOT(0.0,-11.0,-3)
      CALL SYMBOL(6.0,4.0,0.5,13HSYMBOL    FUR:,0.0,13)
      Y1=4.0
      Y2=4.25
      DO 10 I=1,N
          CALL SYMBOL(12.5,Y1,0.5,20HE1=      E2=      P=,0.0,20)
          CALL SYMBOL(9.75,Y2,0.5,S(I),0.0,-1)
          CALL NUMBER(14.0,Y1,0.5,E1(I),0.0,5)
          CALL NUMBER(18.5,Y1,0.5,E2(I),0.0,3)
          CALL NUMBER(22.5,Y1,0.5,P(I),0.0,2)
          Y1=Y1-0.75
          Y2=Y2-0.75
10  CONTINUE
      CALL SYMBOL(6.0,Y1,0.5,15HAND FOR:ALPHA1=,0.0,15)
      CALL NUMBER(999.0,999.0,0.5,ALPHA1,0.0,2)
      CALL SYMBOL(999.0,999.0,0.5,8H ALPHA2=,0.0,8)
      CALL NUMBER(999.0,999.0,0.5,ALPHA2,0.0,2)
      CALL SYMBOL(999.0,999.0,0.5,7H BETA1=,0.0,7)
      CALL NUMBER(999.0,999.0,0.5,BE1,0.0,2)
      Y1=Y1-0.75
      CALL SYMBOL(10.0,Y1,0.5,6HBETA2=,0.0,6)
      CALL NUMBER(999.0,999.0,0.5,BE2,0.0,2)
      CALL SYMBOL(999.0,999.0,0.5,5H VPO=,0.0,5)
      CALL NUMBER(999.0,999.0,0.5,VPO,0.0,3)
      CALL SYMBOL(999.0,999.0,0.5,5H VSO=,0.0,5)
      CALL NUMBER(999.0,999.0,0.5,VSO,0.0,3)
      CALL PLOT(2.0,18.0,-3)
      CALL AXIS(0.0,-0.2,1H ,-1,12.,0.0,0.0,15.0)
      X(182)=0
      X(183)=15
C
      DO 30 I=1,N
          K=I-1
      DO 20 J=1,181

```

```

      PRD1=1/SQRT((1+2.66667*E1(I)*((8*(C21(J)-C41(J)))/7
      + (1+2*C21(J))**2/4)))
      PRD2=1/SQRT((1+2.66667*E2(I)*((8*(C22(J)-C42(J)))/7
      + (1+2*C22(J))**2/4)))
      PRS1=1/SQRT((1+(64*E1(I)*(C21(J)-C41(J)))/21))
      PRS2=1/SQRT((1+(64*E2(I)*(C22(J)-C42(J)))/21))
      V1(J+K#181)=VPO/((1-P(I))/(PRD1*PRD2)+P(I)/
      (PRS1*PRS2))
      X(J)=J-1
      IF(DE.EQ.0) GOTO 15
      DI=DE*E1(I)
      DPRD=-4.0*(PRD1**3)*(8*(C21(J)-C41(J))/7
      + (1+2*C21(J))**2/4)/3
      DPRS=-32.0*(PRS1**3)*(C21(J)-C41(J))/21
      V2(J+K#181)=(((1-P(I))*(PRS1*PRS2)**2*PRD1*DPRD
      + P(I)*(PRD1*PRD2)**2*PRS2*DPRS)/((1-P(I))
      *PRS1*PRS2+P(I)*PRD1*PRD2)**2)*DI
15      IF(DP.EQ.0) GOTO 20
      DI=DP*P(I)
      IF(P(I).EQ.0) DI=DP+0.1
      V3(J+K#181)=-1.0*(V1(J+K#181)/VPO)**2*(1/(PRS1*PRS2)
      -1/(PRD1*PRD2))*DI
20      CONTINUE
30      CONTINUE
      K=N#181
      CALL SCALE(V1,0.0,K,1)
      CALL AXIS(0.0,0.0,1H ,1,8.0,90.0,V1(N#181+1),
      V1(N#181+2))
      DO 50 I=1,N
      K=I-1
      DO 40 J=1,181
      Y(J)=V1(J+K#181)
      IF(I.EQ.N) GOTO 40
      V4(J+K#181)=V1(J)/V1(J+I#181)
40      CONTINUE
      Y(182)=V1(N#181+1)
      Y(183)=V1(N#181+2)
      CALL LINE(X,Y,181,1,20,S(I))
50      CONTINUE
C      GRAPHE DES DERIVEES
C      CALL PLOT(0.0,-11.0,-3)
C      IF(DE.EQ.0) GOTO 80
      K=N#181
      CALL SCALE(V2,0.0,K,1)
      CALL PLOT(16.0,0.0,-3)
      CALL SYMBOL(-1.4,3.8,0.4,1HP,-90.0,1)
      CALL SYMBOL(-1.0,4.0,0.4,6HVP/VPO,90.0,6)
      CALL SYMBOL(2.0,-1.5,0.4,15HFOR E1= XE1,0.0,15)
      CALL SYMBOL(3.8,-1.1,0.4,1HP,-180.0,1)
      CALL NUMBER(5.2,-1.5,0.4,DE,0.0,2)
      CALL AXIS(0.0,0.0,1H ,1,8.0,90.0,V2(N#181+1),
      V2(N#181+2))
      CALL AXIS(0.0,-0.2,10HAZIMUTH IN DEGREES,-18,12.0,0.0,
      0.0,15.0)

```

