



Inversion des anomalies de propagation des ondes sismiques : inverse stochastique et programmation linéaire : application aux Nouvelles-Hébrides (zone de subduction) et aux Pyrénées (Arudy)

Jean-Robert Grasso

► To cite this version:

Jean-Robert Grasso. Inversion des anomalies de propagation des ondes sismiques : inverse stochastique et programmation linéaire : application aux Nouvelles-Hébrides (zone de subduction) et aux Pyrénées (Arudy). Géophysique [physics.geo-ph]. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1981. Français. NNT : . tel-00703281

HAL Id: tel-00703281

<https://theses.hal.science/tel-00703281>

Submitted on 1 Jun 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR - INGÉNIEUR

par

Jean-Robert GRASSO

Ingénieur Arts et Métiers

S U J E T

**Inversion des anomalies de propagation
des ondes sismiques :**

**Inverse stochastique et programmation linéaire.
Application aux Nouvelles-Hébrides
(zone de subduction)
et aux Pyrénées (Arudy)**

Soutenue le 28 Janvier 1981 devant la Commission d'Examen

M. G. PERRIER

Président-Rapporteur

M. M. CUER

M. J.-L. LACOUME

Examineurs

M. A. LATROBE

M. G. PASCAL

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR - INGÉNIEUR

par

Jean-Robert GRASSO

Ingénieur Arts et Métiers

S U J E T

**Inversion des anomalies de propagation
des ondes sismiques :**

**Inverse stochastique et programmation linéaire.
Application aux Nouvelles-Hébrides
(zone de subduction)
et aux Pyrénées (Arudy)**

Soutenue le 28 Janvier 1981 devant la Commission d'Examen

M. G. PERRIER

Président-Rapporteur

M. M. CUER

M. J.-L. LACOUME

M. A. LATROBE

M. G. PASCAL

Examineurs

INVERSION DES ANOMALIES DE PROPAGATION DES ONDES SISMQUES ;
 INVERSE STOCHASTIQUE ET PROGRAMMATION LINEAIRE,
 APPLICATION AUX NOUVELLES-HEBRIDES (zone de subduction)
 ET AUX PYRENEES (ARUDY)

	page
AVANT PROPOS	1
RESUME	3
I - LOCALISATION DES SEISMES	9
I.1. Traitement par moindres carrés	12
I.2. Redétermination hypocentrale	14
. moindres carrés pondérés (méthodes de Geiger)	
. méthode de détermination relative (J.H.D.)	
I.3. Cas des séismes locaux	18
. problèmes liés aux hétérogénéités de la structure	
. le problème physique tel qu'on le pose	
Figures Chapitre I	23
II - TRAITEMENT DE SYSTEME LINEAIRE (ou LINEAISE)	35
II.1. Introduction	39
II.2. Analyse d'un système linéaire	41
. utilisation de la décomposition en valeur singulière	
qui permet de mettre en évidence les difficultés liées	
au couplage données - solutions.	
II.3. Solutions par moindres carrés	45
Problème de régularisation de la matrice. On stabilise le	
problème afin d'obtenir une solution physiquement recevable	
II.4. Contrôle de la solution	50
. le concept de résolution (méthode Bachus et Gilbert)	
. résolution et erreurs dans les moindres carrés :	
formulation matricielle	

	<u>page</u>
II.5. Point de vue statistique	57
. utilisation de contraintes a priori statistiques	
II.6. Les techniques de la programmation linéaire	64
. utilisation de contraintes a priori :	
bornes sur les paramètres	
Figures Chapitre II	73
III - IMPLANTATION MACHINE DES DEUX METHODES UTILISEES	81
III.1. Construction de la matrice G	83
III.2. Implantation de l'algorithme de Franklin	85
III.3. Implantation des méthodes de programmation linéaires	88
IV - DONNEES UTILISEES	89
IV.1. Description	91
IV.2. Discrétisation	92
Figures Chapitre III	99
V - RESULTATS NUMERIQUES	115
Etude des corrélations entre les deux méthodes	
V.1. Ajustements aux données	118
V.2. Modèles obtenus	120
V.3. Recherche d'une solution physi	120
Figures Chapitre V	122
	129
VI - APPLICATIONS A LA STRUCTURE SUPERFICIELLE AU-DESSUS D'UNE PLAQUE PLONGEANTE : (Nouvelles-Hébrides)	181
VI.1. Cadre géodynamique	183
VI.2. Structure tridimensionnelle	184
VI.3. Interprétation	188
Figures Chapitre VI	191

	<u>page</u>
VII - AUTRE EXEMPLE : ETUDE DES REPLIQUES DU SEISME D'ARUDY (février 1980)	
VII.1. Données	230
VII.2. Structure tridimensionnelle	230
VII.3. Sismicité	233
VII.4. Conclusion	233
Figures Chapitre VII	235
REMARQUES GENERALES	269
BIBLIOGRAPHIE	273
"Pour une meilleure approche de cet ouvrage"	279

1984

11-5. Point de vue sur le GORRAIN

Je prends plaisir à remercier ici Guy Perrier pour l'accueil et les conditions de travail du Laboratoire de Geophysique Interne de Grenoble.

Bien qu'un seul nom soit en caractères gras sur la couverture de cette thèse, je voudrais associer à cette étude Georges Pascal et Michel Cueur pour leur large contribution. Georges Pascal a eu l'initiative de ce travail et j'ai toujours apprécié ses nombreux conseils, bien que chaque année les kilomètres nous aient éloignés (Tonnerre de Brest!). Je remercie également Michel Cueur qui a donné un second souffle à cette étude et remis de nombreuses "ruses" numériques à leur place.

Sans oublier Michel Bouchon pour l'intérêt constant porté à ce travail, Xavier Goula, qui m'a initié à cet art particulier qu'est celui de l'inversion, M^{rs} Lacoume et Latrobe pour avoir participé au jury de cette thèse, ainsi que Joëlle et tous mes compagnons de travail.

Et puis,

le soleil et la neige,

la sncf et les ptt qui ont facilité les contacts entre Brest Grenoble et Montpellier;

je profite aussi de cette page officielle pour présenter mes excuses à tout ceux précédemment cités (ou non), qui se sont fait dévorés leurs laçets par Arthur.

Il y a une autre question à se poser :
- la question de la responsabilité

Il y a une autre question à se poser :
- la question de la responsabilité
Il y a une autre question à se poser :
- la question de la responsabilité
Il y a une autre question à se poser :
- la question de la responsabilité
Il y a une autre question à se poser :
- la question de la responsabilité
Il y a une autre question à se poser :
- la question de la responsabilité

R E S U M E

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

La sismologie est d'un apport fondamental pour la connaissance de nombreux processus géologiques. Elle y contribue par deux approches : l'une consiste à étudier avec une précision toujours croissante la structure interne de la Terre, en particulier les hétérogénéités latérales ; l'autre étant l'étude des mécanismes à la source d'un séisme et leurs liens avec les processus géologiques.

Donc, dans le passé, les géologues s'intéressaient à une représentation détaillée de la croûte terrestre, les sismologues se contentant d'une simple coupe unidimensionnelle. Il en résultait une déconnexion presque totale.

Avec les récents progrès de l'appareillage sismologique, le développement de réseaux de stations, l'acquisition de donnée, leur analyse et l'introduction de méthodes d'inversion tridimensionnelle, "l'imagerie" sismique de l'intérieur de la terre est devenue plus fine, se rapprochant ainsi des préoccupations des géologues, des mécaniciens des roches ou des prospecteurs.

Aki et al. (1977) ont les premiers présenté une image tridimensionnelle des anomalies de vitesses sous un réseau de stations locales (NORSAR), en utilisant des télé-séismes (séismes situés à plus de trente degrés de distance) épacentrale.

Dans ce travail, nous nous proposons d'étendre cette méthode à l'utilisation simultanée des stations locales et télé-sismiques, puis, dans une deuxième étape, d'inverser simultanément les paramètres des foyers sismiques et la structure en vitesse au voisinage de la zone focale.

Nous avons pu disposer de données, obtenues dans le Pacifique sud-ouest (Nouvelles Hébrides). Ces observations sont constituées par les temps d'arrivée des ondes P de séismes superficiels enregistrés par un réseau combiné de 17 stations terrestres et marines.

Durant une période de trois semaines, une centaine de micro-tremblements de terre ont été localisés par le réseau ; 43 sont retenus pour l'inversion de leur temps d'arrivée (252 observations), aux stations du réseau.

On obtient une estimation de leurs paramètres (positions du foyer et heures d'origine) à l'aide d'une minimisation par moindres carrés des résidus de temps de parcours dans un modèle tabulaire. Ce modèle est déduit des résultats d'une campagne de sismique réfraction.

Après calcul, il reste des résidus d'ondes P, importants devant l'erreur de lecture ;

$$r_{ij} = t_{ij}^{obs} - t_{ij}^{cal} \quad \text{tels que} \quad 0,2 \text{ s} < |r_{ij}| < 0,7 \text{ s}$$

la pression de la lecture variant entre 0,05 s et 0,15 s.

On se propose d'expliquer ces résidus par des variations aux premiers ordres sur les paramètres des foyers et sur les vitesses des ondes P. En appliquant le principe de Fermat, le problème physique s'écrit alors :

estimer les paramètres m

$$m = (m^F, m^V C(\vec{r}))$$

avec $m^F = (\delta X_1, \delta Y_1, \delta Z_1, \delta t_1^H, \dots, \delta X_{nev}, \delta Y_{nev}, \delta Z_{nev}, \delta t_{nev}^H)$

nev : nombre d'événements (séismes ou tirs)

et $m^V = \frac{SV}{V}(\vec{r})$

qui doivent vérifier,

$$d_i = \langle G_i, m \rangle \quad i = 1, \text{ nobs}$$

$$\text{avec} \quad \langle G_i, m \rangle = \sum_{j=1}^{4 \text{ nev}} g_{ij}^F m_j^F - \int_{rai} \frac{ds}{V(\vec{r})} m^V(\vec{r})$$

les coefficients de g_{ij}^F sont les dérivées partielles du temps de parcours séismes - stations, par rapport aux paramètres des foyers sismiques.

Le problème physique étant posé, nous l'avons abordé, dans un premier temps, en utilisant les algorithmes classiques de minimisation par moindres carrés des écarts aux données (ici les résidus des ondes P). Les outils statistiques, permettant le contrôle de la qualité de la solution "douce" ainsi obtenue, posent des problèmes de base dans notre cas. En effet, selon le choix de paramètres discrets (parallélipèdes), nous sommes conduits à résoudre, avec les mêmes données, soit un système sur-déterminé (moins d'inconnues que de paramètres), soit un système sous-déterminé. On passe alors

d'un système à solution unique (jamais atteinte), à un système qui admet de nombreuses solutions :

i) Comment particulariser la solution lisse obtenue ?

ii) Que signifie une minimisation par moindres carrés lorsqu'il existe plusieurs solutions ?

De telles remarques pourraient condamner ces processus d'inversion ; elles rendent seulement leur interprétation délicate.

Nous présentons ensuite les difficultés liées aux choix de la discrétisation et à l'utilisation de contraintes statistiques sur notre problème physique. Ainsi apparaît la nécessité d'obtenir des critères objectifs pour "choisir" une solution (les critères statistiques montrant leurs limites).

Face à ces problèmes, une seconde approche, "objective", a été définie. En collaboration avec M. CUER (Equipe physique théorique, Montpellier, RCP problèmes inverses), nous avons appliqué à la sismologie les techniques de programmation linéaire. L'utilisation de contraintes linéaires explicites sur les paramètres d'un problème fondamentalement non unique permet d'explorer le domaine des solutions possibles (lorsqu'elles existent) et de les particulariser.

Dans notre exemple, avec les bornes choisies ($\pm 15\%$ sur les anomalies de ± 5 km et $\pm 0,5$ s sur les paramètres du foyer), on ne trouve pas de solution. Si on soupçonne les données d'incohérence, on montre alors comment on ajuste les données en norme L_1 (209 écarts nuls sur 252 données).

Les solutions obtenues par les deux techniques, tant pour les paramètres des épicentres que pour la structure en vitesse, étonnent par leur très bonne correspondance dans le sens (signe) des variations (solutions) obtenues. Sur un exemple, le calcul des valeurs minimum et maximum possibles de quelques paramètres permet d'exprimer clairement la qualité de l'information contenue dans les données. Fort de ces renseignements et vu les corrélations exprimées précédemment, les solutions particulières obtenues présentent un acquis appréciable et fournissent une base de réflexion pour l'interprétation géophysique et géologique de ce modèle.

Deux applications sont présentées : la première étudie la structure au-dessus d'une plaque plongeante dans la partie centrale de l'arc des Nouvelles Hébrides. La deuxième utilise les enregistrements des répliques du séisme d'Arudy (1980) (Pyrénées). Les deux cas traités montrent une très faible dépendance des perturbations des paramètres des hypocentres vis-à-vis des anomalies de vitesse. Dans l'exemple d'Arudy, le résultat majeur reste une anomalie de vitesse négative (zone lente), associée à la zone sismique. Dans le cas de la structure du domaine "océanique" étudié aux Nouvelles Hébrides, l'une des difficultés de l'interprétation réside dans la détermination de la zone de contact entre les deux plaques. Un des résultats les plus intéressants est obtenu entre 20 et 35 km de profondeur, où une couche épaisse de vitesse 7.2 km/s environ est nettement visible sous chaque île (Malikolo, Efate). Cette couche n'est pas mise en évidence dans le domaine intra-îles. Une telle structure peut refléter une ancienne subduction (opposé à la subduction actuelle) et caractériser aussi un modèle de fluage pour la subduction actuelle (absence de gros séismes dans cette région).

CHAPITRE I

LOCALISATION DES SEISMES

L'étude de la propagation des ondes à l'intérieur de la Terre et la modélisation des structures à l'échelle du globe ont permis la mise en évidence d'importants phénomènes tant géophysiques que géochimiques (zones à moindres vitesses et augmentation rapide de vitesses dans le manteau supérieur associées à des changements de phase, structure fine du noyau, concrétisation des plaques plongeantes par la localisation des télé-séismes, etc...).

Dans le problème particulier de la détermination de la position d'un séisme, ces études, à partir de modèles à symétrie sphérique, montraient leurs limites pour résoudre les questions posées par les hétérogénéités régionales. Ces limites sont dues tant aux données fournies par les différents réseaux mondiaux (installés pour résoudre des problèmes à grande échelle), qu'aux modèles numériques utilisés.

Le développement récent de réseaux locaux, portables ou permanents, a pu fournir d'autres données dont le traitement numérique, beaucoup plus complexe mais souvent plus intéressant, est fortement lié aux possibilités des machines de calcul. Les différentes études utilisent la puissance croissante des ordinateurs pour améliorer la souplesse des programmes de calcul et la réalité physique des modèles obtenus.

Nous présentons dans ce chapitre quelques études caractéristiques d'une telle évolution.

La terre est continuellement déformée par des contraintes dues à des forces internes et externes. Si les contraintes ne sont pas trop importantes, il se produit des déformations élastiques et/ou plastiques. Par contre, à cause d'une hétérogénéité locale, d'un phénomène de micro-fissuration, ou d'une accumulation de contraintes, une fracture (discontinuité des déplacements) se superposera au processus précédent. Ce phénomène de fracturation s'accompagne d'une brusque libération de contraintes et génère des ondes élastiques qui se propagent à l'intérieur de la terre. Un réseau sismique, à la surface de la terre, peut enregistrer le mouvement du sol causé par le passage des ondes élastiques sous les différents points d'observation (stations).

I.1. TRAITEMENT PAR MOINDRES CARRES

Méthode formulée par Geiger (1910).

Le perfectionnement des moyens numériques et le développement de réseaux mondiaux de stations standardisées (1960) ont conduit à l'utilisation d'un nombre sans cesse croissant de stations (observation de temps d'arrivée des ondes), pour déterminer les paramètres du foyer.

Un traitement statistique par moindres carrés de cette information (attribué à Geiger 1910) se présente comme suit :

soit n observations, $t_1, \dots, t_n$,
entachées d'erreurs de mesure, $err_1, \dots, err_n$ considérées comme des variables aléatoires ;
et n poids arbitraires, $w_1, \dots, w_n$;

trouver m paramètres du modèle, $m_1, \dots, m_m$ tel que

$$Q = \sum_{i=1}^n w_i (t_i - F_i(m_1, m_2, \dots, m_m))^2 \quad (1)$$

soit minimum; F_i étant les valeurs théoriques des t_i associées aux paramètres $m_1, \dots, m_m$.

Les hypothèses nécessaires à une telle formulation s'énoncent ainsi :

- i) La structure moyenne de la terre et le trajet du rai pour un couple station-séisme sont supposés connus et fixés.
- ii) Le séisme est modélisé par un point source.
- iii) Les seuls paramètres du modèle pouvant varier sont les quatre paramètres du foyer : la profondeur, les deux coordonnées de l'épicentre et l'heure origine.

Pour un système surdéterminé ($n \gg m$) et pour de grandes distances séisme-stations, les données sont inconsistantes ; les deux principales causes étant les erreurs de mesure et les déviations systématiques des fonctions F_i par rapport à la structure réelle de la terre. L'utilisation de méthodes statistiques pour approcher les données peut alors se justifier. La minimisation de Q est un problème numérique classique. Le problème non linéaire (dû au trajet des rais joignant les couples séisme-stations) se résout en utilisant un schéma itératif. On cherche ainsi pas à pas l'ajustement linéaire à apporter aux paramètres pour minimiser le critère choisi.

Une telle méthode itérative se caractérise par les deux points suivants :

- i) il faut fournir au départ une solution approchée du système.
- ii) alors, si la solution existe et est unique, un algorithme (méthode de Newton en général) permet de se rapprocher progressivement de la vraie solution du système, sans jamais l'atteindre (sauf exception). Il est de ce fait nécessaire d'utiliser un critère d'arrêt lorsque la solution trouvée est voisine de la solution réelle.

La convergence vers une solution physiquement acceptable nécessite une régularisation du problème numérique. Il faut à ce niveau être clair, et la notion de solution "physiquement acceptable" demande à être explicitement définie. On étudiera dans le chapitre 2 les formulations statistiques et explicites de ce choix. On doit alors bien différencier les problèmes numériques qui se posent lors de la résolution du système (1) (dus à la précision machine), et les difficultés liées au choix objectif d'une solution physiquement acceptable. L'instabilité dite "numérique" regroupe trop souvent aux yeux de l'utilisateur ces deux cas.

Le stade suivant devant obligatoirement être une estimation de l'erreur sur

ces paramètres, on calcule,

$$s = \sqrt{\frac{Q}{n - m}}, \quad \text{écart-type de la somme des écarts -}$$

avec des hypothèses statistiques sur la répartition des erreurs dans les données et sur la solution, on montre que dans certains cas (n grand), s est un estimateur sans biais de l'erreur sur la solution. On doit cependant bien préciser que dans de tels processus de localisation de séismes, une telle erreur représente l'ajustement aux données et pas nécessairement une erreur de position. (Everden 1968, James et al. 1969).

Différents travaux, liés à l'apparition de nouveaux moyens de calcul ont essayé d'affiner cette technique.

I.2. REDETERMINATION HYPOCENTRALE

I.2.1. Cas des télé-séismes

Les premières révisions des positions des foyers sismiques consistaient à multiplier les données (300 arrivées d'ondes P, PKP, pP pour un séisme, Bolt 1960). On se reportera à la Figure (I.1) pour la visualisation de ces ondes.

L'utilisation d'ondes telles que pP permet un meilleur contrôle sur la profondeur du foyer sismique. La figure (I 3) extraite de J. Jackson et T. Fitch (1979) illustre bien le problème à résoudre. Le principal obstacle à de telles déterminations est le manque de connaissance de la répartition des résidus de temps d'arrivée par rapport à des tables de propagation dans une terre à symétrie sphérique. Une telle connaissance est nécessaire pour procurer les données en fonction de cette répartition. Pour les télé-séismes, une telle loi peut se définir à l'aide de deux composantes (Jeffreys, 1967, p. 214-215) : l'une, dominante, suivant approximativement une loi normale ; une seconde, qui apparaît comme un bruit de densité pratiquement constante (due aux erreurs d'identification de phases, de pointés de temps d'arrivée, de mauvaise lecture des top minute ou d'importantes dérives d'horloge).

La fonction poids utilisée est alors souvent celle proposée par Jeffreys lui-même (1948). Un exemple des valeurs adoptées par Bolt (1960) est présenté ci-dessous :

$ r_i - \bar{r} $	0	2	4	6	8	10	12
$w(r_i)$	0.98	0.98	0.96	0.90	0.67	0.25	0.04

$$r_i = t_i^{\text{obs}} - t_i^{\text{cal}}$$

$\bar{r}$ moyenne des r_i pour un séisme donné, au sens du maximum de vraisemblance.

$w(t_i)$ poids adopté lors de l'implantation machine.

On estime alors l'erreur sur l'heure origine et le processus itératif ^{se}termine si l'ensemble des résidus aux stations est faible par rapport à cette estimation.

La convergence du processus n'est pas garantie, en particulier dans le cas de chocs multiples ou de mauvaises couvertures azimutales. L'erreur sur l'heure origine est la seule estimée et n'est qu'un moyen qualitatif pour comparer deux séismes.

Toutefois, de tels programmes ont abouti à des cartes de sismicité cohérentes mettant en évidence d'importants phénomènes à grande échelle (Fig. I 4).

Détermination relative (par groupe)

Les procédures présentées précédemment fournissent des paramètres de foyer sismique ayant des mesures très variables. Les deux éléments principaux engendrant de telles impressions :

- la distribution des stations utilisées (nombre et position),
- l'hétérogénéité de la structure des zones traversées par les différents rais sismiques.

Pour évaluer les "effets de stations", des méthodes de détermination simultanée de nombreux séismes ont été présentées sous différentes formes (Freedman, 1967,

Douglas, 1967). Une bonne répartition de séismes permet de mettre en évidence des corrections azimutales de stations. Ces mêmes techniques peuvent être utilisées pour obtenir des déterminations relatives de séismes enregistrés par les mêmes stations (Dewey 1972).

On considère un groupe de K séismes tous enregistrés par J stations. Les données de départ sont constituées par des tables de propagation des ondes P et des positions initiales des foyers. On considère que les 2 k ondes P et pP en provenance des K séismes sont également perturbés d'un terme Γ_j au cours de leur trajet vers la j ième station.

Numériquement, on résoud par moindres carrés le système de n équations du type :

$$\delta H_{0k} - (\delta x_k \sin \alpha_{jk} + \delta y_k \cos \alpha_{jk}) \left(\frac{\delta t}{\delta \Delta} \right)_{jk} + \delta z_k \left(\frac{\delta t}{\delta z} \right)_{jk} + \delta g_j + \epsilon_{jk} = r_{jk} \quad (2)$$

avec :

δH_0 : variation de l'heure origine du séisme considéré

$\delta x, \delta y$: variation des coordonnées de l'épicentre en degré du séisme considéré

δz : variation de la profondeur du foyer considéré.

α : azimut de l'épicentre par rapport à la station considérée (en degré)

Δ : distance épicentre - station.

δg : correction à apporter au terme de station considéré.

r_{jk} : résidus du temps de propagation par rapport aux tables théoriques.

ϵ_{jk} : erreur de lecture ou d'horloge.

En choisissant comme séisme étalon un séisme bien localisé et en pondérant les observations pour éliminer les résidus trop forts, (2) s'écrit :

$$\omega_{jk} \delta H_{0k} - \omega_{jk} (\delta x_k \sin \alpha_{jk} + \delta y_k \cos \alpha_{jk}) \left(\frac{\delta t}{\delta \Delta} \right)_{jk} + \omega_{jk} \delta z_k \left(\frac{\delta \Gamma_P}{\delta z} \right)_{jk} + \omega_{jk} \delta g_j + \omega_{jk} \epsilon_{jk} = \omega_{jk} r_{jk} \quad (a)$$

en tenant compte des ondes pP, on adjoint l'équation :

$$\omega_{jk} \delta z_k \left(\frac{\delta t_{pP}}{\delta z} \right)_{jk} + \omega_{jk} \epsilon'_{jk} = \omega_{jk} r'_{jk} \quad (b)$$

Les équations (a) et (b) étant écrites pour $j = 1, J$ et $k = 2, K$;

et

$$\omega_{j1} \delta g_1 + \omega_{j1} \epsilon_{j1} = \omega_{j1} \cdot r_{j1} \quad (c)$$

pour $j = 1, J$.

ϵ'_{jk} et r'_{jk} étant les erreurs sur l'onde pP et le résidu par rapport aux tables de pP-P

$$r'_{jk} = t_{pP}^{obs} - t_{pP}^{cal}$$

Les équations (a), (b) et (c) sont résolues par moindres carrés pour δH_{0n} , δx_n , δy_n , δz_n et δg_j ($j = 1, J$) de manière itérative.

Les résultats les plus spectaculaires sont obtenus lorsque les séismes sont proches du séisme pris comme référence (la distance à la plus proche station doit être beaucoup plus grande que la distance au séisme le plus lointain, pour respecter l'hypothèse de trajet commun à toutes les ondes P (et pP) du groupe de séismes vers chaque station j). La figure (I.5) montre la qualité des résultats obtenus par Pascal et al (1978) dans la région des Nouvelles Hébrides pour des séismes intermédiaires et profonds.

Les limitations de la méthode apparaissent sous divers aspects.

- La réalité des solutions dépend fortement du respect des hypothèses de départ : en particulier les termes source station supposés constants, Γ_j , varient de δg_j , souvent non négligeable,
- on n'obtient qu'une localisation relative,
- la difficulté à déterminer les profondeurs des séismes superficiels en utilisant les ondes P seules n'est pas levée. Fig (I.6).

Ces programmes de localisation de séismes enregistrés par plusieurs centaines de stations à l'échelle du globe fonctionnent maintenant de manière routinière dans les différents centres mondiaux ou régionaux. Les méthodes utilisées fournissent des résultats globaux qui peuvent être affinés à l'aide d'options plus performantes dont un exemple vient d'être présenté (ce travail nécessitant un tri des données).

Le problème beaucoup plus vaste de la localisation de séismes à partir d'un réseau local a été abordé avec les mêmes méthodes numériques. Mais de telles méthodes ne sont pas toujours entièrement applicables. En effet, les problèmes de convergence dus aux nouvelles données sont importants. De plus, le nombre limité de stations rend incorrect les évaluations statistiques de la qualité des localisations (Chap. 1.1).

I.3. SEISMES LOCAUX

Dans la section I.1, on a vu que la méthode qui consiste à minimiser la somme pondérée des carrés des résidus des temps de parcours est peu adaptée au traitement local de la détermination des foyers. Les inconvénients sont de deux ordres :

- un problème numérique d'instabilité, lié à des problèmes peu contraints. (Exemples nombreux dans l'utilisation du programme HYP0 71 où des paramètres restent bloqués à une position initiale fixée arbitrairement (Wesson, 1971).
- la paramétrisation du milieu en couches homogènes ne se justifie pas souvent à l'échelle du réseau où il existe de fortes hétérogénéités.

Problème lié aux hétérogénéités de la structure étudiée

Dans le cas de réseaux locaux, le choix du modèle de vitesse ne peut plus se faire par référence systématique aux modèles de vitesse à grande échelle (Jeffreys 1940, Herrin 1969). Le principal biais obtenu dans les localisations est dû à la non-réalité du modèle tabulaire utilisé. Jusqu'alors ces modèles étaient limités de deux façons :

- soit par manque d'observations,
- soit lorsque la structure est connue (pendage, chambre magmatique ...), les techniques de tracés de rais tridimensionnelles n'étaient pas encore implantées dans les programmes de détermination des foyers.

Deux approches se sont récemment développées :

- i) lorsque une hétérogénéité de grande échelle est connue, une relocalisation des séismes en tenant compte de l'hétérogénéité est effectuée. Les résultats obtenus sont particulièrement intéressants et éclairent de nombreux problèmes (nouveaux mécanismes focaux (Engdhal et Lee, Figure (I.7) (1971), double surfaces de Wadati-Benioff dans les plaques plongeantes, Figure (I.8) 1973)).

Le principal inconvénient d'une telle approche étant la non-unicité de la solution présentée.

- ii) lorsque la structure locale est plus complexe (ou si l'on désire une information plus fine) on cherche à déterminer (à partir des temps d'arrivée des ondes P) à la fois la structure en vitesse et les paramètres des séismes locaux de la zone étudiée.

Les premiers travaux sur ce sujet cherchaient à déterminer, en plus des foyers sismiques,

- une structure unidimensionnelle ($V = f(z)$) Crosson 1976,
- une structure à couche bidimensionnelle (Crosson 1978,
- soit en discrétisant le milieu en blocs tridimensionnels (parallélépipèdes) (Aki and Lee, 1976). Un des problèmes fondamentaux auxquels se heurtent les méthodes actuelles reste le choix de la discrétisation, élément important de l'information que l'on traite.

Remarque :

En ce qui concerne l'étude des géométries des zones de Wadati-Benioff, il est intéressant de noter (Barazangi et Isacks 1980) que les déterminations obtenues par le réseau mondial (à condition de trier les données et de "tester" la qualité de la détermination) donnent des localisations plus fiables que celles obtenues par les réseaux locaux sans tenir compte de l'effet de la plaque plongeante (Figure I.9). Cette remarque n'est valable que pour les séismes profonds ou intermédiaires.

Le problème physique posé

a) Les données du problème

Les observations utilisées sont les temps d'arrivée d'ondes P à des stations locales (au-dessus de la zone étudiée) et à des stations situées à des distances télé-sismiques.

Comme nous l'avons vu précédemment, le problème étant non linéaire, il est nécessaire de partir d'une solution proche de la solution réelle. Pour les paramètres des séismes, cette estimation est obtenue par les moindres carrés pondérés avec un modèle local de vitesse à couches planes homogènes (provenant de données obtenues par la sismique réfraction, des forages ou d'autres observations géophysiques).

Après cette détermination initiale des foyers, il nous reste des résidus des ondes P. Ces résidus,

$$t^{\text{obs}} - t^{\text{cal}} = d \quad d \text{ grand devant l'erreur de mesure sur } t^{\text{obs}}$$

constituent les données de notre problème. A ces données physiques, s'ajoute une discrétisation du milieu qui constitue une deuxième information sur la solution cherchée.

b) Les paramètres inconnus

Bien que les déterminations initiales lissent beaucoup les anomalies de temps de propagation, on cherche à partir de ces résidus à accroître notre connaissance sur la structure traversée par les ondes. Un tel milieu est défini par de nombreux paramètres physiques ou chimiques. Les plus couramment utilisés sont les paramètres sismiques déduits directement de l'analyse des ondes, vitesses en milieu isotrope ou anisotrope, coefficient d'atténuation de l'amplitude des ondes. Pour cette étude, nous avons choisi d'expliquer les résidus de temps de parcours par des variations relatives de vitesse isotropique et des perturbations des paramètres géographiques des séismes considérés comme des points source.

Le lien entre l'ensemble des données et les paramètres est une approximation linéaire :

$$t^{\text{obs}} - t^{\text{cal}} = f \left(\frac{\delta V}{V}, \delta x_i, \delta t_i^H \right)_{i=1,3}$$

En appliquant le principe de Fermat, le problème physique s'écrit alors :

ESTIMER LES PARAMETRES m

$$\text{avec } m = (m^F, m^V(\vec{r}))$$

$$\text{où } m^F = (\delta X_1, \delta X_1, \delta Z_1, \delta t_1^H, \dots, \delta X_{ns}, \delta Y_{ns}, \delta Z_{ns}, \delta t_{ns}^H)$$

ns : nombre de séismes.

$$m^V(\vec{r}) = \frac{\delta V}{V}(\vec{r})$$

QUI DOIVENT VERIFIER

$$d_i \approx \langle G_i, m \rangle \quad i = 1, nobs$$

$$\text{avec } \langle G_i, m \rangle = \sum_{j=1}^{4ns} g_{ij}^F m_j^F - \int_{\text{rai}} \frac{ds}{V_0(\vec{r})} m^V(\vec{r})$$

Les g_{ij} étant les dérivées partielles du temps de parcours par rapport aux quatre paramètres du foyer

$$g_{ij}^F = \frac{\delta t_{ij}}{\delta X_j}, \frac{\delta t_{ij}}{\delta Y_j}, \frac{\delta t_{ij}}{\delta Z_j}, 1 \text{ pour le séisme considéré}$$

$$g_{ij}^F = 0 \text{ partout ailleurs.}$$

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1. - Représentation schématique des différentes ondes se propageant à l'intérieur de la terre (d'après Bullen, 1954).

Figure I.2. - Visualisation de l'onde pP.

Figure I.3. - Sur ce dessin est porté en ordonnée le nombre de stations utilisées par l'I.S.C. (International Seismological Center) pour localiser un séisme. Aucune onde pP n'a été enregistrée par ces stations (pas de contrôle sur la profondeur des séismes).

En abscisse, sont reportées les profondeurs des séismes correspondants. Dans cette étude, seuls les événements enregistrés par au moins 25 stations sont utilisés. On remarque la forte dépendance entre la profondeur de ces séismes et le nombre d'observations (d'après Jackson et Fitch, 1979).

Figure I.4. - Cartes de sismicités mondiales. Les limites entre les plaques sont bien concrétisées tant au niveau des dorsales qu'au niveau des zones de subduction.

Figure I.5. - Comparaison des relocalisations obtenues par J.H.D. (Joint Hypocenter Détermination) avec les déterminations de l'I.S.C. pour une coupe perpendiculaire à l'arc des Nouvelles Hébrides. On se reportera au chapitre VI pour la localisation de cette coupe. (D'après Pascal et al, 1978).

Figure I.6. - On présente ici les résultats obtenus par Pascal et al (1978) en utilisant une méthode de détermination relative de télé-séisme. Les mécanismes liés aux séismes superficiels restent peu compréhensibles (nuage de points).

Figure I.7. - Mécanismes focaux obtenus par Enghdal et Lee (1976) en tenant compte de la structure hétérogène au voisinage de la faille de San Andréas.

Figure I.8. - Les séismes intermédiaires de l'arc des Aléoutiennes sont redéterminés en caractérisant la plaque plongeante par une anomalie de vitesse relative de + 8 %.

Figure I.9. - Les résultats présentés comparent les renseignements obtenus par l'étude de la micro-sismicité d'une région à ceux qui proviennent de l'étude des télé-séismes. La faible extension latérale d'un réseau local, comme la mauvaise couverture en distance des réseaux mondiaux, nécessitent de particulariser chaque étude.

a/ Région Honshu (Japon) :

les résultats définissent la même position de la plaque plongeante (grande ouverture du réseau local).

b/ Arc Aléoutien :

le choix entre les deux positions est possible.

La ligne en pointillés de la figure du haut reporte le pendage de la plaque plongeante déduit de l'étude des séismes locaux. Ici on n'a pas tenu compte de l'effet de la plaque plongeante. Le pendage, fort en profondeur, peut en être le reflet (Engel et al, 1977). (D'après Varazangui et Isachs, 1980).

c/ Séismicité mondiale et répartition des stations. Lomnitz (1981) remarque que la plupart des stations (continents) sont situées à des distances critiques.

Figure I.10. - Le problème de la détermination simultanée des séismes locaux et de la structure en vitesse tel qu'on le traite dans cette étude.

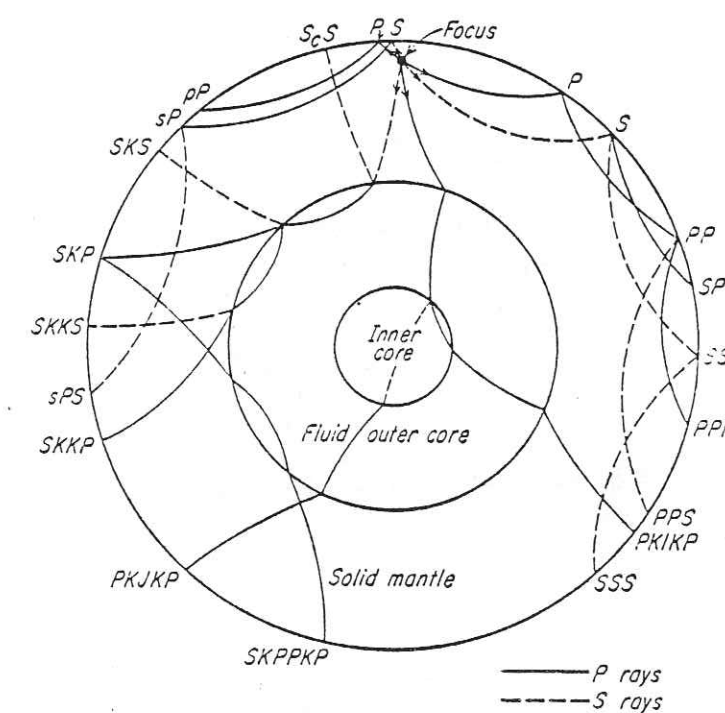


Fig. 1.1. Representative seismic rays through the Earth. (After Bullen, 1954.)

Figure I.1.

Figure I.8. - Les séismes intermédiaires de l'arc des Aléoutiennes sont redéterminés en caractérisant la plaque plongeante par une anomalie de vitesse relative de + 8 %.

Figure I.9. - Les résultats présentés comparent les renseignements obtenus par l'étude de la micro-sismicité d'une région à ceux qui proviennent de l'étude des télé-séismes. La faible extension latérale d'un réseau local, comme la mauvaise couverture en distance des réseaux mondiaux, nécessitent de particulariser chaque étude.

a/ Région Honshu (Japon) :

les résultats définissent la même position de la plaque plongeante (grande ouverture du réseau local).

b/ Arc Aléoutien :

le choix entre les deux positions est possible.

La ligne en pointillés de la figure du haut reporte le pendage de la plaque plongeante déduit de l'étude des séismes locaux. Ici on n'a pas tenu compte de l'effet de la plaque plongeante. Le pendage, fort en profondeur, peut en être le reflet (Engel et al, 1977). (D'après Varazangui et Isachs, 1980).

c/ Séismicité mondiale et répartition des stations. Lomnitz (1981) remarque que la plupart des stations (continents) sont situées à des distances critiques.

Figure I.10. - Le problème de la détermination simultanée des séismes locaux et de la structure en vitesse tel qu'on le traite dans cette étude.

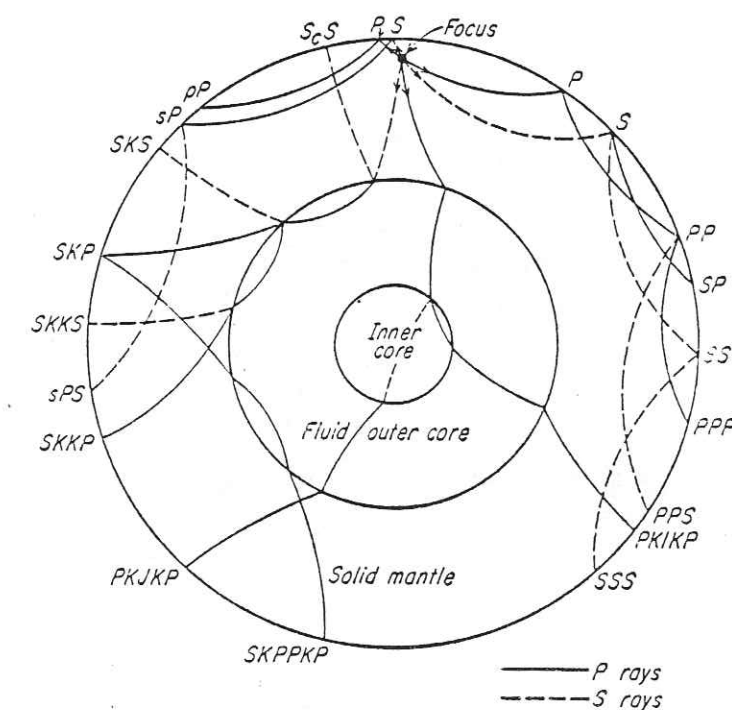
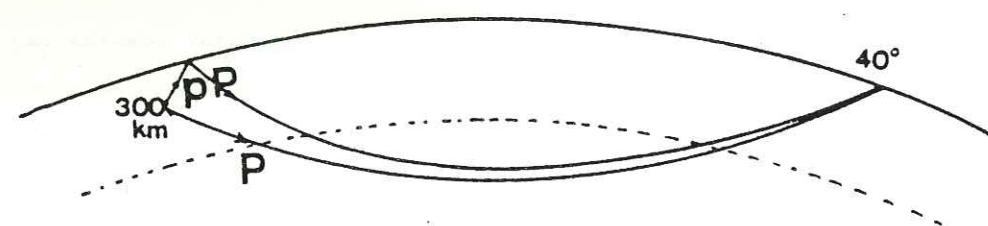


Fig. 1.1. Representative seismic rays through the Earth. (After Bullen, 1954.)

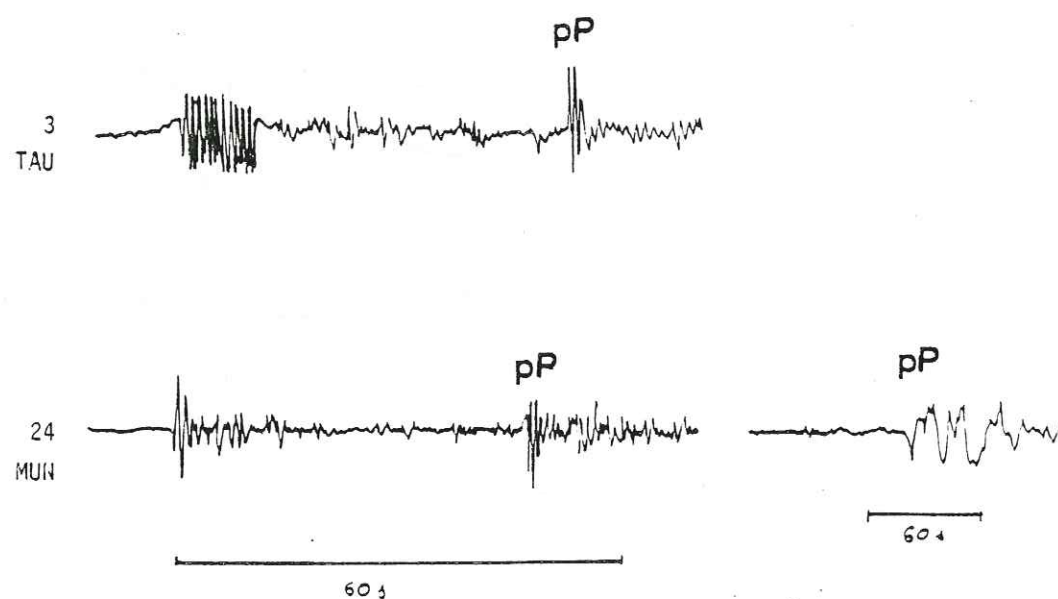
Figure I.1.



MANTEAU

NOYAU

Coupe verticale de la Terre montrant les trajets des ondes pP et P pour un séisme à 300 km de profondeur, enregistré à 40° de distance.



Exemples de sismogrammes WSSN enregistrés à des distances télé-sismiques. Tous les enregistrements correspondent à la composante verticale. Tous les enregistrements de courte période sont à la même échelle de temps. L'échelle pour les enregistrements de longue période est montré dans chaque cas.

Figure I.2.

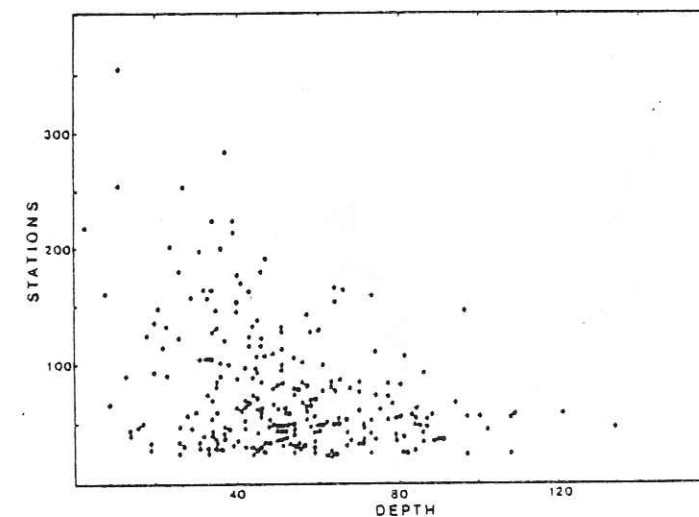


Figure I.3.

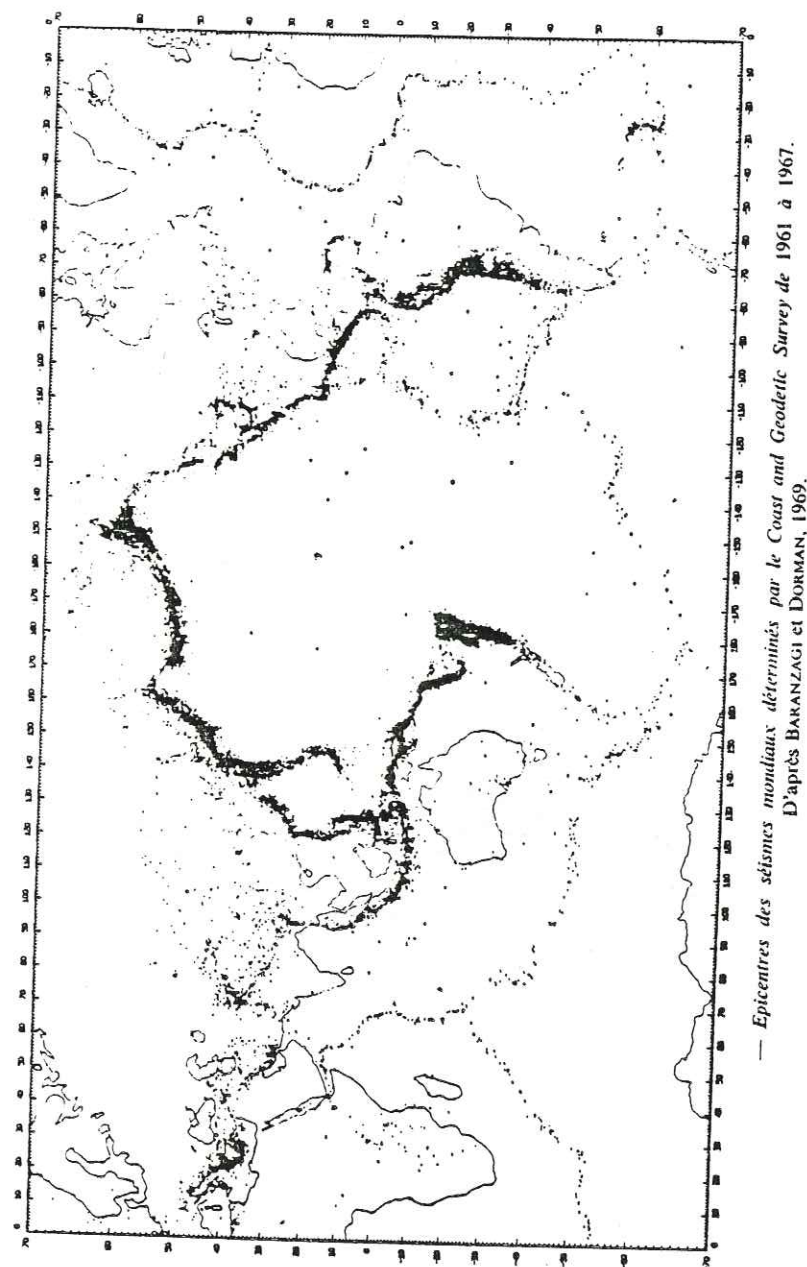


Figure I.4.