```

      DO 70 I=1,N
      K=I-1
      DO 60 J=1,181
      Y(J)=V2(J+K*1d1)
  60    CONTINUE
      Y(182)=V2(N*1d1+1)
      Y(183)=V2(N*181+2)
      CALL LINE(X,Y,181,1,20,S(I))
  70    CONTINUE

C   80 IF(DP.EQ.0) GOTO 110
      K=N#181
      CALL SCALE(V3,0.0,K,1)
      CALL PLOT(16.0,0.0,-3)
      CALL SYMBOL(-1.4,3.8,0.4,1MP,-90.0,1)
      CALL SYMBOL(-1.0,4.0,0.4,6HVP/VP0,90.0,6)
      CALL SYMBOL(2.0,-1.5,0.4,14HF0K P = XP,0.0,14)
      CALL SYMBOL(3.8,-1.1,0.4,1MP,-180.0,1)
      CALL NUMBER(5.2,-1.5,0.4,DP,0.0,2)
      CALL AXIS(0.0,0.0,1H ,1,8.0,90.0,V3(N#181+1),
      +           V3(N#181+2))
      CALL AXIS(0.0,-0.2,18HAZIMUTH IN DEGREES,-18,12.,0.0,
      +           0.0,15.0)
  80    DO 100 I=1,N
      K=I-1
      DO 90 J=1,181
      Y(J)=V3(J+K*1d1)
  90    CONTINUE
      Y(182)=V3(N#181+1)
      Y(183)=V3(N#181+2)
      CALL LINE(X,Y,181,1,20,S(I))

 100  CONTINUE
      CALL PLUT(-16.0,0.0,-3)

C   110 IF(DE.NE.0) CALL PLUT(-16.0,0.0,-3)

C   SH-WAVE GRAPHE
C
      CALL PLOT(16.0,11.0,-3)
      CALL SYMBOL(-1.0,0.0,0.4,18HVVELOCITY IN KM/SEC,90.0,18)
      CALL SYMBOL(3.0,-1.4,0.4,18HAZIMUTH IN DEGREES,0.0,18)
      CALL SYMBOL(4.5,8.0,0.6,8HSW-WAVES,0.0,8)
      CALL AXIS(0.0,-0.2,1H ,-1,12.,0.0,0.0,15.0)

C
  150  DO 150 I=1,N
      K=I-1
      DO 140 J=1,181
      SRD1=1/SQRT((1+16*E1(I))*((1-2*C21(J))**2/7
      +           +(C21(J)-C41(J))/4)))
      -      SRD2=1/SQRT((1+16*E2(I))*((1-2*C22(J))**2/7
      +           +(C22(J)-C42(J))/4)))
      SRS1=1/SQRT((1+16*E1(I))*((1-2*C21(J))**2/7))
      SRS2=1/SQRT((1+16*E2(I))*((1-2*C22(J))**2/7))
      Q1=VS(J+K#181)=VSO/((1-P(I))/(SRD1*SRD2)+P(I)/
      +           (SRS1*SRS2))
      Q2=VS(J+(K+N)#181)=VSO*(1/SQRT((1+(16*E1(I)*C21(J))
      +           /7)))*(1/SQRT((1+(16*E2(I)*C22(J))/7)))

```