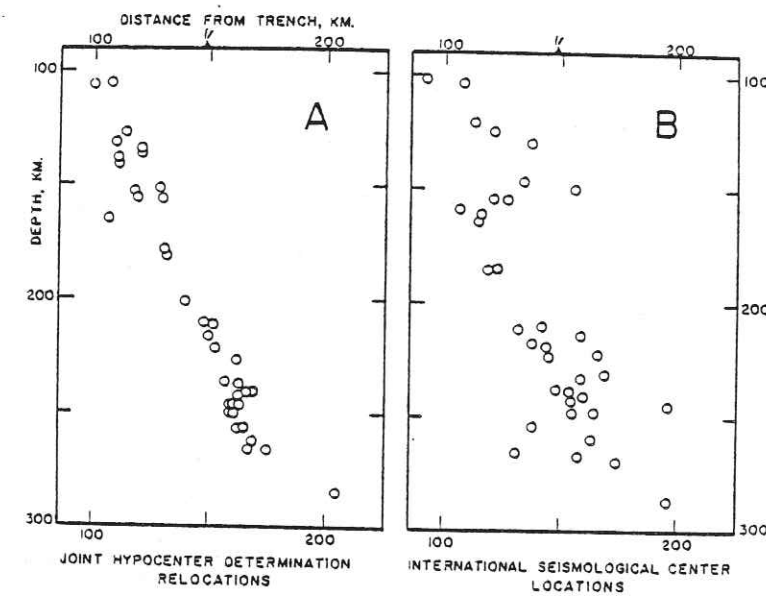


Figure I.5.

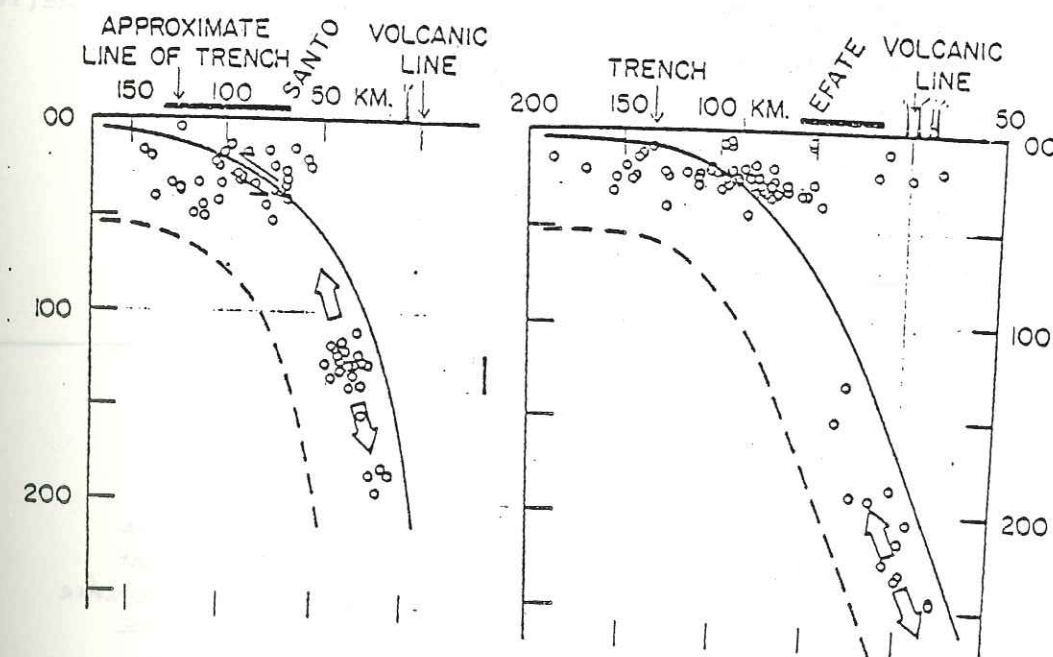
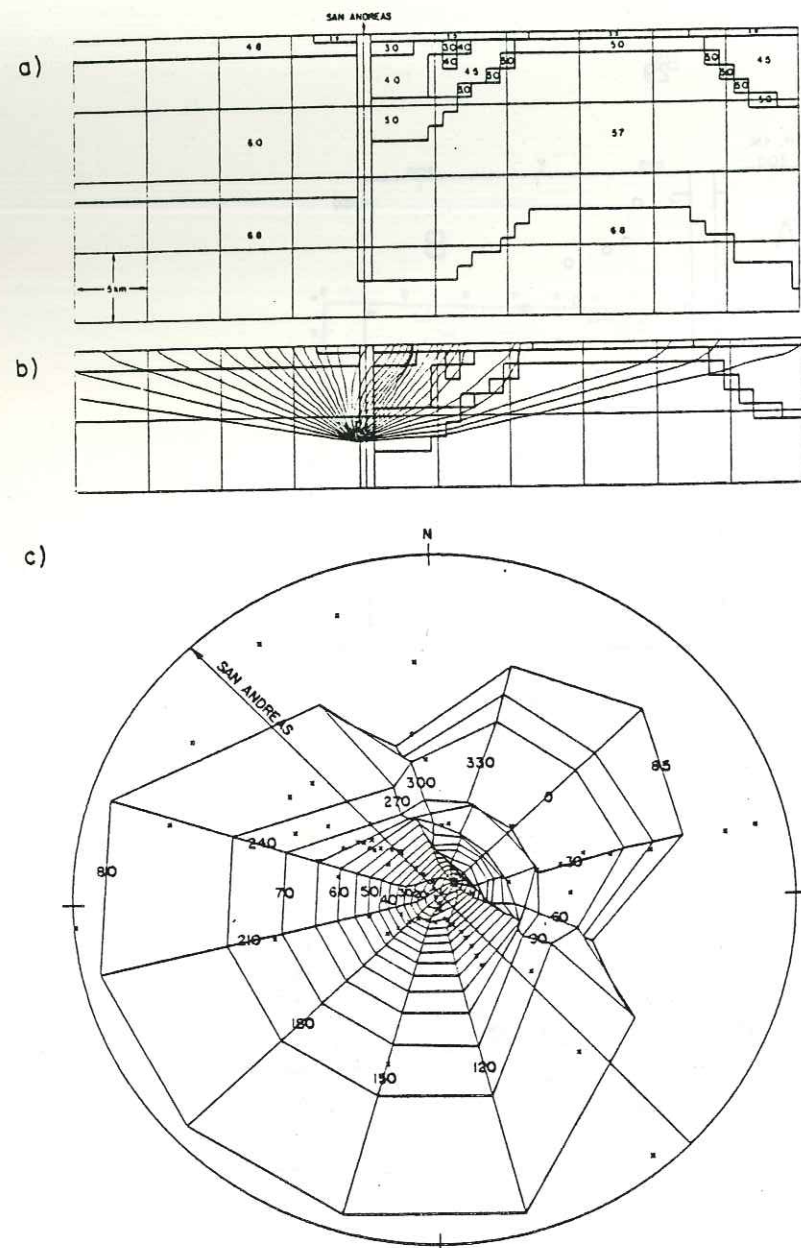


Figure I.6.

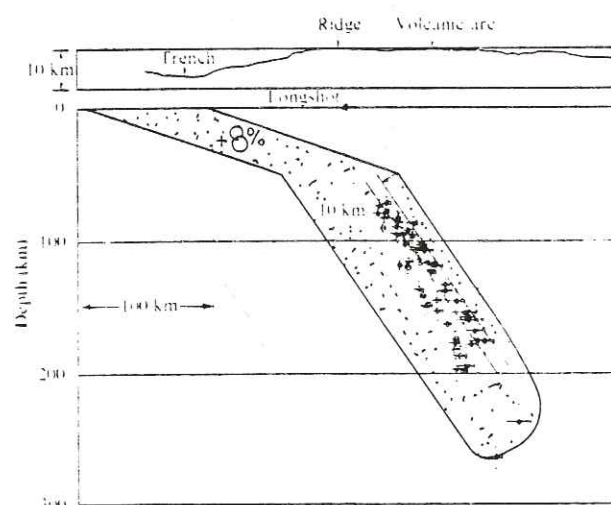


a). modèle de vitesse
bidimensionnel de Bear Valley (U.S.A.)
(vitesse en km/s.) perpendiculaire
à la faille de San Andreas.

b) tracés des rais pour un séisme
situé à 6.8 km de profondeur.

c) projection azimutale
équidistante des rais
tracés avec un pas de 5°
comme angle d'incidence et
un pas de 30° en azimut pour
le même séisme que précédemment.
Les croix reportent les stations
utilisées dans cette région. Le
cercle à 40 km de rayon est
centré sur l'épicentre.
(d'après Engdhal et Lee (76))

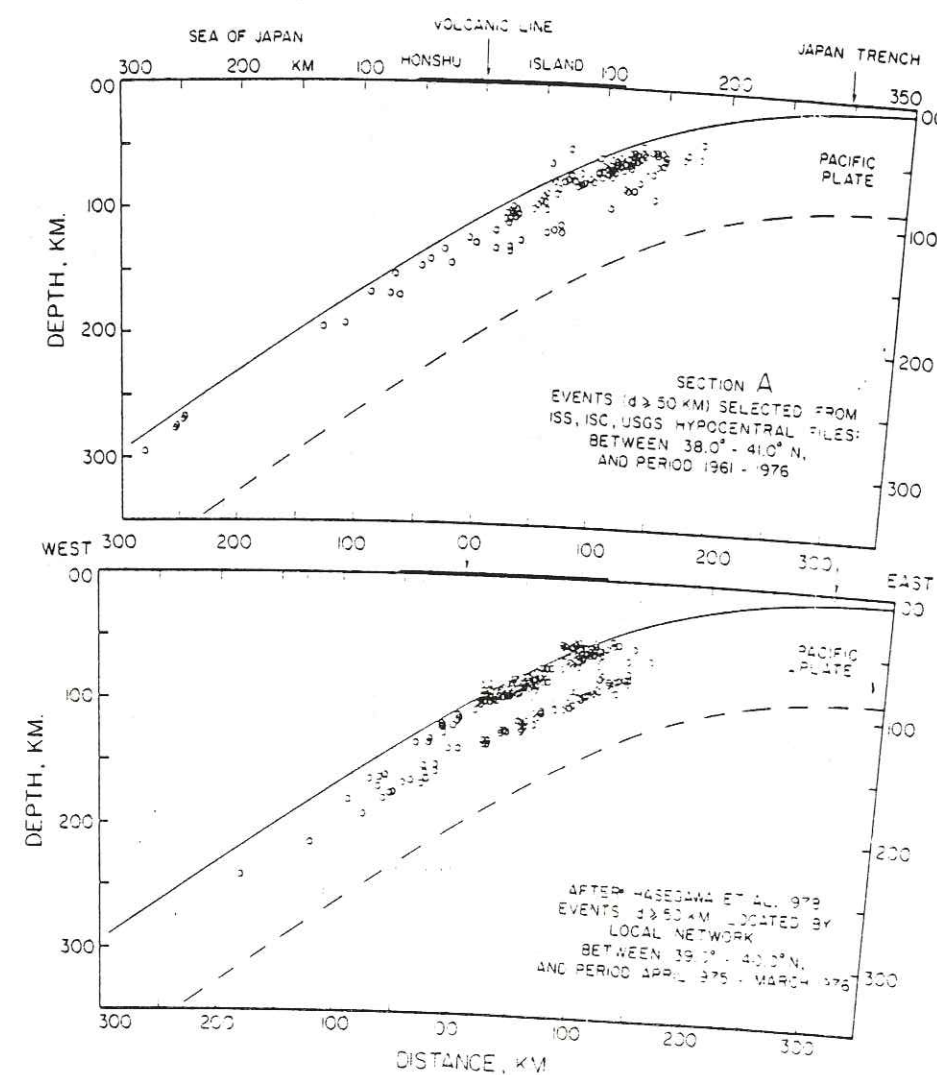
Figure I.7.



relocalisation de
séismes en tenant
compte d'une anomalie
de vitesse dans la
plaque plongeante

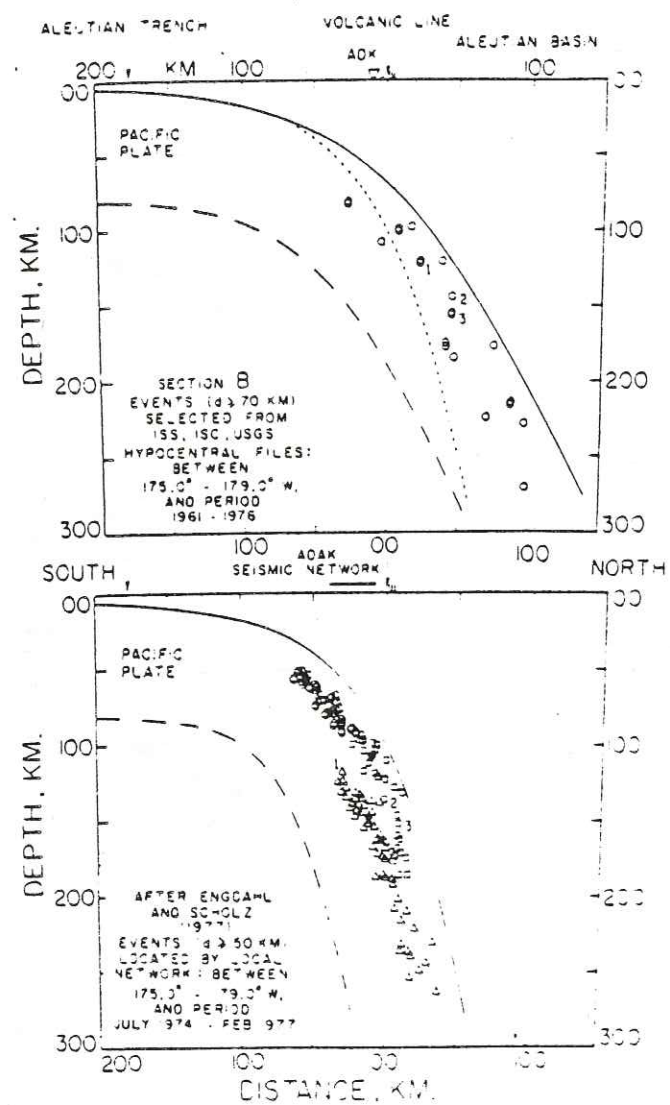
o position initiale
• relocalisation.

Figure I.8.

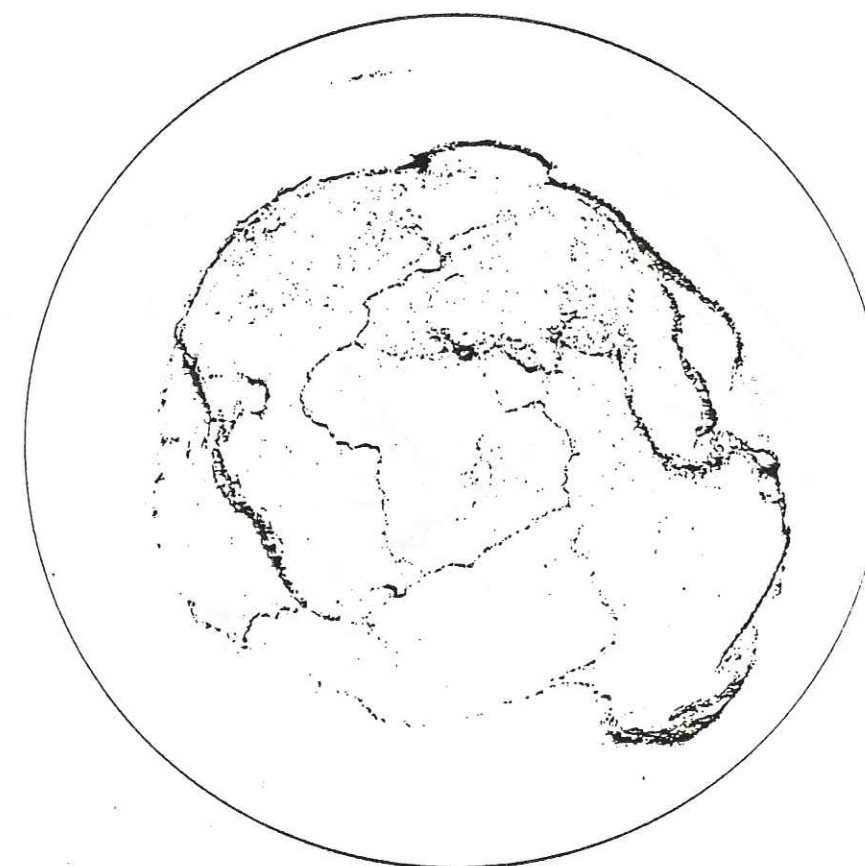


(a)

Figure I.9.



9 (b)



The distribution of continental masses as referred to the major earthquake belts (after Spilhaus, 1975). Note that the angle of observations for epicenters in subduction zones is around 90° for most continental stations.

9 (c)

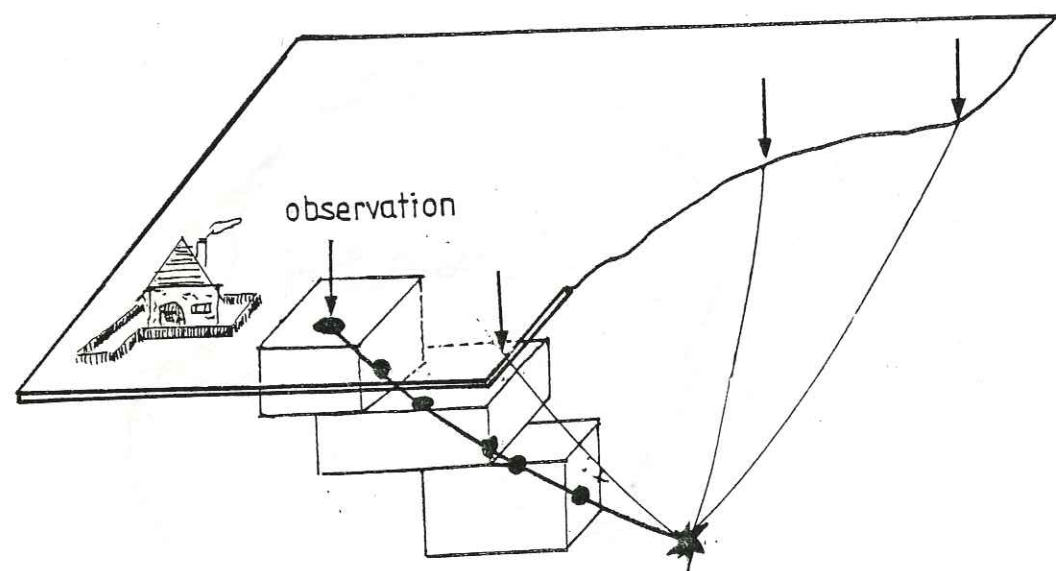


Figure I.10.

CHAPITRE II

TRAITEMENT DE SYSTEMES LINEAIRES

(OU LINEARISES)

Le plan de cette section représente la démarche que nous avons effectuée pour traiter ce type de problème. Dans un premier temps, on calcule une solution lisse en utilisant les moindres carrés. Ensuite se pose la question de la signification des moindres carrés lorsque le nombre d'inconnues est supérieure au nombre de données. Pour essayer de déterminer la qualité de la solution obtenue, on est alors amené à utiliser des méthodes statistiques (Franklin 1972). On obtient seulement des critères relatifs qui classent les différentes solutions entre elles. Face à ces problèmes dans la troisième partie, nous introduisons des contraintes linéaires explicites sur les paramètres inconnues. Nous présentons les différentes solutions calculables.

II.1. INTRODUCTION

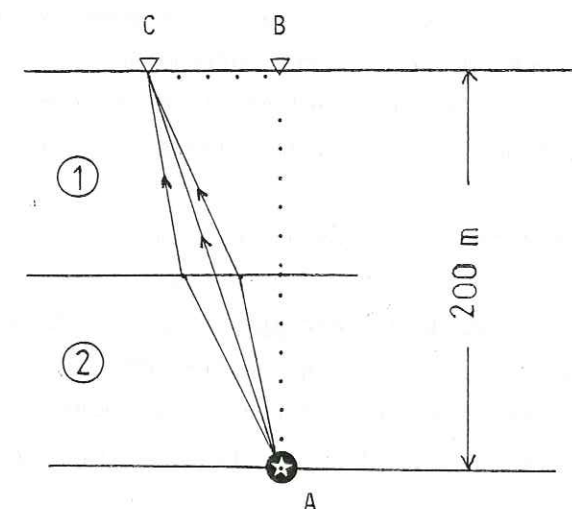
II.1.1. Les difficultés physiques

Le problème inverse que nous nous proposons de traiter consiste à trouver la répartition des foyers sismiques et des vitesses qui rendent compte d'un ensemble de données, constituées par les heures des premières arrivées lues sur les sismogrammes.

Dès 1972, des prospecteurs ont très bien défini les limites concrètes d'une telle étude dans le cas plus simple de la recherche d'un schéma de répartition bi-dimensionnel des vitesses (tirs entre puits) (Bois, Laporte, Lavergne et Thomas, 1972). En général le problème n'a pas de solution unique ; il peut n'avoir aucune solution ou bien en avoir plusieurs, voire même une infinité, selon que le nombre d'équations (nombre d'observations) diffère dans un sens ou dans l'autre du nombre d'inconnues (nombre de paramètres fixant le schéma de répartition des vitesses). Lorsqu'il y a plusieurs solutions, celles-ci peuvent être très différentes les unes des autres et très sensibles aux erreurs de mesures.

Un exemple théorique simple permet de mieux concrétiser le problème.

Une charge est tirée en A à 200 mètres de profondeur. Deux géophones sont disposés en surface aux points B et C distants de 45 mètres. B étant à la verticale du point A, l'expérience fournit les temps t_b^{obs} , t_c^{obs} de première arrivée aux deux géophones. Si on choisit de déterminer la vitesse dans deux couches d'égale épaisseur, les cas suivants peuvent se présenter :



1) avec des temps expérimentaux,

$$t_b = 100 \text{ ms}$$

$$t_c = 105 \text{ ms}$$

Le problème n'admet aucune solution.

2) Si les temps expérimentaux sont :

$$t_b = 100 \text{ ms}$$

$$t_c = 102 \text{ ms}$$

La solution est unique et donne $V_1 = V_2 = 2000 \text{ m/s}$.

3) Pour des données légèrement différentes :

$$t_b = 100 \text{ ms}$$

$$t_c = 102,5 \text{ ms}$$

On a deux solutions possibles :

$$V_1 = 1384 \text{ m/s}$$

$$V_1 = 3604 \text{ m/s}$$

ou

$$V_2 = 3604 \text{ m/s}$$

$$V_2 = 1384 \text{ m/s}$$

4) Si on ajoute une troisième couche, le rapport t_b/t_c restant dans une limite physiquement acceptable, on a une infinité de solutions (deux équations, trois inconnues).

Une modification inférieure à 0,5 % sur l'un des temps provoque une modification de la structure en vitesse atteignant 80 % (cas 2 et 3). Ce manque d'unicité et cette sensibilité exagérée aux erreurs devraient irrémédiablement condamner le problème inverse. Toutefois ces mêmes défauts se rencontrent en diverses disciplines géophysiques (gravimétrie et magnétisme en particulier) et ils n'ont jamais empêché les méthodes interprétatives de se développer : ils les ont simplement rendues prudentes.

Les cas 1 et 4 mettent en évidence l'importance du choix des paramètres à déterminer. En reprenant les cas 2 et 3, on constate qu'avec une erreur de lecture de l'ordre de la milliseconde, les deux observations t_b , 102 ms et 102,5 ms, sont physiquement possibles. Le temps $t_b = 105 \text{ ms}$ étant rejeté. Une telle analyse des données, qui consiste à rejeter les anomalies "trop" fortes, peut choquer le numéricien. En effet, ces anomalies qui semblent contenir l'information la plus importante sont exclues en

sismologie car elles correspondent dans la plupart des cas à une erreur de phase.

La démarche de l'expérimentation pour choisir entre les trois solutions possibles se présente souvent comme suit :

il serait logique ... de retenir la solution du type $V_1 = V_2 = 2000 \text{ m/s}$ car elle entre dans la classe la plus lissée compte tenu des erreurs expérimentales. Une telle solution lisse présente bien des défauts :

- elle n'est pas unique, il peut donc exister plusieurs domaines de solutions qui sont dis joints et il est difficile de savoir a priori vers lequel de ces domaines le calcul de cette solution particulière se dirigera.
- l'écart, entre les temps expérimentaux et les temps calculés correspondant à la solution, peut, dans certains cas, rester nettement supérieur aux erreurs de mesures ; ce qui signifie :
 - soit que celles-ci sont sous estimées,
 - soit que le schéma adopté n'a pas assez de souplesse pour rendre compte de la réalité (on peut alors essayer d'utiliser les statistiques pour rejeter ce modèle avec un niveau de confiance donnée).

Le choix subjectif d'une solution lisse est fortement lié à la notion expérimentale de solution "physiquement non recevable". Ce rejet par l'expérimentateur se fonde sur des informations a priori sur la solution cherchée, différentes de celles contenues dans un nombre limité d'observations. On peut alors définir, comme une solution objective, l'utilisation de contraintes explicites (bornes sur les paramètres inconnues par exemple) pour le calcul d'une solution dans un domaine limité. Dans ce domaine, on est à même de particulariser plusieurs solutions. L'implantation machines de telles procédures est bien adoptée aux algorithmes de programmation linéaire. (Chap. II.6).

II.2. ANALYSE D'UN SYSTEME LINEAIRE

La résolution correcte d'un système linéaire $Gm = d$ nécessite une analyse précise des données, des caractéristiques de la matrice G , et une évaluation de la qualité de la solution.

La matrice G , qui fait correspondre les paramètres du modèle aux données, joue ici un rôle essentiel. Pour évaluer les effets du couplage qui existe entre les données et les paramètres de la solution, Lanczos (1961), démontre que l'on peut décomposer G en produit de trois matrices.

$$G = U \Lambda V^T$$

G étant une matrice de dimension $n \times m$

U étant une matrice de dimension $n \times n$

V étant une matrice de dimension $m \times m$

Λ étant une matrice de dimension $n \times m$;

n : nombre de données

m : nombre d'inconnues.

Les matrices U , V , Λ sont telles que :

$$U^T U = I_n$$

$$V^T V = I_m$$

$$\Lambda = \begin{vmatrix} \lambda_1 & & & 0 \\ 0 & \ddots & & \\ 0 & & \lambda_r & 0 \\ 0 & & & 0 \end{vmatrix}$$

si $n > m$

et

$$\Lambda = \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 & & 0 \\ 0 & \ddots & & \\ 0 & & \lambda_r & 0 \\ 0 & & & 0 \end{vmatrix}$$

si $n < m$

on a r valeurs λ_i différentes de zéro ; r est appelé rang de G . Les λ_i non nulles étant les valeurs propres différentes de zéro de $G^T G$ ou GG^T .

La matrice U est donc constituée des vecteurs propres de GG^T , que l'on peut relier à l'ensemble des données de dimension n . De même la matrice V est constituée des vecteurs propres de $G^T G$, que l'on relie à l'ensemble des paramètres inconnues de dimension m . On décompose alors les matrices U et V en

$$U = (U_r, U_0) \quad , \quad V^T = \begin{pmatrix} V_r^T \\ V_0^T \end{pmatrix}$$

U_r et U_0 étant une décomposition de la matrice U à partir des r vecteurs propres correspondants aux valeurs propres de $G^T G$ différentes de zéro et des $n - r$ vecteurs propres correspondants aux valeurs propres nulles. Avec les mêmes définitions pour V^T , l'équation (II 4) devient :

$$G = (U_r, U_0) \begin{pmatrix} \Lambda_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_r^T \\ V_0^T \end{pmatrix}$$

ou

$$G = U_r \Lambda_r V_r^T$$

Une telle décomposition (appelée aussi décomposition en valeur singulière) est une visualisation idéale des informations contenues dans G . On voit très bien ici que G peut être construite avec U_r et V_r et Λ_r seules. On peut analyser le système à partir d'une telle décomposition.

Approche des données

Si U_0 existe, on ne pourra jamais, avec un modèle (m) expliquer les données qui ont des composantes dans U_0 non nulles car $d = Gm$ implique

$$U_0^T d = \underbrace{U_0^T U_r}_{0} \Lambda_r V_r^T d = 0$$

Unicité de la solution

La composante V_0 est source de non unicité de la solution. On peut en effet ajouter au modèle (solution) autant de vecteurs dans V_0 , sans être en contradiction avec les données, puisque :

$V_p^T \delta m \neq 0$ et $V_r^T \delta m = 0$ implique $G(m + \delta m) = U_r \Lambda_r V_r^T (m + \delta m) = Gm$ quel que soit m .

Remarque : Une telle décomposition permet de trouver la solution qui minimise,

$$\|Gm - d\|_2^2$$

avec $\|m\|_2^2$ minimum.

En effet, on prend :

$$m = V \Lambda^{-1} U^T d \quad \text{avec} \quad \Lambda^{-1} = \begin{vmatrix} \lambda_r^{-1} & 0 \\ 0 & \lambda_p^{-1} \end{vmatrix}$$

alors, puisque U est orthogonale $\|Gm - d\|_2^2 = \|U^T Gm - U^T d\|_2^2$ donc :

$$\begin{aligned} \|Gm - d\|_2^2 &= \|\Lambda V^T m - U^T d\|_2^2 \\ &= \sum_{i \neq 0} |\lambda_i (V^T m)_i - (U^T d)_i|^2 + \sum_{i=0} (U^T d)_i^2 \end{aligned}$$

avec m tel que

$$(V^T m)_i = \lambda_i^{-1} (U^T d)_i \quad \text{si } \lambda_i \neq 0$$

$$(V^T m)_i = 0 \quad \text{si } \lambda_i = 0$$

on obtient alors $\|m\|_2^2 = \|V^T m\|_2^2$ minimum (puisque V est orthogonale) et

$$\|Gm - d\|_2^2 = \|U_0^T d\|_2^2 \quad \text{minimum puisque une somme de nombres } > 0 \text{ est}$$

minimum lorsqu'on minimise tous ces nombres. Cette valeur représente une limite inférieure en dessous de laquelle on ne peut descendre.

II.3. SOLUTIONS PAR MOINDRES CARRES

La recherche d'une solution lisse (ou douce), telle qu'on la présente au début de cette section, a conduit les expérimentateurs à choisir un nombre de paramètres faibles devant les données. On cherche alors à approcher au mieux les données en minimisant une norme du vecteur $\vec{e}$,

$\vec{e} = G\vec{m} - \vec{d}$ dimension $(\vec{m}) \ll \text{dimension}(\vec{n})$, bien que plusieurs normes soient utilisables, la norme L_2 est souvent la plus employée :

$$\begin{aligned} \|\vec{e}\|_2^2 &= (Gm - d)^T (Gm - d) \\ &= m^T G^T G m - 2 m^T G^T d + d^T d \end{aligned}$$

pour minimiser $\|\vec{e}\|_2$ on cherche à annuler,

$$\begin{aligned} \frac{d\|\vec{e}\|_2^2}{dm} &= 2 G^T G m - 2 G^T d \\ \text{ou } G^T G m &= G^T d \end{aligned}$$

Pour les mathématiciens, s'il existe un seul m tel que :

$$\sum_{j=1}^n \|Gm - d\|_2^2 \quad \text{soit minimum,}$$

alors le m obtenu ($\hat{m}$) est sans biais, ($E(\hat{m}) = E(m)$), et de variance minimale. On peut alors écrire que l'estimation est consistante si :

$$\hat{m} \rightarrow m \quad \text{lorsque } n \rightarrow \infty$$

n : nombre de données.

Ceci est vrai seulement dans le cas où la solution est unique (les colonnes de G linéairement indépendantes). Alors l'estimation $\hat{m}$, à variance minimale est solution de :

$$\hat{m} = (G^T G)^{-1} G^T d.$$

Remarque :

La notion de colonnes linéairement indépendantes pour la matrice G demande à être précisée. Une matrice $G^T G$ est normalement inversible si toutes ces valeurs propres sont non nulles. Or, certains problèmes sont tels que :

$$\frac{\min \lambda_i}{\max \lambda_i} \approx P \quad \text{avec } \min \lambda_i > 0 ; P, \text{ étant la précision machine}$$

$i=1, n$

alors la solution obtenue dépend de l'ordinateur utilisé!

Dans la plupart des traitements par moindres carrés des systèmes linéaires à partir de données physiques, des difficultés apparaissent. Elles sont liées au fait que la matrice $G^T G$ est singulière au proche de la singularité. Ces difficultés sont alors les reflets d'un inhérent manque d'information dans les données utilisées (Lanczos 1961, Wiggins 1972). Pour régulariser ces deux types de problèmes, la matrice $G^T G$ est altérée de manière à éliminer les valeurs propres faibles.

Méthode de régularisation :

Une manière élégante d'éliminer les valeurs propres nulles est l'inverse "naturelle" (Lanczos 1961). Cette technique qui utilise la décomposition en valeur singulière (voir Lawson et Hanson 1974 pour une étude détaillée de cet algorithme) se sert d'un ensemble tronqué de valeurs propres. Les difficultés dues à la présence de valeurs propres faibles sont bien visualisées par cette technique : on obtient (chapitre II.I) une estimation de la solution par moindre carré :

$$\hat{m} = V \Lambda^{-1} U^T d \quad (a)$$

avec

$$\Lambda^{-1} = \begin{vmatrix} 1/\lambda_1 & & \\ & 1/\lambda_2 & \\ & & 1/\lambda_3 \dots \end{vmatrix}$$

$\lambda_1, p \neq 0, \lambda_1^2, \lambda_2^2 \dots$ sont les valeurs propres de $G^T G$.

Les valeurs propres faibles projettent, à l'aide de l'équation (a) de faibles erreurs, d'une ou plusieurs des composantes des données, en fortes oscillations d'une ou plusieurs des composantes du vecteur solution ($\hat{m}$). La cause de ces solutions non physiques (valeur trop importante par exemple) est dans la plupart des cas liée à la discrétisation choisie et non à l'estimateur utilisé pour obtenir la solution ($\min ||Gm-d||^2$ ou $\min |Gm-d|$, ou $\min \max |Gm-d|$). L'influence d'une variation Δd (dans les données), sur l'estimation des paramètres caractérise du point de vue statistique la robustesse de l'estimateur :

$$d_i \pm \Delta d \rightarrow \hat{m}_j \pm \frac{\Delta_{mj}}{\lambda_i}$$

Une technique élégante pour éliminer ces inconvénients consiste à couper de manière franche les composantes sur la solution liées aux valeurs propres inférieures à un seuil choisi.

λ_c étant ce seuil, on pose :

$$\lambda_i = 0 \quad \text{si } \lambda_i < \lambda_c \quad (\text{Wiggins 1972}).$$

Cette technique nécessite le calcul des valeurs propres du système, et lorsque G est importante, le coût d'un tel calcul est assez élevé.

Au lieu d'éliminer les valeurs propres nulles ou faibles et les vecteurs propres correspondants en utilisant la décomposition en valeurs singulière (ou d'autre algorithme de décomposition), une méthode de "moindres carrés atténués" peut être utilisée pour stabiliser la solution. Cette technique fut présentée par Levenberg (1944) et reprise par Marquart (1963).

$$\text{L'équation } G^T G m = G^T d \text{ est modifiée en } (G^T G + \theta^2) m = G^T d$$

θ : constante fixée par l'utilisateur.

On peut alors résoudre le système par élimination, les problèmes de singularités étant éliminés.

Un tel algorithme minimise :

$$||\hat{e}||_2 + \theta^2 ||m||_2$$

θ étant un coefficient donnant plus ou moins de poids à la minimisation du vecteur solution.

Avec la formulation du paragraphe II.1, on obtient :

$$\hat{m}_i = V_i \frac{\lambda}{(\lambda^2 + \theta^2)} U_i d_i$$

La figure (II.1) explicite bien l'effet des différentes régularisations possibles (Crosson 1976).

Toutefois, il faut être conscient que le manque d'information ne peut en aucun cas être résolu par quelques ruses numériques que ce soit.

Choix du niveau de régularisation

Cela reste un problème crucial pour l'utilisateur. Le contrôle de θ ou de λ se fait d'une manière très pragmatique (Der 1970, Wiggins 1972) : on cherche θ et λ tel que les solutions satisfassent, $m < k$,
 k : constante fixe par l'utilisateur.

Ces méthodes de régularisation s'appliquent à des systèmes à solutions uniques, mathématiquement stables, lorsque la précision de machine utilisée pour calculer la solution numérique le nécessite.

Elles s'utilisent aussi dans le cas où $Gm = d$ n'a pas de solution (effet des erreurs de mesures). On minimise alors $\|Gm - d\|_2 + \theta^2 \|m\|_2$.

Dans le cas où la solution n'est pas unique, les mêmes techniques sont employées pour calculer une solution qui satisfasse le physicien. La différence entre les deux domaines (système surdéterminé ou sous-déterminé) n'est pas réelle dans notre cas. Elle reflète simplement un choix de l'utilisateur pour traiter le problème.

On ne cherche plus à résoudre le problème numérique :

$Gm - d = p$ précision machine,

mais le problème physique :

$Gm - d = \text{erreur de lecture}$ avec $|m| < m_{\max}$.

Dans le cas où il existe plusieurs solutions, une estimation n'a une valeur que si elle se particularise dans l'ensemble des solutions possibles. La signification des

moindres carrés sur un système sous-déterminé est alors à préciser (la solution de longueur minimum n'a pas toujours un sens, exemple en magnétisme).

Toutes ces méthodes nécessitent une évaluation de la qualité de la solution. Le concept de résolution introduit par Bockus et Gilbert (1968) peut être utilisé. On en montrera ses limites dans le paragraphe suivant.

II.4. CONTROLE DE LA SOLUTION

1. Le concept de Résolution - Méthode de Backus et Gilbert

Dans sa formulation originale, la méthode de Backus et Gilbert (1967) est un outil capable de quantifier l'information sur la fonction $m(r)$ contenue dans les équations de la forme,

$$\int_0^1 g_i(r) m(r) dr = d_i \quad (5)$$

$i = 1, \text{ nobs}$

d_i : donné

$g_i(r)$: fonction connue reliant les données et la fonction $m(r)$.

L'idée de base consiste à construire à partir de $g_i(r)$ un noyau $R(r, r_0)$ centré au point r_0 . Pour résoudre ce problème, les auteurs proposent de résoudre :

$$\delta = \min_{\text{nobs}} \int_0^1 R^2(r, r_0) (r - r_0)^2 dr \quad (6)$$

avec $R(r, r_0) = \sum_{i=1}^{\text{nobs}} \alpha_i g_i(r).$

Le noyau $R(r, r_0)$ étant donc défini par une combinaison linéaire des g_i , est soumis à la condition

$$\int_0^1 R(r, r_0) dr = 1. \quad (7)$$

Pour chaque r_0 , les constantes α_i sont calculées en utilisant les moindres carrés. La quantité $\hat{m}(r_0)$,

$$\hat{m}(r_0) = \sum_{i=1}^{\text{nobs}} \alpha_i d_i \quad (8)$$

est interprétée comme une moyenne de $m(r)$ autour du point r_0 .

L'équation (8) peut s'écrire,

$$\hat{m}(r_0) = \int_0^1 R(r, r_0) m(r) dr \quad (9)$$

pour toutes les solutions de (5). $R(r, r_0)$ est alors interprétée comme un noyau de "résolution".

Dans le cas où $R(r, r_0)$ est bien "piqué" autour de r_0 ,

$$R(r, r_0) = \begin{cases} \frac{1}{\delta} & \text{pour } r_0 - \frac{\delta}{2} < r < r_0 + \frac{\delta}{2} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

alors le nombre $\delta = 1$, mesure la longueur du pic de $R(r, r_0)$ en r_0 . δ est appelé largeur de résolution.

Remarques :

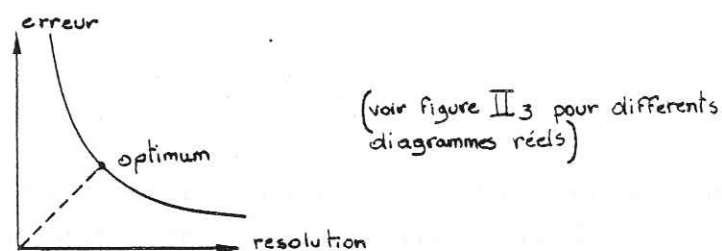
- le nombre 12 introduit dans l'équation (6) correspond à l'utilisation présentée par Backus et Gilbert (1968) dans l'étude du facteur de qualité. Un tel coefficient est nécessaire pour que δ soit la vraie mesure de la largeur du pic. Dans cette application, Backus et Gilbert (1969) montrent que les $g_i(r)$ peuvent être combinés pour former des quantités très voisines d'un pic en (r_0) . (Figure II.2, a, b).
- si $R(\vec{r}, \vec{r}_0)$ est de la forme b (Figure II.2), la méthode ne marche plus en toute rigueur.

A ce niveau, selon Backus et Gilbert, l'utilisateur a besoin de déterminer un compromis entre la capacité du modèle pour expliquer les données et la réalité de l'estimation des paramètres. Alors, au lieu de minimiser (6), Backus et Gilbert (1970) proposent de minimiser :

$$(1 - s) \delta + s \alpha^T C \alpha \quad (10)$$

- . $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_{\text{nobs}})$
- . C : matrice de covariance des erreurs dans les données.
Les erreurs sur l'estimation $\hat{m}(r_0)$ sont liées aux erreurs sur les données par :
 $\Delta \hat{m}(r_0) = \alpha \Delta d$
 $\alpha^T C_\alpha$ est alors la variance de l'estimateur $\hat{m}(r_0)$.
- . s est fixé tel que $0 < s < 1$.

On remarque dans (10) que pour un s croissant de 0 à 1, la longueur de résolution δ croît et la variance de $\hat{m}(r_0)$ décroît. On obtient alors pour différentes valeurs de s des diagrammes théoriques de la forme :



le s optimal étant déterminé par le point le plus proche de l'origine.

Il est important de noter qu'une telle procédure ne présente un intérêt que lorsque $R(r, r_0)$ est bien piqué. La recherche systématique d'un tel compromis peut masquer une mauvaise résolution, car on n'est pas sûr de trouver des $R(r, r_0)$ combinaisons linéaires des $g_i(r)$ et bien piqués. (Figure II.2).

2. Cas où les inconnues sont sous forme discrète

Dans la plupart des applications tridimensionnelles des techniques d'inversion en géophysique, une structure discrète facilite l'appréhension du problème. Bien qu'en sismologie la structure choisie ne soit jamais justifiée rigoureusement, la plupart des solutions obtenues constituent un acquis intéressant en accord avec d'autres connais-

ces de la zone étudiée. (Aki et al. 1977, Ellsworth (1977), Goula (1979).

En suivant la démarche définie dans (II.2.) (utilisation d'un algorithme minimisant les écarts aux données et d'une certaine manière la solution) on se retrouve face à l'ordinateur avec une solution.

- Ecart aux données.

La première idée pour estimer le pouvoir de cette solution est d'examiner les écarts aux données. Ellsworth (1977) calcule alors le coefficient :

$$VE = \left(1 - \frac{\sigma_e^2}{\sigma_d^2}\right) \times 100$$

σ_e^2 : variance des écarts, $e = Gm - d$

σ_d^2 : variance des données.

Sachant que l'on a obtenu une solution qui minimise

$$\|\vec{e}\|^2 = \|Gm - d\|^2,$$

le coefficient VE exprime le pourcentage de la variance des données qui est expliqué par la dépendance linéaire entre $\hat{m}$ et d . C'est une mesure possible de l'approche des données. L'effet de lissage dû à un tel choix est montré sur un exemple simple.

La Figure (II.4) montre comment les moindres carrés sont compatibles avec le choix d'une solution douce, alors que le $\min \|Gm - d\|$ est une solution extrême bien adaptée aux algorithmes de programmation linéaire. Un autre détail relatif à la rigueur de ce test statistique mérite d'être mentionné.

Le calcul du coefficient VE,

$$VE = \left|1 - \frac{\sigma_e^2}{\sigma_d^2}\right| \times 100$$

s'écrit :

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{nobs} (e_i)^2 - (\sum_{i=1}^{nobs} e_i)^2 / nobs}{nlib} \times \frac{\sum_{i=1}^{nobs} (d_i)^2 - (\sum_{i=1}^{nobs} d_i)^2 / nobs}{nlib}^{-1} \quad (11)$$

nobs : nombre d'observations

nlib : nombre de degré de liberté de la solution :

$$nlib = nobs - (mb1 + 4 \times nev)$$

mb1 : nombre de blocs

nev : nombre de séismes et d'explosions.

Bien que le degré de liberté n'intervienne pas dans la formulation finale, quelle est la valeur de ce critère lorsque

$$nlib < 0 ?$$

Le cas présenté sur la table (II.1) montre l'évolution du degré de liberté de la solution pour une "variance expliquée" croissante.

Information contenue dans la solution :

Après avoir mesuré l'approche aux données, il est naturel d'évaluer l'information contenue dans les ($\hat{m}_i$) qui est jusqu'alors laissée libre. Avec les restrictions énoncées précédemment sur la rigueur de la discrétisation, le problème est abordé ainsi (Jackson 1977, Wiggins 1972) :

on cherche une solution, de $Gm=d$, de la forme :

$$\langle m \rangle = Ld \quad (12)$$

(toutes les solutions ne sont pas de cette forme).

L étant une matrice à choisir telle que, LG se rapproche de l'identité.

Alors, connaissant L et $\langle m \rangle$, on peut dire que toutes solutions de $Gm = d$ vérifie :

$$\langle m \rangle = LGm \quad (13)$$

$R = LG$, est appelé matrice de résolution.

Chaque ligne de R peut être interprétée comme un filtre à travers lequel on perçoit la vraie réponse du système. A l'entrée de celui-ci se situe la vraie réponse (m_k) et la sortie est constituée de l'estimation de (m_k), filtrée par la ligne correspondante de R et à laquelle peut se superposer une erreur aléatoire (que l'on espère faible).

Le but d'une telle formulation peut se résumer ainsi : on multiplie G par L à gauche, pour que LG (ou une ligne particulière de LG, Wiggins 1972) soit la plus creuse possible en dehors de la diagonale.

En pratique, plutôt que de fabriquer pour chaque paramètre une ligne de résolution optimale, les différentes applications utilisent Marquart-Lerenberg en remarquant que l'équation (SII.3) qui s'écrit

$$\hat{m} = (G^T G + \theta I)^{-1} G^T d \quad (14)$$

devient

$$\hat{m} = (G^T G + \theta I)^{-1} G^T Gm$$

On a alors un opérateur L,

$$L = (G^T G + \theta I)^{-1} G^T$$

qui définit une matrice de résolution,

$$R_\theta = (G^T G + \theta I)^{-1} G^T G. \quad (15)$$

On notera que l'on obtient une matrice de résolution possible, sans savoir si elle est optimale. Ce n'est pas la vraie résolution donnée par les formules de Backus et Gilbert mais cela relève de la même idée : si la ligne de la matrice R correspondant à un paramètre est telle que :

$$r_{ij} < \epsilon$$

$$r_{ii} \approx 1$$

l'information contenue dans le paramètre correspondant est de bonne qualité.

On peut estimer l'erreur sur un paramètre sous la forme d'un écart-type :

$$\sigma(\hat{m}_i) = (C_{ii}(\hat{m}))^{\frac{1}{2}}$$

avec

$$\begin{aligned} C(\hat{m}) &= E(\delta\hat{m}, \delta\hat{m}^T) \\ &= (G^T G + \theta^2 I)^{-1} G^T E(e, e^T) G (G^T G + \theta^2 I)^{-1} \\ &= \sigma^2 e (G^T G + \theta^2 I)^{-1} R \end{aligned}$$

comme $E(e, e^T) = \sigma^2 e$

un petit exemple, Tableau (II.2), permet de concrétiser ces matrices.

Dans les applications présentées en sismologie, on obtient le même type de résultat numérique :

$$\hat{m}_k = r_{ik} m_i + r_{kk} m_k + r_{jk} m_j$$

Les estimations ($\hat{m}_k$) obtenues peuvent varier entre $-\infty$ et $+\infty$, si m_i et m_j ne sont pas bornés ; la valeur de r_{kk} étant pourtant proche de l'unité.

La matrice R reste toutefois un critère subjectif très puissant. Lors des applications à des données télésismiques (Aki et al. 1977a, Ellsworth et al. 1977, Auseby et al. 1976, Goula et al. 1979, par ex.) les pics parasites restaient très faibles par rapport au pic principal (0.01/0.8). Pour notre application les pics parasites sont cent fois plus grands (Figure II.5). Les restrictions présentées plus haut deviennent alors sérieuses.

II.5. POINT DE VUE STATISTIQUE

Afin d'obtenir une définition plus satisfaisante du choix de la solution, on reconnaît que l'on a d'autres connaissances sur le problème que celles contenues dans les données. Toutes les connaissances a priori sont formulées à l'aide d'une loi de probabilité et interviennent dans le calcul (approche Bayésienne).

Les outils statistiques, utilisés pour évaluer la qualité de la solution, quantifient l'apport d'information contenu dans les données ; apport relatif par rapport à la connaissance a priori que l'on a formulée sous forme probabiliste.

La procédure présentée ici (Franklin 1972) refuse la pratique couramment utilisée pour choisir une solution : le résultat d'un calcul numérique est rejeté parce que les nombres calculés par la machine sont trop grands et/ou trop sujets à oscillations. De telles pratiques reflètent une mauvaise étude du système à traiter : l'information que l'on cherche à obtenir n'est pas compatible avec celle contenue dans les données que l'on possède.

Dans cette section, on reconnaît que l'on dispose d'autres connaissances sur le problème que celles fournies par les observations. Chaque connaissance a priori (contraintes sur les solutions, erreur sur les données ...) est formulée à l'aide d'une loi de probabilité et intervient dans le calcul (point de vue Bayésien où l'on caractérise les solutions, les erreurs et les données par des lois de probabilité). De plus, les outils statistiques utilisés pour évaluer la qualité de la solution quantifient l'apport d'information obtenu sur chaque paramètre de la solution. Cette estimation reste toutefois relative et ne permet pas de relier la solution obtenue aux différentes valeurs "possibles" pour ce paramètre. (Cette approche n'est pas partagée par tous les statisticiens).

Pour concrétiser ce point de vue statistique (au premier abord peu réaliste), il est utile de reposer notre problème physique tel qu'il a été formulé au Chapitre I,

$$t^{\text{obs}} - t^{\text{cal}} = \langle G_i, m^{V,F} \rangle \quad (0)$$

m étant des variations au premier ordre autour d'un modèle initial. Le système (0) n'est jamais exact du fait des erreurs de mesure, des hypothèses permettant la linéarisation ... On considère que le modèle de départ (m_0^V, m_0^F) explique la majorité des observations (t^{obs}). Les résidus, $t^{\text{obs}} - t^{\text{cal}}$, sont concrètement faibles par rapport au temps de parcours : quelques dizaines de secondes sur des temps de propagation de 5 s à 10 s. Mais on admet une incertitude due à la complexité des phénomènes étudiés.

La fonction inconnue ($m(r)$), dans le cas d'une loi de vitesse, où l'échantillonnage (m^V, m^F), que l'on utilise, sont supposés représenter un processus stochastique, c'est-à-dire une fonction aléatoire dont la moyenne et la fonction de corrélation (ou matrice de covariance), sont connues.

$$E(m) = 0 \quad (1)$$

$$E(m, m^T) = C_{mm} \quad (2)$$

Il est important de remarquer que l'égalité (1) signifie que l'on reconnaît qu'en moyenne il n'y a pas d'anomalie de vitesse et que les moindres carrés donnent les bons foyers.

C_{mm} est la fonction de corrélation de la fluctuation relative de vitesse, $E(\frac{\delta V}{V}(r), \frac{\delta V}{V}(r'))$, déduite normalement "d'une théorie des processus qui ont contribué à la constitution de la zone étudiée" ! En pratique, dans le cas d'une structure discrétisée en bloc, cela revient à supposer une indépendance de la vitesse dans chaque bloc. Cette hypothèse appuie la notion de valeur moyenne dans un bloc (Backus et Gilbert 1972) assimilée à chaque inconnue m_j^V . On remarquera que dans ce cas le problème de la discrétisation ne se pose pas.

Franklin écrit alors le système (0)

$$d = Gm + n \quad (3)$$

d : processus stochastique défini sur les données, avec d vecteur aléatoire,

m : processus stochastique défini sur les solutions, avec m vecteur aléatoire,

n : processus stochastique de bruit, n vecteur contenant les composantes du bruit.

Les valeurs scalaires de ces composantes sont inconnues, dans le cas contraire, il suffirait de corriger d de ces valeurs.

avec les informations suivantes :

$$E(m) = 0 \quad E(m_j, m_j^T) = C_{mm_{jj}} \neq 0$$

$$E(n) = 0 \quad E(n, n^T) = \sigma^2 I_{\text{nobs}}$$

$$E(m, n^T) = 0$$

Le processus bruit défini par Franklin regroupe à la fois les erreurs dues aux hypothèses de calcul (linéarisation, théorie simplificatrice), et aux erreurs d'instrumentations (mesures et appareillage). Dans le contexte statistique de cette formulation, on étudie la réalité (ou le rejet) d'un modèle pour expliquer des données. Il paraît alors plus clair de ne considérer le bruit que comme une erreur de mesure (lecture liée aux caractéristiques de l'instrumentation et erreur dans le choix des phases par exemple). Les autres phénomènes physiques (on retrouve parmi eux les hypothèses simpli-

ficatrices) apparaîtront dans la capacité du modèle choisi à approcher les données.

Les différentes applications géophysiques de cette technique considère le cas particulier, simple, où les composantes du bruit ont la même variance σ_n^2 , et où les deux processus signal et bruit sont indépendants ($E(m, n^T) = 0$). Une telle corrélation est possible à formuler dans la procédure de Franklin. Toutefois, dans la plupart des études, la nature stochastique des fluctuations (m_i) s'appuie sur la complexité des processus liés à la structure actuelle de la zone étudiée alors que le bruit, tel qu'on l'a défini, est principalement contrôlé par les caractéristiques des instruments utilisés. La justification du cas particulier ($E(m, n^T) = 0$) est donc bien concrète.

Le problème à résoudre se formule en deux temps : estimer la fluctuation m qui a produit la fluctuation d et comparer la variance atteinte à la variance de départ.

On choisit l'estimateur robuste de variance minimum, à savoir b tel que :

$E(|c^T m - b^T d|^2)$ minimum (c^T étant donné, par exemple $c^T = (0, 0, 1, 0, \dots, 0)$ pour avoir un des paramètres).

On cherche donc à déterminer b .

$$\begin{aligned} \text{On a } E(|c^T m - b^T d|^2) &= E(c^T m m^T c - 2 c^T m d^T b + b^T d d^T b) \\ &= c^T \cdot C_{mm} \cdot c - 2 b^T \cdot C_{dm} \cdot c + b^T \cdot C_{dd} \cdot b \end{aligned} \quad (4)$$

En regroupant les termes contenant b , on met (4) sous la forme,

$$\begin{aligned} (b - C_{dd}^{-1} \cdot C_{dm} \cdot c)^T C_{dd} (b - C_{dd}^{-1} \cdot C_{dm} \cdot c) \\ + c^T (C_{mm} - C_{dm}^T \cdot C_{dd}^{-1} \cdot C_{dm}) c \end{aligned} \quad (5)$$

Le deuxième terme de (5) étant indépendant de b et le premier est toujours non négatif, (4) sera minimisé pour b , tel que :

$$b = C_{dd}^{-1} \cdot C_{dm} \cdot c \quad (6)$$

Calcul de C_{dd} et C_{dm} :

$$\begin{aligned} C_{dm} &= E(d m^T) \\ &= E((Gm + n) m^T) \\ &= G \cdot E(m m^T) + E(n m^T) \\ &= G \cdot C_{mm} \\ C_{dd} &= E(d d^T) \\ &= E((Gm + n)(Gm + n)^T) \\ &= G \cdot E(m m^T) \cdot G^T + G \cdot E(m n^T) + E(n m^T) \cdot G^T + E(n n^T) \\ &= G \cdot C_{mm} \cdot G^T + C_{nn} \end{aligned}$$

en reportant les valeurs de C_{dd} et C_{dm} dans (6) on obtient ; $b = C_{dd}^{-1} \cdot G \cdot C_{mm} \cdot c$ pour l'échantillonnage de d , ($\hat{d}$), que nous avons,

$$\underline{b^T \hat{d} \text{ peut s'écrire } c^T \hat{m};}$$

on a en effet:

$$\begin{aligned} b^T \hat{d} &= (C_{dd}^{-1} \cdot C_{dm} \cdot c)^T \hat{d} \\ &= c^T \cdot C_{dm}^T \cdot C_{dd}^{-1} \hat{d} \end{aligned}$$

alors il faut préciser $\hat{m}$;

$$\hat{m} = C_{dm} \cdot C_{dd}^{-1} \cdot \hat{d}$$

avec les valeurs de C_{dm} et C_{dd}^{-1} calculés précédemment,

$$\hat{m} = C_{mm} G^T \cdot (G \cdot C_{mm} G^T + C_{nn})^{-1} \hat{d}$$

avec les hypothèses particulières sur l'indépendance des solutions et l'indépendance du bruit, les matrices C_{mm} et C_{nn} sont diagonales :

$$C_{mm} = \sigma_m^2 I_{m \times m}$$

$$C_{nn} = \sigma_n^2 I_{n \times n}$$

Qualité de la solution :

La réalité de la solution ($\hat{m}$) est contrôlée par la fonction de corrélation

$$E(m - \tilde{m}, (m - \tilde{m})^T)$$

où $\tilde{m}$ est le processus stochastique défini par () dans lequel l'échantillonnage $\hat{d}$ est remplacé par le vecteur aléatoire d . () représente la fonction de corrélation de l'erreur sur la fonction estimée. La variance initiale des $c^T m$ étant comme par hypothèse,

$$V I = c^T C_{mm} c$$

la variance des $\hat{m}$ après calcul (VF) est comparée à cette variance initiale. On définit ainsi une variance améliorée

$$V A = \frac{c^T C(m - \tilde{m}), (m - \tilde{m}) c}{c^T C_{mm} c} = \frac{V F}{V I}$$

On obtient

$$\begin{aligned} C(m - \tilde{m}, m - \tilde{m}) &= E(m, m^T) - E(\tilde{m}, m^T) - E(m, \tilde{m}^T) + E(\tilde{m}, \tilde{m}^T) \\ &= C_{mm} - C_{mm} G^T (G \cdot C_{mm} \cdot G^T + \sigma^2 n I)^{-1} G \cdot C_{mm} \end{aligned}$$

en reportant dans ()

$$V A = 1 - \frac{c^T C_{mm} G^T (G \cdot C_{mm} \cdot G^T + \sigma^2 n I)^{-1} G \cdot C_{mm} \cdot c}{c^T C_{mm} c}$$

si C_{mm} est diagonale, avec $C_{mm_{jj}} = \sigma^2 m_j$

$$V A = 1 - \sigma^2 m_j (G^T (G \cdot \sigma^2 m_j \cdot G^T + \sigma^2 n I)^{-1} G)_{jj}$$

$$V A = 1 - R_{jj} \quad 0 < R_{jj} < 1$$

on peut remarquer que la formule définissant R_{jj} est semblable au point de vue numérique à la résolution du type Jackson. La signification de R_{jj} est alors bien différente de celle définie par Backus et Gilbert. R_{jj} peut ici s'identifier à un gain en variance :

Plus R_{jj} est proche de 1, plus notre connaissance sur la structure s'est améliorée.

Si l'information a priori est pauvre ($\sigma^2 m \gg \sigma^2 n$), l'estimation $\hat{m}$, qui est obtenue ici par les moindres carrés est la plus robuste possible, c'est-à-dire la moins sensible à des fluctuations aléatoires. Mais cette estimation ne révèle pas toute l'information contenue dans les données.

Si l'on suppose que les paramètres sont non corrélés, l'élément diagonal de la matrice de résolution représente le gain en variance sur l'estimation initiale de chaque paramètre. Pour chaque m_j , la solution est alors bien représentée par les trois nombres suivants :

i) $\hat{m}_j$, une estimation de la fluctuation,

ii) $\sigma^2 m_{jj}$, l'information a priori sur m_j ,

iii) R_{jj} , le gain en variance sur l'estimation de m_j .

Remarque : Lien entre les points de vue statistique et algébrique

Diverses formes particulières des matrices de covariance C_{mm} et C_{nn} permettent d'obtenir des algorithmes de programmation semblables à ceux présentés dans la section (II 2.2) (Lanczos, moindres carrés atténués de Marquart, matrice poids de Wiggins... maximum de vraisemblance ...). Au niveau du contrôle de la solution, l'implantation sur ordinateur de la résolution "discrète" et du gain en variance de Franklin est identique.

Ces particularités sont sources de nombreuses confusions dans la rigueur de la présentation des différents les études tridimensionnelles citées précédemment.

Il faut retenir que la technique de Franklin se particularise par une très forte consistance interne. Cet avantage nécessite par contre des hypothèses statistiques dont la cohérence doit être étudiée sur chaque problème particulier. La réalité de celles-ci étant difficile à vérifier, nous avons utilisé une deuxième approche, en introduisant les informations d'une manière explicite.

II.6. PROGRAMMATION LINEAIRE

PRINCIPE

Les techniques de programmation linéaire sont utiles pour résoudre des problèmes du type :

$$\begin{aligned} \min c^T m \\ h^{\min} \leq Hm \leq h^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

c , $h^{\min}$, $h^{\max}$ sont des vecteurs donnés et H une matrice.

Deux exemples permettent de comprendre l'importance concrète du système (1).

Si un problème a une mauvaise résolution (gravimétrie par exemple), il est naturel de chercher les valeurs extrêmes que peuvent prendre certains paramètres (notion de borne). Le problème (1) se pose :

$$\begin{aligned} \min \sum m_j \\ \text{j/le bloc } w_j \text{ étant dans un volume donné} \\ \text{anomalie} - \text{erreur} \leq Gm \leq \text{anomalie} + \text{erreur} \\ m^{\min} \leq m \leq m^{\max} \end{aligned}$$

On peut ainsi voir l'effet des bornes $m^{\min}$ et $m^{\max}$ sur la résolution de certains paramètres. Le paramètre est ici bien résolu si :

$$\max \sum m_j - \min \sum m_j \ll \frac{\max \sum m_j + \min \sum m_j}{2}$$

Les informations a priori utilisées étant ici les erreurs sur les données et les bornes sur chacun des paramètres. Ces bornes étant déduites soit de mesures en laboratoire, soit de calculs théoriques.

Si un problème semble avoir une bonne résolution (sismologie), il est naturel d'essayer d'ajuster au mieux les données en imposant aux paramètres de rester bornés.

On veut alors résoudre

$$\min \| Gm - d \| \quad (\| Gm - d \| \text{ pouvant être la norme } L_1, L_2 \text{ ou } L_\infty \text{ par exemple})$$

$$m^{\min} \leq m \leq m^{\max}$$

pour déterminer par exemple si certaines des bornes imposées a priori ne sont pas compatibles avec les données (ou si l'on soupçonne les données d'être entachées d'erreurs). Cela présente aussi l'intérêt de rechercher des solutions extrêmes. Dans de telles solutions, un grand nombre de paramètres sont aux bornes et on peut espérer ainsi deviner les tendances qu'un modèle lisse ne montre pas.

Un autre exemple de solution extrême est celui formulé par Gilbert (1971), lorsque les erreurs sur les données sont connues. Après transformation, le système à résoudre s'exprime :

$$d' - \sigma' \leq m' \leq d' + \sigma'$$

La correction m' à apporter au modèle n'étant connue qu'à $\pm \sigma'$, Gilbert propose de choisir dans ce domaine l'ajustement le plus petit. En classant les données par ordre d'erreurs décroissant, on compare les m' obtenus à l'erreur sur les données :

Si $m_1 < -\sigma'_1$, il pose $m'_1 = m_1 + \sigma'_1$ et passe à la donnée suivante. (De même pour $m'_1 > \sigma'_1$, on pose $m'_1 = m_1 - \sigma'_1$, et $-\sigma'_1 \leq m_1 \leq \sigma'_1$, on choisit $m'_1 = 0$). Une telle procédure assure la minimisation de $|m|^2 = \sum_i m_i'^2$, mais ignore l'information due à la consistance interne des données" (Wiggins 1972).

Principe de résolution des méthodes de programmation linéaire

Lorsque le système (1) s'écrit sous forme matricielle :

$$\begin{aligned} & \min c^T m \\ \text{avec} \quad & h_o^{\min} \leq H_o m \leq h_o^{\max} \\ & m^{\min} \leq m \leq m^{\max} \end{aligned}$$

H_o est une matrice d'ordre inférieur du nombre de paramètre.

On le transforme en :

$$\begin{aligned} & \min c^T (m - m^{\min}) \\ & H_o (m - m^{\min}) + \text{écart} = h_o^{\max} \\ & 0 \leq m - m^{\min} \leq m^{\max} - m^{\min} \\ & 0 \leq \text{écart} \leq h_o^{\max} - h_o^{\min} \end{aligned} \quad (2)$$

Le système (2) est la forme dite standard de tout problème de programmation linéaire. On arrive ainsi à écrire le système (3) :

$$\begin{aligned} & \min c^T x \\ & Ax = b \\ & 0 \leq x \leq x^{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

x est inconnue, A , b , $x^{\max}$, c étant données.

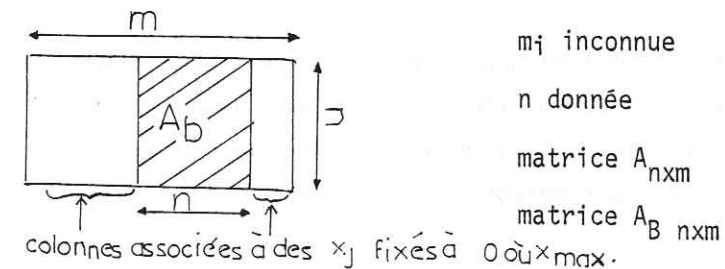
On démontre que $c^T x$ réalise son minimum en un vecteur x qui vérifie :

$$\begin{aligned} x_j & \neq 0 \\ x_j & \neq x^{\max} \end{aligned}$$

pour au plus m indices, m étant les dimensions de b . De plus, les indices j pour lesquels $0 < x_j < x_j^{\max}$ sont tels que les colonnes correspondantes, A_j , de A sont linéairement indépendantes.

Explication graphique de la recherche d'une telle solution, dite solution de base :

Un dessin explique clairement le processus de calcul :



si tous les x_j trouvés en inversant A_B sont tels que :

$$0 \leq x_j \leq x_j^{\max}$$

on a une solution dite de base. Sinon, on sort de A_B le vecteur correspond à un x_j supérieur (ou inférieur) aux bornes, et m le remplace par un vecteur correspondant à un x_j hors base. L'algorithme converge toujours en un nombre fini d'itération.

Lorsqu'une solution de base est atteinte, on peut, soit particulariser différentes solutions en minimisant des formes linéaires, soit calculer des bornes sur différents paramètres. Les algorithmes performants écrits par Cauer et Bayer (1980) permettent ce type de travail.

De nombreux autres problèmes peuvent être résolus par ces algorithmes. Nous présentons seulement ici ceux que nous avons utilisés.

Application à la sismologie

Dans un premier temps, on a étudié la comptabilité entre l'information et le modèle,

$$\begin{aligned} d_i - \sigma_i & \leq (G m)_i \leq d_i + \sigma_i & i = 1 \text{ nobs} \\ m_j^{\min} & \leq m_j \leq m_j^{\max} & j = 1, m, \end{aligned} \quad (4)$$

l'information étant constituée par une limite sur l'erreur des données, et les bornes $m^{\min}$ et $m^{\max}$ sur chaque paramètre.

Dans l'application aux Nouvelles Hébrides, on a choisi une erreur de lecture maximum, $\sigma_i = 0,15$ s, uniforme, des variations relatives de vitesse, $m_j^{\max} = -m_j^{\min} = 0,15$, des mouvements des hypocentres de ± 5 km, et des variations de l'heure origine de $\pm 0,50$.

Le résultat d'un tel calcul ne nous a pas permis d'obtenir une solution dite de base. (Le système (4) n'ayant pas de solution dans le domaine fixé par nos bornes). On en déduit que l'information a priori que l'on a utilisée est riche. On peut donc espérer une certaine "résolution" des paramètres, et utiliser des procédures d'optimisation.

Comme nous soupçonnons les données de ne pas permettre la résolution de (4) on peut chercher :

- la plus petite erreur compatible avec les bornes
- ou un modèle qui ajuste les données.

(On a choisi de ne pas mettre en cause les bornes utilisées).

Le calcul de la plus petite erreur compatible avec les bornes s'effectue en cherchant

$$\sigma_{\infty} = \min \max |(Gm)_i - d_i| \quad (5)$$

$$m_j^{\min} \leq m_j \leq m_j^{\max}$$

On obtient avec une partie de nos données une erreur minimum de 0.5 s pour des variations relatives de vitesses de ± 15 %.

Cette erreur n'étant pas réelle (physiquement acceptable) dans notre problème (voir résultat numérique chap. V.1), on cherche alors un modèle qui ajuste les données en norme L_1 .

$$\alpha_{\text{opt}} = \min \sum_{i=1}^{\text{nobs}} \frac{|(Gm)_i - d_i|}{\sigma_i} \quad (6)$$

$$m_j^{\min} \leq m_j \leq m_j^{\max}$$

Le système (6) est ramené à un problème standard de programmation linéaire à l'aide des procédures décrites par Cuet et Bayer (1980), qui le résolvent en un nombre fini d'itérations. L'utilisation de la norme L_1 s'avérera très intéressante (ajustement parfait pour un maximum de données en rejetant les autres) vu l'idée a priori que l'on a sur le problème (on soupçonne les données). Toutefois cette justification a posteriori ne cache pas le choix concret de L_1 : facilité d'implantation dans les algorithmes de programmation linéaire par rapport à la norme L_2 par exemple.

Information contenue dans la solution

Ayant obtenu numériquement une solution de (6), il est nécessaire d'en présenter la qualité.

Niveau de confiance de la solution : en supposant que la loi de probabilité d_i est connue, Gaussienne par exemple, le nombre α_{opt} , défini par le système (6) est une variable aléatoire. Sa loi de probabilité est :

$$\text{Prob} \{ \alpha_{\text{opt}} \leq x \} = \int \dots \int dP(d_1, \dots, d_{\text{nobs}})$$

$$\min \sum_{i=1}^{\text{nobs}} |(Gm)_i - d_i| / \sigma_i < x \quad (7)$$

$$m_j^{\min} \leq m_j \leq m_j^{\max}$$

$dP(d_1, \dots, d_{\text{nobs}})$ étant la loi de distribution des observations, le calcul de la loi de probabilités de α_{opt} est pratiquement insoluble si $\text{nobs} > 3$ (Il faut utiliser des techniques de programmation paramétrique, voir G.B. Dantzig (1963), et Goddstein et Youdine (1973)). On peut toutefois essayer d'approximer la loi de α_{opt} à la loi de probabilité de r variables Gaussiennes centrée. Le nombre r représente les écarts $((Gm)_i - d_i)$ non nuls. Une telle loi dépend uniquement de r

$$\text{Prob} \{ \alpha_{\text{opt}} < \alpha \} \approx \int_0^{\alpha} \beta_r(t) dt. \quad (8)$$

et a été utilisé par Parker (1977).

Si maintenant on se fixe un niveau de confiance τ auquel on rejette le modèle obtenu, la vraie solution vérifie :

$$\alpha_{opt} \leq \sum_{i=1}^{nobs} |(Gm)_i| / \sigma_i \leq \alpha(\tau)$$

$$m_j^{min} \leq m_j \leq m_j^{max}$$

$$\text{où } \tau = \int_0^{\alpha(\tau)} \beta_t(t) dt$$

$\alpha(\tau)$, τ étant obtenue par des tables on peut déterminer des erreurs sur les estimations $\hat{m}_j$.

En effet, autour de l'optimum $\hat{m}$ est caractérisé par les dérivées partielles de α_{opt} relativement au paramètre m_j . Ces données (u_j) appelées coût marginaux dans les algorithmes de programmation linéaire s'expriment :

$$\begin{aligned} u_j &= \frac{\partial}{\partial m_j} \sum_{i=1}^{nobs} |(Gm)_i - d_i| / \sigma_i = 0 & \text{si } m_j^{min} < \hat{m}_j < m_j^{max} \\ u_j &= \frac{\partial}{\partial m_j} \sum_{i=1}^{nobs} |(Gm)_i - d_i| / \sigma_i > 0 & \text{si } \hat{m}_j = m_j^{min} \\ u_j &= \frac{\partial}{\partial m_j} \sum_{i=1}^{nobs} |(Gm)_i - d_i| / \sigma_i < 0 & \text{si } \hat{m}_j = m_j^{max} \end{aligned} \quad (9)$$

u_j vérifiant :

$$u_j = \sum_{(Gm)_i - d_i > 0} g_{ij} / \sigma_i - \sum_{(Gm)_i - d_i < 0} g_{ij} / \sigma_i$$

Connaissant les u_j , on détermine une erreur Δm_j

$$\Delta m_j = \min (m_j^{max} - m_j^{min}, \frac{\alpha(\tau) - \alpha_{opt}}{u_j}) \quad (10)$$

qui représente la résolution au niveau de confiance τ . Elle n'apporte information que si

$$\frac{\Delta \alpha}{u_j} < m_j^{max} - m_j^{min}.$$

Ainsi, après calcul, on possède les éléments suivants :

- i) des estimations, $\hat{m}_j$
- ii) les bornes a priori m_j^{min} , m_j^{max}
- iii) la contribution des $\hat{m}_j$ à l'ajustement des données (u_j)
- iii) une estimation de l'erreur sur m_j , Δm_j .

On remarquera que pour les estimations $m_j^{min} < \hat{m}_j < m_j^{max}$ on n'a aucun contrôle ($u_j = 0$) sur les $\hat{m}_j$.

Le tableau (II.3) présente les résultats obtenus lors de l'application de cette technique sur notre problème. Une estimation de l'erreur à 0.20 ou 0.240 nous amène à rejeter, dans un cas, le modèle avec un niveau de confiance voisin de 90 % et à accepter ce modèle, dans l'autre cas, avec un taux de confiance de 70 %.

On peut présenter cependant un moyen objectif de définir la résolution sur nos paramètres.

Dans notre exemple, il reste 43 mesures (sur 252) mal ajustées. Soit $\tilde{d}_1, \dots, \tilde{d}_{43}$ ces mesures, on devrait étudier le système :

$$\begin{aligned} \tilde{d}_i + \delta - \sigma_i &\leq (Gm)_i \leq \tilde{d}_i + \delta + \sigma_i & \text{pour les 43 indices} \\ \tilde{d}_i - \sigma_i &\leq (Gm)_i \leq \tilde{d}_i + \sigma_i & \text{pour les autres} \\ m_j^{min} &\leq m_j \leq m_j^{max} \end{aligned} \quad (11.)$$

Cette formulation revient à postuler une erreur systématique sur certaines stations, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus. (Figure (V-6) et Tableau (V.2) du Chapitre 5).

Ensuite on obtient une solution de base. On peut alors calculer des bornes sur les variations relatives de vitesse intégrées sur de grands volumes, telles que :

$$\frac{\Delta V}{V} (\Omega')^{\min} \text{ et } \frac{\Delta V}{V} (\Omega')^{\max} = \min \text{ et } \max \sum m_j$$

j tel que $\omega_j \in \Omega$.

La résolution objective définie par Cuet (Cuet - Grasso - Pascal, part I en cours) est alors proche de la notion utilisée en optique $\frac{\lambda}{\Delta \lambda}$,

$$R \left(\frac{\Delta V}{V} (\Omega') \right) = \frac{\max \left\{ \left| \frac{\Delta V}{V} (\Omega')^{\min} \right|, \left| \frac{\Delta V}{V} (\Omega')^{\max} \right| \right\}}{\frac{\Delta V}{V} (\Omega')^{\max} - \frac{\Delta V}{V} (\Omega')^{\min}} \quad (12)$$

Cette définition apporte quelque chose seulement si les bornes calculées sont de même signe. Sinon on a bien $R < 1$, mais ce manque d'information est dû au signe qui n'est pas considéré dans la formule (12).

Les techniques présentées dans cette section constituent une approche objective des problèmes inverses tant au niveau du contrôle de la solution que dans la façon de poser le problème.

CHAPITRE II

Figure II.1. - Effet schématique de deux méthodes de régularisation. (D'après Crosson, 1976).

Figure II.2. - Exemple de "résolution" obtenu par Bachus et Gilbert (1968).

a/ La longueur de résolution est caractérisée par la largeur des pics (barres horizontales) de $R(r_0, r)$.

Les résultats correspondent à une détermination du facteur de qualité (Q) à des profondeurs différentes. Une barre "large" est interprétée par les auteurs comme une moyenne de la solution autour d'une profondeur donnée. (On essaie d'obtenir une barre aussi étroite que possible).

b/ Idem que (a), mais pour des données différentes. Seul le résultat obtenu pour $r_0 = 0,8$ est acceptable. Les lignes verticales représentent la profondeur (r) à laquelle se situe la recherche de l'information. Les profondeurs sont sans dimension.

Figure II.3. - Recherche du compromis entre la résolution et l'erreur :

a/ Exemple théorique (d'après Aki et Richards, 1980).

b/ Cas réel (données Nouvelles Hébrides). On travail ici sur les paramètres des foyers.

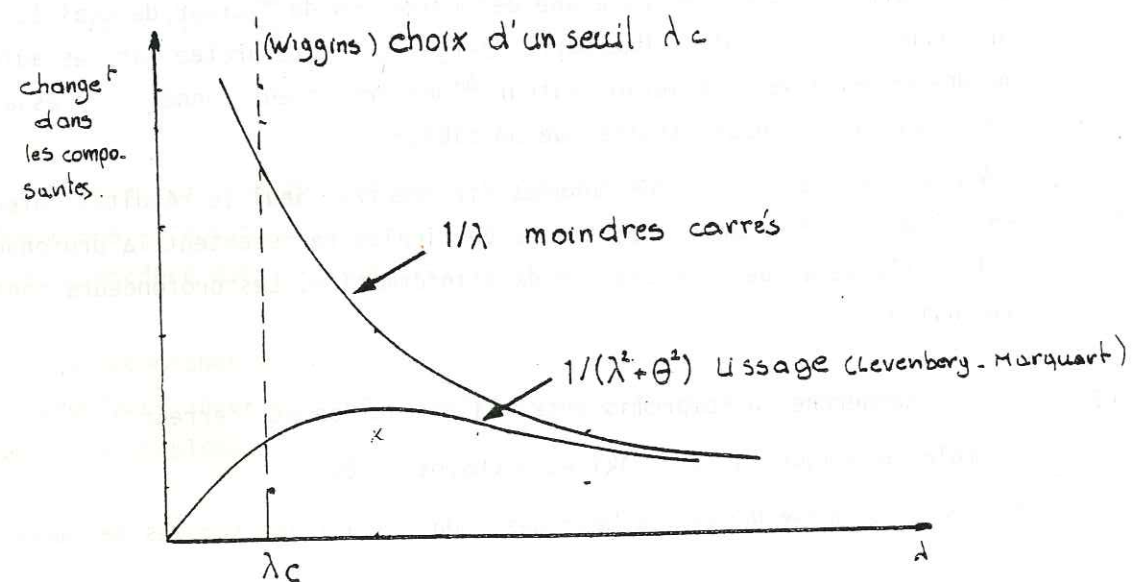
Figure II.4. - Choix d'un ajustement à des données.

L'effet de lissage de la norme L2 est ici bien clair. On doit remarquer qu'on obtient deux optimum car les outils de mesure sont différents.

Figure II.5. - Exemple de pics parasites dans notre application.

Tableau II.1. - Evolution entre la variance expliquée et le degré de liberté de la solution.

Tableau II.2. - Exemple d'un système 3 x 4 où l'on peut mieux "sentir" le rôle de θ : cas des moindres carrés atténués.



on a :
 variance de $\hat{m}$, $\text{var}(m_i) = [\lambda_c / (\lambda_i^2 + \theta^2)]^2$

si $\lambda_i^2 \gg \theta^2$ le coefficient est $\approx 1/\lambda_i$: cas des moindres carrés classiques

si $\lambda_i^2 = \theta^2$ le coefficient est $\approx 1/2\lambda_i$: si θ est bien choisi en fonction des λ_i que l'on veut éliminer,
 $\text{var}(m_i)_{LM} \approx \frac{1}{2} \text{var}(m_i)_{MC}$

si $\lambda_i^2 \ll \theta^2$ le coefficient est $\approx \lambda_i/\theta^2$: alors
 $\text{var}(m_i)_{LM} \ll \text{var}(m_i)_{MC}$ car $\lambda_i/\theta^2 \ll 1/\lambda_i$

Figure II.1.

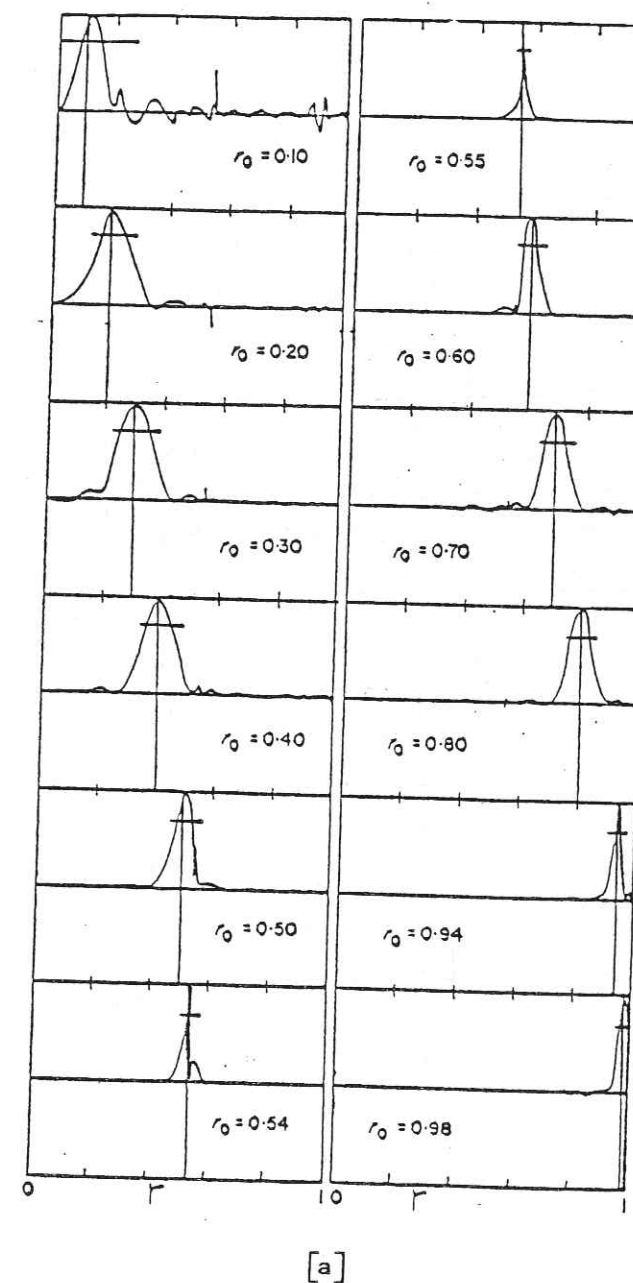
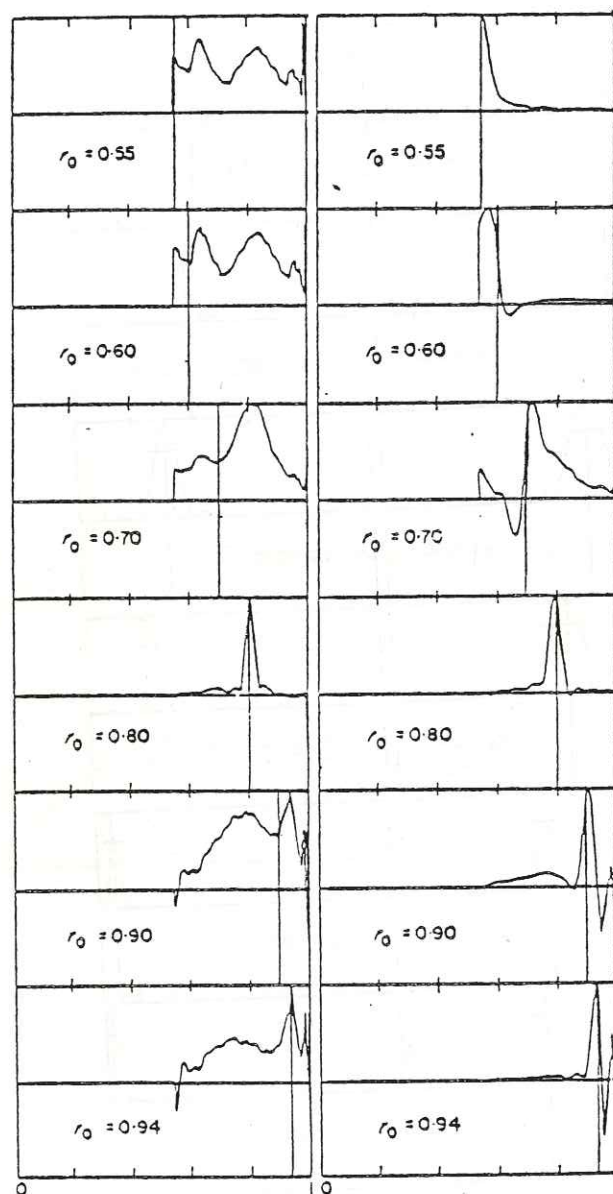
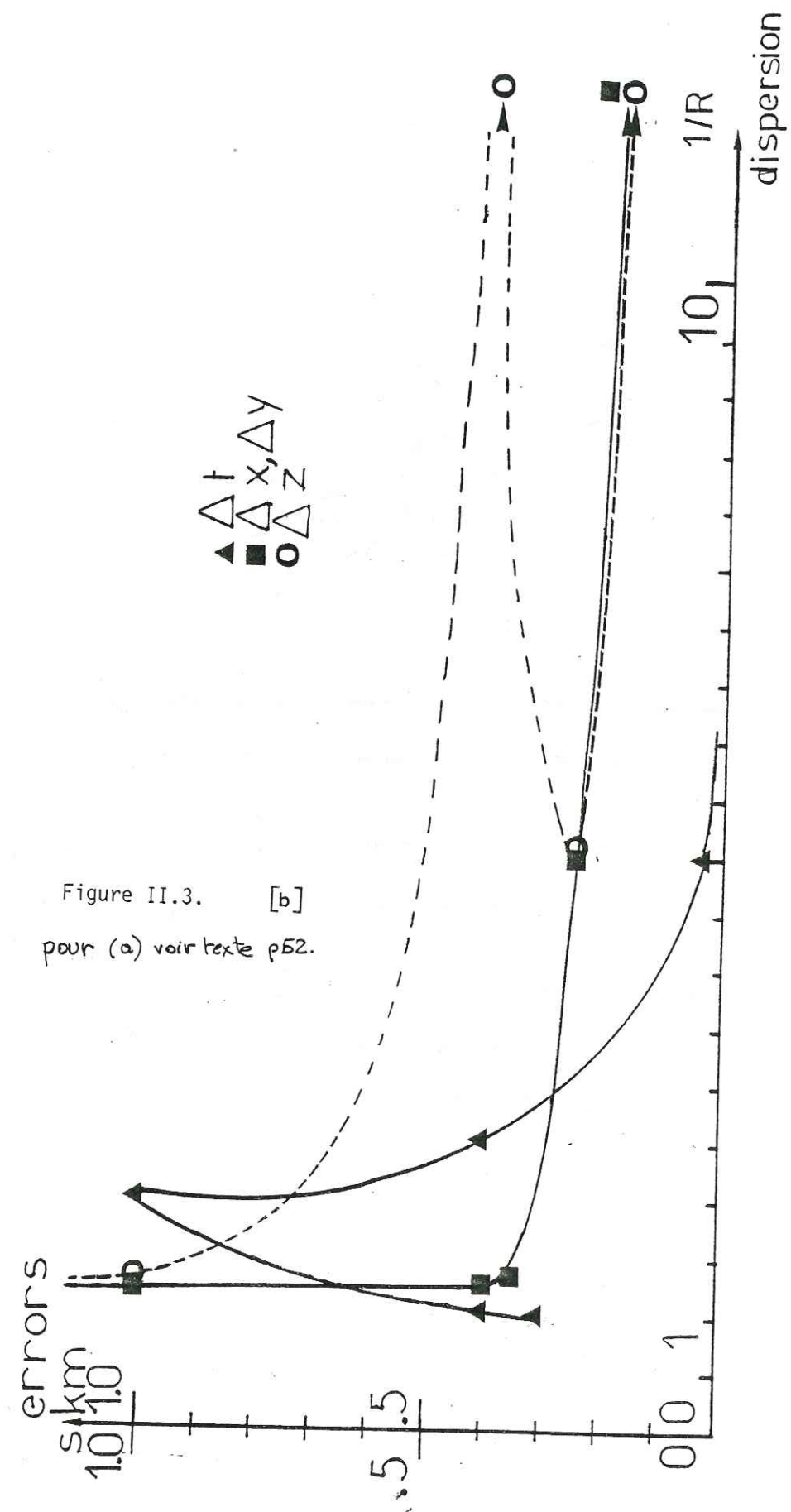
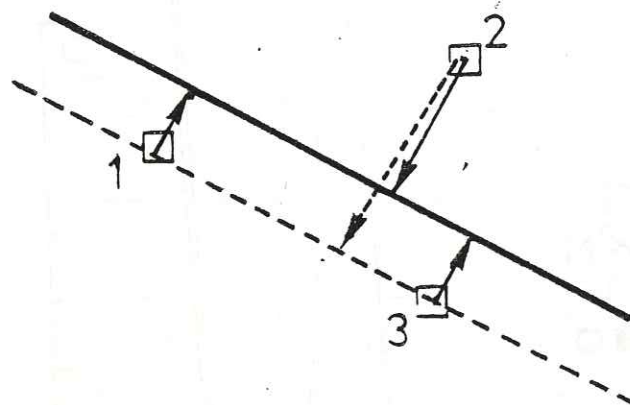


Figure II.2.



2 [b]





— on approche les données par moindres carrées

les écarts à l'optimum sont: $e_1 = e_3 = -0.1$
 $e_2 = 0.2$

on mesure l'optimum par: $\sum_{i=1}^3 (e_i)^2 = \beta$, quantité
 que l'on cherche à minimiser: Ici $\beta = 0.6 \cdot 10^{-1}$

----- on cherche à minimiser: $\sum_{i=1}^3 |e_i|$
 à l'optimum on obtient: $\alpha = 0.3$ ($\alpha_{mc} = 0.4$)

avec $e_1 = e_3 = 0$, $e_2 = 0.3$
 on a alors $\beta = 0.9 \cdot 10^{-1}$

Figure II.4.

ensemble blocs de la couche 5				seules les valeurs supérieures à 0.1 sont reportées sur ce tableau.
indice du bloc	valeur de la "résolution"	indices des blocs parasites	valeur de la résolution (pic parasite)	
511	0.84	345 565	0.13 0.10	
512	0.91			
516	0.02			
517	0.96			
518	0.92			
522	0.45	568	0.30	
523	0.98			
524	0.97			
528	0.69	391 583	0.13 0.19	
529	0.99			
530	0.84			
534	0.61	428 624	0.27 0.10	
535	0.97			
540	0.90			
541	0.99			
542	0.98			
546	0.93			
547	0.98			
548	0.97			
552	0.76	476 600	0.13 0.17	
553	0.95			
554	0.81			
exemples typiques "alarmants" (au sens de Backus et Gilbert)				
465	0.76	295 466	0.15 -0.10	couche 4
467	0.85	296 96	-0.10 0.10	
479	0.76	296 309	-0.15 0.11	
481	0.84	493 654	-0.10 0.16	
601	0.89			couche 6

Figure II.5.