```

        IF(Q1.GT.Q2) Q2=VS(J+K*181)
        V1(J+K*181)=V1(J+K*181)/Q2
140      CONTINUE
150      CONTINUE
        K=2*N*181
        CALL SCALE(VS,0.0,K,1)
155      CALL AXIS(0.0,0.0,1H ,1,8.0,90.0,VS(K+1),
        +           VS(K+2))
        DO 170 I=1,N
        K=I-1
        DO 160 J=1,181
        Y(J)=VS(J+K*181)
160      CONTINUE
        Y(182)=VS(2*N*181+1)
        Y(183)=VS(2*N*181+2)
        CALL LINE(X,Y,181,1,20,S(I))
170      CONTINUE
C
C   VP/VS GRAPHE
C
        CALL PLOT(16.0,0.0,-3)
        CALL SYMBOL(-1.0,4.0,0.4,5HVP/VS,90.0,5)
        CALL SYMBOL(3.0,-1.1,0.4,18HAZIMUTH IN DEGREES,
        +           0.0,18)
        K=N*181
        CALL SCALE(V1,8.0,K,1)
        CALL AXIS(0.0,0.0,1H ,1,8.0,90.0,V1(K+1),V1(K+2))
        CALL AXIS(0.0,-0.2,1H ,-1,12.0,0.0,0.0,15.0)
        DO 190 I=1,N
        K=I-1
        DO 180 J=1,181
        Y(J)=V1(J+K*181)
180      CONTINUE
        Y(182)=V1(N*181+1)
        Y(183)=V1(N*181+2)
        CALL LINE(X,Y,181,1,20,S(I))
190      CONTINUE
        CALL PLOT(-32.0,-11.0,-3)
C
C   VP1-VP(2,3,4,5) GRAPHE
C
        K=(N-1)*181
        CALL SCALE(V4,8.0,K,1)
        CALL AXIS(0.0,0.0,1H ,1,8.0,90.0,V4(K+1),V4(K+2))
        CALL AXIS(0.0,-0.2,18HAZIMUTH IN DEGREES,-18,
        +           12.0,0.0,0.0,15.0)
        CALL SYMBOL(-1.0,1.0,0.4,15HVP1/VP(2,3,4,5),90.0,15)
        L=N-1
        DO 200 I=1,L
        - K=I-1
        DO 195 J=1,181
        Y(J)=V4(J+K*181)
195      CONTINUE
        Y(182)=V4(L*181+1)
        Y(183)=V4(L*181+2)
        CALL LINE(X,Y,181,1,20,S(I))
200      CONTINUE

```