Tableau II.2.

Soit à résoudre le système :

$$\begin{aligned} x &= 1 \\ y + z + t &= 2 \\ y - z + t &= -3 \end{aligned}$$

les matrices G , $G^T G + \theta^2 I$, et R correspondante sont :

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad G^T G + \theta^2 I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2+\theta & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2+\theta & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 2+\theta \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1/1+\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & .2\theta/4\theta+\theta^2 & 0 & .2\theta/4\theta+\theta^2 \\ 0 & 0 & .2/2+\theta & 0 \\ 0 & .2\theta/4\theta+\theta^2 & 0 & .2\theta/4\theta+\theta^2 \end{bmatrix}$$

on obtient les estimations :

$$\hat{x} = 1/1+\theta \quad ; \quad \hat{z} = -1/2+\theta \quad \hat{y} = \hat{t} = 50/4\theta+\theta^2$$

un choix de θ de 0.1, faible devant les coefficients de $G^T G$, nous permet de calculer :

$$\hat{x} = 0.999 \quad \hat{z} = -0.475 \quad \hat{y} = \hat{t} = 1.23$$

pour une "variance expliquée" des données supérieure à 99%, la résolution sur les différents paramètres étant

$$R_x = 0.99 \quad R_z = 0.95 \quad R_y = R_t = 0.49$$

la résolution sur x et z présente un seul pic bien centré sur $\hat{x}$ et $\hat{z}$ sans lobes parasites. Par contre pour $\hat{y}$ et $\hat{t}$, la résolution indique que la solution obtenue n'a aucune signification, on a effet :

$$y = 5/2 - t, \quad y \text{ et } t \text{ pouvant prendre n'importe quelle valeur entre } +\infty \text{ et } -\infty$$

CHAPITRE III

IMPLANTATION MACHINE DES DEUX METHODES UTILISEES

III.1. CONSTRUCTION DE LA MATRICE G

Le premier travail à effectuer est de poser le système à résoudre. Il s'agit dans notre application de construire la matrice G, liant les données aux paramètres à déterminer.

Le problème ayant été approché par un développement au premier ordre d'un problème non linéaire (voir chapitre I.3), on calcule les éléments de la matrice G comme les dérivées partielles du temps par rapport à chacun des paramètres :

- pour les paramètres des épicentres :

$$\frac{\delta t_o^{cal}}{\delta x_i} = \frac{\delta t_o}{\delta \Delta} \cdot \frac{\delta \Delta}{\delta x_i} \quad (III.1) \quad \Delta : \text{distance séisme station}$$

- pour la profondeur des foyers :

$$\frac{\delta t_o^{cal}}{\delta z} \text{ est calculé numériquement (III.2)}$$

- et l'heure origine est telle que :

$$\frac{\delta t_o^{cal}}{\delta t^h} = 1 \quad (III.3)$$

Pour chaque bloc (k), le coefficient de la matrice G est :

$$ij = g_{ijk} = t_k \quad (III.4)$$

t_k étant le temps passé dans le bloc k par le rai joignant la station i au séisme j.

Il est alors nécessaire de calculer le temps de parcours minimum pour un trajet séisme-station. Le modèle de départ étant un milieu à stratification plane (dans la méthode présentée initialement par Aki et Lee (1976), une structure homogène ($V_p = \text{cst}$) constituait le modèle initial), un tracé de rai utilisant le "tir" permet de déterminer ce temps de parcours.

Tracé de rai

Une telle méthode de tir consiste à modifier l'angle de départ du rai sous la station pour obtenir un rai joignant le séisme avec une précision donnée. On modifie alors le paramètre du rai pour satisfaire ce test. Une telle technique est très compacte dans le cas de notre problème bidimensionnel. (On converge en une dizaine d'itérations avec une précision de 200 m sur l'arrivée du "tir" au séisme). Cette technique devient beaucoup moins efficace lors de son utilisation en milieu hétérogène tridimensionnel. On utilise alors des méthodes dites de "courbure" du rai (bending, en anglais).

On choisit un rai initial joignant le séisme à la station (la ligne droite souvent), et on le perturbe pour obtenir un temps minimum (ici aussi des problèmes d'unicité peuvent se poser : problème de lentille). Différents algorithmes recherchant une précision et une rigueur sans cesse croissante (Julian et Gubbins, 1977 ; Peyreyra et al. 1979) aboutissent à des solutions élégantes résolvant bien le problème au prix d'un temps de calcul et d'un stockage mémoire énorme ce qui exclut tout emploi systématique dans le processus d'inversion. Une application a tout de même été présentée récemment par Spencer et Gubbins (1980) où la vitesse est cherchée sous forme analytique. Les résultats obtenus montrent des difficultés au niveau de la convergence des déplacements des foyers. Récemment, Thurber et Ellsworth (1980) reviennent à un calcul simplifié où le compromis entre la précision du calcul et la facilité d'implantation semble acquis. Une utilisation de cette technique dans les processus d'inversion est en cours (Aki - communication personnelle - 1981).

Caractéristique de la matrice G

Une fois le temps de parcours minimum déterminé, on différencie les cas, rai partant vers le haut ou rai réfracté par les couches inférieures. On utilise le temps minimum correspondant au rai partant vers le haut (voir chapitre IV.2). Le paramètre du rai correspondant est alors connu et l'on peut calculer les dérivées partielles (équation III.1, 2, 3, 4) avec) :

$$p = \frac{\delta t^{cal}}{\delta \Delta}$$

p : paramètre du rai

t^{cal} : temps de parcours

Δ : distance épacentrale

On obtient :

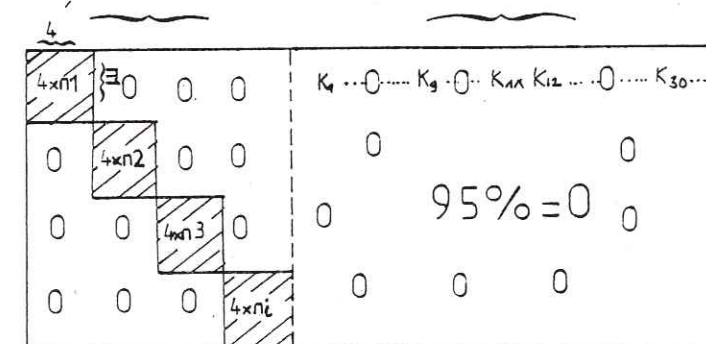
$$\frac{\delta t^{cal}}{\delta z} = \frac{t^{cal}(z + \Delta z) - t^{cal}(z)}{\Delta z} \quad (III.5)$$

en utilisant la subroutine décrite pour le tracé de rai.

Pour chaque observation, une ligne de la matrice G est construite. Elle est constituée de quatre coefficients non nuls sur les $4 \times ns$ coefficients correspondant aux paramètres des ns séismes, et de k coefficients correspondant au nombre de blocs traversés par le rai joignant le séisme à la station considérée.

Pour un modèle à sept couches, par exemple, le nombre k est au maximum de l'ordre de 15 (si les séismes ne sont pas superficiels, plus souvent inférieur à 10, alors que le modèle est caractérisé par environ 200 blocs traversés par des rais). Dans une application "normale" où l'on utilise une cinquantaine de séismes et 200 blocs testés, chaque ligne de la matrice G comporte au minimum 95 % de zéro.

$4 \times ns$ coefficients liés aux séismes k coefficients liés aux blocs de vitesse



n_1 : nombre d'observations pour un séisme donné (1)

ns : nombre de séismes

Le traitement de cette matrice creuse n'est pas ici optimisée.

III.2. IMPLANTATION DE LA TECHNIQUE DE FRANKLIN

On a vu (chapitre II.2) que le traitement par moindres carrés (pondéré ou non) utilise le produit $G^t G$ ou $G G^t$. Il est intéressant du point de vue stockage machine de construire directement le produit de ces deux matrices. On notera toutefois que l'on perd

une partie de l'information contenue dans G (le rapport $p = \lambda_{\min}/\lambda_{\max}$ étant plus grand pour G que $G^T G$). Pour un système surdéterminé type téléseismique, on passe d'une taille mémoire de (3000 x 200) à (200 x 200) mots. $G^T G$ étant de plus symétrique, on réduit d'un facteur 2 la dimension de la matrice stockée. L'estimation obtenue par Franklin s'écrit :

$$\hat{m} = C_{mm} \cdot G^T (G \cdot C_{mm} \cdot G^T + C_{nn})^{-1} d \quad (\text{III.6})$$

Si C_{nn} et C_{mm} sont supposées diagonales (voir les hypothèses nécessaires au chapitre II.5) telles que :

$$C_{nn} = \sigma_n^2 \cdot I_n$$

$$C_{mm} = \sigma_m^2 \cdot I_m$$

avec $\sigma_n^2 = \text{cste}$

$$\sigma_m^2 = \text{cste}$$

alors on résout

$$\hat{m} = G^T \left(G G^T + \frac{\sigma_n^2}{\sigma_m^2} I \right)^{-1} d \quad (\text{III.7})$$

C'est le cas où les inconnues sont constituées par la même grandeur physique. La variance de chaque paramètre est alors identique (dans le cas de blocs de dimensions différentes cela peut poser quelques problèmes (Wiggins 1972 pour le cas de couches d'épaisseurs différentes)).

Numériquement, on pose le système

$$(G \cdot G^T + \theta^2 \cdot I) \hat{m} = G^T \cdot d \rightarrow B \hat{m} = t$$

$$\theta^2 = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_m^2}$$

que l'on résout en utilisant la décomposition de Cholesky :

- Une première subroutine Fortran décompose la matrice B en un produit de matrice tel que :

$$B = L \cdot L^T \quad (\text{III.8})$$

- Une deuxième subroutine résout :

$$L \cdot L^T \hat{m} = t \quad (\text{III.9})$$

en deux étapes

$$L y = t \rightarrow y$$

puis $L^T \hat{m} = y \rightarrow \hat{m}$

Une telle décomposition, rapide et très compacte, est précise.

Pour chaque paramètre on calcule la ligne correspondante de la matrice "R" pour obtenir le gain en variance.

$$R = (G^T G + \theta^2 I)^{-1} G \cdot G^T \quad (\text{III.10})$$

que l'on résout en utilisant la deuxième subroutine précédemment citée, la matrice B étant ici la même que précédemment.

$$B \cdot R = B^T \quad (\text{III.11})$$

On remarquera que pour obtenir le vecteur solution $\hat{m}$, on appelle une seule fois la subroutine 2. Alors que, pour obtenir le gain en variance sur chaque paramètre, on résout m fois le système (III.11) ! D'où la lourdeur du calcul.

Le calcul de la covariance (erreur estimée sur les paramètres) se fait alors sous la forme :

$$\begin{aligned} C(\hat{m}) &= E(\hat{m}, \hat{m}^T) = \sigma_\epsilon^2 (G^T G + \theta I)^{-1} R \\ &= \sigma_\epsilon^2 B^{-1} \cdot R \end{aligned}$$

pour chaque paramètre la ligne de R est connue, et l'on obtient :

$$\sigma(\hat{m}) = C_{ii}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{III.13})$$

Dans le cas d'un problème sous-déterminé, le calcul rigoureux de σ_ϵ est impossible (nombre de degré de liberté négatif (voir chapitre I)).

III.3. IMPLANTATIONS DES TECHNIQUES DE PROGRAMMATION LINEAIRES

Les algorithmes que nous avons utilisés font partie d'un ensemble de routines écrites en Fortran ANSI par M. Cuer. Ces routines ont précédemment été utilisées en gravimétrie et magnétisme avant leur présente application à des données sismologiques. Elles nécessitent la connaissance :

- d'une matrice A de dimension $n \times m$
- d'un vecteur b de dimension n lié au donné
- d'un vecteur $x^{\max}$ de dimension m lié au paramètre.

Différents problèmes peuvent être traités avec le système

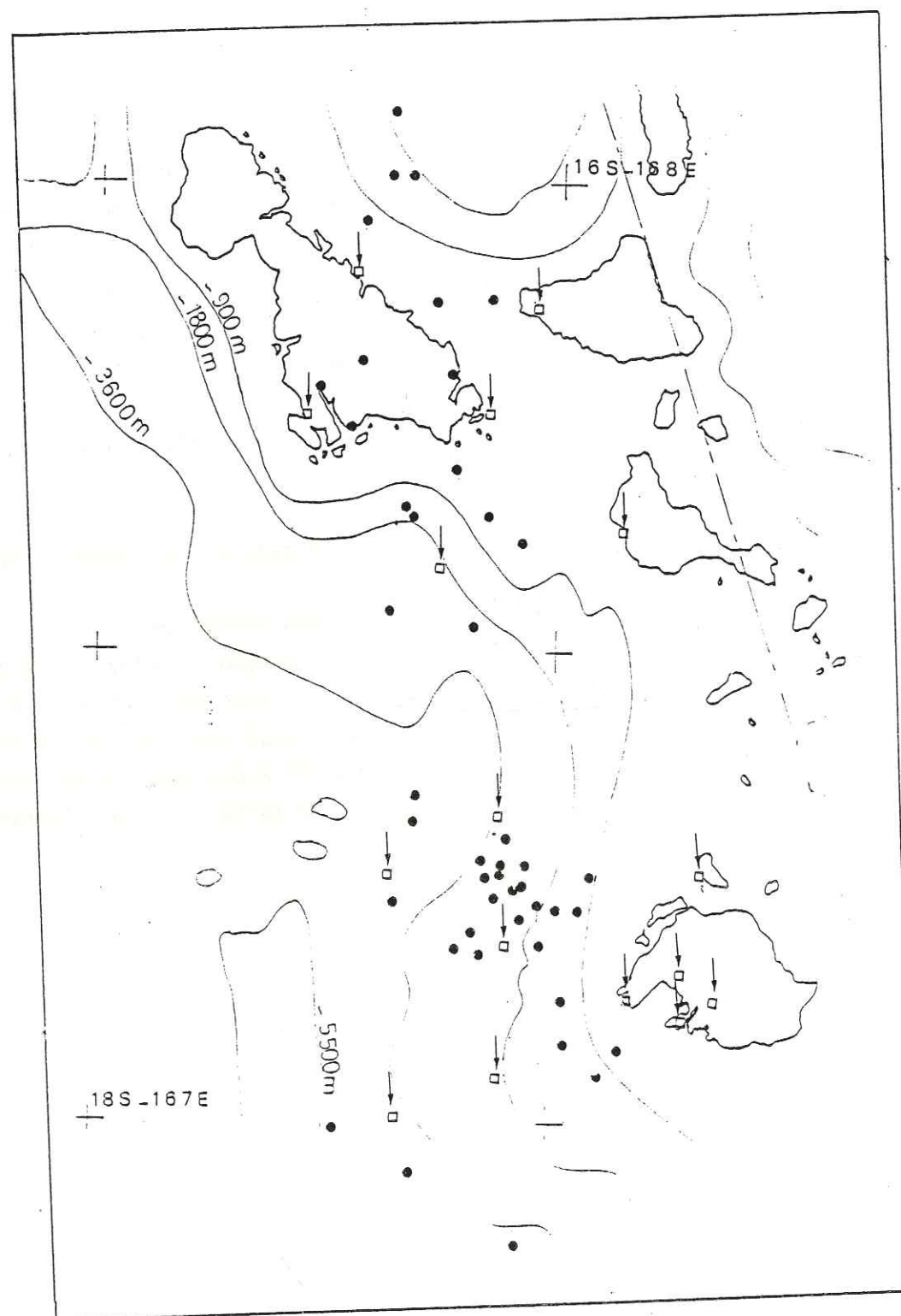
$$Ax = b \quad (\text{III.14})$$

auquel diverses contraintes linéaires de positivité sur x sont adjointes.

Dans un premier temps, ces programmes d'un emploi très souple, particulièrement adapté aux systèmes conversationnels, transforment les données pour mettre un traitement standard de la forme (III.14). Les différents problèmes que l'on peut traiter par la suite sont présentés dans Cuer et Bayer (1980). Pour une description détaillée de ces techniques, on se reportera à "A Package of routine for linear inverse problem : User and Technical Manual" (Cuer et Bayer, 1980 b).

CHAPITRE 4

DONNEES UTILISEES



IV.1. IMPLANTATION DU RESEAU

En collaboration avec les universités de Carnell et de Texas (U.S.A.), l'Office de la recherche scientifique et technique d'outre mer (ORSTOM) a implanté un réseau terrestre télémétré ayant pour objet de détecter les caractéristiques de la distribution spatiale et temporelle des phénomènes qui peuvent être reliés à la génération de gros séismes superficiels.

Dix stations terrestres sur les quinze prévues dans le réseau complet sont opérationnelles depuis le début septembre 1978. Pour étalonner ce réseau de sismographes, sept stations OBS (sismographes placés au fond de l'océan) lui ont été adjointes à la mi-septembre 78, dans une zone située à l'est de l'île d'Efate et au sud de l'île de Malekula. Ce réseau combiné de stations terrestres et marines (Fig.IV 1) et table (IV.1) fournit un puissant contrôle sur les localisations des foyers sismiques situés entre la fosse et l'arc volcanique. Plus de 250 séismes sont enregistrés, 150 étant situés dans le réseau.

IV.2. MATERIEL UTILISE

Les ondes P et S générées par des séismes locaux de faible magnitude ont des fréquences comprises entre 3 et 10 Hz pour la plupart. Des sismomètres de fréquence propre de 4.5 Hz ont aussi été choisis, pour diminuer l'effet du bruit dû aux vagues, un tel bruit prédominant à des fréquences inférieures à 2 Hz.

Les dix stations terrestres ont toutes une composante verticale et deux d'entre elles (SWB sur l'île de Malekula, et PVC sur l'île d'Efate) sont équipées de sismomètres horizontaux, permettant une bonne lecture des ondes S. Les signaux des douze composantes terrestres sont télémétrés à la station permanente de l'ORSTOM à Port Vila (PVC). Ils sont alors triés sur un système d'enregistrement à seuil analogique (mis au point par l'Université de Texas, Galveston). Ce système inclut :

- i) une unité de seuil analogique,
- ii) un détecteur de coïncidences (3 stations doivent déclencher dans une fenêtre de temps donné,

iii) une unité d'enregistrement analogique - digital - analogique (le signal reçu en analogique est stocké temporairement sous forme digitale, puis rejoué sous forme analogique si au moins trois composantes ont déclenché).

La sortie analogique démodulée est enregistrée sur un oscillographe à la vitesse de 1 cm/s. Les douze composantes sont sorties sur la même feuille de papier avec une base de temps commune. Il en résulte des enregistrements clairs, à grande résolution et de dépouillement aisé. La Figure (IV.2) montre en échelle réelle le type de données recueillies. Les ondes P et S peuvent être lues au 1/10 de seconde et estimées au 1/100 sur de tels enregistrements. Le temps est enregistré à partir de la sortie IRIG d'une horloge Sprengnether TS-250.

Les stations OBS sont du type "pop-up" et équipées de géophones verticaux (fréquence propre 4.5 Hz) du même type que ceux utilisés par le réseau terrestre. Les signaux sont stockés sur un système à seuil d'une capacité maximale de 700 événements (maxima atteint en 16 jours pour quatre stations, les trois autres ayant pour diverses raisons techniques enregistré respectivement pendant une semaine, trois jours et deux jours).

IV.3. ANALYSE DES DONNEES ET TRAITEMENT

Approximativement 150 séismes locaux furent enregistrés dans une région s'étendant de 16°S à 18°S et 167°E à 169°E. Un ensemble de cent séismes a été sélectionné par l'équipe ORSTOM de Nouméa (qui procéda au dépouillement des enregistrements) pour une détermination des foyers et heures origine.

Un premier passage sur ordinateur en utilisant la méthode Geiger (moindres carrés pondérés - programme HYP0 75 - Lee et Lahr) nous permet de construire les déterminations initiales. Le modèle initial (couches à vitesse constante) est choisi tel que le nombre de couches utilisées et les vitesses dans ces couches correspondent à la structure de la croûte dérivée d'une campagne de sismique réfraction au sud d'Efaté.

IV.3.1. Modèle de vitesse

Le profil de réfraction (Pontoise et al. 1979) est un assemblage de tirs effectués entre 18° et 20° de latitude Sud (Figure IV.3). Pour construire le modèle de vitesse, nous avons seulement retenu les données les plus au Nord, les plus proches de notre zone d'étude. Le modèle (Figure IV.4), est aussi utilisé dans les procédures d'inversion. L'utilisation d'un tel modèle initial est déterminante pour aborder d'une manière réaliste les processus d'inversion présentés dans les sections (II.4,5,6). En effet, il nous permet de respecter les conditions nécessaires à la résolution de systèmes linéarisés : perturbation par rapport à un modèle initial réaliste.

Le modèle initial génère un ensemble de données,

$$d_{ij} = t_{ij}^{obs} - t_{ij}^{cal}$$

différent de la mesure "physique réelle" (telle qu'on l'obtient en gravimétrie ou magnétisme par exemple).

Pour chaque séisme, les d_{ij} en différentes stations sont obtenus par détermination classique des foyers et heures origine à l'aide des moindres carrés.

Après différents essais de déterminations initiales, 55 séismes ont été retenus pour l'inversion (table IV.2) selon les critères suivants :

- stabilité des paramètres du foyer pour différentes profondeurs de départ, ces paramètres étant obtenus par la méthode de Geiger.
- au moins 10 phases lues (après un tri sur les résidus trop forts).
- événements situés dans le réseau.

La Figure (IV.5) montre les histogrammes par station des résidus de temps de parcours obtenus après localisation

$$d_{ij} = r_{ij} = t_{ij}^{obs} - t_{ij}^{cal}$$

Ces histogrammes mettent en évidence des résidus importants devant l'erreur de lecture (0,1 s).

L'étude de ces résidus par les méthodes directes classiques ne révèlent aucun phénomène facilement compréhensible. Sur un exemple, on montre pour quelques stations le type de résultats obtenus : recherche de corrélation des résidus en fonction de la profondeur des séismes, ou des résidus en fonction de l'azimut des rais (Figure IV-6). Il est alors logique de chercher à expliquer ces anomalies de temps de parcours par des variations aux premiers ordres sur les paramètres des foyers sismiques et sur le modèle de vitesse.

Dans un premier temps, pour tester les programmes utilisés, nous avons utilisé un nombre limité de données. On a ainsi obtenu par des calculs indépendants, des résultats sur les zones nord et sud. Pour lever l'ambiguïté due à cette séparation artificielle en deux zones, on a inversé simultanément toutes les données disponibles. Cette inversion globale montre qu'une information nouvelle pouvait être extraite. Les résultats numériques et l'interprétation sont basés sur les deux aspects du calcul.

IV.3.2. Discretisation

Dans tout problème linéarisé, des hypothèses sont faites pour permettre l'écriture de telles équations. Elles sont souvent assez simples à formuler, mais leur validité est beaucoup plus difficile à tester. Lorsque l'on cherche de petites perturbations autour d'un modèle (hypothèses) initial, ce choix initial limite l'étude aux approches du modèle initial. On doit toujours le garder à l'esprit au moment de l'interprétation des résultats numériques.

Pour décrire en trois dimensions la zone étudiée, il paraît naturel de choisir des blocs comme unité de discrétisation. Il se pose alors le problème de déterminer à partir d'intégrales curvilignes (rastraversant le bloc considéré), une valeur moyenne dans un volume. Bien qu'aucune rigueur mathématique ne suggère une justification à une telle transformation, l'utilisation de la théorie de la propagation d'ondes peut nous apporter quelques éléments

$$\langle G_i, m \rangle = \sum_{j=1}^{4ns} g_{ij} \frac{F}{m_j} - \iiint_{\text{rai } ti} g_i(\vec{r}) m^V(\vec{r}) d_3r$$

en considérant $g_i(\vec{r})$ comme la moyenne du temps de parcours dans un tube (d'extension latérale de l'ordre de la longueur d'onde) suivant le rai.

Un choix objectif de la taille des blocs serait alors l'ordre de grandeur de la longueur d'onde (inférieure à 10 km dans la plupart des applications, et pouvant atteindre l'ordre du kilomètre pour des séismes locaux). Dans la pratique, aucun critère rigoureux (au sens des mathématiciens) n'existe pour le choix de la discrétisation. Il reste alors les connaissances géophysiques de la zone étudiée (géologique, magnétique, gravimétrique ...).

Cherchant un compromis entre un grand nombre d'inconnues (bloc), ce qui laisse plus de liberté à (aux) la solution(s), et la qualité de l'information contenue dans l'unité de volume - nombre de rais testant le bloc, la discrétisation géométrique a été construite comme suit :

i) Dans la couche plus superficielle, on a adopté un modèle, bloc-station, guidé par l'échelle des hétérogénéités des différents paramètres influant sur la propagation des ondes à ces profondeurs. La valeur numérique déterminée dans ces blocs sera présentée en "terme de station". (Crosson 1976a), à rapprocher de l'anomalie de station telle qu'elle est définie par ceux qui travaillent sur les anomalies de temps de propagation. Ce terme de station regroupe les effets ponctuels de la structure sous la station et les éventuels biais dus à l'instrumentation.

ii) Le découpage en profondeur respecte le modèle initial dérivé du profil de réfraction. Après différents essais, la discrétisation de la figure (IV.7) a été choisie, plusieurs couches ont été considérées, certaines sont divisées en sous-couches de même vitesse pour localiser plus précisément les anomalies de vitesse observées à ces profondeurs. On remarquera que la quatrième couche est divisée en blocs, relativement petits, afin d'obtenir des "résultats acceptables" avec l'inverse stochastique.

iii) La taille des blocs reflète elle aussi l'information lissée (ou douce) que l'on cherche traditionnellement à obtenir dans ce type de problèmes (A.C.H. 1976, Aki, Lee 1976 et les différentes applications qui suivirent).

Dans le cas de l'approche en programmation linéaire, on cherche au contraire à obtenir des solutions extrêmes (par exemple des bornes sur les différents paramètres). Une discrétisation plus fine permettrait (le problème étant alors fortement sous-déterminé) d'obtenir une solution admissible - tous les écarts aux données inférieurs à l'erreur de lecture-. Il est alors possible de décrire plusieurs solutions particulières,

ce qui est l'étape suivante du travail présenté ici. Dans cette étude, nous cherchons plutôt à tester la validité des résultats obtenus par les deux approches sur une discrétisation commune. La Figure (IV. 7) visualise le modèle M22 utilisé. Le caractère arbitraire de la discrétisation (on limite le nombre de paramètres à déterminer) amène à traiter le même problème (données identiques), soit comme un système à solution unique jamais atteinte (inconsistante entre les données d'un système surdéterminé), soit comme un problème sous-déterminé où il existe une infinité de solutions.

Le géophysicien utilisant de telles méthodes doit être conscient que dans le cas de la détermination de la structure en vitesse à partir des observations des temps d'arrivée, le problème brut est fondamentalement sous-déterminé et la solution non unique. Il est alors nécessaire de caractériser explicitement les contraintes utilisées pour obtenir une solution, afin de la particulariser.

Pour pallier cette information a priori sur la géométrie des perturbations de vitesse recherchée, les différentes applications présentées avec des méthodes statistiques pour "contrôler" la solution montre^{nt}, dans le cas de rais téléseismiques, une bonne stabilité de la solution à des mouvements latéraux de blocs. Dans notre cas, on a des exemples où, malgré un découpage plus fin dans une couche, les anomalies relatives se conservent par rapport à l'ancien dédoublage (annexe)

Ces vérifications "expérimentales" ne suffisent pas à lever l'ambiguïté théorique présente dans une telle discrétisation.

Remarques

1. L'arbitraire de la discrétisation n'est pas en lui-même une faiblesse de la technique utilisée. Les difficultés proviennent de l'utilisation de sources naturelles. Celles-ci ne sont pas distribuées d'une manière aléatoire. La répartition en essaim (due à des failles par exemple) des foyers sismiques conduit à l'utilisation de rais ayant des directions privilégiées. Les différents éléments de discrétisation sont alors traversés par ces rais de manière très inégale.

A l'opposé, un exemple concret de "bonne" répartition de rais est constitué par la tomographie. Dans ce cas, la source de rayonnement est déplacée autour du corps

(humain) afin de "tester" d'une manière optimale l'élément que l'on désire étudier. Des techniques d'inversion sont alors utilisées pour mettre en évidence des structures anormales (tumeur cancéreuse, par exemple). Là non plus la solution n'est pas unique, mais la qualité et le nombre des données utilisées garantissent les résultats à de rares exceptions près.

2. Le trajet des rais correspondant à des ondes "coniques" (Figure IV 8) pose différents problèmes du point de vue de l'inversion :

i) Si la discontinuité n'est pas une "connaissance sûre du milieu", l'utilisation de tels rais donne un poids trop fort à cette information.

ii) Ces discontinuités réelles (lorsqu'elles existent), diffèrent souvent d'une interface plan et leur implantation dans la structure nécessite un algorithme de tracé de rais volumineux.

iii) Dans le cas où une discontinuité est "bien connue", un nombre important de rais "coniques" peut perturber la solution dans le bloc situé juste en dessous de la discontinuité, spécialement si peu de rais traversent ce bloc (Figure IV.8b)

Pour ces raisons, nous présentons ici des résultats utilisant seulement des rais portant vers le haut.

Les modèles de vitesse présentés sur la Figure (IV 4) montrent un pendage de 5° pour les couches superficielles. Les stations marines étant elles-mêmes situées sur ce plan incliné, aucune correction de station n'a été incluse dans le calcul. Les localisations relatives des hypocentres sont alors recalés par rapport à ce plan incliné pour obtenir des positions absolues. D'autre part, la Figure (IV 9) ne montre aucune corrélation entre les résidus moyens aux stations et l'altitude.

CHAPITRE IV

Figure IV.1. - Emplacement des stations utilisées dans cette étude. Les fonds marins sont ici exprimés en brasses (1 brasse = 1,83 mètre).

- stations "Fonds de mer" (campagne 1978)
- ▲ stations permanentes ORSTOM à multicomposantes
- stations du réseau téléométré.

Figure IV.2. Exemple du type d'enregistrement fourni par le réseau téléométré. Ici enregistrement d'un séisme proche de la baie de Sud-Ouest (île de Malekula).

Figure IV.3. - Campagne de sismique refraction effectuée au Sud de notre zone d'étude. Le modèle de vitesse que nous utilisons est dérivé des résultats obtenus avec les tirs Nord : 5, 8, 10, 11, 7 et I, II, IV, V (d'après I. Brahim et al, 1980).

Figure IV.4. - Modèle de réfractions (I. Brahim et al, 1980).

A droite on représente le modèle tabulaire utilisé.

La racine sous l'arc ($V_p \approx 6,6$ km/s) n'est mise en évidence que par les profils plus au sud.

La racine sous l'arc ($V_p \approx 6,6$ km/s) n'est mise en évidence que par les profils situés plus au sud. C'est pourquoi elle est reportée à titre indicatif en pointillé.

Figure IV.5. - Histogrammes des résidus utilisés dans l'inversion pour chaque station. L'indice des stations est le suivant :

n° 1	obs	5	n° 7	swb	n° 13	obs	1
n° 2	obs	4	n° 8	nga	n° 14	obs	3
n° 3	amb		n° 9	mbv	n° 15	obs	6
n° 4	epi		n° 10	rtv	n° 16	obs	7
n° 5	smt		n° 11	DVP	n° 17	obs	8
n° 6	Lmp		n° 12	pvc			

Figure IV.6. -

Figure IV.7. - Visualisation de la géométrie de la discrétisation utilisée.

Figure IV.8. - Le problème lié aux ondes "coniques".

a/ Trajet d'un rai correspondant à une onde "conique".

b/ Echantillonnage d'un bloc par différentes ondes coniques. L'anomalie de vitesse évoluée comme une valeur moyenne dans un bloc donné, correspond dans ce cas au volume v .

Figure IV.9. - Correspondance entre résidu moyen et altitude des stations utilisées.

Table IV.1. - Coordonnées station.

Table IV.2. - Coordonnées sêismes.

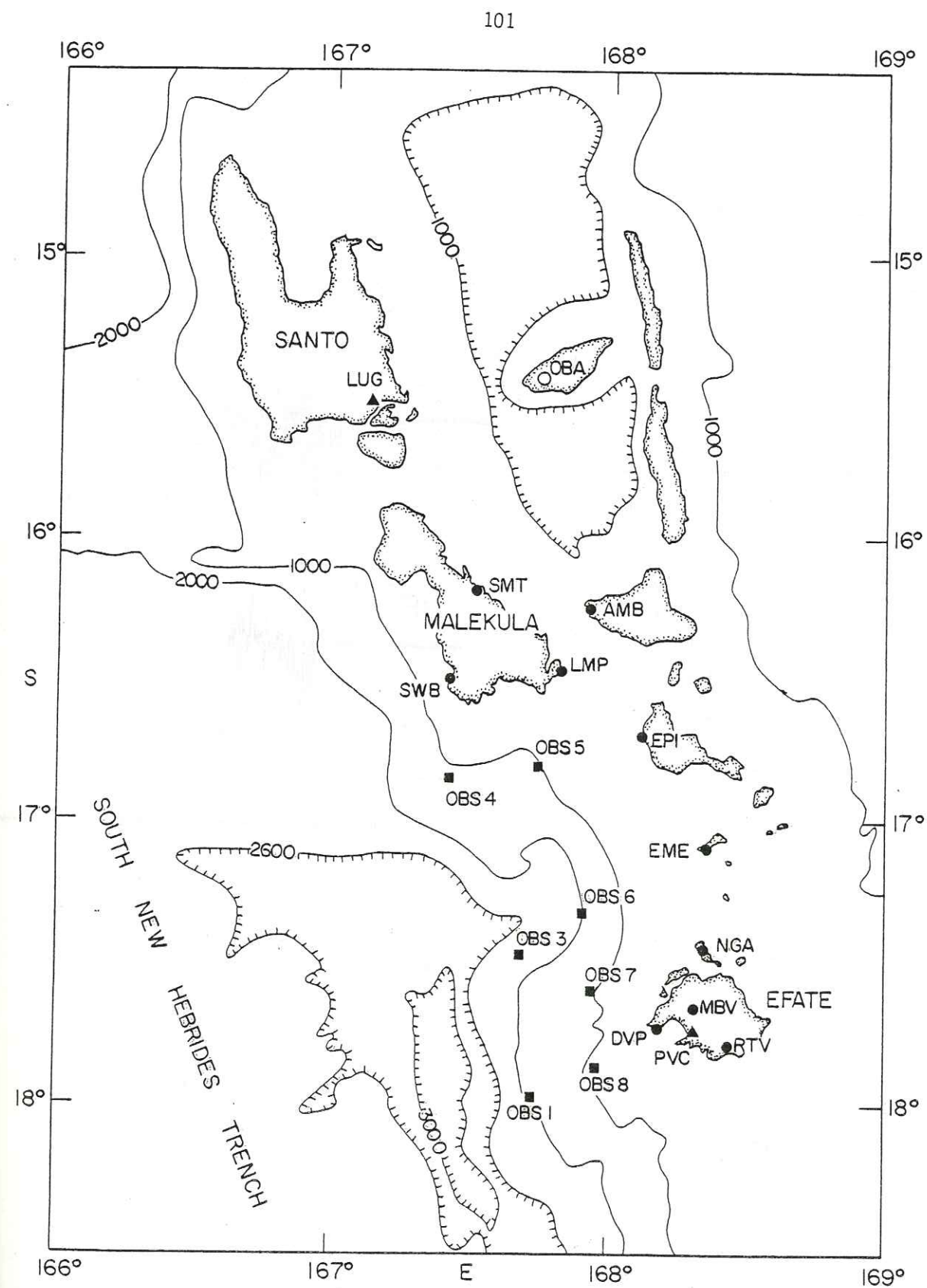
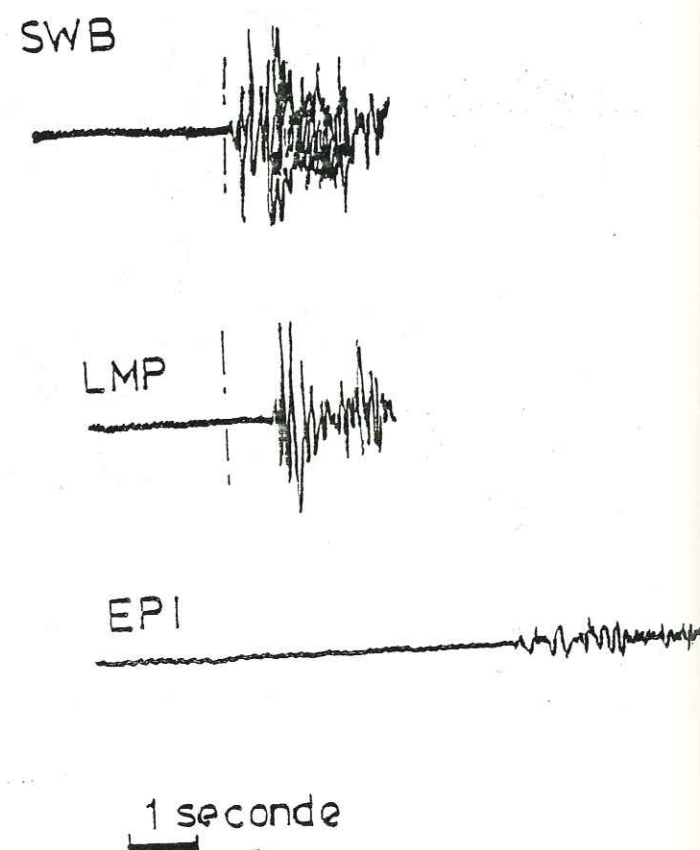


Figure IV.1.



exemple du type d'enregistrement fourni par le réseau
télémétré : ici enregistrement d'une secousse proche de la
baie du sud-ouest (île de Mahé).

Figure IV.2.

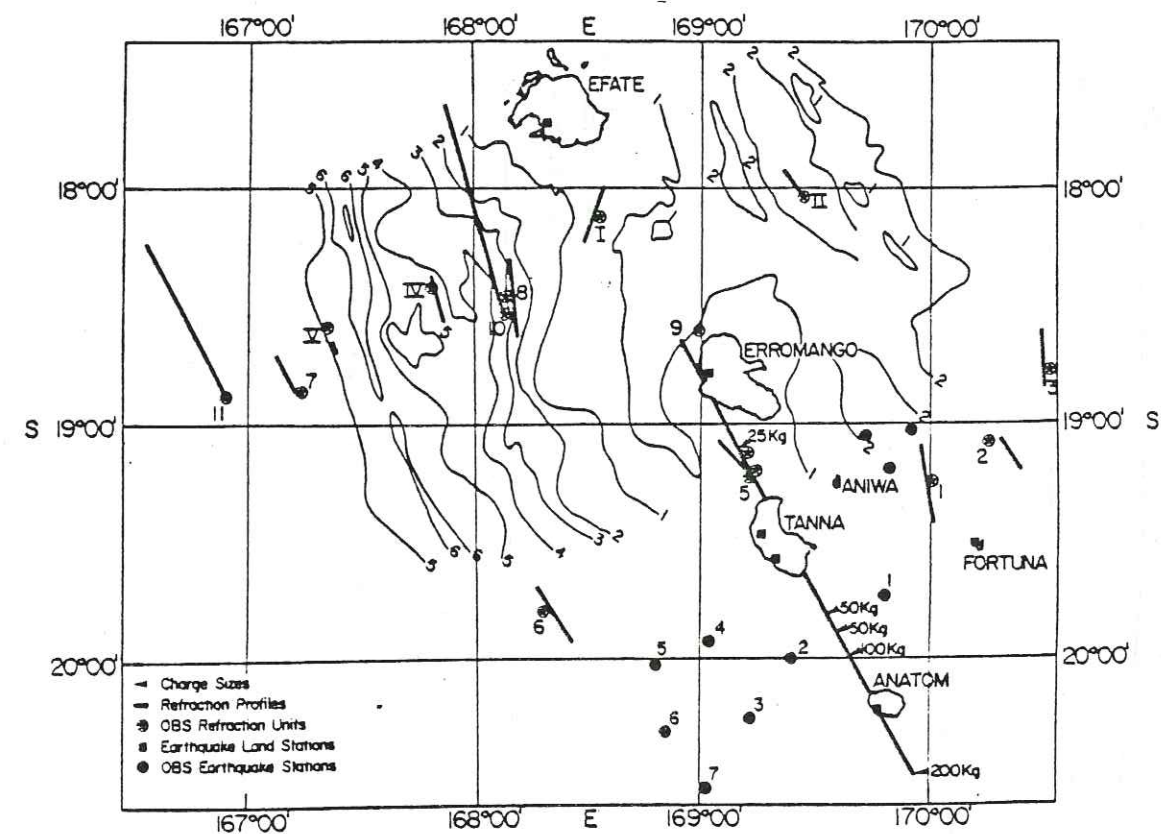


Figure IV.3.

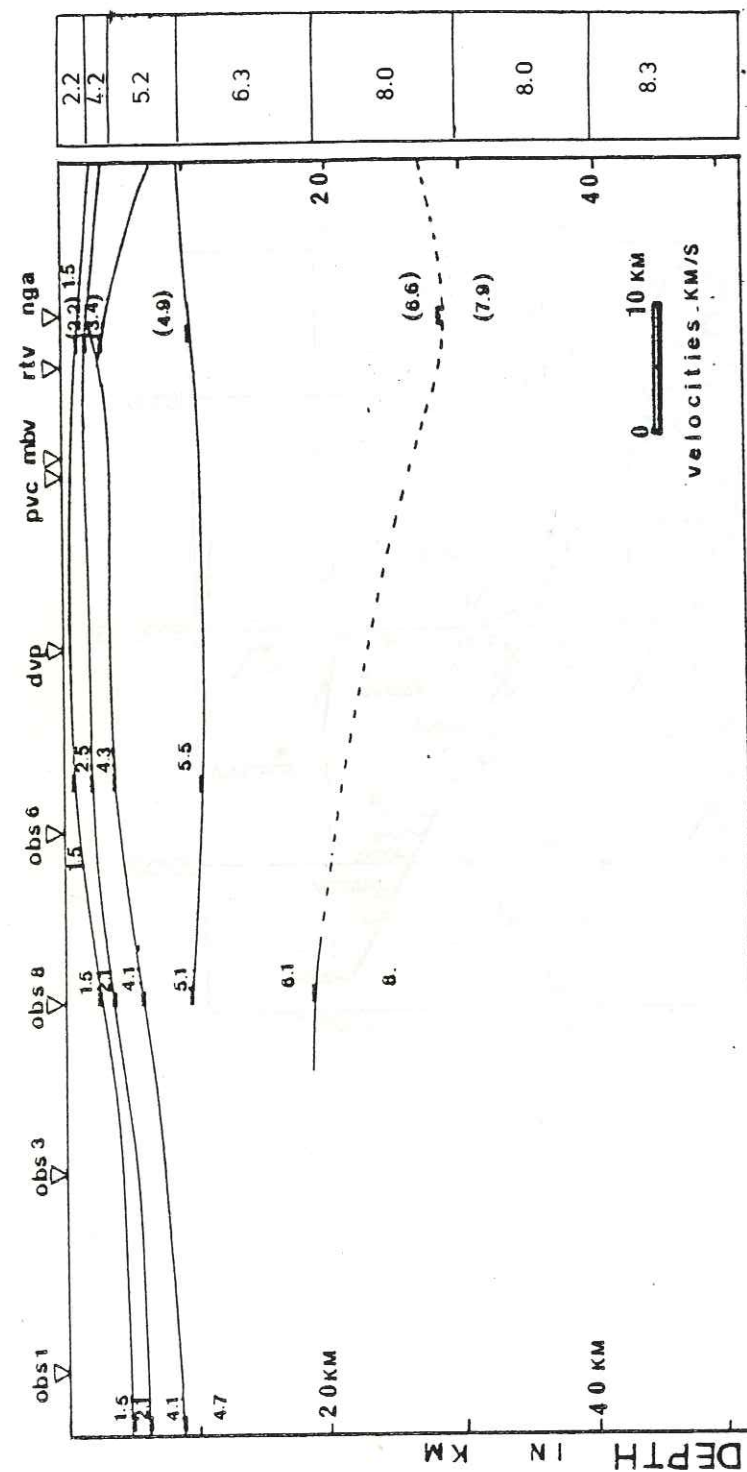


Figure IV.4.

after PONTOISE (1979)

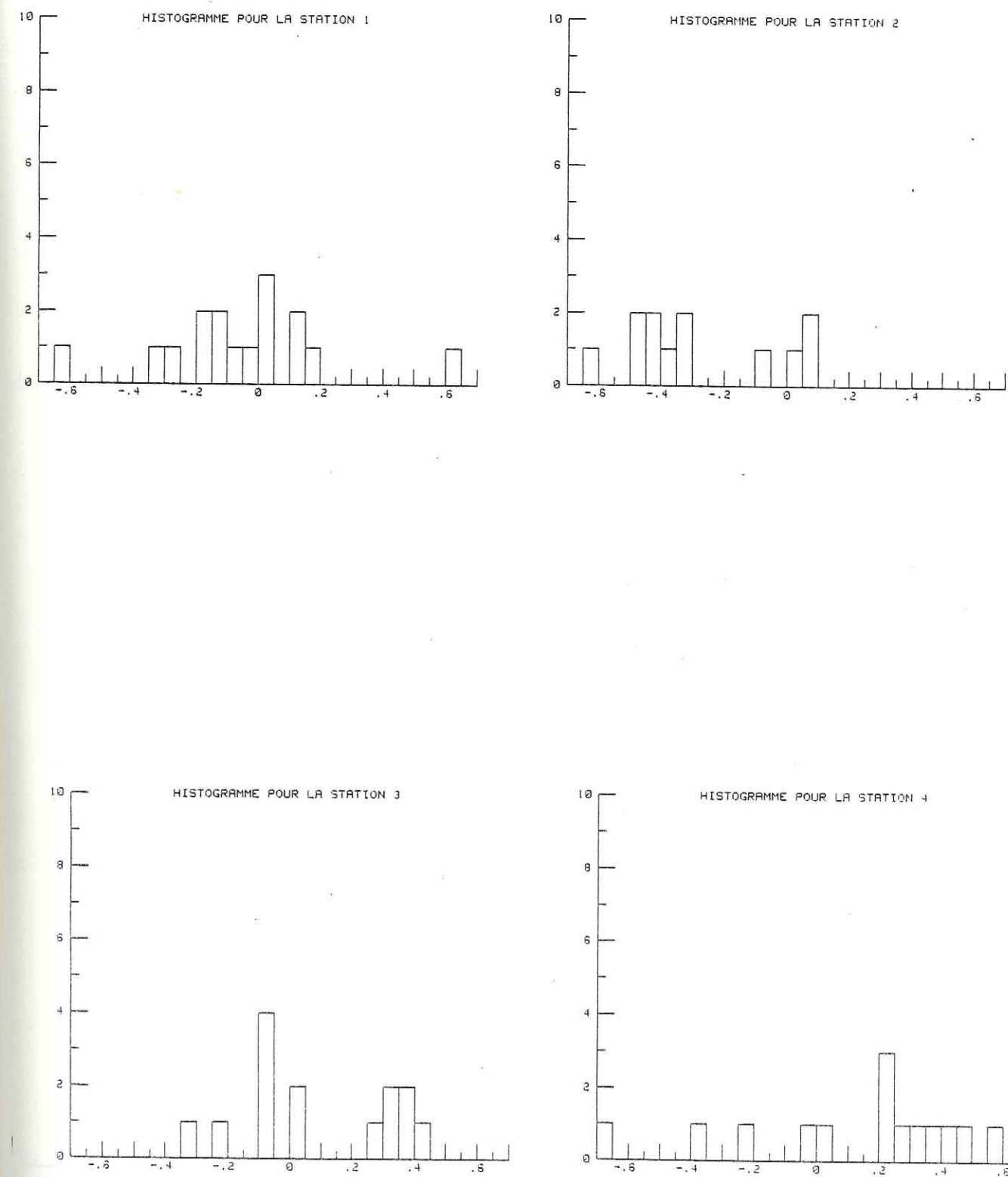
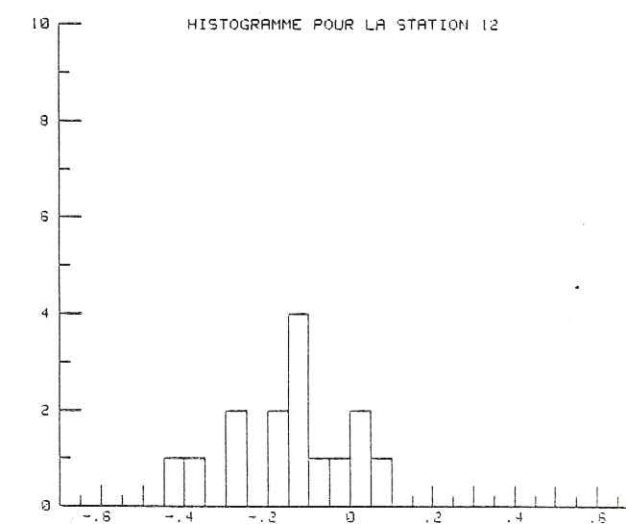
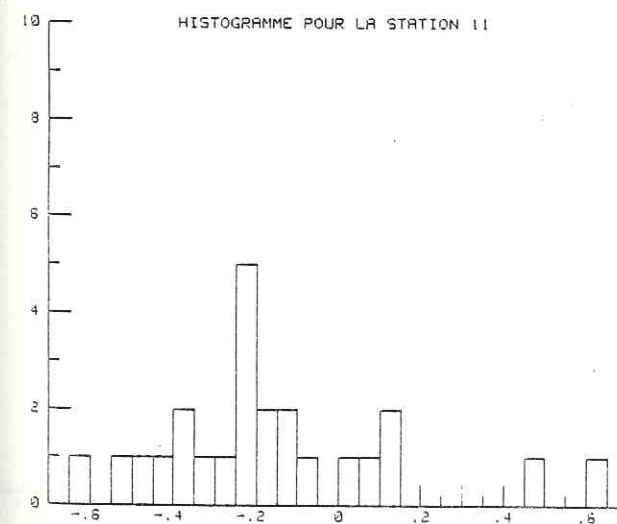
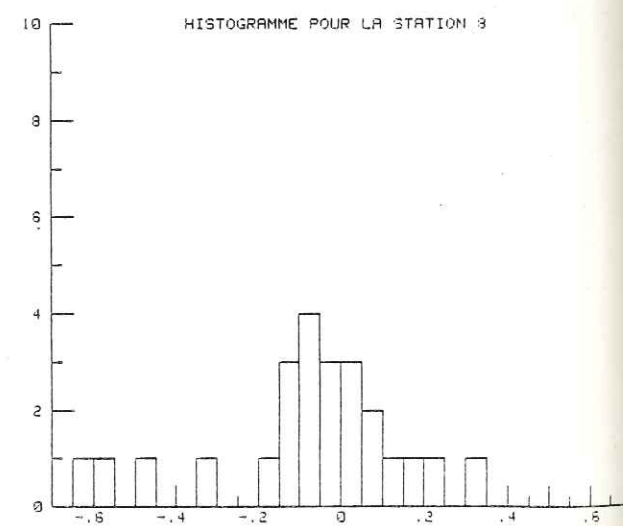
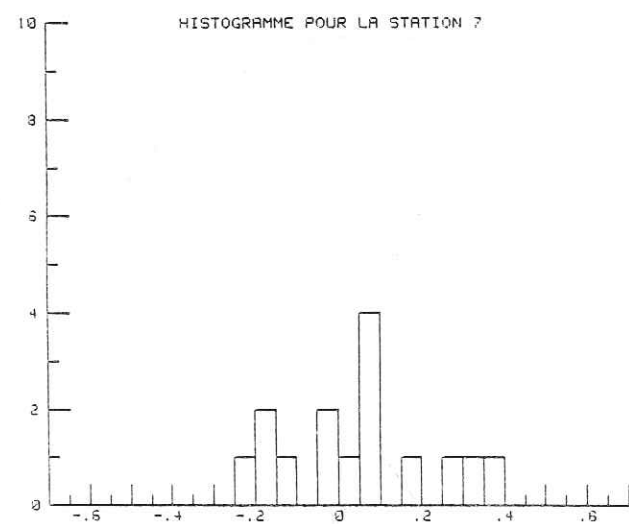
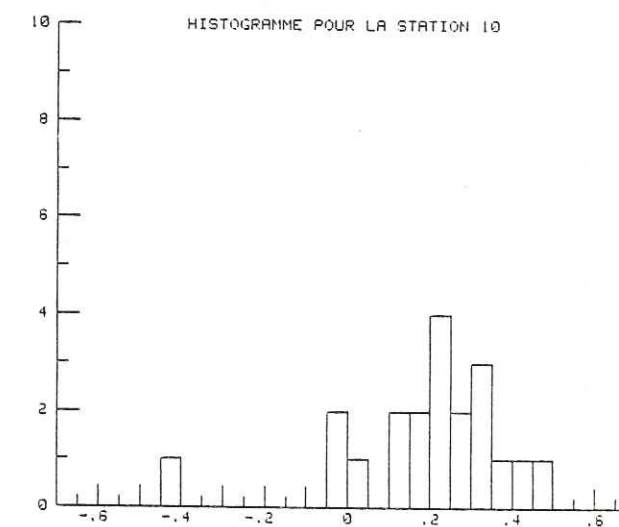
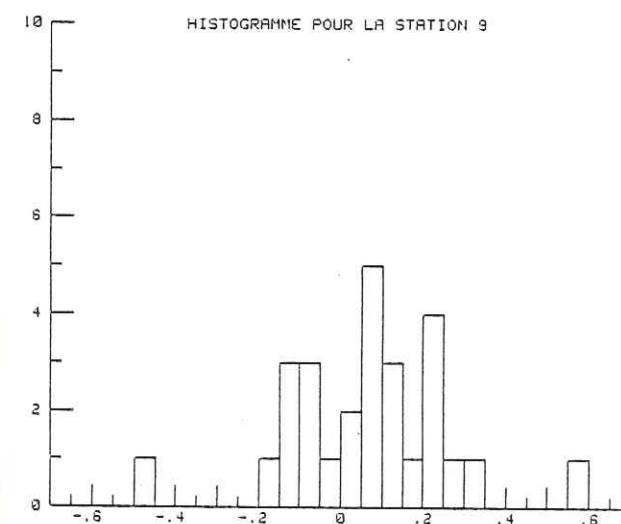
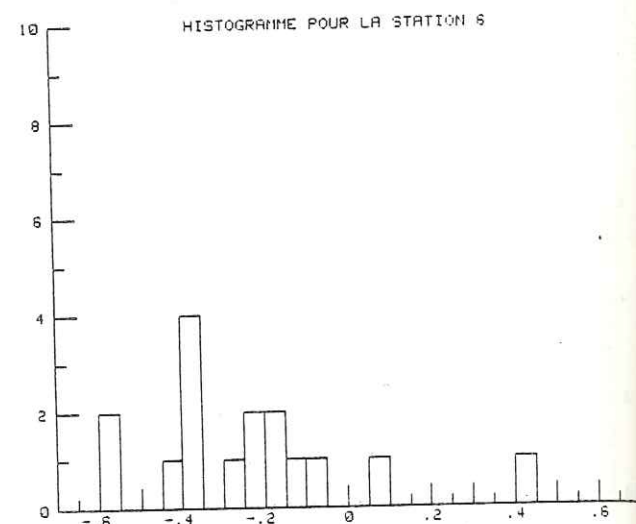
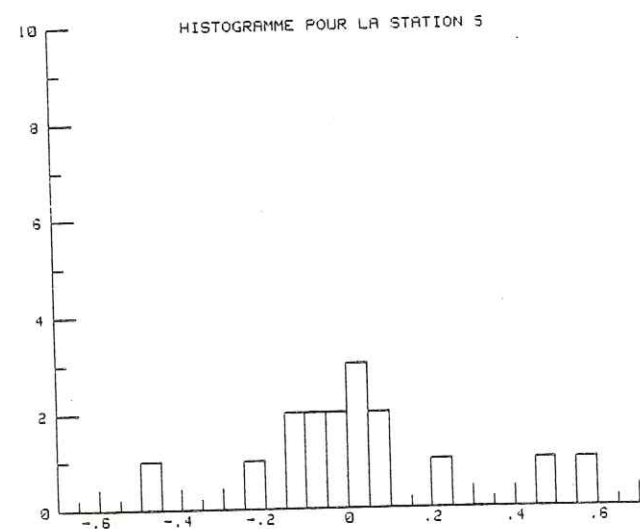
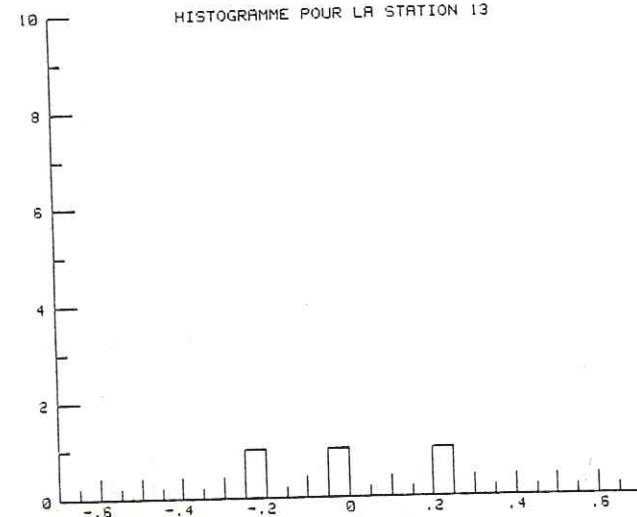


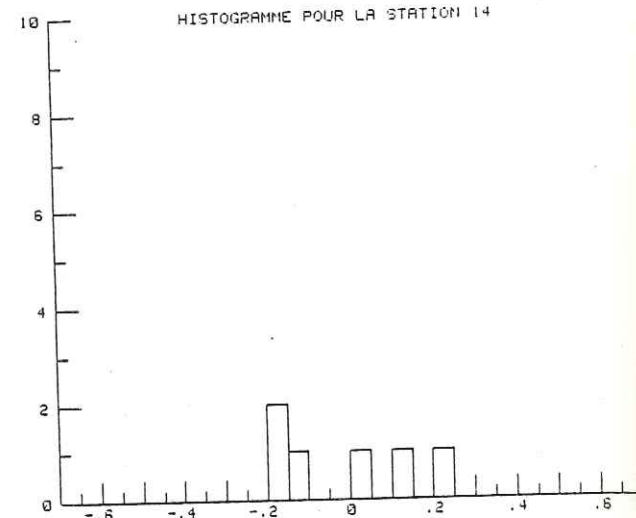
Figure IV.5.



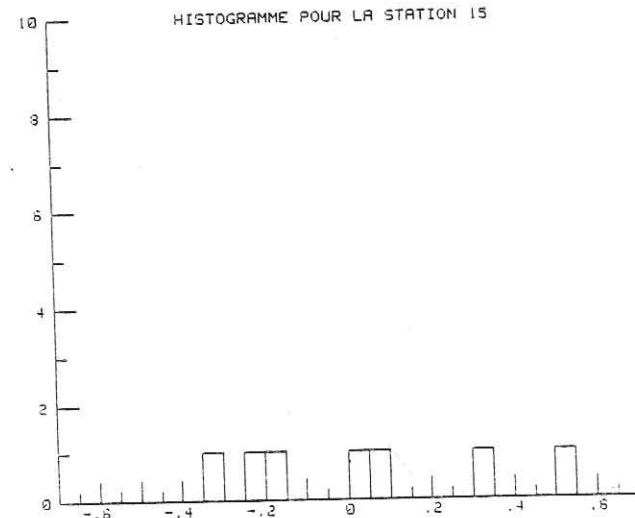
HISTOGRAMME POUR LA STATION 13



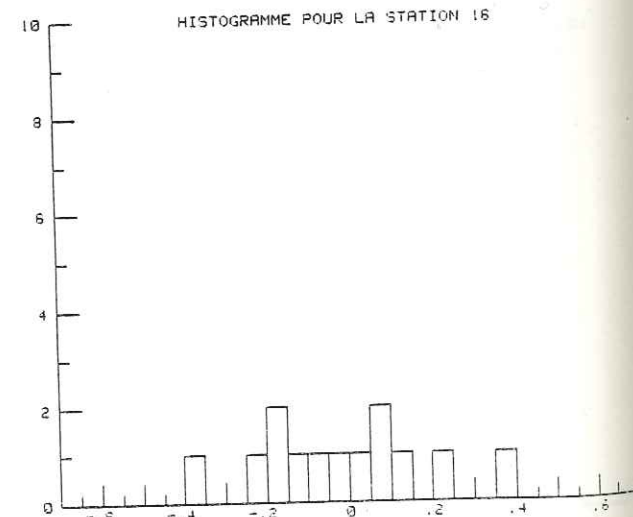
HISTOGRAMME POUR LA STATION 14



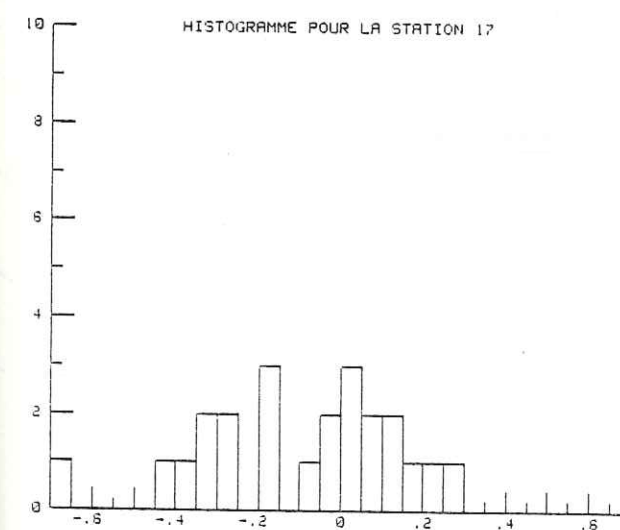
HISTOGRAMME POUR LA STATION 15



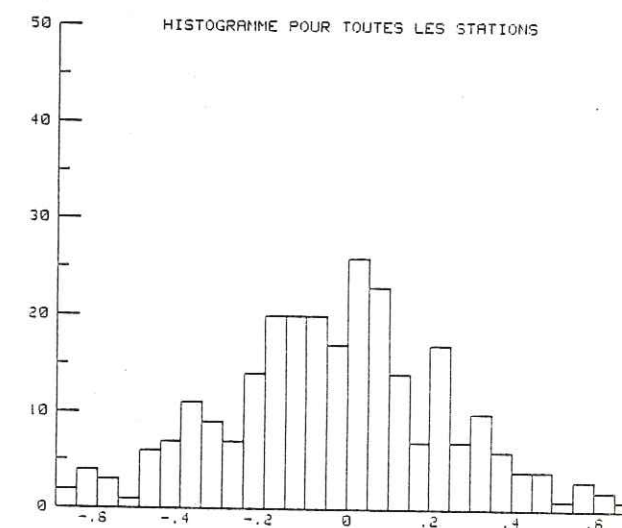
HISTOGRAMME POUR LA STATION 16

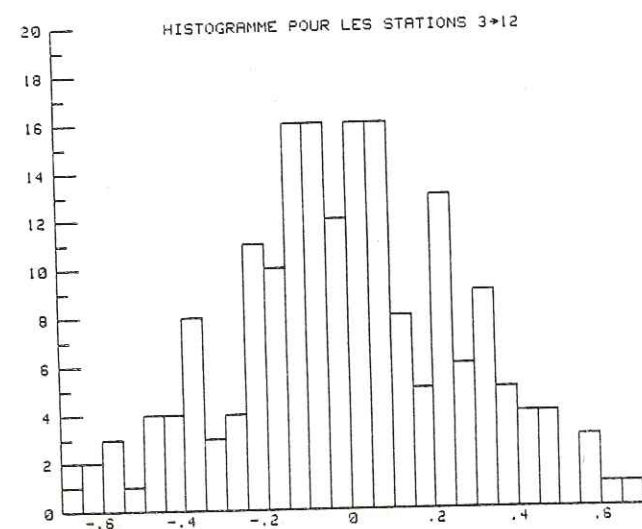


HISTOGRAMME POUR LA STATION 17

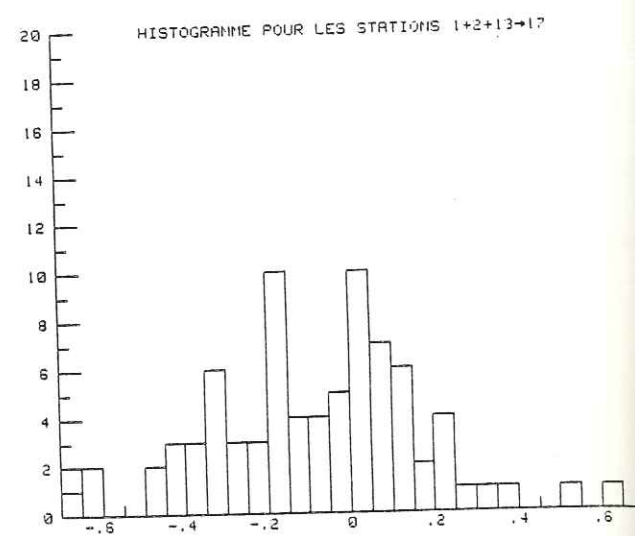


HISTOGRAMME POUR TOUTES LES STATIONS

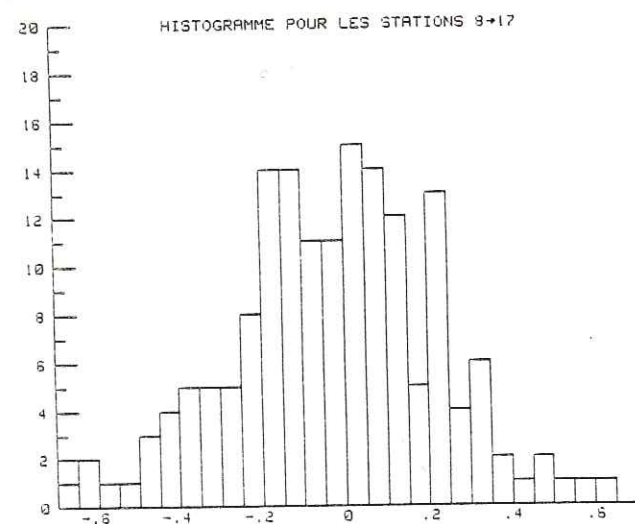




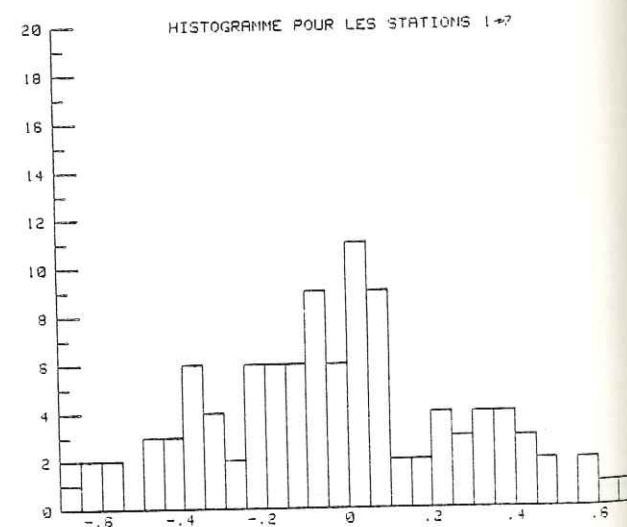
stations terrestres



7 stations fond de mer.



stations region sud



stations "partie Nord"

Figure IV.6.

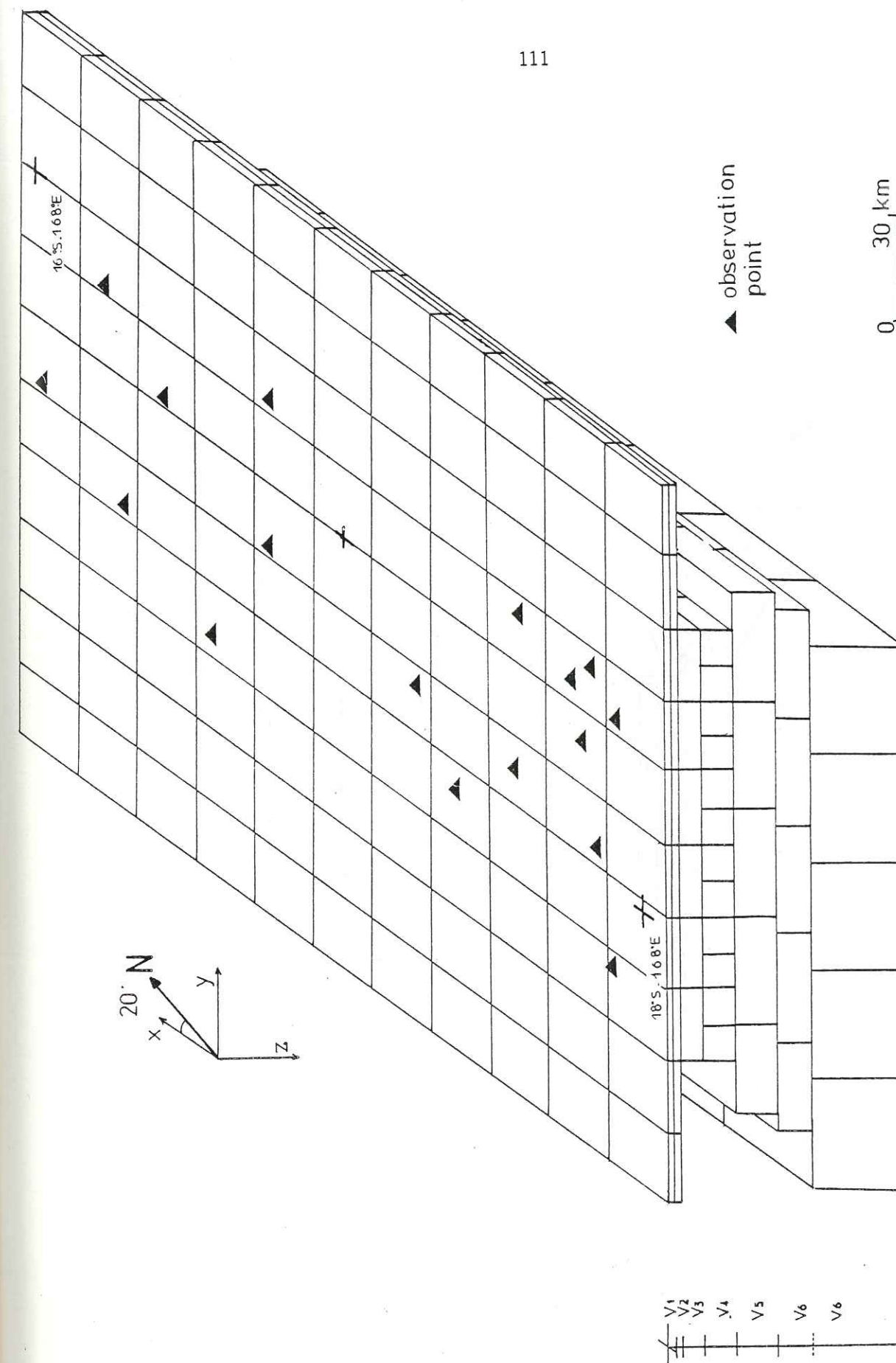


Figure IV.7.

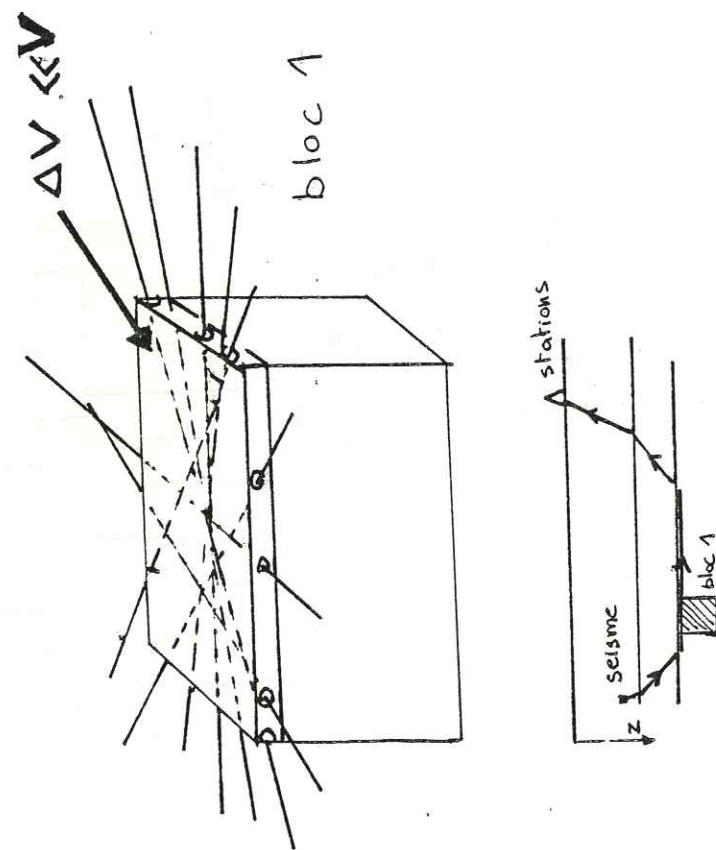


Figure IV.8.

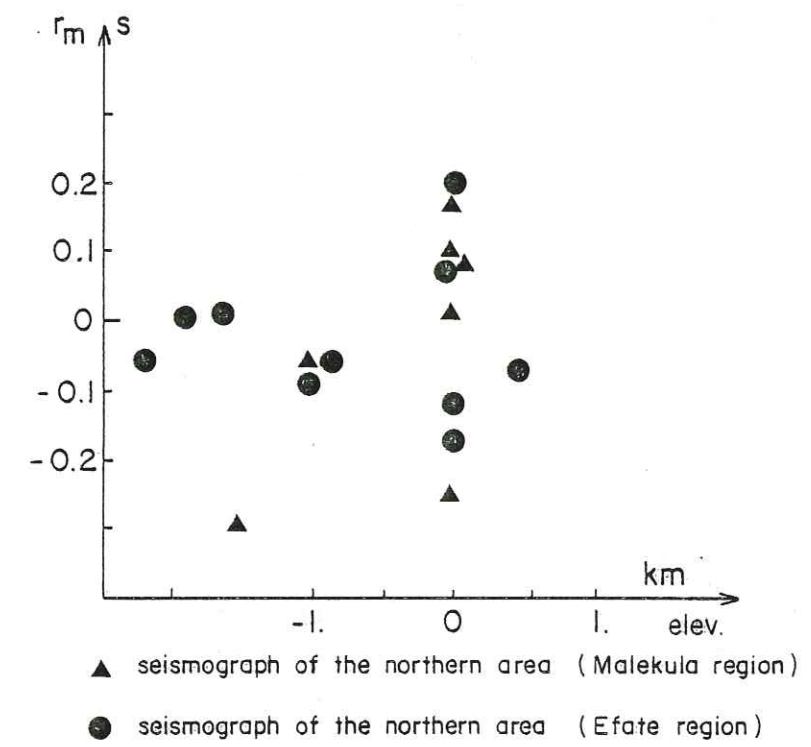
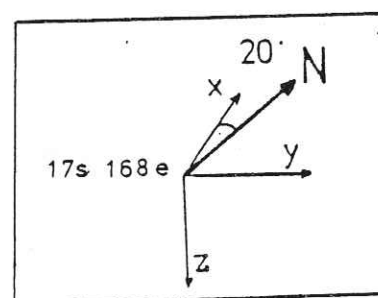


Figure IV.9.

Table IV.1.

STA LATITUDE LONGITUDE ELEVATION RELATIVE COORDINATES

10BS5	16848.67	167E44.60	0.	28.94	-18.55
20BS4	16851.00	167E25.00	0.	36.73	-52.71
3 AMB	16814.75	167E55.40	0.	81.13	20.82
4 EPI	16841.70	168E 6.97	0.	27.45	23.16
5 SMT	16811.25	167E30.75	0.	102.14	-18.24
6 LMP	16828.32	167E49.18	0.	61.41	1.88
7 SWB	16830.52	167E25.22	0.	72.09	-39.54
8 NGA	17827.12	168E20.42	0.	-59.33	16.83
9 MBV	17839.52	168E18.63	0.	-79.70	6.01
10 RTV	17847.55	168E25.48	0.	-97.75	12.29
11 DVP	17843.52	168E11.22	0.	-82.13	-8.81
12 PVC	17844.40	168E18.72	0.	-88.20	3.07
130BS1	17858.00	167E43.50	0.	-90.48	-63.90
140BS3	17828.10	167E40.70	0.	-37.00	-49.78
150BS6	17819.35	167E53.82	0.	-29.76	-22.47
160BS7	17836.00	167E56.50	0.	-60.21	-28.50
170BS8	17852.00	167E57.50	0.	-88.52	-36.91



CHAPITRE 5

RESULTATS NUMERIQUES

Table IV.2.

n°	x	y	z
1	111.47	-14.72	54.89
2	-58.28	-10.10	12.39
3	-48.49	-27.09	29.36
4	-49.18	-18.33	15.02
5	-45.55	-17.43	16.82
6	-64.31	-28.05	15.91
7	-51.62	-22.04	16.68
8	-49.23	-27.95	21.04
9	-48.07	-24.29	21.71
10	-45.25	-29.32	28.27
11	-62.67	-21.78	27.93
12	-52.50	-26.26	20.59
13	-43.18	-50.48	33.11
14	-62.98	-36.14	29.65
15	-44.41	-21.85	42.67
16	-38.45	-23.01	43.44
17	-42.13	-25.22	39.53
18	-60.29	-41.01	48.56
19	-23.48	-40.52	45.96
20	-98.08	-14.27	42.57
21	-92.40	-75.55	35.23
22	-50.35	-7.00	60.58
23	-131.00	-41.03	33.24
24	-80.78	-18.54	43.68
25	-95.43	-8.91	45.32
26	-90.73	-21.46	66.79
27	-26.59	-43.96	34.72
28	-107.51	-81.96	56.46
29	-57.66	-35.84	29.49
30	-55.14	-21.27	38.97
31	-40.07	-30.40	31.19
32	34.97	-1.77	25.75
33	88.43	-6.05	34.67
34	90.27	-5.67	33.30
35	49.85	-22.77	15.10
36	110.57	14.25	15.70
37	81.27	-33.06	8.49
38	104.83	-46.11	13.21
39	25.06	-11.32	17.63
40	43.81	-25.68	25.51
41	120.05	-6.33	34.14
42	12.69	-17.03	20.61
43	26.89	-80.42	18.47
44	28.51	-2.56	15.62
45	68.26	-33.20	39.29
46	74.47	-36.63	16.50
47	121.38	-7.03	37.50
48	78.96	-26.29	14.56
49	48.93	-12.49	13.02
50	88.41	45.67	15.50
51	10.28	-11.67	8.15
52	44.59	-24.09	36.80
53	72.73	-6.84	31.26
54	32.21	-35.94	29.47
55	136.84	-3.35	49.75

Dans ce chapitre, nous présentons, sur des données réelles, la nature des solutions obtenues par les différentes techniques. Ces exemples concrétisent les problèmes évoqués au chapitre II. De plus, ils reflètent notre démarche.

Sur le plan "théorique", j'ai commencé à travailler avec les méthodes statistiques. Ces techniques sont utilisées par de nombreux sismologues pour ce type de problèmes : Fitch et Muirhead 1974, Aki et Lee 1976, Crosson 1976, 1979, Spencer et Gubbins 1980. La nature de nos données et les résultats obtenus ont mis en évidence les confusions possibles (souvent existantes), et les limitations théoriques de tels processus (surtout au niveau du contrôle des résultats). Les algorithmes sont utilisés dans des domaines où ils sont mal définis, sans que l'utilisateur en prenne conscience. Que signifie par exemple la notion de résolution due à Backus et Gilbert (1968), lorsqu'elle est étendue à un paramètre du foyer sismique (valeur moyenne dans un volume donné) ?

Les différents travaux cités précédemment ont néanmoins montré des solutions particulières très cohérentes avec d'autres observations géophysiques ou géologiques. On aperçoit alors l'ambiguïté de la recherche d'un support théorique rigoureux.

Nous préférons limiter explicitement, à partir des connaissances physiques que nous avons du phénomène, le domaine des solutions possibles. Les algorithmes de programmation linéaire écrits par M. Cuet (Cuet et Bayer 1980),

nous permettent d'utiliser des contraintes linéaires pour décrire les solutions et déterminer la valeur physique de l'information obtenue.

V.1. AJUSTEMENT AUX DONNEES

L'utilisation des trois normes les plus classiques, L_1 , L_2 , L_∞ , pour approcher un ensemble de données est présentée sur la Figure (V.1). Les paramètres correspondants du modèle sont pour ces différents calculs les blocs de vitesse constante de la zone nord. La table (V.A) précise le modèle et les données utilisées. Un des faits les plus marquants de cette figure est la capacité de la norme L_1 à expliquer parfaitement 75 % des données ($e = 0$), alors que les écarts non nuls sont souvent grands : (15 % supérieur à 0,2 s). Les variations des paramètres de la solution étaient limitées à ± 15 % de leur valeur initiale.

L'effet, bien connu, de lissage de la norme L_2 calculée en utilisant l'algorithme de régulation de Marquart (1963) apparaît clairement. Le choix du coefficient de lissage (θ) n'est pas évident à la simple étude de l'ajustement aux données. On peut seulement constater une légère réduction de l'écart aux données lorsque le coefficient θ devient dix fois plus faible. Si l'on considère la procédure stochastique de Franklin (1970), avec une erreur de mesure estimée à 0.15 s par l'expérimentateur, de tels choix de θ correspondent à des fluctuations des vitesses d'environ 15 %, 30 % et 50 %.

$$\text{avec } \theta = \frac{\sigma^2 d}{\sigma^2 v}$$

σd : estimation de l'erreur sur les données : 0.15 s

σv : estimation du niveau de fluctuations des paramètres inconnus (à partir d'autres connaissances géophysiques, par exemple).

La Figure (V-1) reflète ainsi la faible capacité des paramètres à mieux ajuster les données si les contraintes statistiques sont moins sévères. Avec le coefficient, VE , défini au chapitre (II4), on obtient comme mesure de l'ajustement aux données dans les trois cas b_1 , b_2 , b_3 respectivement : 74 %, 77 %, 84 %, d'ajustement à la pseudo-variance des données.

Concrètement, la norme L_1 ($\min |Gm_i - d_i|$), cherche à ajuster (écarts nuls) le maximum de données en rejetant les autres. L'ajustement avec L_2 se différencie en approchant (écarts faibles) toutes les données. On peut philosopher longtemps sur le "meilleur" critère pour approcher des observations. Dans certaines applications, les moindres carrés peuvent masquer une distribution particulière des données (Aki et Richards, 1980).

Toutefois, le choix des différentes normes est avant tout fortement lié aux facilités d'implantation numérique : l'algèbre des moindres carrés est très souple et s'appuie sur deux importants supports théoriques (le théorème de Gauss-Markov et le critère de maximum vraisemblance). Ces deux éléments suffisent à expliciter un tel engouement pour la norme L_2 .

La réponse à la norme L_1 est très consistante avec l'introduction de contraintes explicites (recherche de solution extrême). Dans le cas de l'inversion globale de la zone étudiée dans les Nouvelles-Hébrides (chapitre VII), on obtient 43 écarts non nuls sur 252 observations. Ces écarts sont dus à cinq stations sur les 17 utilisées, ce qui particularise bien les données non expliquées par cette procédure.

La norme L_∞ qui minimise,

$$\max |Gm - d|$$

est la plus restrictive au sens de l'ajustement aux données. Dans ce cas, une estimation de l'erreur sur les données borne les écarts. Les résultats de la figure (V.1.c) exprime qu'une erreur de 0,50 s sur les données, est l'erreur minimum nécessaire pour permettre le calcul (avec la norme L_∞) d'une solution telle que :

$$\frac{\Delta V}{V} \ll |0.15|$$

L'évidence d'un écart global largement positif établit la déficience de nos données à être résolues avec cette norme. Une ou plusieurs données incohérentes, peu faciles à localiser, peuvent perturber les conditions d'un tel ajustement et produire ces écarts importants.

Sur cet exemple, il est intéressant de noter la bonne corrélation entre les écarts obtenus par les deux minimisations (a et b). (Figure V-2)

V.2. MODELES OBTENUS

Chaque procédure d'ajustement aux données façonne une ou plusieurs solutions dans l'ensemble des modèles possibles.

Les tendances générales exprimées par les différents résultats (Figure V-3 a,b,c,d,e) sont bien corrélées. Ceci constitue l'information la plus intéressante pour l'interprétation. Au premier abord, la corrélation obtenue par les deux procédures peut seulement refléter l'inefficacité des contraintes sur le modèle. Les figures (V-3 a,b,c) révèlent immédiatement que l'on n'est pas dans ce cas : de nombreuses valeurs de la solution obtenues par programmation linéaire sont égales aux bornes choisies.

Une information supplémentaire peut être extraite de ces figures. On observe le pouvoir important du coefficient (θ) sur les paramètres de la solution. Pour de faibles variations sur l'écart aux données (Figure V-1), la solution lisse peut varier d'un domaine compris entre -20 % et +20 % à un domaine de -50 % à +70 %. Ces résultats sont compatibles avec l'information a priori utilisée pour limiter statistiquement la solution. Il montre aussi la différence entre des contraintes explicites et les contraintes statistiques. Ces dernières n'affectent que quelques paramètres et le coefficient " θ " choisi est très proche de la régularisation de Marquart. L'avantage considérable de la procédure stochastique de Franklin réside dans sa consistance interne qui permet de définir la qualité de la solution obtenue.

V.3. RECHERCHE D'UNE SOLUTION PHYSIQUE

Face aux différentes réponses numériques fournies par les deux techniques, l'existence d'outils capables d'extraire une solution physique est indispensable. D'autres données géophysiques ainsi que différents contrôles numériques (qui doivent être connectés aux différentes procédures) sont alors utiles dans cette recherche.

MESURE DE L'APPROCHE AUX DONNEES

Une approche qualitative est visualisée sur la Figure (V-4) où les écarts sont ici exprimés en terme de stations. L'interprétation des écarts physiquement significatifs ($e > \text{erreur de mesure}$) reste difficile bien que, dans cet exemple, deux points d'observations expliquent tous les écarts supérieurs à 0.2 s. On a vu dans le chapitre II.4 qu'il est possible d'estimer la réduction relative de la dispersion des données. Cette réduction relative qui est obtenue en résolvant le système d'équation linéaire reste une mesure de cet ajustement aux données. Différents critères sont utilisables, liés aux choix de minimisation. Dans la programmation linéaire, il est par exemple naturel de calculer,

$$\sum_{i=1}^{\text{nobs}} |G_m - d_i| = \alpha$$

lorsque α n'est plus améliorée, on considère que l'optimum est atteint. Ces mesures permettent pour chaque calcul, une interprétation quantitative des diagrammes, e : $F(\text{nobs})$.

CONTROLES DES PARAMETRES DE LA SOLUTION

Pour évaluer la qualité de la solution, on a vu au chapitre II.5 que Franklin utilise l'apport d'informations obtenues sur chaque paramètre. Cette estimation est calculée relativement à l'estimation initiale de la fluctuation ; c'est l'équivalent de la réduction en variance définie sur les données. Les limitations d'un tel outil ont été mises en évidence au chapitre II.4.5

La Figure (V.5) représente le type de résultat obtenu dans le cas des données de la zone nord. La plupart des applications précédentes utilisent le même algorithme pour définir une "résolution" sur chaque bloc (chapitre II.4). La démarche consiste alors à "choisir" le paramètre θ , afin d'obtenir une "bonne" résolution et/ou un bon compromis, entre une erreur "estimée" sur les paramètres et une bonne résolution. Nous présenterons une étude complète de ces critères dans le cas de l'application aux Nouvelles Hébrides.

De telles procédures consistent à déterminer un niveau de solution acceptable : $R_i > a$, le choix de a étant fortement lié au travail effectué. On veut présenter une interprétation, donc on essaie d'obtenir un nombre suffisant de blocs ; c'est-à-dire

on choisit a tel que l'on ait suffisamment de $R_i > a$ (a varie entre 0.5 et 1).

Dans le cas de l'approche par programmation linéaire, la résolution objective au sens de l'optique (voir chapitre II.6), et Cuet, Grasso, Pascal, part. I, 1981) permet pour chaque paramètre de calculer la valeur minimum et maximum possible pour le problème tel que l'on se l'est posé. Au lieu d'obtenir une valeur pour un paramètre, on calcule des bornes physiques pour ces paramètres. Cela présente un double intérêt :

$$\text{si } |m_i^{\min} - m_i^{\max}| \approx 2 b_i, \quad b \text{ bornes fixées par exemple } 0.15 \text{ km/s}$$

L'information que l'on pourrait extraire de la valeur particulière de ces blocs est sans signification. Si $m_i^{\min} - m_i^{\max}$ petit, alors la valeur trouvée est proche de la vraie valeur pour le système tel qu'il est posé. Une telle approche, encore assez onéreuse, n'est effectuée dans notre cas que pour quelques blocs particularisés.

D'autres outils moins puissants sont aussi utilisés. Les coûts marginaux nous renseignent, seulement pour les paramètres à leurs bornes, sur l'influence relative d'un paramètre pour approcher les données. Des critères statistiques peuvent aussi s'utiliser ici pour définir des niveaux de confiance qui permettent de rejeter ou d'accepter un modèle (Parker, 1975, Huestis, 1979). On montre que, dans notre cas, il est possible de "choisir" l'erreur qui permet d'obtenir le taux de confiance nécessaire ... (Chap. II.6, pp. 50-53).

V.4. EXEMPLE NOUVELLES HEBRIDES (Modèle M22)

A la suite des différents calculs effectués sur deux zones séparées nord et sud, l'interprétation des solutions obtenues a fait naître la nécessité d'une étude globale. En effet, les blocs situés à la périphérie de chaque zone posaient des problèmes particuliers. A toutes tentatives d'interprétations on pouvait objecter l'effet d'une mauvaise information, difficilement contrôlable avec les procédures stochastiques. On présente ici l'application des deux techniques sur l'inversion globale des deux zones.

Les connaissances utilisées pour déterminer les solutions se regroupent ainsi :

1) Des observations de temps d'arrivée d'ondes P.

2) Un modèle de vitesse initiale.

Ces deux éléments génèrent des estimations des paramètres des foyers sismiques et des résidus de temps de parcours. (voir table(V 1) et annexe)

3) Une discrétisation (Figure V.6)

4) Des contraintes sur les paramètres de la solution.

Ces contraintes sont exprimées de manière statistique dans les techniques stochastiques :

$$\sigma_V = 15\%$$

$$\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z = 4.76 \text{ Km}$$

$$\sigma_T = 0.15 \text{ s}$$

Les différents σ_j correspondent à des facteurs θ_j tels que :

$$\theta_V = 1$$

$$\theta_X = \theta_Y = \theta_Z = 0.001$$

$$\theta_T = 1$$

Avec les algorithmes de programmation linéaire, les contraintes explicites s'écrivent :

$$\frac{\Delta V}{V} = \pm 0.15$$

$$\Delta_X = \Delta_Y = \Delta_Z = \pm 5 \text{ km}$$

$$\Delta_T = \pm 0.5 \text{ s.}$$

Le choix de ces contraintes est sensé laisser autant de liberté à chaque paramètre de la solution.

AJUSTEMENT AUX DONNEES

Les 252 données (rais) correspondent à 43 séismes. Lors de l'inversion, on utilise en moyenne six enregistrements (stations) par séisme, sur les 17 stations constituant le réseau.

Après minimisation des valeurs absolues des écarts,

$$| G m_i - d_i |$$

il reste 43 écarts non nuls. La valeur de α ,

$$\alpha = \sum_{i=1}^{252} | G m_i - d_i |$$

est à l'optimum : $\alpha = 7.7$.

Avec l'inverse stochastique, il reste 223 écarts non nuls ($e > |0.02 \text{ s}|$). Parmi ces 223 écarts non nuls, 29 sont supérieurs à $|0.2| \text{ s}$. La valeur optimale de β

$$\beta = \sum_{i=1}^{252} | G m_i - d_i |^2$$

est : 18.7

De tels résultats caractérisent bien les deux possibilités d'approches d'un ensemble de données.

Il est intéressant de particulariser les écarts non nuls de la norme L_1 . Le tableau (V.2) relie ces 43 écarts non nuls aux écarts statistiques (norme L_2), aux stations et aux séismes concernés. L'étude brutale d'un tel tableau montre :

- une correspondance absolue entre les signes écarts obtenus par les deux techniques.
- les écarts significatifs ($|e| > 0.05 \text{ s}$) sont expliqués par les cinq stations de la zone d'Efate (voir Figure V.6)
- le rejet possible d'un séisme.