```
        CALL PLOT(16.0,11.0,-3)
C
C   SV-WAVE GRAPHE
C
        CALL NEWPEN(3)
        CALL SYMBOL(2.7,8.0,0.6,3HSV,,0.0,3)
        DO 220 I=1,N
          K=I-1
          DO 210 J=1,101
            Y(J)=VS(J+(K+N)*181)
210      CONTINUE
            Y(182)=VS(2*N*181+1)
            Y(183)=VS(2*N*181+2)
            CALL LINE(X,Y,181,1,20,S(I))
220      CONTINUE
C
        RETURN
        END
```

C

SUBROUTINE GRAPH2(E1,E2,P,ALPHA1,PAS,VPO,BE1,BE2)

C

CE SOUS-PROGRAMME EFFECTUE LES GRAPHES POUR B=0

C

$$\begin{aligned} \text{REAL } & E1, E2, P, ALPHA1, VPO, C21(181), C22(181), C41(181), C42(181), \\ & V(183), PRD1, PRD2, PRS1, PRS2, X(183), A, Q1, Q2, BE1, BE2 \\ \text{INTEGER } & J, K, PAS \end{aligned}$$

C

$$\begin{aligned} \text{CALL } & \text{SYMBOL}(2.0, 2.0, 0.5, 16\text{HP-WAVE VELOCITY}, 90.0, 16) \\ \text{CALL } & \text{SYMBOL}(999.0, 999.0, 0.5, 14\text{HFOR DIFFERENT ANGLE}, 90.0, 19) \\ \text{CALL } & \text{SYMBOL}(999.0, 999.0, 0.5, 14\text{H BETWEEN THE CRACKS}, 90.0, 19) \\ \text{CALL } & \text{SYMBOL}(3.0, 2.0, 0.5, 17\text{HAND FOR VALUE E1=}, 90.0, 17) \\ \text{CALL } & \text{NUMBER}(999.0, 999.0, 0.5, E1, 90.0, 3) \\ \text{CALL } & \text{SYMBOL}(999.0, 999.0, 0.5, 4H E2=, 90.0, 4) \\ \text{CALL } & \text{NUMBER}(999.0, 999.0, 0.5, E2, 90.0, 3) \\ \text{CALL } & \text{SYMBOL}(999.0, 999.0, 0.5, 3H P=, 90.0, 3) \\ \text{CALL } & \text{NUMBER}(999.0, 999.0, 0.5, P, 90.0, 2) \\ \text{CALL } & \text{SYMBOL}(999.0, 999.0, 0.5, 8H ALPHA1=, 90.0, 8) \\ \text{CALL } & \text{NUMBER}(999.0, 999.0, 0.5, ALPHA1, 90.0, 2) \\ \text{CALL } & \text{SYMBOL}(4.0, 9.0, 0.5, 6HBETA1=, 90.0, 6) \\ \text{CALL } & \text{NUMBER}(999.0, 999.0, 0.5, BE1, 90.0, 2) \\ \text{CALL } & \text{SYMBOL}(999.0, 999.0, 0.5, 7H BETA2=, 90.0, 7) \\ \text{CALL } & \text{NUMBER}(999.0, 999.0, 0.5, BE2, 90.0, 2) \\ \text{CALL } & \text{SYMBOL}(999.0, 999.0, 0.5, 5H VPO=, 90.0, 5) \\ \text{CALL } & \text{NUMBER}(999.0, 999.0, 0.5, VPO, 90.0, 3) \end{aligned}$$
 $X(182)=0.0$  $X(183)=15.0$ 

CALL PLUT(6.0, 32.4, -3)

C

 $K=0$ 

DO 40 I=1,91,PAS

 $K=K+1$ 

IF(K.EQ.4) GOTO 10

GOTO 20

10 CALL PLUT(14.0, 30.0, -3)

 $K=1$ 

20 CALL PLUT(0.0, -10.0, -3)

CALL AXIS(0.0, -0.2, 18HAZIMUTH IN DEGREES, -18, 12., 0.0, 0.0, 15.0)

 $A=(I-1)*1.0$ 

CALL NUMBER(11.0, 8.5, 0.5, A, 0.0, -1)

CALL CALC2C4(C21, C41, C22, C42, ALPHA1, A, BE1, BE2)

DO 30 J=1,181

$$\begin{aligned} \text{PRD1=} & 1/\text{SQRT}((1+2.66667*E1*((8*(C21(J)-C41(J)))/7 \\ & +(1+2*C21(J))**2/4))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PRD2=} & 1/\text{SQRT}((1+2.66667*E2*((8*(C22(J)-C42(J)))/7 \\ & +(1+2*C22(J))**2/4))) \end{aligned}$$
 $\text{PRS1=}1/\text{SQRT}((1+(64*E1*(C21(J)-C41(J)))/21))$  $\text{PRS2=}1/\text{SQRT}((1+(64*E2*(C22(J)-C42(J)))/21))$  $V(J)=VPO/((1-P)/(PRD1*PRD2)+P/(PRS1*PRS2))$  $X(J)=J-1$ 

30 CONTINUE

IF(I.NE.1) GOTO 35

CALL SCALE(V, 9.0, 181, 1)

 $Q1=V(182)$  $Q2=V(183)$

```
35      CALL AXIS(0.0,0.0,18HVELOCITY IN KM/SEC,18,9.0,90.0,Q1,Q2)
        V(182)=Q1
        V(183)=Q2
        CALL LINE(X,V,181,1,0,0)
40  CONTINUE
      RETURN
      END
```

C

SUBROUTINE CALC2C4(C21,C41,C22,C42,ALPHA1,ALPHA2,BE1,BE2)

C

REAL C21(181),C22(181),C41(181),C42(181),ALPHA1,ALPHA2,BE1,  
+ BE2,B,A,T

INTEGER I

C

PSI=3.1415927/180

DO 10 I=1,181

B=BE1\*PSI

A=ALPHA1\*PSI

T=(I-1)\*PSI

C21(I)=(COS(ACUS(CUS(B)\*SIN(A)\*SIN(T)+COS(B)\*CUS(A)\*  
+ COS(T))))\*\*2

C41(I)=C21(I)\*C21(I)

B=BE2\*PSI

A=ALPHA2\*PSI

C22(I)=(COS(ACUS(CUS(B)\*SIN(A)\*SIN(T)+COS(B)\*CUS(A)\*  
+ COS(T))))\*\*2

C42(I)=C22(I)\*C22(I)

10 CONTINUE

C

RETURN

END