Dans cette application, la norme L_1 met en lumière un problème sur cinq stations (on peut noter qu'il reste 12 écarts stochastiques, sur les 29 supérieurs à 0.2 seconde, qui ne sont pas dans le tableau (V.2))

Fort de ces enseignements, on peut affirmer que le modèle présenté explique parfaitement 84 % des données (209/252). Cette mesure est très différente de celle obtenue par le coefficient ;

$$VE = \left(1 - \frac{\sigma^2 e}{\sigma d^2}\right) \times 100 = 84 \%$$

de la procédure de Franklin.

Une autre mesure des résultats en norme L_1 , peut s'exprimer à l'aide des écarts physiquement significatifs ($e > 0.15 \text{ s}$). Alors les solutions obtenues expliquent 94 % des données (237/252). Ces quelques nombres suffisent à montrer qu'une simple mesure de l'approche aux données ne suffit pas pour caractériser la solution d'un problème numérique. Ils doivent aussi inciter l'utilisateur à contrôler la validité et le sens de telles mesures dans leur application.

SOLUTIONS OBTENUES

Les résultats correspondant à ces différents ajustements aux données sont présentés sur les figures (V.7 a,b,c,d,e,f,g). On remarque une très bonne corrélation des signes : 80 % des variations vont dans le même sens. La couche 5 atteignant 100 %.

Couche 7 : 15 blocs/16	ont le même signe :	6 (nombre rais des blocs non corrélés)
Couche 6 : 17 blocs/22	ont le même signe :	6 4 2 9 6
Couche 5 : 23 blocs/23	ont le même signe :	-
Couche 4 : 68 blocs/82	ont le même signe :	25 3 11 4 21 2 2 3 1 4 3 4 4 3

Face à cette bonne correspondance (a priori il existe plusieurs solutions, on pourrait ne pas converger vers un domaine commun), on a essayé d'utiliser les critères classiques pour évaluer notre solution. Les variances expliquées sur les paramètres par

la procédure stochastique sont variables suivant les blocs, un nombre important étant supérieur à 70 %. Cela peut se rapprocher de la notion de niveau de confiance auquel on peut accepter un modèle. Sur les figures (V.8 a,b.), on montre comment les critères relatifs aux deux procédures classent les paramètres. L'évidence d'un désaccord apparaît sur la Figure (V.8 a). Il faut nuancer ce premier test car les coûts marginaux (chapitre II.6) n'ont aucune signification pour les paramètres situés entre les bornes. On ne peut donc pas interpréter les coûts marginaux nuls des paramètres de base. Les résultats de la coupe 5 par exemple, en correspondance parfaite (au sens du signe seulement), ne peuvent pas être étudiés à l'aide des coûts marginaux alors que la variance expliquée est de l'ordre de 90 % pour chaque bloc (Figure V.9). Ces blocs correspondent au nuage de points autour de 0.9 sur la figure (V.8 a)

Pour les valeurs aux bornes, on a essayé de choisir un niveau de confiance de 70 % sur l'approche statistique, et un coût marginal qui permettent à la variable de rester dans le domaine où l'on cherche une solution.

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta m} = u$$

avec $\Delta m = \pm 15 \%$ pour les blocs
et $\Delta\alpha = 0.1$ pour un niveau de confiance de 70 %

on obtient : $u \geq 0.3$

On définit ainsi huit blocs que l'on peut penser être bien "résolus" (Figure V.8 b). Ils sont en grisé sur les figures (V.7, a,b,c,d,e,f,g), où l'on peut aussi comparer les deux valeurs obtenues. Une même approche pour les séismes (table V.3) nous permet de définir ainsi une quinzaine de paramètres des foyers.

Paramètres des foyers

Dans le cas des séismes, il est intéressant de remarquer l'homogénéité de la résolution obtenue. Cette résolution, au sens de Franklin, représente le gain en variance sur l'information statistique a priori. Les valeurs globalement proches de 0.95, particulièrement ces paramètres par rapport aux blocs de vitesse. Les Figures (V.10 a,b,c) montrent les projections des vecteurs de placements sur trois plans orthogonaux. Pour dif-

férents degrés de lissage ($\theta = 0.1$, $\theta = 0.001$) et pour les valeurs obtenues par programmation linéaire, seuls les modules de ces vecteurs changent. La Figure (V.11) montrent la corrélation entre les variations en Z obtenues par deux calculs différents. Avec les mêmes données, on cherche à expliquer les résidus, soit avec des variations des paramètres des foyers seuls, soit en joignant des modifications du modèle de vitesse. La bonne corrélation obtenue tend à montrer une indépendance entre ces deux types de paramètres.

Une telle éventualité proposée par Anderson (1978) est concrétisée par l'approche du problème inverse de Pavlis et Booker (1980). Les auteurs présentent alors une inversion où paramètres des foyers et des vitesses sont déconnectés. De même, les figures (V.12 a,b,c,d,e,f,g) montrent la stabilité des modèles de vitesses obtenues lorsque les foyers sismiques sont bloqués ou laissés libres.

Dans le cas de la programmation linéaire, les applications présentées en magnétisme et gravimétrie, définissent des niveaux de confiance auxquels on peut rejeter ou accepter un modèle (Banks, Parker et Huestis 1977, Huestis 1980, par exemple). On a essayé d'utiliser ces mêmes critères statistiques dans cette application. Ces calculs sont détaillés en annexe. Le résultat principal consiste en une possibilité de choix de l'erreur sur les données (0.24 s) pour atteindre un modèle recevable à 70 % sur les 43 données non ajustées (tableau 5). En prenant une erreur de 0.18 s, le modèle est alors rejetable à un niveau de confiance de 90 % ! Il faut remarquer que dans les applications citées plus haut, les auteurs travaillent sur l'ensemble des données (ici nous = 252) alors que l'on doit en toute rigueur utiliser seulement les écarts non nuls (ici 43). De tels tests ne peuvent rien apporter dans notre type de problème, l'hypothèse de la loi de probabilité de $\alpha_{optimal}$ étant de plus, peu rigoureuse.

Pour ce qui est de l'interprétation, il n'en reste pas moins que les deux solutions obtenues montrent les mêmes tendances tant en vitesse que pour les mouvements des foyers et constituent un acquis appréciable pouvant servir de base de réflexion pour la compréhension de la zone étudiée.

CHAPITRE V

Figure V.I. - Ajustement aux données par différentes normes. Pour chaque observation on reporte l'écart e entre la donnée initiale d et la donnée d' , calculée avec l'estimation $\hat{m}$.

$$e = G\hat{m} - d = d' - d$$

$$a/ L_1 = \min_{L=1}^{\text{nobs}} \left\| \frac{(G_m)_i - d}{w} \right\| w : \text{poids (par exemple erreurs de lecture)}$$

$$b/ L_2 = \min \left\| (G_m)_i - d_i \right\|$$

$$c/ L_\infty = \min \max ((G_m)_i - d_i)$$

Les normes L_1 , L_∞ sont calculées en utilisant des algorithmes de programmation linéaire.

La norme L_2 est formulée à l'aide des moindres carrés atténués. On remarquera pour différentes valeurs de θ (coefficient de lissage) les faibles fluctuations de l'approche aux données (données zone Malékula seulement).

Figure V.2. - Corrélation entre les écarts obtenus par les normes L_1 et L_2 pour les mêmes données que (V.I.).

Figure V.3. - Corrélation entre les solutions en vitesse obtenues en utilisant les différentes normes L_1 , L_2 , L_∞ . Les données sont les mêmes que sur la figure V.I. On observe ici de larges fluctuations des solutions pour $L_2 \theta=1$ $L_2 \theta=0.1$. L'ajustement aux données variant peu (Figure V.I.b.).

Figure V.4. - Corrélation entre les écarts et les stations $e : f$ (station) - 2 stations expliquent 90 % des écarts supérieurs à 0,2 s.

Figure V.5. - Eléments diagonaux de la matrice de résolution. Le nombre d'observations pour chaque bloc est visualisé dans la figure (V.5.b.).

Figure V.6. - La discrétisation utilisée lors de l'inversion globale des deux régions. Les points d'observations sont ici des stations sismologiques. L'interprétation du chapitre VI est basée sur cette modélisation.

Figure V.7. - a, b, c, d, e, f, g : résultats numériques correspondant à la structure discrétisée de la figure (V.6.). On reporte dans chaque bloc : le nombre de rais traversant le bloc (en haut à droite).

La valeur obtenue en norme L_1 à l'optimum (2 230 itérations).

La valeur correspondant à la technique stochastique : $E(\hat{m}, m^t)$ minimum.

En grisé, les blocs bien "résolus" par les deux estimations.

On notera la très bonne cohérence des signes obtenus par les deux techniques.

Figure V.8. - Les outils utilisés pour contrôler la qualité des solutions obtenues.

Coût marginal (U) et gain en variance (résolution, R).

a/ Echantillonnage de toutes les valeurs.

b/ Les valeurs aux bornes par la programmation linéaire sont les seules utilisées.

U indique l'influence d'une variation de $\hat{m}_j$ sur l'ajustement aux données.

On cherche donc des U grands.

R, gain en variance : $VA = 1 - R$.

Pour $R \approx 1$, l'amélioration de la variance (VA) atteindra son optimum.

$VA = \frac{VF}{VI}$ (VF variance finale très faible).

VI, estimation a priori de la variance initiale.

Figure V.9. - Gain en variance pour les blocs de la couche 5.

Le coût marginal étant nul (variables de base) pour tous les blocs, il n'apparaissent pas dans les solutions retenues, bien que R soit très satisfaisant.

Figure V.10. - Vecteurs déplacement des foyers obtenus pour 3 calculs :

$L_1, L_2 \theta = 0,1 \quad L_2 \theta = 0,001$

a/ Les épicentres de départ sont notés par des cercles ouverts. Les positions finales par des cercles pleins. Le numéro correspond à la table (V.3.).

b/ Mêmes notations que (a) mais sur une coupe Est-Ouest perpendiculaire à la ligne volcanique.

c/ Mêmes notations que (a) pour une coupe parallèle à la ligne volcanique.

Figure V.11. - Diagramme montrant les profondeurs obtenues pour les foyers lorsque les blocs de vitesse interviennent ou non dans le calcul. Ces calculs correspondent aux résultats obtenus par l'inversion globale des 2 zones à l'aide des algorithmes de moindre carré (Franklin).

Figure V.12. - Valeurs obtenues pour les blocs de vitesses de l'inversion :

. de la structure seule,

. de la structure en vitesse et des paramètres de foyers.

(Résultats obtenus sur les deux zones à l'aide de la même technique que pour la figure (V.11.).)

Tableau V.1. - Séismes utilisés et résidus des temps de propagation dans le modèle initial.

Tableau V.2. - Ecart aux données.

a/ Norme L_1

b/ Norme L_2

c/ Corrélation entre les écarts non nuls de L_1 et L_2 .

Tableau V.3. - Modifications des paramètres des foyers sismiques pour les deux calculs.

a/ Norme L_1 , programmation linéaire.

b/ Norme L_2 , approche stochastique.

Tableau V.4. - Coûts marginaux pour les séismes et les blocs utilisés.

Tableau V.5. - Détermination d'un niveau de confiance.

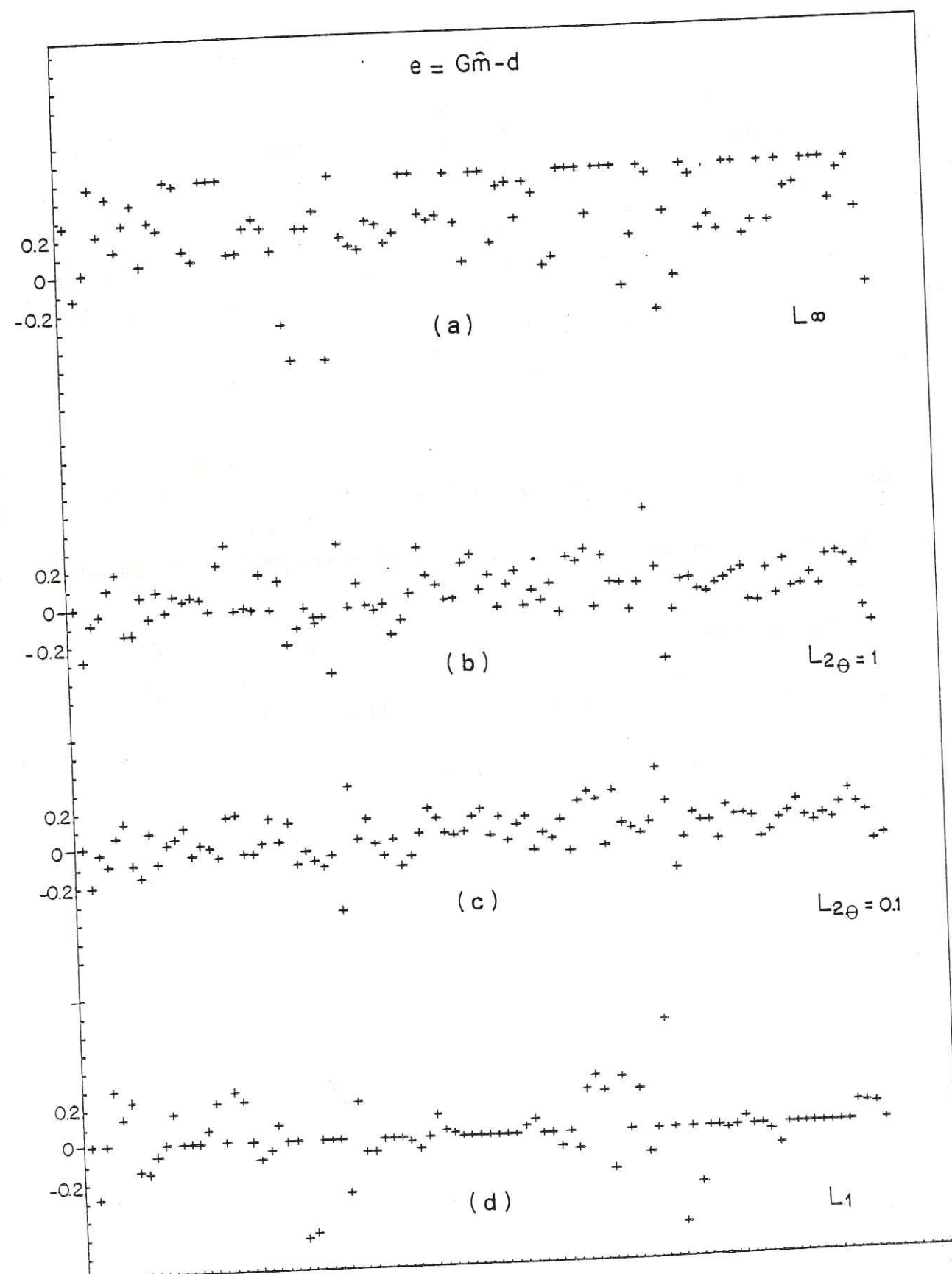


Figure V.1.

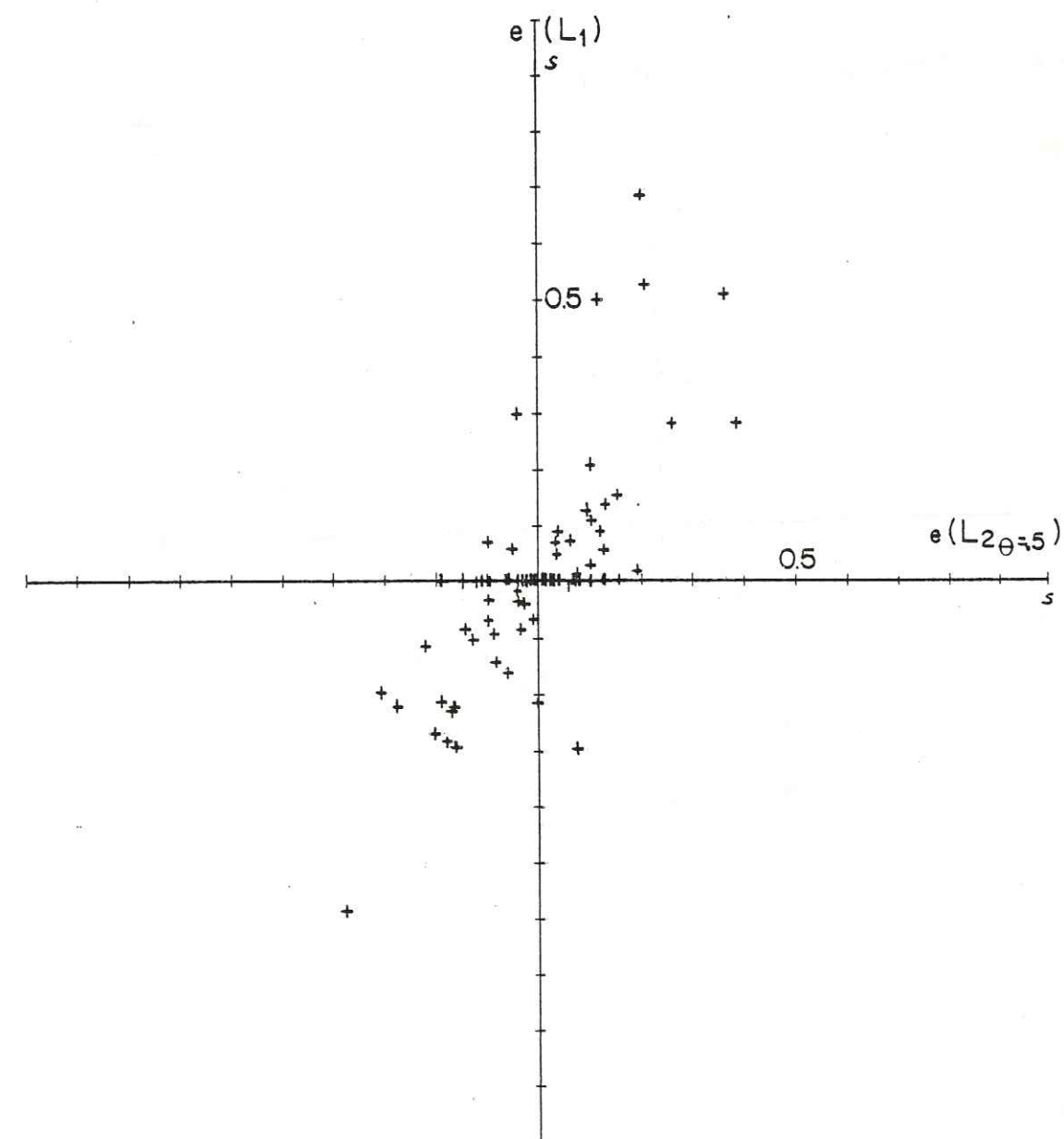


Figure V.2.

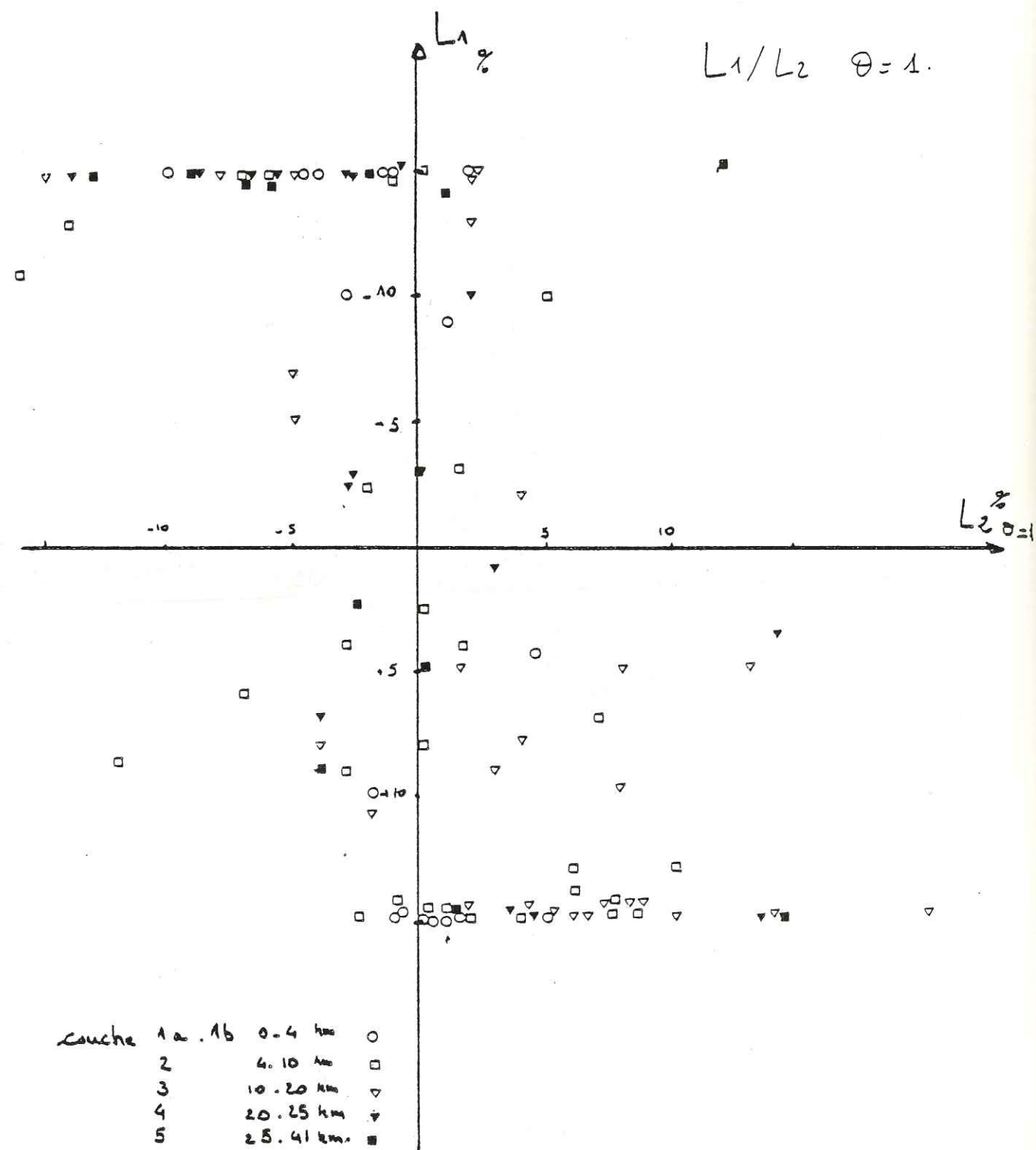
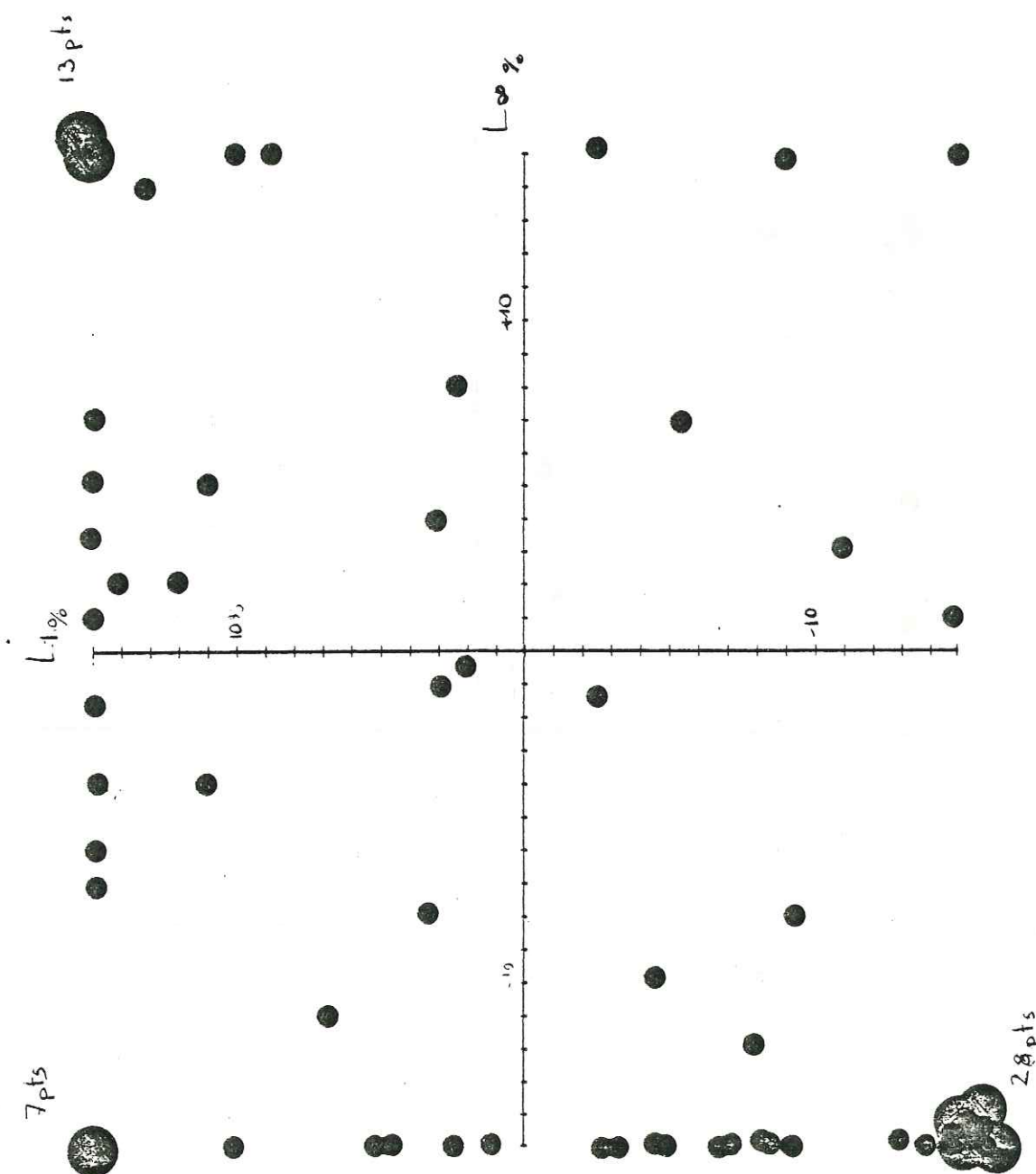
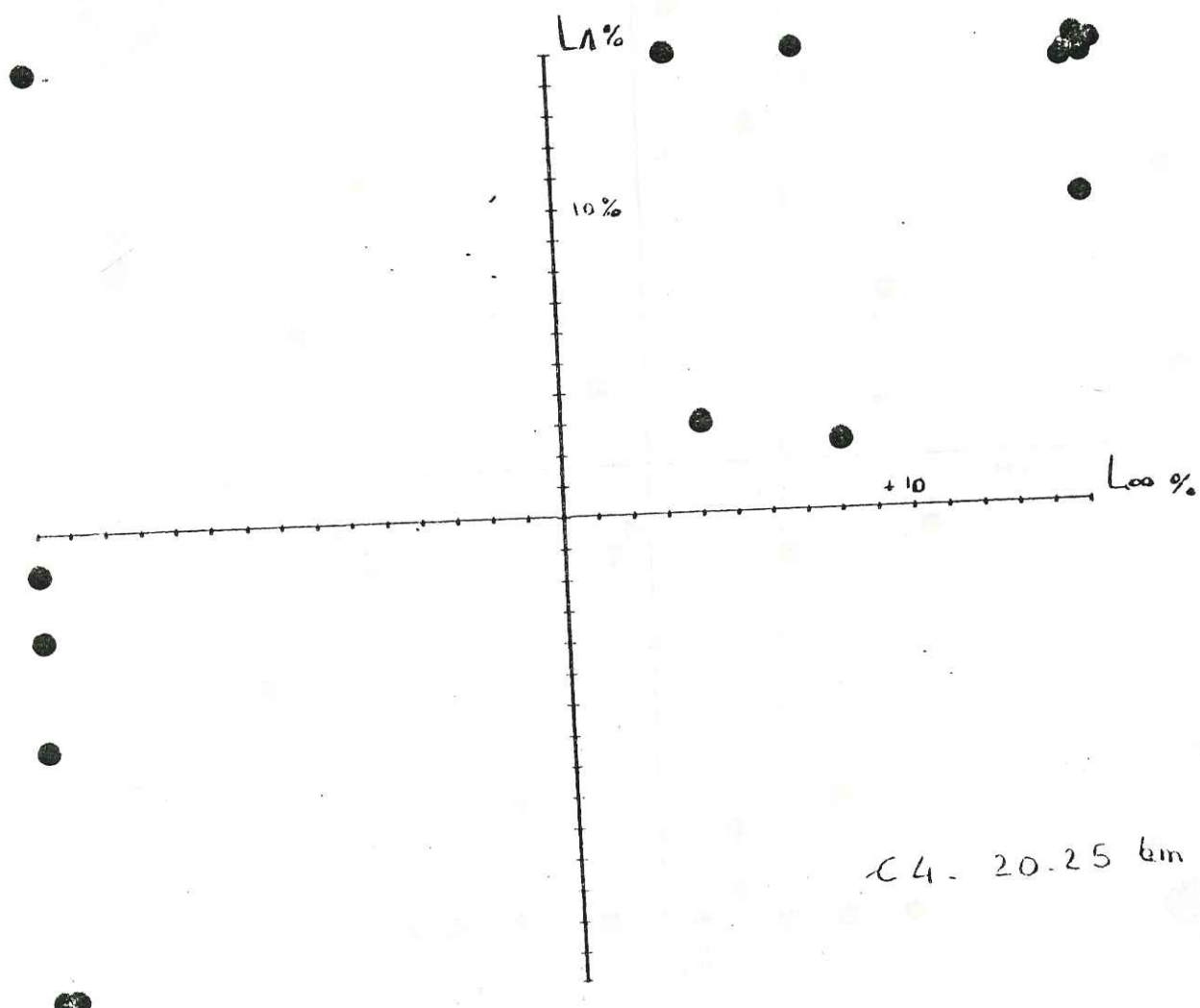
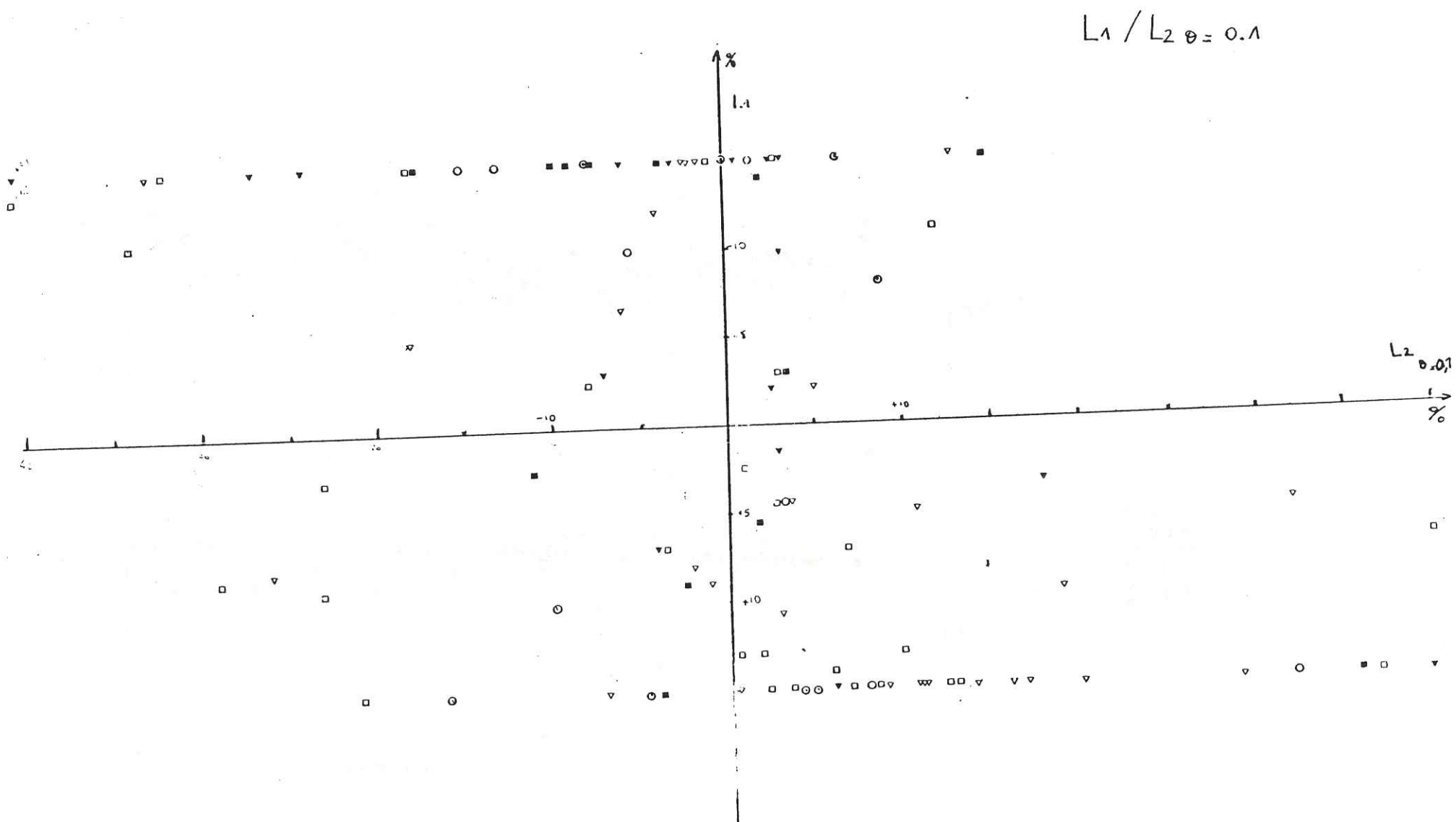


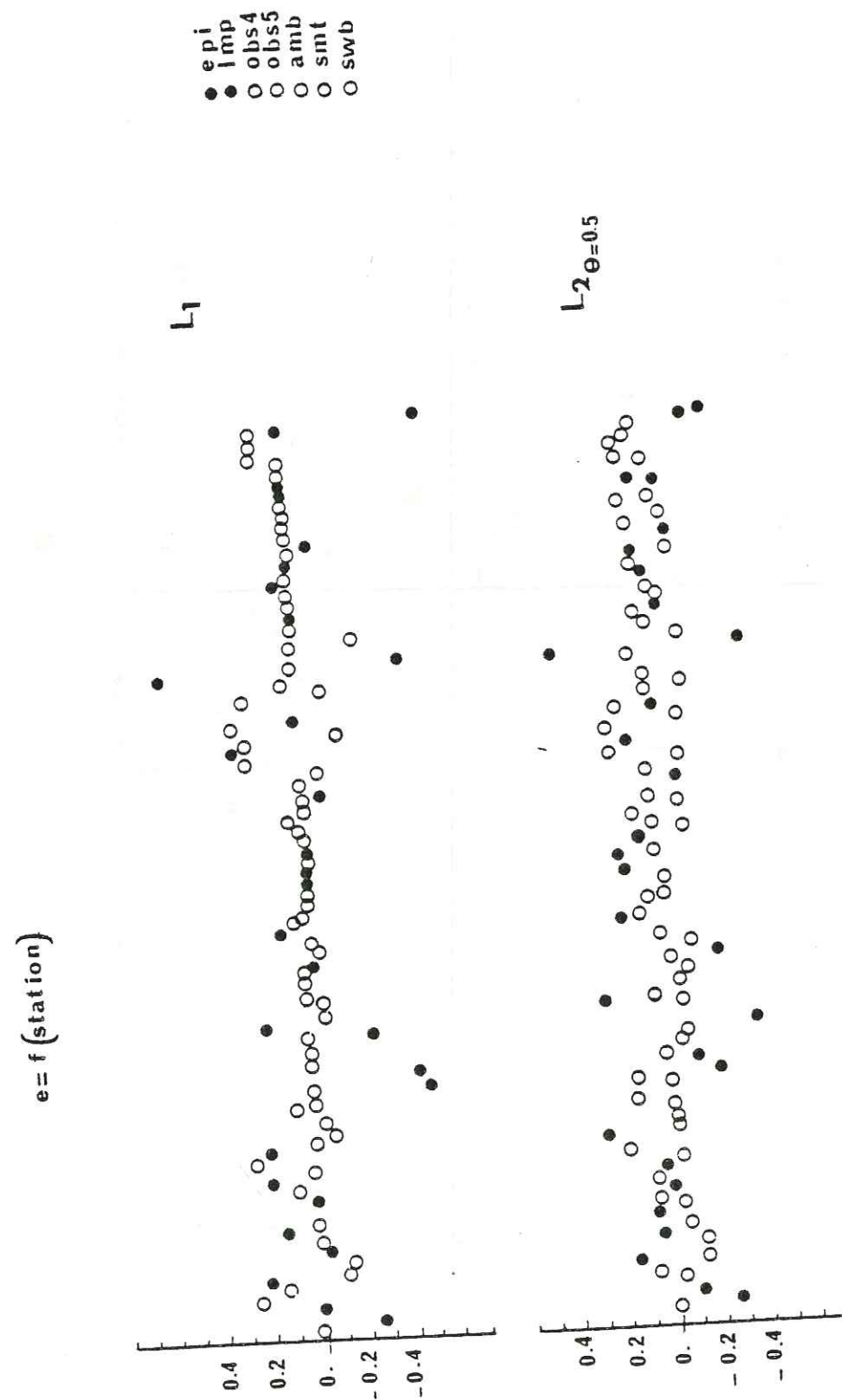
Figure V.3.





136





RESOLUTION FOR P VELOCITY MODEL

LAYER 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.312	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.310	0.0	0.0	0.240	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.416	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.193	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.352	0.0	0.329	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.170	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.172	0.127	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.378	0.0	0.343	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.295	0.388	0.428	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.224	0.0	0.0	0.0	0.215	0.0	0.0	0.0

LAYER 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.112	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.098	0.0	0.086	0.075	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.004	0.147	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.072	0.0	0.073	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.103	0.0	0.127	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.049	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.070	0.105	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.119	0.0	0.115	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.029	0.0	0.089	0.139	0.160	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.037	0.0	0.000	0.0	0.078	0.0	0.0	0.0

[a]

Figure V.5.

LAYER 3

0.0	0.0	0.034	0.0	0.0
0.0	0.0	0.449	0.464	0.0
0.0	0.0	0.149	0.0	0.519
0.0	0.0	0.850	0.703	0.502
0.0	0.0	0.0	0.724	0.695
0.0	0.0	0.150	0.249	0.439
0.0	0.0	0.0	0.450	0.622
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.150	0.0	0.0
0.0	0.0	0.881	0.346	0.0
0.0	0.0	0.646	0.070	0.703
0.0	0.0	0.640	0.193	0.688
0.272	0.124	0.444	0.679	0.679
0.213	0.0	0.277	0.174	0.495
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

LAYER 4

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.669	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.660	0.700	0.0	0.0	0.305	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.621	0.557	0.369	0.169	0.100	0.647	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.796	0.415	0.023	0.746	0.687	0.738	0.0
0.0	0.0	0.0	0.433	0.454	0.216	0.305	0.659	0.668	0.0	0.0
0.0	0.0	0.006	0.791	0.153	0.757	0.785	0.207	0.445	0.740	0.372
0.0	0.0	0.403	0.717	0.234	0.0	0.620	0.413	0.282	0.531	0.082
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.393	0.0	0.0	0.062	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.005	0.034	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.260	0.0	0.335	0.421	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.003	0.082	0.717	0.164	0.0	0.039	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.736	0.406	0.728	0.629	0.346	0.654	0.0
0.0	0.0	0.0	0.051	0.768	0.545	0.357	0.354	0.483	0.650	0.0
0.0	0.0	0.298	0.576	0.689	0.415	0.761	0.406	0.642	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.366	0.477	0.126	0.0	0.745	0.593	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

LAYER 5

0.0	0.0	0.842	0.916	0.0	0.0
0.0	0.027	0.964	0.927	0.0	0.0
0.0	0.456	0.940	0.971	0.0	0.0
0.0	0.493	0.994	0.839	0.0	0.0
0.0	0.816	0.971	0.979	0.0	0.0
0.0	0.898	0.993	0.984	0.0	0.0
0.0	0.931	0.986	0.976	0.0	0.0
0.0	0.767	0.952	0.819	0.0	0.0

LAYER 6

0.0	0.0	0.698	0.805	0.0	0.0
0.0	0.0	0.592	0.809	0.0	0.0
0.0	0.0	0.683	0.752	0.0	0.0
0.0	0.0	0.851	0.007	0.0	0.0
0.0	0.040	0.433	0.563	0.0	0.0
0.0	0.628	0.934	0.730	0.0	0.0
0.0	0.524	0.935	0.879	0.0	0.0
0.011	0.440	0.896	0.884	0.0	0.0
0.0	0.0	0.331	0.0	0.0	0.0

LAYER 7

0.0	0.0	0.384	0.0	0.0	0.0
0.0	0.039	0.295	0.0	0.0	0.0
0.0	0.041	0.044	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.069	0.0	0.0	0.0
0.009	0.432	0.900	0.002	0.0	0.0
0.037	0.543	0.239	0.0	0.0	0.0
0.188	0.296	0.877	0.0	0.0	0.0

[illegible]

143

▲ observation point

0 30 km

16°S, 168°E

18°S, 168°E

20°N

x y z

Les flèches repèrent les cinq stations dont les données sont rejetées par la

Figure V.6.

								COUCHE 1	
								0.2 Km	
								$V_0 = 2.2 \text{ Km/s}$	
								BLOC : Km	
								20x20x2	
					14 -15 0.2				
				13 -15 -0.2			12 -11.2 -2.3		
						16 -6.5 6.5			
			12 15 9						
					15 -15 0.7		15 11.3 -0.2		
					6 13 -2.5				
			4 -15 -1.3	4 15 3					
				11 15 6.4		24 15 13	→ Nbre de rais → $\ G\hat{m}_{-dll}\ _{min}$ → $E(\hat{m}, \hat{m}^t)_{min}$		
				23 15 8.8	23 -15 -3.4	42 8 -0.2			
		3 15 -0.1				20 -15 -0.1			

[a]

Figure V.7.

					3 -15 2.4			COUCHE 2 2-4 Km $V_0 = 4.2 \text{ Km/s}$ BLOC: Km 20x20x2		
			1 15 0.6	13 15 0.2		10 15 1.5	12 -5 -3			
					2 15 -0.3	16 -15 3				
			12 15 5.2		8 -15 0.1					
					15 15 0.01		15 15 0.7			
				2 -15 -0.7						
			4 -15 -0.9	4 15 1.4						
				11 9.8 4		24 15 6.6	→ Nbre de rais → $\ G\hat{m}_{-dll}\ _{\min}$ → $E(\hat{m}, \hat{m}^t)_{\min}$			
		2 15 1.1		23 11.7 4.3	23 3.8 -2.4	42 15 1				
		3 -12.4 -1.2		1 15 0.3		20 15 1.5				

7 [b]

COUCHE 3

		3 -3.2 0.3	4-10 Km $V_0 = 5.2 \text{ Km/s}$	
	3 15 0.3	14 -15 1.8	BLOC: Km 15 x 20 x 6	
	4 15 2.5		12 -15 4.5	1 15 -0.1
	13 4.5 2.0	4 15 1	11 15 13.8	
		5 -15 -16.8	4 0.3 7.6	
12 5 13.3	3 15 2.8	10 15 3	1 15 19	5 -15 -8
		6 -15 -6.8	9 -12.8 1.5	15 -15 -6
	2 6.2 -1.8			
4 1.8 -2.1	4 15 8.7	1 -15 -3.3	→ Nbre de rails → $\ G\hat{m} - d\ _1 \text{ min}$ → $E(\hat{m}, \hat{m}^t) \text{ min}$	
	7 -15 -0.6	1 15 4	18 -0.1 0.4	
	5 15 8.3	4 5.3 -4	9 -2 9	
2 10.2 -0.0	22 -15 0.6	33 15 9.6	43 -3.2 4.4	
-1	2 15 10.6	1 15 1.4	21 -0.2 1.4	

COUCHE 4

10-19 Km

$$V_0 = 6.3 \text{ Km/s}$$

BLOC: Km

 $15 \times 10 \times 9$ [illegible]

		11	12
		-15	-8.6
		-4	-0.6
15	1	19	22
	4.4	-9.5	-15
		-6.5	-6.5
15	3	23	17
		-8.5	-7.2
	6.4	-5.6	-4.4
	6	24	9
13		-3.6	-15
	0.2	-0.7	-3.5
	3	10	4
9.6	7		0.1
	2.3	1.8	2.2
	4	67	16
-3.4		3.5	4.3
	-7.5	0.5	1
10		78	50
-13		-5.6	-0.7
	-5.5	-4	-3.5
	6	9	10
10		-7.3	15
	8.6	-4.5	7

COUCHE 5
19_30 Km
 $V_0 = 8.0 \text{ Km/s}$
BLOC: Km
30 x 30 x 11

→ Nbre de rais
→ $\|G\hat{m} - d\|_1 \text{ min}$
→ $E(\hat{m}, \hat{m}^t) \text{ min}$

0 20 Km

7 [e]

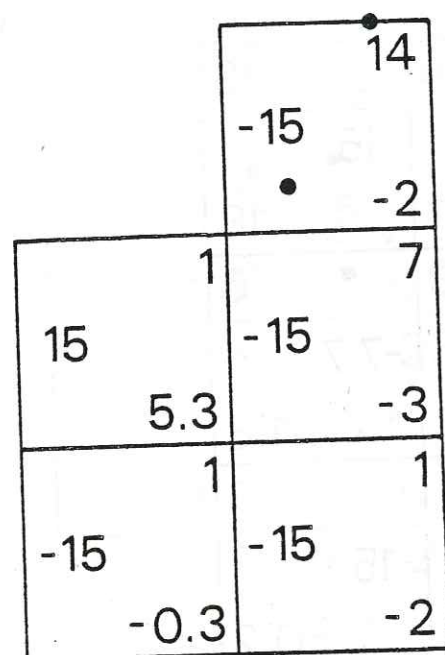
COUCHE 6
30_40 Km
 $V_0 = 8.0 \text{ Km/s}$
BLOC: Km
30 x 30 x 10

		2	18
		-15	-14
		-8.8	-3.6
		6	19
		-15	15
		-2.7	18
		9	6
		-2.8	-7.7
		1.5	1.8
		7	1
		6	-15
		1.5	-0.2
	1	5	2
15		15	4.2
	2	9	-0.1
	6	29	4
-3		9	12
	7.5	7.7	-7
	4	32	18
	15	11	-15
	7.5	3.3	-13.5
	6	8	11
-15		-15	20
	0.3	-1.1	13
		8.8	-7
		-2.5	
		5	
		-15	
		2.8	

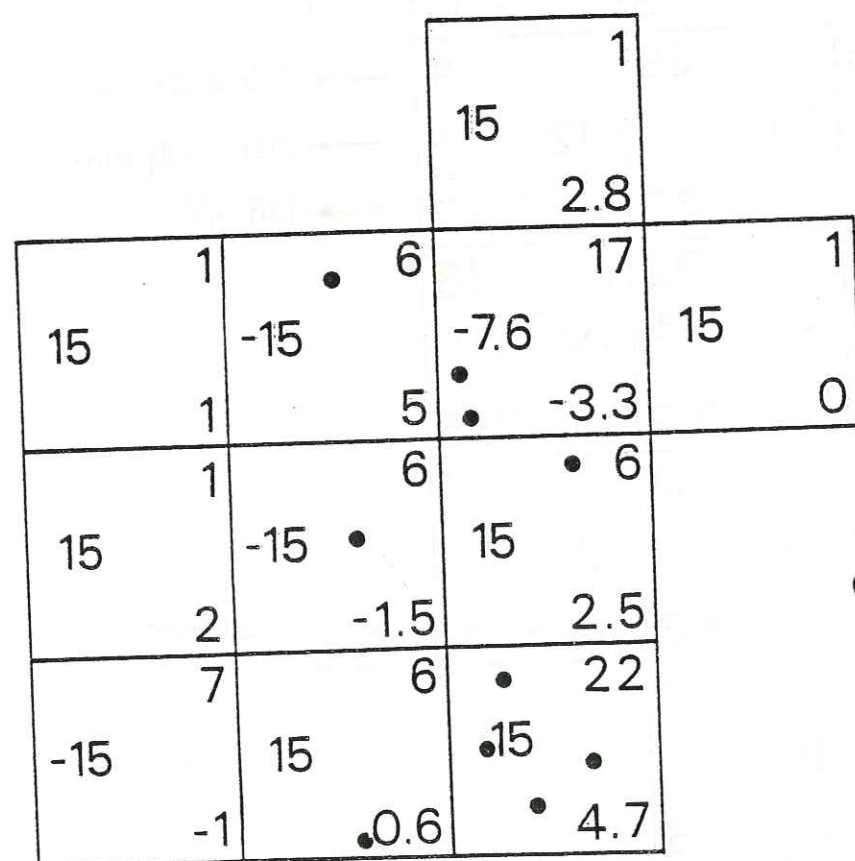
→ Nbre de rais
→ $\|G\hat{m} - d\|_1 \text{ min}$
→ $E(\hat{m}, \hat{m}^t) \text{ min}$

0 20 Km

7 [f]



COUCHE 7
 40_68 Km
 $V_0 = 8.3$ Km/s
 BLOC: Km
 30x30x28



→ Nbre de rais
 → $\|G\hat{m} - d\|_1$ min
 → $E(\hat{m}, \hat{m}^t)$ min

0 20 Km

7 [g]

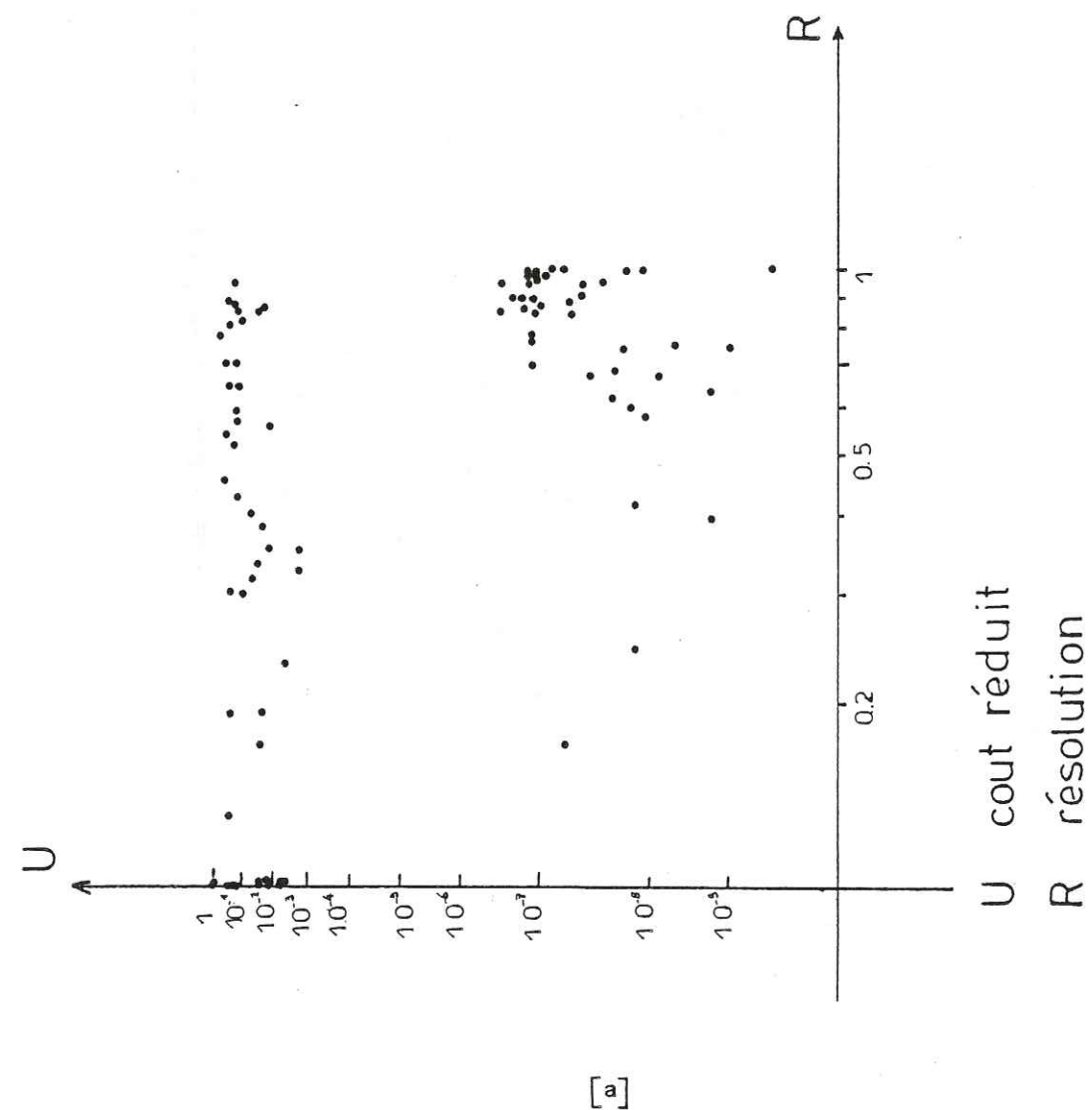
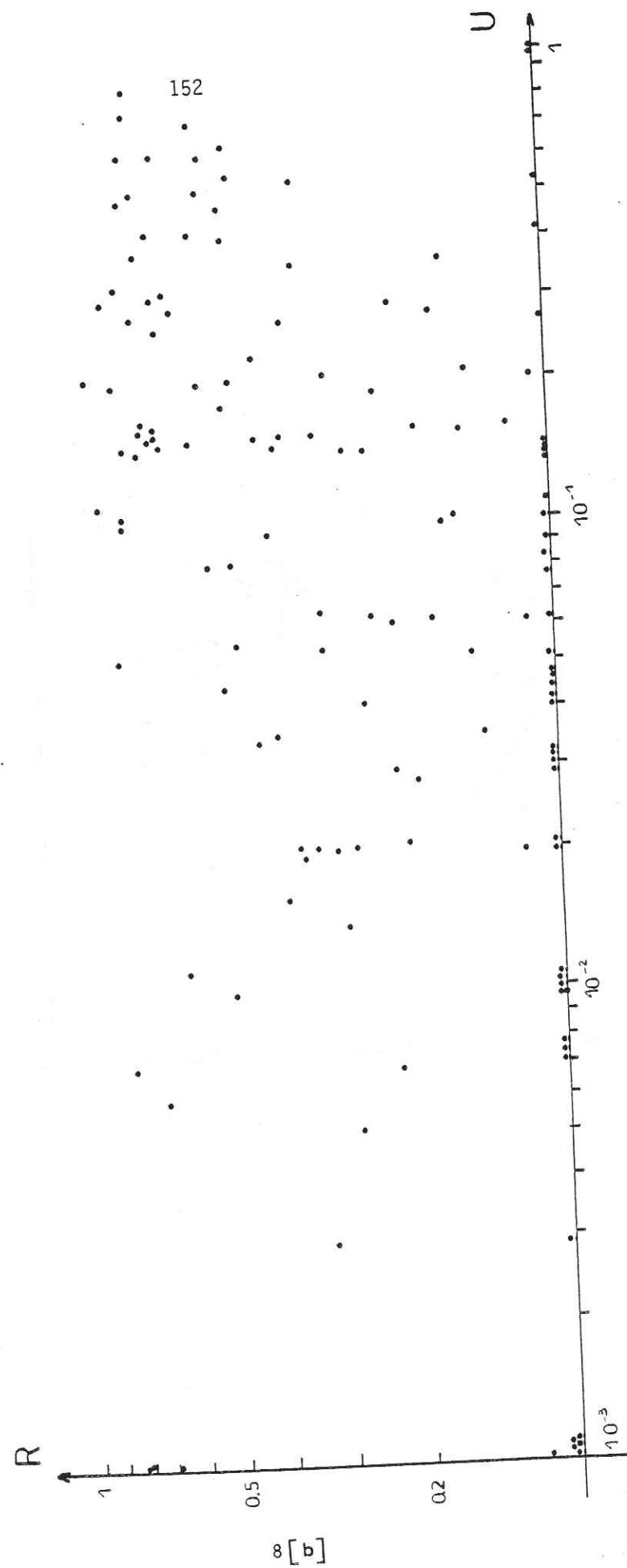
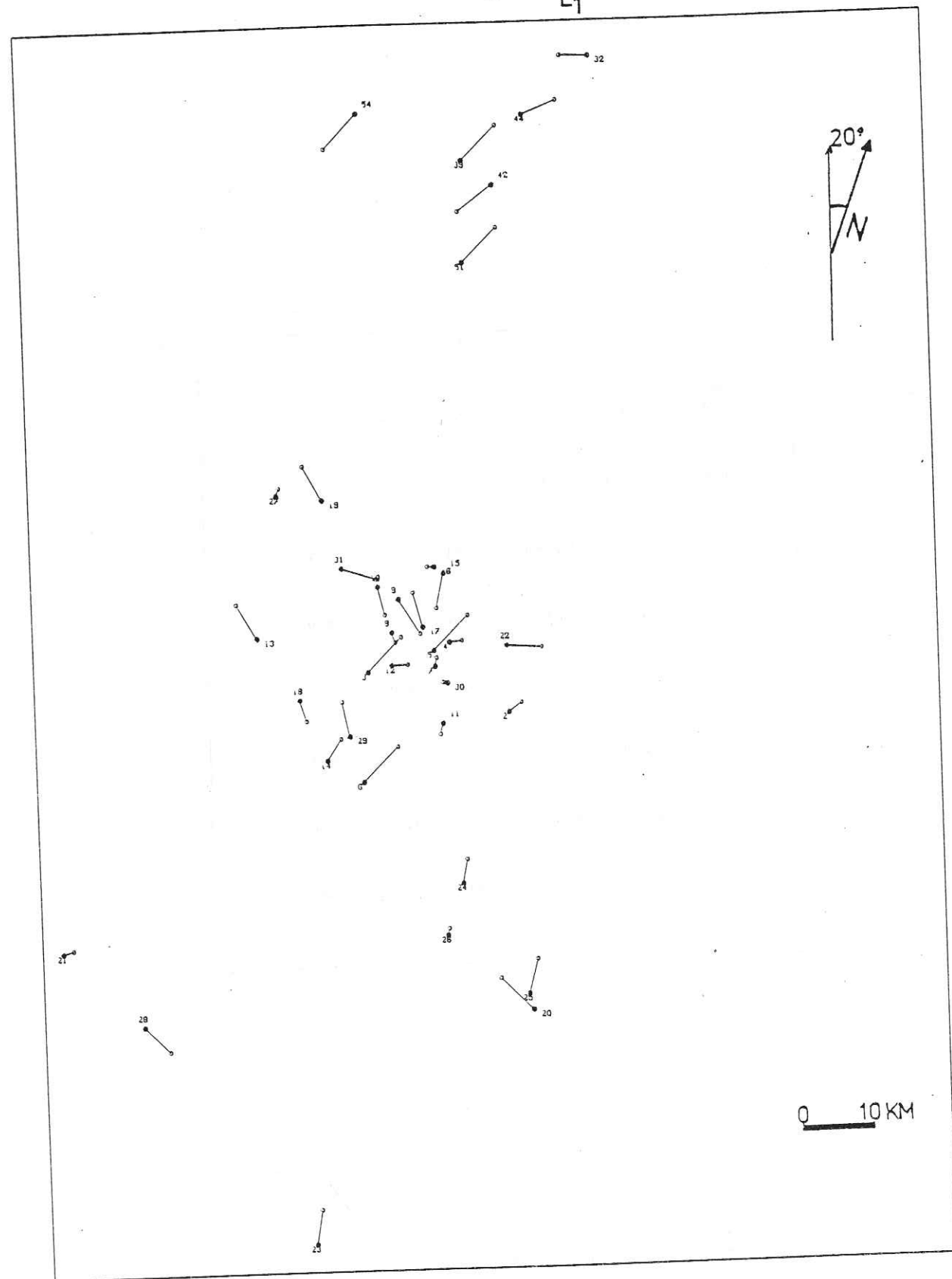


Figure V.8.



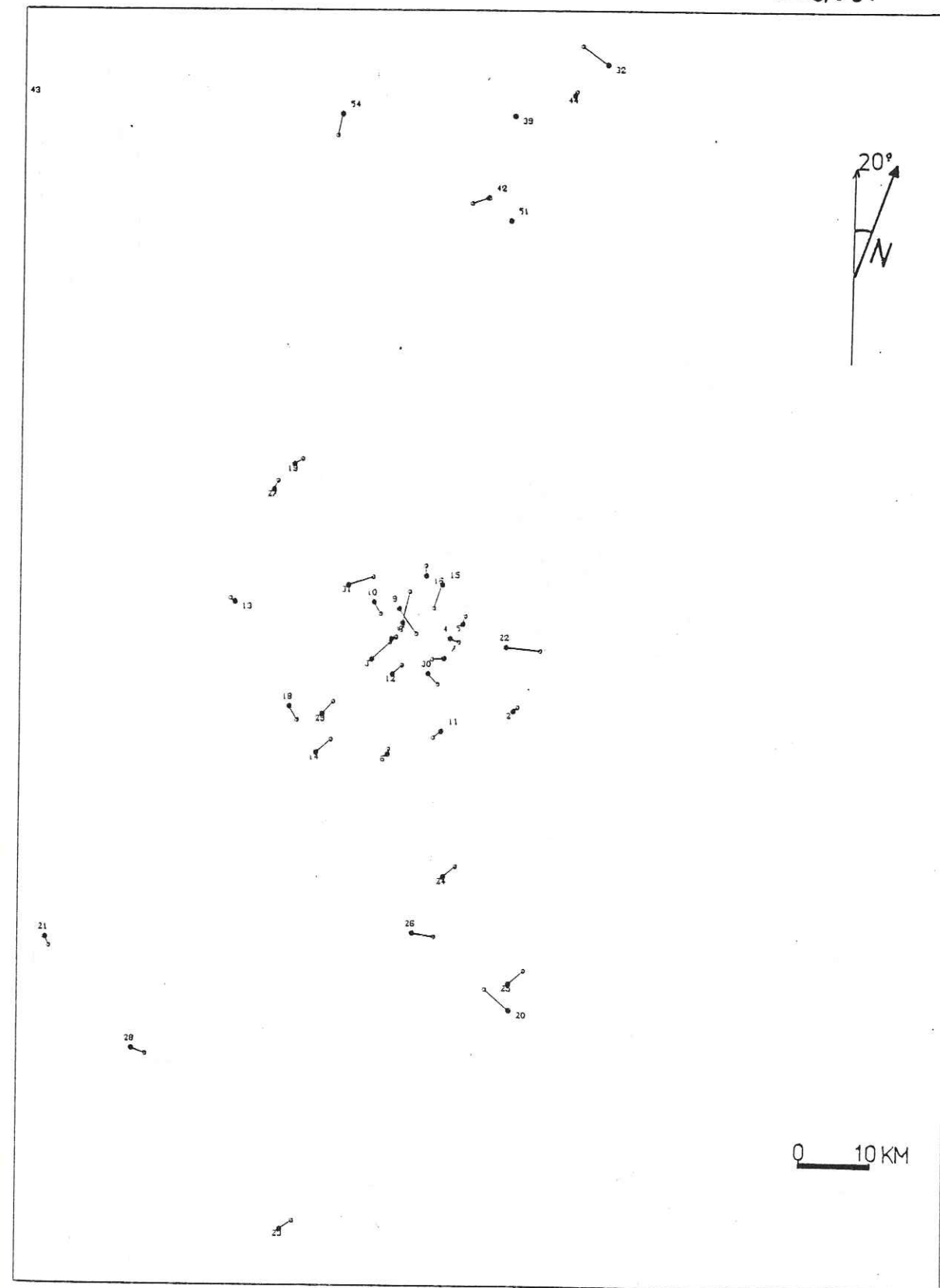
LAYER 5					
0.0	0.0	0.842	0.916	0.0	0.0
0.0	0.027	0.966	0.927	0.0	0.0
0.0	0.456	0.980	0.971	0.0	0.0
0.0	0.693	0.994	0.839	0.0	0.0
0.0	0.616	0.971	0.979	0.0	0.0
0.0	0.898	0.993	0.984	0.0	0.0
0.0	0.931	0.986	0.976	0.0	0.0
0.0	0.767	0.952	0.819	0.0	0.0

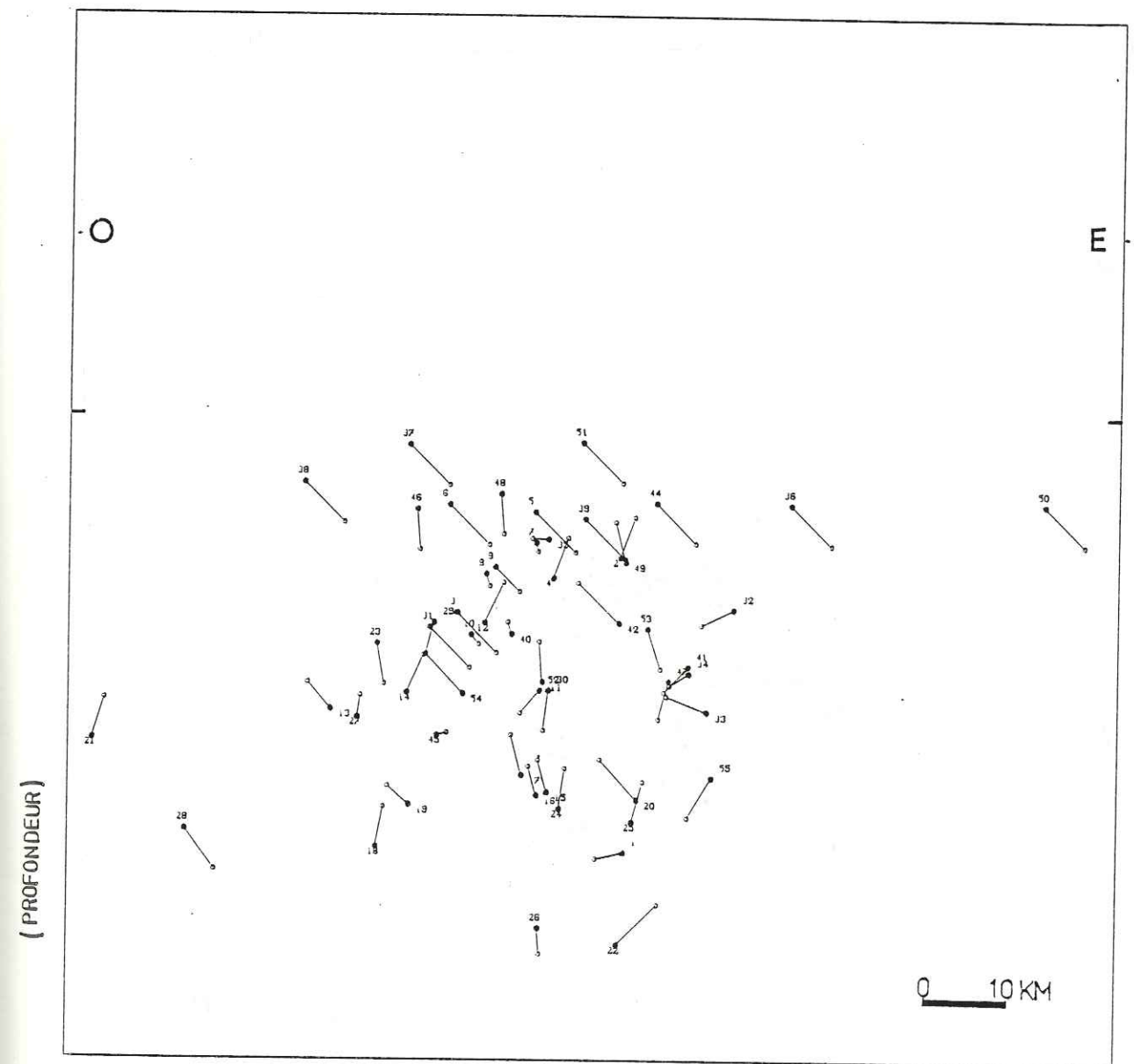
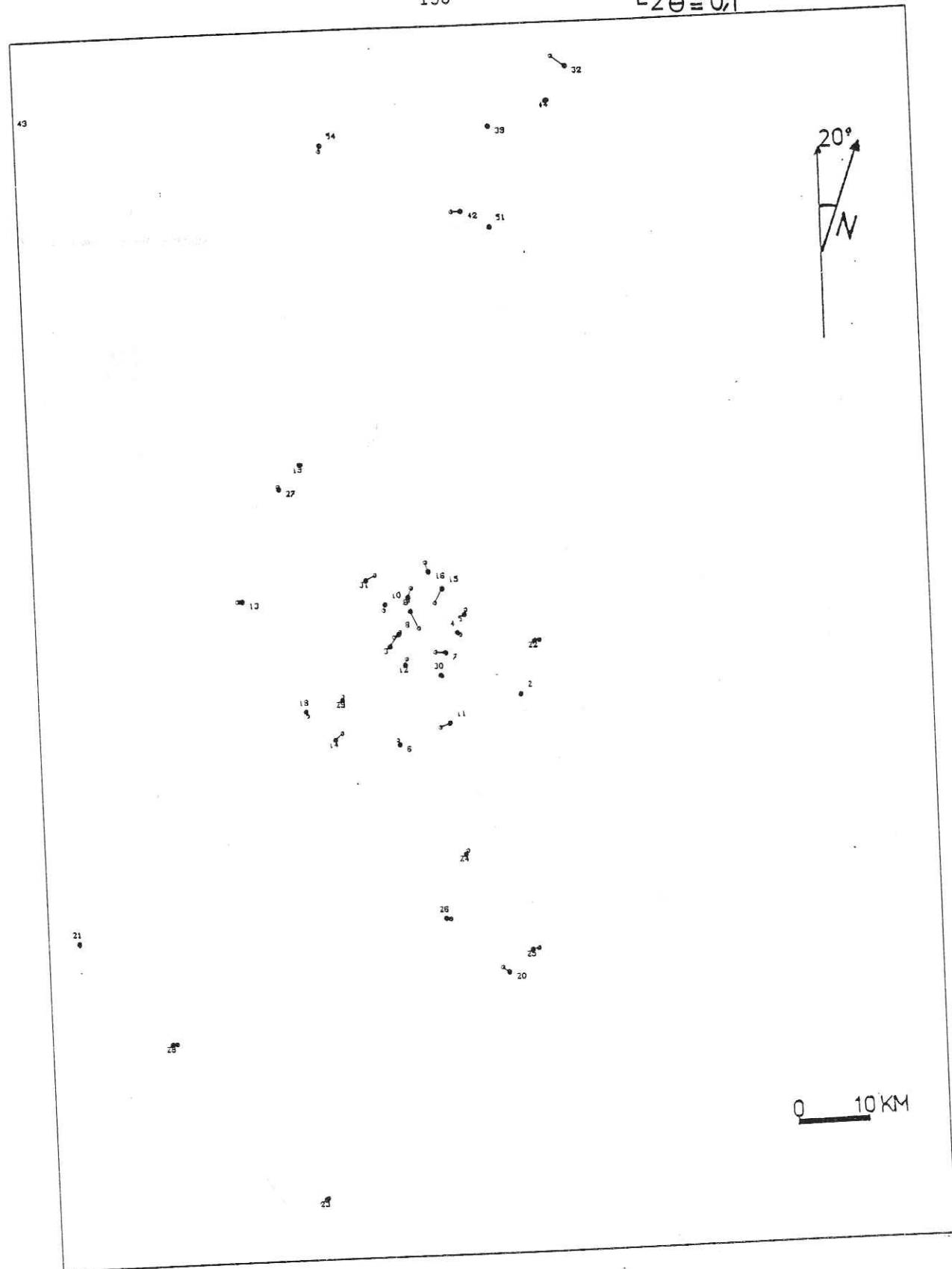
Figure V.9.

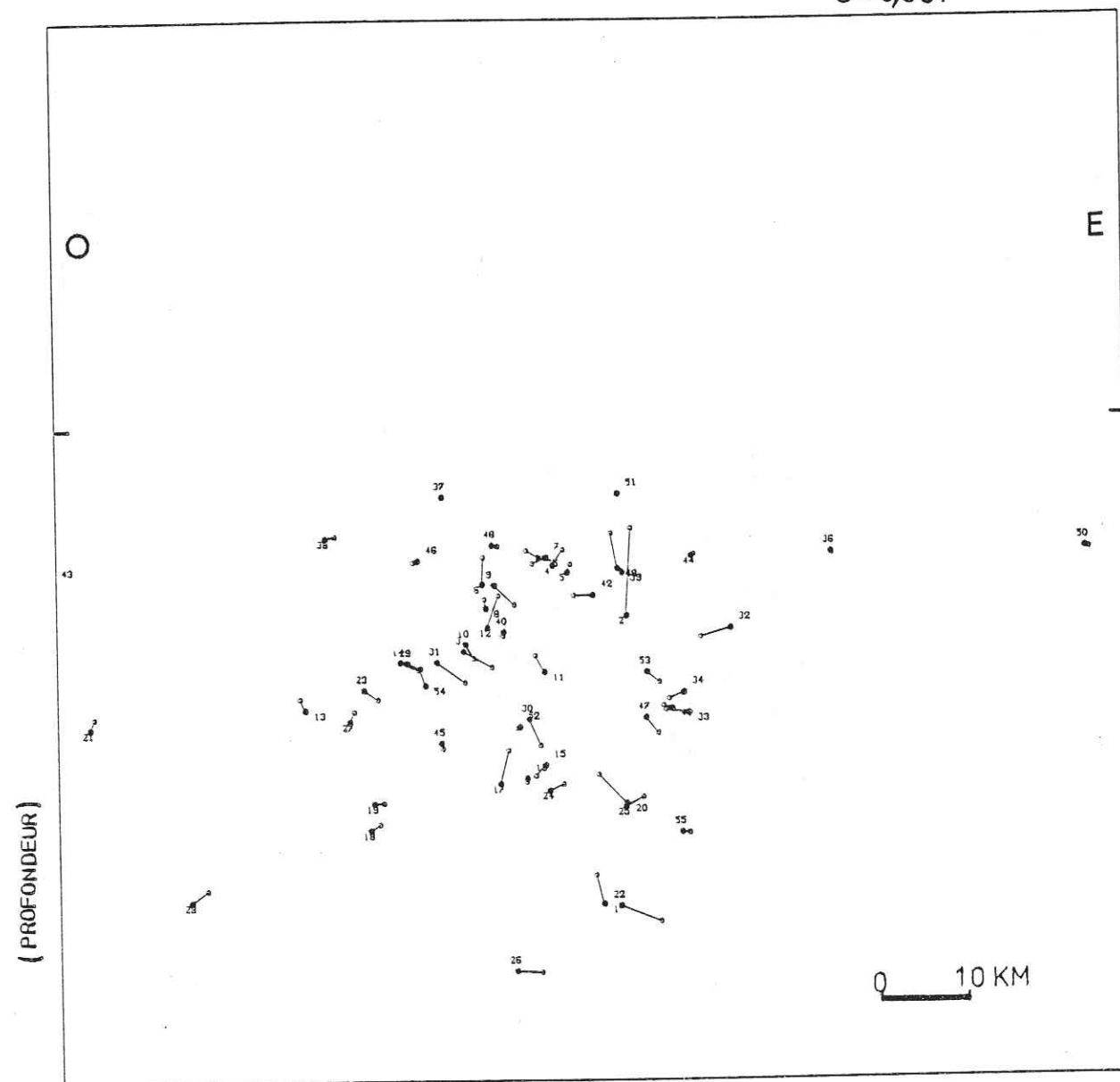
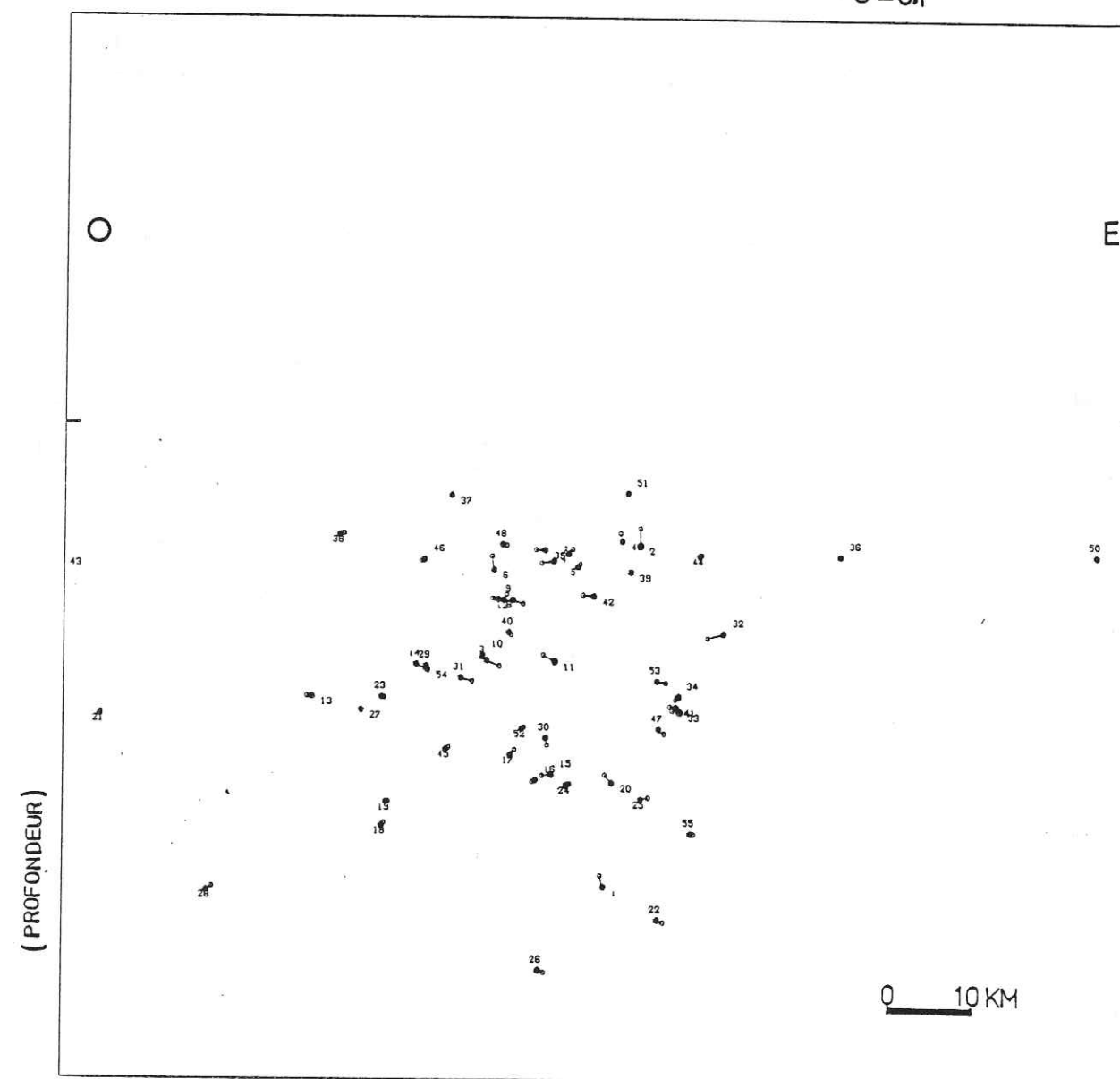


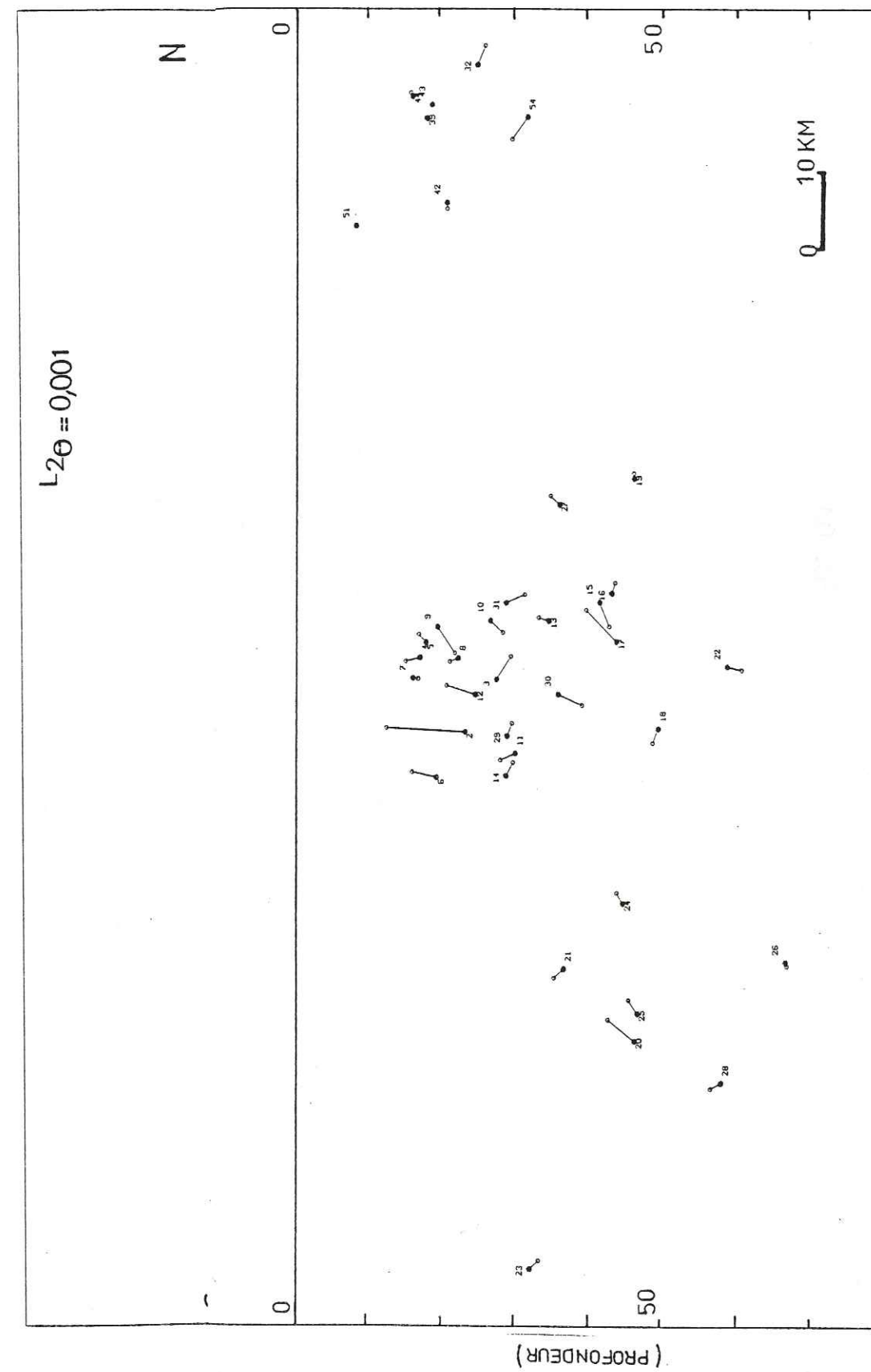
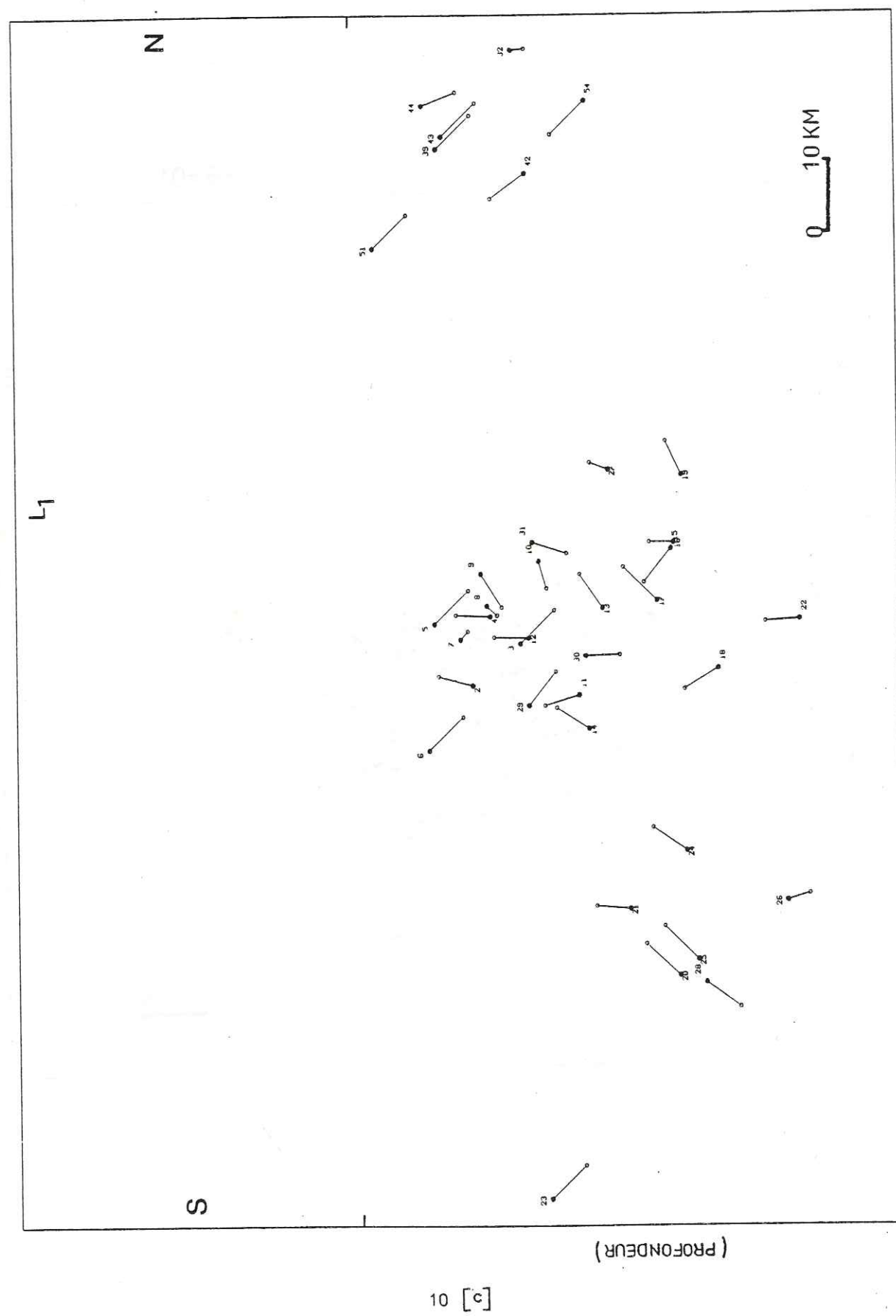
[a]

Figure V.10.





$L_2\theta=0,001$  $L_2\theta=0,1$ 



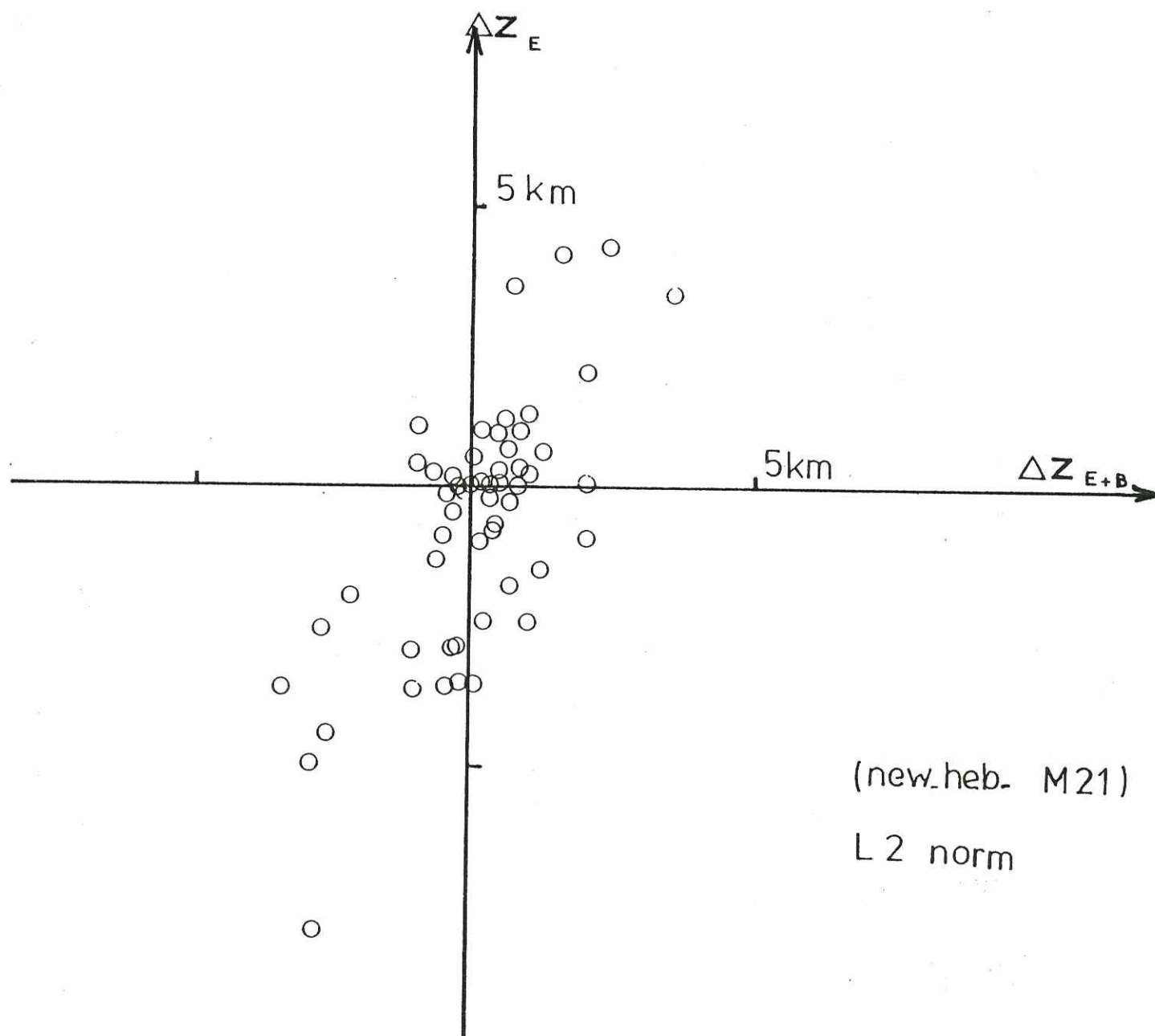
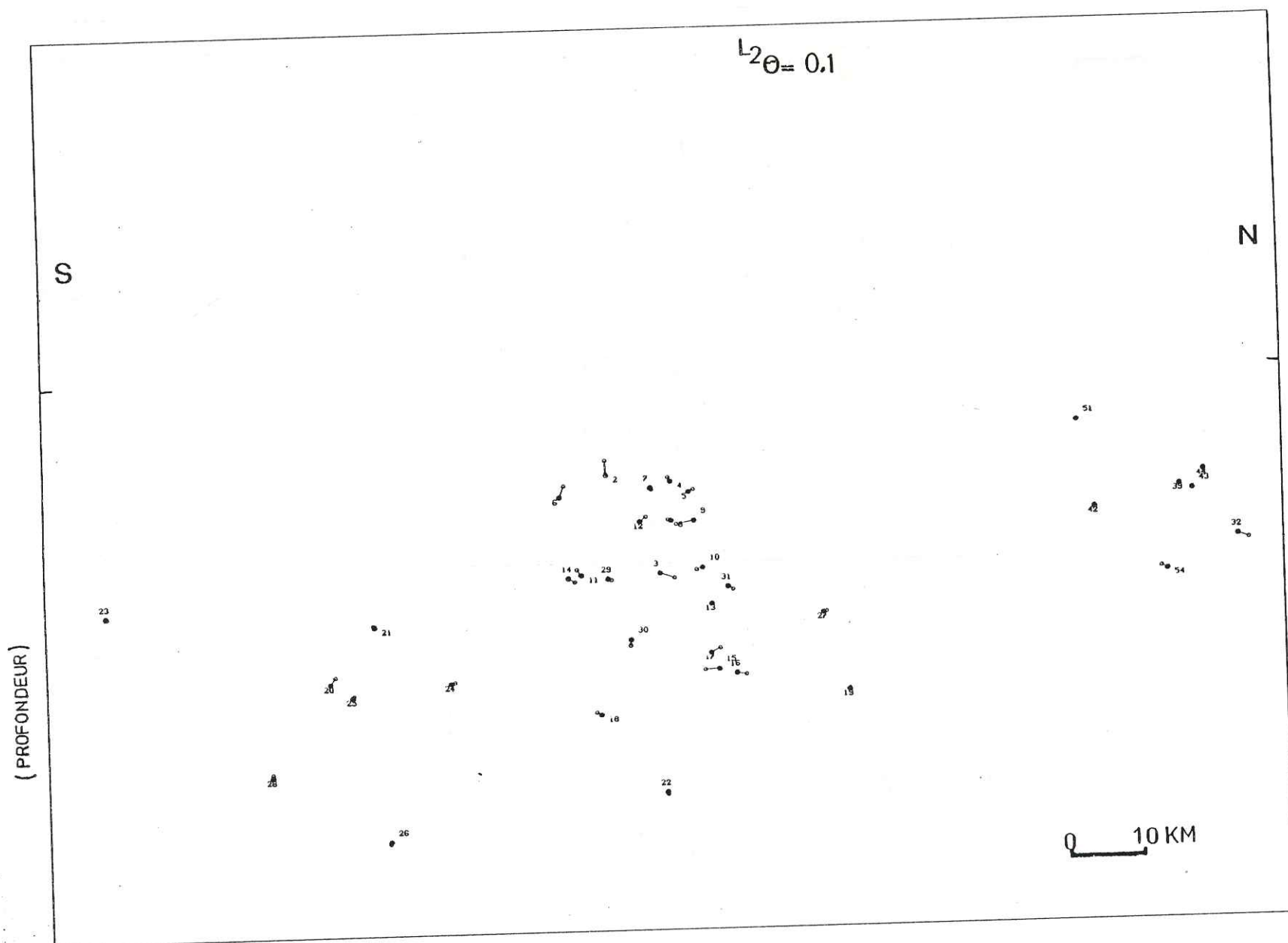


Figure V.11.

SOLUTION FOR P-VELOCITY MODEL V seal

LAYER	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420	1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430	1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440	1441	1442	1443	1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451	1452	1453	1454	1455	1456	1457	1458	1459	1460	1461	1462	1463	1464	1465	1466	1467	1468	1469	1470	1471	1472	1473	1474	1475	1476	1477	1478	1479	1480	1481	1482	1483	1484	1485	1486	1
-------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	---

LAYER 5	0.0	0.0	-5.417	-1.778	0.0	0.0
0.0	4.025	-2.217	-2.533	0.0	0.0	
0.0	6.711	-5.417	-1.331	0.0	0.0	
0.0	11.099	-0.271	8.609	0.0	0.0	
0.0	-1.766	3.242	1.868	0.0	0.0	
0.0	-7.218	0.381	2.287	0.0	0.0	
0.0	-1.021	-0.750	0.728	0.0	0.0	
0.0	9.392	-5.314	9.549	0.0	0.0	
LAYER 6	0.0	0.0	-17.586	-4.670	0.0	0.0
0.0	0.0	-10.288	12.478	0.0	0.0	
0.0	0.0	11.559	1.757	0.0	0.0	
0.0	0.0	8.526	-2.428	0.0	0.0	
0.0	0.974	-8.099	-6.013	0.0	0.0	
0.0	11.812	-2.872	-10.192	0.0	0.0	
0.0	2.428	2.111	-4.389	0.0	0.0	
0.073	-4.226	7.196	-12.826	0.0	0.0	
0.0	0.0	-7.882	0.0	0.0	0.0	
LAYER 7	0.0	0.0	-5.218	0.0	0.0	0.0
0.0	4.841	-4.117	0.0	0.0	0.0	
0.0	0.479	-4.231	0.0	0.0	0.0	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
0.0	0.0	7.261	0.0	0.0	0.0	
0.071	-0.147	-2.027	-0.139	0.0	0.0	
0.02	-11.209	1.831	0.0	0.0	0.0	
0.009	-5.460	4.971	0.0	0.0	0.0	

LAYER 5	0.0	0.0	-4.132	-0.672	0.0	0.0
0.0	4.448	-6.504	-6.437	0.0	0.0	
0.0	6.999	-5.636	-4.475	0.0	0.0	
0.0	0.238	-0.764	-3.546	0.0	0.0	
0.0	2.370	1.775	2.272	0.0	0.0	
0.0	-7.518	0.555	1.041	0.0	0.0	
0.0	-5.452	-3.921	-3.562	0.0	0.0	
0.0	8.621	-4.560	6.911	0.0	0.0	
LAYER 6	0.0	0.0	-8.822	-3.677	0.0	0.0
0.0	0.0	-2.583	18.183	0.0	0.0	
0.0	0.0	1.556	1.796	0.0	0.0	
0.0	0.0	1.593	-0.267	0.0	0.0	
0.0	2.150	9.105	-0.165	0.0	0.0	
0.0	7.513	-7.723	-6.924	0.0	0.0	
0.0	7.442	3.327	-13.592	0.0	0.0	
-0.333	-1.131	8.830	-2.607	0.0	0.0	
0.0	0.0	-2.809	0.0	0.0	0.0	
LAYER 7	0.0	0.0	-1.942	0.0	0.0	0.0
0.0	5.349	-2.936	0.0	0.0	0.0	
0.0	-0.337	-1.985	0.0	0.0	0.0	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
0.0	0.0	2.885	0.0	0.0	0.0	
1.040	5.140	-3.345	0.094	0.0	0.0	
2.040	-1.459	2.485	0.0	0.0	0.0	
-0.023	0.642	4.726	0.0	0.0	0.0	

Tableau V.1.

NOV78JRG

LOCAL EVENT ONLY RAYS GETTING UP NOUVELLES HEBRIDES -- TOUT--

LATITUDE LONGITUDE THA INCL VO JPWT IRES IPUNCH IPRINT THETA RESLMIN NINT
 175 0.00 168E 0.0020 0.0 5.00 2 0 0 1 1. 0.100 1 10

DAMPING PARAMETERS
 V 1.00000T 1.00000H 0.00100Z 0.00100
 INVERSE EPICENTRE *BLOC-VITESSE 55
 VELOCITY THICKNESS #NORTH LENGTH #EAST LENGTH COORDINATE DISPLACEMENT
 1 2.20 2.00 11 20.00 10 20.00 0.000 -20.000
 2 4.20 2.00 11 20.00 10 20.00 0.000 -20.000
 3 5.20 6.00 16 15.00 6 20.00 0.000 -20.000
 4 6.30 9.00 16 15.00 12 10.00 0.000 -20.000
 5 8.00 11.00 8 30.00 6 30.00 0.000 -10.000
 6 8.00 10.00 9 30.00 6 30.00 0.000 -15.000
 7 8.30 28.00 8 30.00 6 30.00 12.000 5.000

STA LATITUDE LONGITUDE ELEVATION RELATIVE COORDINATES

10BS5	16548.67	167E44.60	0.	28.94	-18.55
20BS4	16551.00	167E25.00	0.	36.73	-52.71
3 AMB	16514.75	167E55.40	0.	81.13	20.82
4 EPI	16541.70	168E 6.97	0.	27.45	23.16
5 SMT	16511.25	167E30.75	0.	102.14	-18.24
6 LRP	16528.32	167E49.18	0.	61.41	1.88
7 SWB	16530.52	167E25.22	0.	72.09	-39.54
8 NGA	17527.12	168E20.42	0.	-59.33	16.83
9 MBV	17539.52	168E18.63	0.	-79.70	6.01
10 RTV	17547.55	168E25.48	0.	-97.75	12.29
11 DVP	17543.52	168E11.22	0.	-82.13	-8.81
12 PVC	17544.40	168E18.72	0.	-88.20	3.07
130BS1	17558.00	167E43.50	0.	-90.48	-63.90
140BS3	17528.10	167E40.70	0.	-37.00	-49.78
150BS6	17519.55	167E53.82	0.	-29.76	-22.47
160BS7	17536.00	167E56.50	0.	-60.21	-28.50
170BS8	17552.00	167E57.50	0.	-88.52	-36.91

STN 5DELAY = 0.597
 STN 7DELAY = 0.363
 STN 3DELAY = -0.051
 STN 6DELAY = -0.585
 STN 1DELAY = -0.155
 STN 2DELAY = -0.485
 STN 4DELAY = 0.307
 STN 15DELAY = 0.032
 STN 14DELAY = -0.180
 1 0 1 9 -0.02 111.47 -14.72 54.89
 STN 16DELAY = -0.244
 STN 11DELAY = 0.644
 STN 15DELAY = 0.313
 STN 12DELAY = -0.351
 STN 14DELAY = -0.193
 STN 10DELAY = -0.446
 2 0 0 9 -0.03 -58.28 -10.10 12.39
 STN 11DELAY = -0.332
 STN 17DELAY = -0.665
 STN 8DELAY = -0.035
 STN 9DELAY = 0.035
 STN 10DELAY = 0.323
 STN 2DELAY = 0.028
 3 0 14 6 -0.11 -48.49 -27.09 29.36
 STN 16DELAY = 0.062
 STN 15DELAY = -0.314
 STN 14DELAY = -0.117
 STN 11DELAY = -0.203
 STN 8DELAY = 0.144
 STN 9DELAY = 0.062
 4 0 8 10 -0.04 -49.18 -18.33 15.02
 STN 15DELAY = 0.079
 STN 16DELAY = -0.152
 STN 14DELAY = 0.049
 5 0 10 6 -0.00 -45.55 -17.43 16.82
 STN 16DELAY = 0.380
 STN 11DELAY = -0.061
 STN 14DELAY = 0.147
 6 0 17 6 0.08 -64.31 -28.05 15.91
 STN 16DELAY = -0.064
 STN 15DELAY = -0.176
 STN 14DELAY = 0.230
 STN 11DELAY = -0.153
 7 0 22 7 -0.02 -51.62 -22.04 16.68
 STN 11DELAY = -0.210
 STN 17DELAY = 0.107
 STN 9DELAY = 0.045
 STN 8DELAY = -0.089
 STN 12DELAY = -0.077
 STN 10DELAY = 0.170
 8 0 17 6 -0.01 -49.23 -27.95 21.04
 STN 16DELAY = -0.128
 STN 17DELAY = 0.034
 STN 9DELAY = 0.564
 STN 12DELAY = -0.423
 STN 13DELAY = -0.203
 STN 1DELAY = -0.615
 9 0 0 6 -0.13 -48.07 -24.29 21.71
 STN 11DELAY = -0.271

STN 17DELAY = 0.004
 STN 8DELAY = -0.093
 STN 9DELAY = 0.078
 STN 12DELAY = -0.159
 STN 10DELAY = 0.309
 10 0 16 6 -0.02 -45.25 -29.32 28.27
 STN 16DELAY = -0.170
 STN 11DELAY = 0.130
 STN 17DELAY = 0.153
 STN 9DELAY = -0.051
 STN 12DELAY = 0.017
 STN 8DELAY = -0.551
 STN 10DELAY = -0.046
 STN 1DELAY = 0.194
 11 0 4 8 -0.04 -62.67 -21.78 27.93
 STN 11DELAY = -0.146
 STN 17DELAY = -0.160
 STN 9DELAY = -0.035
 STN 8DELAY = 0.087
 STN 12DELAY = -0.140
 STN 10DELAY = 0.010
 STN 4DELAY = 0.212
 12 0 22 7 -0.02 -52.50 -26.26 20.59
 STN 17DELAY = 0.296
 STN 11DELAY = -0.432
 STN 9DELAY = -0.153
 STN 8DELAY = 0.013
 STN 10DELAY = 0.202
 13 0 19 5 -0.01 -43.18 -50.48 33.11
 STN 17DELAY = -0.318
 STN 11DELAY = -0.237
 STN 9DELAY = 0.110
 STN 8DELAY = 0.088
 STN 10DELAY = 0.303
 14 0 5 5 -0.01 -62.98 -36.14 29.65
 STN 16DELAY = 0.092
 STN 11DELAY = -0.188
 STN 8DELAY = -0.334
 STN 9DELAY = 0.224
 STN 17DELAY = -0.042
 STN 1DELAY = -0.188
 15 0 15 6 -0.07 -44.41 -21.85 42.67
 STN 8DELAY = -0.181
 STN 11DELAY = -0.375
 STN 9DELAY = 0.056
 STN 17DELAY = -0.195
 STN 12DELAY = -0.254
 STN 1DELAY = 0.603
 STN 10DELAY = 0.438
 STN 2DELAY = -0.317
 16 0 10 8 -0.03 -38.45 -23.01 43.44
 STN 11DELAY = -0.627
 STN 8DELAY = 0.346
 STN 17DELAY = -0.009
 STN 9DELAY = -0.132
 STN 10DELAY = 0.132
 17 0 5 5 -0.06 -42.13 -25.22 39.53
 STN 16DELAY = -0.000
 STN 13DELAY = -0.006
 STN 9DELAY = 0.191

STN 12DELAY = -0.035
 STN 8DELAY = -0.107
 18 0 12 5 0.01 -60.29 -41.01 48.56
 STN 17DELAY = 0.078
 STN 11DELAY = -0.488
 STN 8DELAY = 0.207
 STN 9DELAY = -0.098
 STN 10DELAY = 0.219
 19 0 22 5 -0.02 -23.48 -40.52 45.96
 STN 11DELAY = 0.478
 STN 12DELAY = -0.113
 STN 10DELAY = 0.143
 STN 9DELAY = 0.281
 STN 8DELAY = 0.002
 20 0 0 6 0.13 -98.08 -14.27 42.57
 STN 17DELAY = 0.012
 STN 16DELAY = -0.041
 STN 11DELAY = 0.023
 STN 9DELAY = 0.133
 STN 10DELAY = -0.028
 STN 8DELAY = -0.069
 21 0 5 6 0.00 -92.40 -75.55 35.23
 STN 8DELAY = -0.067
 STN 9DELAY = 0.246
 STN 12DELAY = -0.147
 STN 4DELAY = 0.247
 STN 7DELAY = -0.235
 22 0 13 5 0.01 -50.35 -7.00 60.58
 STN 17DELAY = -0.433
 STN 12DELAY = 0.074
 STN 9DELAY = 0.112
 STN 16DELAY = 0.234
 STN 2DELAY = 0.050
 23 0 18 5 0.01 -131.00 -41.03 33.24
 STN 11DELAY = -0.105
 STN 17DELAY = -0.274
 STN 12DELAY = -0.167
 STN 9DELAY = 0.217
 STN 10DELAY = 0.272
 STN 8DELAY = -0.002
 24 0 1 6 -0.01 -80.78 -18.54 43.68
 STN 11DELAY = 0.060
 STN 12DELAY = 0.031
 STN 10DELAY = 0.151
 STN 9DELAY = 0.329
 STN 17DELAY = -0.368
 STN 8DELAY = -0.126
 25 0 23 6 0.01 -95.43 -8.91 45.32
 STN 11DELAY = -0.246
 STN 17DELAY = -0.256
 STN 9DELAY = 0.241
 STN 10DELAY = 0.258
 STN 8DELAY = -0.013
 26 0 0 5 -0.00 -90.73 -21.46 66.79
 STN 17DELAY = 0.148
 STN 11DELAY = -0.375
 STN 8DELAY = 0.042
 STN 9DELAY = -0.118
 STN 10DELAY = 0.207
 27 0 16 5 -0.02 -26.59 -43.96 34.72

STN 13DELAY = 0.210
 STN 17DELAY = -0.163
 STN 12DELAY = -0.143
 STN 9DELAY = 0.071
 STN 8DELAY = -0.460
 STN 2DELAY = -0.644
 STN 4DELAY = 0.685
 28 0 13 8 -0.06 -107.51 -61.96 56.46
 STN 16DELAY = -0.380
 STN 15DELAY = 0.530
 STN 11DELAY = 0.130
 STN 9DELAY = -0.113
 STN 10DELAY = 0.241
 29 0 22 6 0.07 -57.66 -35.84 29.49
 STN 11DELAY = -0.509
 STN 9DELAY = -0.056
 STN 17DELAY = -0.071
 STN 8DELAY = -0.131
 STN 10DELAY = 0.394
 30 0 5 5 -0.07 -55.14 -21.27 38.97
 STN 11DELAY = -0.222
 STN 17DELAY = -0.310
 STN 8DELAY = 0.150
 STN 9DELAY = 0.098
 STN 12DELAY = -0.258
 STN 10DELAY = 0.453
 31 0 16 6 -0.01 -40.07 -30.40 31.19
 STN 1DELAY = -0.042
 STN 4DELAY = -0.367
 STN 6DELAY = -0.357
 STN 3DELAY = 0.433
 STN 15DELAY = -0.209
 32 0 13 5 -0.11 34.97 -1.77 25.75
 STN 5DELAY = 0.055
 STN 3DELAY = -0.217
 STN 6DELAY = -0.245
 STN 1DELAY = -0.298
 STN 4DELAY = 0.381
 33 0 17 5 -0.06 88.43 -6.05 34.67
 STN 5DELAY = -0.098
 STN 3DELAY = -0.087
 STN 6DELAY = -0.376
 STN 1DELAY = -0.148
 STN 4DELAY = 0.489
 34 0 6 5 -0.04 90.27 -5.67 33.30
 STN 1DELAY = -0.061
 STN 6DELAY = 0.055
 STN 7DELAY = 0.162
 STN 2DELAY = -0.099
 35 0 10 6 0.01 49.85 -22.77 15.10
 STN 3DELAY = 0.034
 STN 5DELAY = -0.087
 36 0 15 6 -0.01 110.57 14.25 15.70
 STN 7DELAY = -0.029
 37 0 14 6 -0.00 81.27 -33.06 8.49
 STN 5DELAY = 0.223
 STN 7DELAY = -0.116
 38 0 17 4 0.03 104.83 -46.11 13.21
 STN 1DELAY = 0.127
 39 0 4 5 0.03 25.06 -11.32 17.63

COMPUTATION OF THE BEST APPROXIMATION OF RHOB IN NORM 1

ANOMALY SHIFT G+RHO-ANOM

1	-0.214e-05	2	-0.143e-04	3	0.373e-04	4	-0.199e-04
5	0.270e-04	6	0.542e-01	7	0.291e-04	8	-0.639e-04
9	0.211e-04	10	-0.950e-06	11	-0.876e+00	12	-0.113e-04
13	-0.389e-05	14	0.402e-05	15	-0.132e-05	16	-0.148e+00
17	-0.299e-04	18	0.498e+00	19	0.206e-04	20	0.286e-04
21	-0.148e-04	22	0.187e-05	23	-0.204e-05	24	0.561e-04
25	0.493e-04	26	0.689e-04	27	0.592e-04	28	-0.109e+01
29	-0.167e+01	30	-0.967e+00	31	-0.181e+01	32	-0.916e+00
33	-0.770e+00	34	0.135e-04	35	-0.105e-08	36	-0.273e-05
37	0.423e-05	38	-0.722e-04	39	0.261e-04	40	0.421e-04
41	-0.519e-05	42	-0.123e-04	43	0.279e-05	44	0.445e-05
45	0.774e-05	46	-0.382e+00	47	0.490e+00	48	0.177e-04
49	-0.327e-04	50	-0.235e-04	51	0.311e-05	52	-0.232e-06
53	-0.165e+00	54	-0.139e-04	55	-0.303e-05	56	0.124e-03
57	-0.118e+00	58	-0.137e-04	59	0.340e-04	60	-0.120e+00
61	0.740e-01	62	0.349e+00	63	0.187e-05	64	-0.155e-01
65	0.227e-04	66	0.123e+00	67	-0.607e-04	68	-0.102e-03
69	0.761e-01	70	0.884e-05	71	-0.562e-05	72	0.859e-01
73	-0.129e-03	74	-0.356e-04	75	0.142e-03	76	0.116e-03
77	0.304e-01	78	-0.860e-05	79	0.585e-04	80	0.336e-05
81	-0.418e-04	82	-0.194e-03	83	0.112e+00	84	-0.206e+00
85	-0.413e-04	86	-0.369e-04	87	-0.231e-04	88	-0.311e-03
89	-0.120e+00	90	0.160e-04	91	0.107e+00	92	-0.184e-04
93	-0.249e-03	94	0.565e-04	95	0.404e+00	96	-0.761e-01
97	-0.946e-04	98	-0.204e-03	99	-0.182e-03	100	0.122e-04
101	-0.256e-04	102	-0.141e+00	103	-0.534e-04	104	0.257e-04
105	-0.110e-03	106	0.355e+00	107	-0.956e-05	108	0.664e-01
109	0.485e-04	110	-0.892e-04	111	0.371e-01	112	0.126e-03
113	0.676e-01	114	-0.143e-03	115	-0.829e-04	116	0.662e-06
117	-0.683e-04	118	-0.129e-03	119	0.191e-04	120	-0.501e-04
121	-0.450e-04	122	0.180e-03	123	0.411e+00	124	-0.145e-03
125	-0.442e-04	126	-0.127e-04	127	0.684e-04	128	0.538e-05
129	0.289e-04	130	0.341e-05	131	-0.659e-04	132	0.173e-03
133	0.189e+00	134	-0.233e-03	135	-0.378e-04	136	-0.106e-03
137	-0.252e-03	138	-0.245e-01	139	0.301e-03	140	0.574e-04
141	0.277e-03	142	-0.127e-03	143	0.155e+00	144	0.112e-03
145	-0.152e-01	146	-0.609e-04	147	-0.968e-04	148	0.942e-04
149	-0.732e-04	150	0.509e-04	151	0.155e-03	152	0.281e-03
153	-0.784e-04	154	-0.404e-05	155	0.280e-03	156	-0.253e-01
157	-0.197e-03	158	0.327e-05	159	0.279e-03	160	0.226e-03
161	-0.436e-04	162	-0.549e+00	163	-0.156e-03	164	0.425e-01
165	0.252e+00	166	0.166e-04	167	0.223e-03	168	-0.203e-03
169	-0.587e-01	170	-0.578e-01	171	0.253e-03	172	0.135e-03
173	0.282e-03	174	0.176e+00	175	0.344e-03	176	0.998e-04
177	0.198e-03	178	0.948e-04	179	-0.110e-05	180	-0.200e-05
181	0.155e-05	182	0.415e-02	183	-0.951e-02	184	0.260e+00
185	-0.663e-04	186	-0.198e-05	187	-0.643e-05	188	0.129e-03
189	0.192e-04	190	-0.501e-04	191	0.215e-05	192	0.617e-06
193	-0.163e-04	194	0.400e-04	195	-0.106e+01	196	-0.128e+01
197	-0.219e+01	198	-0.595e+00	199	-0.165e+01	200	-0.123e+01
201	0.143e-03	202	0.209e-04	203	-0.132e-03	204	0.450e-04
205	-0.121e-03	206	-0.385e-04	207	0.111e-03	208	-0.657e-05
209	-0.181e-05	210	0.192e-05	211	0.120e-03	212	-0.345e-04
213	-0.169e-03	214	-0.393e-04	215	-0.183e-03	216	-0.101e-03
217	-0.949e-04	218	-0.512e-01	219	0.299e-04	220	-0.816e-04
221	-0.826e-04	222	-0.820e-04	223	-0.994e-04	224	0.105e-05
225	0.161e-05	226	0.286e-06	227	-0.112e-05	228	0.204e-05
229	-0.138e-04	230	-0.117e-03	231	-0.373e-08	232	-0.136e+01
233	-0.389e-05	234	0.492e-04	235	0.230e-06	236	0.825e-04
237	0.324e-05	238	0.114e-05	239	-0.206e-05	240	-0.180e-05
241	0.126e-03	242	0.175e-03	243	-0.431e-04	244	0.130e-05
245	-0.215e-05	246	-0.640e-06	247	-0.100e+01	248	0.513e-04
249	0.194e-03	250	0.107e-03	251	-0.126e-05	252	0.210e-04
253	0.676e-04	254	0.320e-06	255	-0.330e-05	256	-0.640e-04
257	0.359e-04	258	0.241e-04	259	-0.225e-03	260	-0.363e-04
261	-0.210e-03	262	-0.117e-03	263	0.754e-04	264	-0.183e-03
265	0.146e-03	266	0.928e-04				

VARIANCE =

0.109e-01

Tableau V.2. [a]

40	STN 1 DELAY = -0.112	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -0.261	STN 1 DELAY = -
----	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	-----------------

RESIDUS RECALCULES

DELAY 1= 0.511 E = 0.087
 DELAY 2= 0.289 E = 0.074
 DELAY 3=-0.055 E = 0.004
 DELAY 4=-0.493 E = -0.087
 DELAY 5=-0.264 E = 0.100
 DELAY 6=-0.328 E = -0.157
 DELAY 7= 0.324 E = -0.019
 DELAY 8=-0.001 E = 0.030
 DELAY 9=-0.190 E = 0.005
 DELAY 10=-0.138 E = -0.105
 DELAY 11= 0.372 E = 0.265
 DELAY 12= 0.290 E = 0.028
 DELAY 13=-0.252 E = -0.107
 DELAY 14=-0.163 E = -0.032
 DELAY 15=-0.280 E = -0.167
 DELAY 16=-0.472 E = 0.137
 DELAY 17=-0.489 E = -0.175
 DELAY 18= 0.168 E = -0.205
 DELAY 19=-0.027 E = 0.059
 DELAY 20= 0.155 E = 0.168
 DELAY 21=-0.081 E = 0.103
 DELAY 22=-0.048 E = 0.114
 DELAY 23=-0.184 E = -0.130
 DELAY 24=-0.144 E = 0.023
 DELAY 25= 0.016 E = -0.222
 DELAY 26=-0.000 E = 0.142
 DELAY 27= 0.064 E = -0.004
 DELAY 28=-0.049 E = -0.010
 DELAY 29=-0.169 E = -0.008
 DELAY 30= 0.209 E = 0.018
 DELAY 31=-0.163 E = 0.008
 DELAY 32=-0.227 E = 0.018
 DELAY 33= 0.087 E = 0.026

RESIDUS ORIGINAUX

DELAY= 0.598
 DELAY= 0.363
 DELAY=-0.050
 DELAY=-0.580
 DELAY=-0.164
 DELAY=-0.485
 DELAY= 0.305
 DELAY= 0.029
 DELAY=-0.185
 DELAY=-0.243
 DELAY= 0.637
 DELAY= 0.318
 DELAY=-0.359
 DELAY=-0.195
 DELAY=-0.447
 DELAY=-0.335
 DELAY=-0.664
 DELAY=-0.037
 DELAY= 0.032
 DELAY= 0.323
 DELAY= 0.022
 DELAY= 0.066
 DELAY=-0.314
 DELAY=-0.121
 DELAY=-0.206
 DELAY= 0.142
 DELAY= 0.059
 DELAY=-0.060
 DELAY=-0.177
 DELAY= 0.227
 DELAY=-0.154
 DELAY=-0.209
 DELAY= 0.113

DELAY 34= 0.069 E = -0.025 DELAY= 0.044
 DELAY 35=-0.132 E = 0.040 DELAY=-0.092
 DELAY 36=-0.136 E = 0.057 DELAY=-0.079
 DELAY 37= 0.271 E = -0.097 DELAY= 0.174
 DELAY 38=-0.092 E = -0.030 DELAY=-0.122
 DELAY 39= 0.040 E = 0.000 DELAY= 0.040
 DELAY 40= 0.169 E = 0.395 DELAY= 0.563
 DELAY 41= 0.021 E = -0.445 DELAY=-0.424
 DELAY 42=-0.202 E = 0.004 DELAY=-0.198
 DELAY 43=-0.484 E = -0.127 DELAY=-0.612
 DELAY 44=-0.248 E = -0.024 DELAY=-0.272
 DELAY 45= 0.035 E = -0.027 DELAY= 0.008
 DELAY 46=-0.079 E = -0.066 DELAY=-0.095
 DELAY 47=-0.000 E = 0.076 DELAY= 0.075
 DELAY 48=-0.145 E = -0.017 DELAY=-0.162
 DELAY 49= 0.262 E = 0.049 DELAY= 0.311
 DELAY 50=-0.091 E = -0.079 DELAY=-0.170
 DELAY 51=-0.092 E = 0.221 DELAY= 0.178
 DELAY 52= 0.275 E = -0.069 DELAY= 0.156
 DELAY 53=-0.070 E = 0.018 DELAY=-0.052
 DELAY 54=-0.181 E = 0.196 DELAY= 0.015
 DELAY 55=-0.380 E = -0.173 DELAY=-0.553
 DELAY 56= 0.168 E = -0.212 DELAY=-0.044
 DELAY 57= 0.101 E = 0.101 DELAY= 0.207
 DELAY 58=-0.254 E = 0.104 DELAY=-0.145
 DELAY 59=-0.163 E = 0.010 DELAY=-0.153
 DELAY 60= 0.054 E = -0.089 DELAY=-0.036
 DELAY 61= 0.009 E = 0.079 DELAY= 0.087
 DELAY 62=-0.212 E = 0.071 DELAY=-0.141
 DELAY 63= 0.170 E = -0.156 DELAY= 0.014

$$E = d - Gm$$

(methode stochastique)

les 13 données rejetées après 1180 itérations par la programmation linéaire
ne sont pas entrées ici. on a donc 266-13 = 253 données

DELAY 64= 0.206 E = 0.006 DELAY= 0.212
 DELAY 65= 0.180 E = 0.115 DELAY= 0.295
 DELAY 66=-0.255 E = -0.178 DELAY=-0.434
 DELAY 67=-0.073 E = -0.081 DELAY=-0.154
 DELAY 68=-0.118 E = 0.131 DELAY= 0.013
 DELAY 69= 0.164 E = 0.039 DELAY= 0.203
 DELAY 70=-0.289 E = -0.030 DELAY=-0.319
 DELAY 71=-0.196 E = -0.040 DELAY=-0.237
 DELAY 72= 0.013 E = 0.096 DELAY= 0.109
 DELAY 73= 0.121 E = -0.034 DELAY= 0.088
 DELAY 74= 0.312 E = -0.009 DELAY= 0.303
 DELAY 75=-0.019 E = 0.113 DELAY= 0.094
 DELAY 76=-0.197 E = 0.007 DELAY=-0.189
 DELAY 77=-0.180 E = -0.156 DELAY=-0.335
 DELAY 78= 0.064 E = 0.158 DELAY= 0.222
 DELAY 79= 0.126 E = -0.166 DELAY=-0.040
 DELAY 80=-0.129 E = -0.052 DELAY=-0.181
 DELAY 81=-0.049 E = -0.134 DELAY=-0.182
 DELAY 82=-0.400 E = 0.025 DELAY=-0.375
 DELAY 83=-0.049 E = 0.104 DELAY= 0.055
 DELAY 84=-0.181 E = -0.009 DELAY=-0.190
 DELAY 85=-0.139 E = -0.116 DELAY=-0.255
 DELAY 86= 0.490 E = 0.117 DELAY= 0.607
 DELAY 87= 0.343 E = 0.099 DELAY= 0.442
 DELAY 88=-0.241 E = -0.084 DELAY=-0.326
 DELAY 89=-0.341 E = -0.288 DELAY=-0.629
 DELAY 90= 0.194 E = 0.150 DELAY= 0.344
 DELAY 91=-0.150 E = 0.144 DELAY=-0.006
 DELAY 92=-0.115 E = -0.019 DELAY=-0.134
 DELAY 93= 0.093 E = 0.040 DELAY= 0.133
 DELAY 94=-0.028 E = 0.027 DELAY=-0.001
 DELAY 95= 0.031 E = -0.037 DELAY=-0.005
 DELAY 96= 0.038 E = 0.152 DELAY= 0.190
 DELAY 97=-0.010 E = -0.027 DELAY=-0.037
 DELAY 98= 0.022 E = -0.131 DELAY=-0.109
 DELAY 99=-0.069 E = 0.112 DELAY= 0.077
 DELAY 100=-0.230 E = -0.261 DELAY=-0.491
 DELAY 101= 0.062 E = 0.145 DELAY= 0.207
 DELAY 102=-0.028 E = -0.072 DELAY=-0.100
 DELAY 103= 0.141 E = 0.078 DELAY= 0.219
 DELAY 104= 0.360 E = 0.120 DELAY= 0.480
 DELAY 105=-0.040 E = -0.071 DELAY=-0.111
 DELAY 106= 0.143 E = 0.000 DELAY= 0.143
 DELAY 107= 0.331 E = -0.048 DELAY= 0.283
 DELAY 108=-0.015 E = 0.020 DELAY= 0.004
 DELAY 109= 0.010 E = -0.001 DELAY= 0.009
 DELAY 110= 0.025 E = -0.071 DELAY=-0.046
 DELAY 111= 0.045 E = -0.023 DELAY= 0.022
 DELAY 112= 0.056 E = 0.075 DELAY= 0.131
 DELAY 113= 0.012 E = -0.042 DELAY=-0.030
 DELAY 114=-0.127 E = 0.054 DELAY=-0.072

DELAY 115=-0.142 E = 0.074 DELAY=-0.068
 DELAY 116= 0.055 E = 0.188 DELAY= 0.243
 DELAY 117= 0.119 E = -0.271 DELAY=-0.152
 DELAY 118= 0.256 E = -0.009 DELAY= 0.247
 DELAY 119=-0.174 E = -0.059 DELAY=-0.233
 DELAY 120=-0.367 E = -0.066 DELAY=-0.433
 DELAY 121= 0.096 E = -0.019 DELAY= 0.077
 DELAY 122= 0.081 E = 0.033 DELAY= 0.115
 DELAY 123= 0.170 E = 0.061 DELAY= 0.231
 DELAY 124= 0.047 E = -0.001 DELAY= 0.047
 DELAY 125=-0.171 E = 0.066 DELAY=-0.105
 DELAY 126=-0.251 E = -0.024 DELAY=-0.275
 DELAY 127=-0.031 E = -0.137 DELAY=-0.168
 DELAY 128= 0.146 E = 0.072 DELAY= 0.218
 DELAY 129= 0.236 E = 0.036 DELAY= 0.272
 DELAY 130= 0.009 E = -0.010 DELAY=-0.001
 DELAY 131=-0.011 E = 0.072 DELAY= 0.061
 DELAY 132= 0.018 E = 0.014 DELAY= 0.032
 DELAY 133= 0.201 E = -0.050 DELAY= 0.151
 DELAY 134= 0.278 E = 0.052 DELAY= 0.330
 DELAY 135=-0.305 E = -0.063 DELAY=-0.368
 DELAY 136=-0.088 E = -0.037 DELAY=-0.125
 DELAY 137=-0.124 E = -0.121 DELAY=-0.245
 DELAY 138=-0.271 E = 0.015 DELAY=-0.256
 DELAY 139= 0.195 E = 0.047 DELAY= 0.242
 DELAY 140= 0.213 E = 0.045 DELAY= 0.258
 DELAY 141=-0.036 E = 0.025 DELAY=-0.011
 DELAY 142= 0.123 E = 0.028 DELAY= 0.150
 DELAY 143=-0.342 E = -0.036 DELAY=-0.378
 DELAY 144=-0.027 E = 0.063 DELAY= 0.036
 DELAY 145=-0.051 E = -0.071 DELAY=-0.122
 DELAY 146= 0.189 E = 0.018 DELAY= 0.207
 DELAY 147= 0.176 E = 0.034 DELAY= 0.211
 DELAY 148=-0.129 E = -0.034 DELAY=-0.163
 DELAY 149=-0.153 E = 0.012 DELAY=-0.141
 DELAY 150=-0.063 E = 0.134 DELAY= 0.072
 DELAY 151=-0.317 E = -0.142 DELAY=-0.459
 DELAY 152=-0.610 E = -0.030 DELAY=-0.647
 DELAY 153= 0.636 E = 0.053 DELAY= 0.690
 DELAY 154=-0.300 E = -0.080 DELAY=-0.380
 DELAY 155= 0.437 E = 0.093 DELAY= 0.530
 DELAY 156=-0.194 E = 0.323 DELAY= 0.129
 DELAY 157= 0.072 E = -0.187 DELAY=-0.115
 DELAY 158= 0.319 E = -0.076 DELAY= 0.242
 DELAY 159=-0.301 E = -0.211 DELAY=-0.512
 DELAY 160=-0.044 E = -0.015 DELAY=-0.059
 DELAY 161=-0.156 E = 0.084 DELAY=-0.072
 DELAY 162=-0.178 E = 0.046 DELAY=-0.132
 DELAY 163= 0.266 E = 0.128 DELAY= 0.394
 DELAY 164=-0.296 E = 0.070 DELAY=-0.276
 DELAY 165=-0.254 E = -0.056 DELAY= 0.211

AJUSTEMENT AUX DONNEES

43 écarts non nuls

lorsqu'on minimise $\sum_{i=1}^{252} |(G_m)_i - d_i|$

33 écarts ≤ 0.02
 29 " ≥ 0.2 $\left\{ \sum |(G_m)_i - d_i| \right\}^{\frac{1}{2}} \min$

DELAY= 0.465	E = 0.072	DELAY 211= 0.393	DELAY= 0.149	E = -0.009	DELAY 166= 0.157
DELAY= -0.459	E = -0.042	DELAY 212= -0.416	DELAY= 0.095	E = -0.002	DELAY 167= 0.097
DELAY= 0.036	E = 0.062	DELAY 213= -0.026	DELAY= -0.263	E = -0.132	DELAY 168= -0.131
DELAY= 0.025	E = 0.001	DELAY 214= 0.024	DELAY= 0.454	E = 0.118	DELAY 169= 0.335
DELAY= -0.191	E = 0.003	DELAY 215= -0.194	DELAY= -0.040	E = -0.035	DELAY 170= -0.074
DELAY= 0.033	E = -0.014	DELAY 216= 0.047	DELAY= 0.164	E = -0.042	DELAY 171= -0.323
DELAY= -0.179	E = -0.013	DELAY 217= -0.165	DELAY= -0.366	E = -0.075	DELAY 172= -0.291
DELAY= -0.004	E = 0.009	DELAY 218= -0.013	DELAY= 0.429	E = 0.078	DELAY 173= 0.351
DELAY= -0.012	E = 0.022	DELAY 219= -0.034	DELAY= -0.208	E = -0.017	DELAY 174= -0.191
DELAY= -0.023	E = 0.000	DELAY 220= -0.023	DELAY= 0.053	E = 0.013	DELAY 175= 0.040
DELAY= -0.150	E = -0.005	DELAY 221= -0.146	DELAY= -0.217	E = -0.105	DELAY 176= -0.112
DELAY= -0.115	E = -0.034	DELAY 222= -0.078	DELAY= -0.239	E = 0.163	DELAY 177= -0.402
DELAY= 0.317	E = 0.001	DELAY 223= 0.316	DELAY= 0.304	E = -0.106	DELAY 178= -0.199
DELAY= -0.100	E = 0.017	DELAY 224= -0.118	DELAY= 0.380	E = 0.009	DELAY 179= 0.371
DELAY= 0.108	E = 0.019	DELAY 225= 0.088	DELAY= -0.100	E = 0.004	DELAY 180= -0.104
DELAY= -0.102	E = -0.004	DELAY 226= -0.178	DELAY= -0.086	E = -0.020	DELAY 181= -0.066
DELAY= 0.046	E = 0.007	DELAY 227= 0.043	DELAY= -0.370	E = 0.001	DELAY 182= -0.371
DELAY= -0.041	E = 0.002	DELAY 228= -0.043	DELAY= -0.154	E = 0.003	DELAY 183= -0.157
DELAY= 0.434	E = 0.112	DELAY 229= 0.322	DELAY= 0.488	E = 0.007	DELAY 184= 0.481
DELAY= 0.040	E = 0.094	DELAY 230= -0.046	DELAY= -0.073	E = -0.021	DELAY 185= -0.052
DELAY= -0.679	E = -0.135	DELAY 231= -0.128	DELAY= 0.051	E = 0.026	DELAY 186= 0.025
DELAY= -0.469	E = -0.047	DELAY 232= -0.543	DELAY= 0.161	E = -0.017	DELAY 187= 0.177
DELAY= -0.327	E = -0.040	DELAY 233= -0.402	DELAY= -0.103	E = 0.042	DELAY 188= -0.145
DELAY= -0.352	E = 0.000	DELAY 234= -0.287	DELAY= -0.122	E = -0.060	DELAY 189= -0.062
DELAY= -0.264	E = -0.024	DELAY 235= -0.353	DELAY= -0.474	E = -0.004	DELAY 190= -0.470
DELAY= 0.087	E = 0.016	DELAY 236= -0.236	DELAY= 0.163	E = 0.053	DELAY 191= -0.216
DELAY= 0.428	E = 0.025	DELAY 237= 0.071	DELAY= 0.225	E = 0.043	DELAY 192= 0.181
DELAY= -0.402	E = -0.008	DELAY 238= 0.403	DELAY= -0.495	E = -0.094	DELAY 193= -0.401
DELAY= 0.359	E = 0.103	DELAY 239= -0.024	DELAY= -0.091	E = 0.010	DELAY 194= -0.101
DELAY= -0.206	E = -0.079	DELAY 240= -0.317	DELAY= 0.217	E = 0.003	DELAY 195= 0.213
DELAY= 0.073	E = 0.076	DELAY 241= 0.256	DELAY= 0.017	E = 0.027	DELAY 196= -0.010
DELAY= -0.362	E = 0.021	DELAY 242= -0.127	DELAY= 0.001	E = 0.033	DELAY 197= -0.032
DELAY= -0.254	E = -0.064	DELAY 243= -0.003	DELAY= 0.051	E = -0.049	DELAY 198= 0.100
DELAY= 0.267	E = 0.049	DELAY 244= -0.383	DELAY= -0.545	E = -0.079	DELAY 199= -0.466
DELAY= 0.308	E = 0.000	DELAY 245= -0.190	DELAY= -0.315	E = -0.125	DELAY 200= -0.190
DELAY= -0.094	E = 0.001	DELAY 246= 0.219	DELAY= 0.077	E = 0.141	DELAY 201= -0.064
DELAY= 0.294	E = 0.006	DELAY 247= 0.308	DELAY= 0.550	E = 0.064	DELAY 202= 0.486
DELAY= 0.268	E = -0.012	DELAY 248= -0.007	DELAY= 0.025	E = -0.010	DELAY 203= 0.035
DELAY= -0.382	E = 0.003	DELAY 249= 0.094	DELAY= -0.217	E = -0.051	DELAY 204= -0.166
DELAY= -0.012	E = 0.005	DELAY 250= 0.289	DELAY= -0.436	E = -0.081	DELAY 205= -0.354
DELAY= -0.362	E = 0.003	DELAY 251= 0.280	DELAY= -0.389	E = 0.031	DELAY 206= -0.420
DELAY= -0.012	E = 0.003	DELAY 252= -0.385	DELAY= 0.315	E = -0.007	DELAY 207= 0.322
DELAY= -0.012	E = 0.005	DELAY 253= -0.017	DELAY= 0.127	E = -0.007	DELAY 208= 0.134
			DELAY= 0.355	E = -0.043	DELAY 209= 0.398
			DELAY= -0.619	E = -0.025	DELAY 210= -0.595

écarts L1	écarts "stochastiques"	stations	n° seisme
.05	.18		1
-.876	-.45	DVP	2
-.15	-.04	DVP	3
.50	.03	NGA	3
-.38	-.55	MBV	9
.49	.30	PVC	9
-.16	-.05	MBV	10
-.11	.30	DVP	11
-.12	.15	PVC	11
.07	.34	NGA	11
.35	.26	RTV	11
-.01	-.19	DVP	12
.01	.21	RTV	12
.03	.09	DVP	14
-.13	-.10	MBV	16
.07	.00	MBV	20
.13	.16	PVC	24
-.01	.03	MBV	26
.25	.28	DVP	30
-.08	-.22	RTV	30
.12	.11	MBV	12
-.14	.15	MBV	18
.35	.26	DVP	9
-.02	.04	PVC	25
-.55	.28	DVP	23
-.06	.05	DVP	31
.17	.18	PVC	31
.00	.18		33
-.05	.04	AMB	42
.11	.23	LMP	15
.10	.20	NGA	16
.40	.35	PVC	H
.04	.08	DVP	20
.41	.08	PVC	22
.15	.33	PVC	26
-.01	.18	DVP	26
.09	.15		33
-.20	.19	DVP	13
-.04	.21	MBV	15
.07	.37	NGA	19
-.02	.07	MBV	18
.04	.20	MBV	28
.26	.07	RTV	29
	.09	OBS5	33

on notera: la courbe pondérée partielles entre les signaux des écarts de ce tableau
 - il y a en plus 12 écarts stochastiques, supérieures à 0.23, qui ne sont pas
 dans ce tableau.

	x	y	z	Δx	Δy	Δz	Δt
1	111.47	-14.72	54.89	-0.500E+01	0.343E+01	-0.784E+00	0.206
2	-58.28	-10.10	12.39	-0.139E+01	-0.181E+01	0.500E+01	-0.213
3	-48.49	-27.89	29.36	-0.500E+01	-0.490E+01	-0.500E+01	0.465
4	-49.18	-18.33	15.02	-0.245E+00	-0.181E+01	0.500E+01	-0.304
5	-45.55	-17.43	16.82	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500
6	-64.31	-28.05	15.91	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500
7	-51.62	-22.04	16.68	-0.122E+01	-0.265E+00	-0.104E+01	0.159
8	-49.23	-27.95	21.04	0.139E+01	-0.496E+00	-0.153E+01	0.042
9	-48.07	-24.29	21.71	0.500E+01	-0.305E+01	-0.304E+01	-0.271
10	-45.25	-29.32	28.27	0.403E+01	-0.931E+00	-0.119E+01	-0.250
11	-62.67	-21.78	27.93	0.158E+01	0.345E+00	0.500E+01	-0.181
12	-52.50	-26.26	20.59	-0.907E+01	-0.233E+01	0.500E+01	-0.000
13	-43.18	-50.48	33.11	-0.500E+01	0.278E+01	0.332E+01	0.500
14	-62.98	-36.14	29.65	-0.312E+01	-0.207E+01	0.469E+01	-0.261
15	-44.41	-21.85	42.67	0.500E+01	0.111E+01	0.400E+01	-0.500
16	-38.45	-23.01	43.44	-0.642E+01	0.975E+00	0.361E+01	-0.220
17	-42.13	-25.22	39.53	-0.500E+01	0.131E+01	0.500E+01	0.396
18	-60.29	-41.01	40.56	0.304E+01	-0.932E+00	0.500E+01	-0.332
19	-23.48	-40.52	45.96	-0.500E+01	0.265E+01	0.233E+01	0.500
20	-98.08	-14.27	42.57	-0.471E+01	0.455E+01	0.500E+01	-0.088
21	-92.40	-75.55	35.23	-0.427E+00	-0.148E+01	0.500E+01	-0.500
22	-50.35	-7.00	60.58	0.317E+00	-0.500E+01	0.500E+01	-0.500
23	-131.00	-41.03	33.24	-0.500E+01	-0.921E+00	-0.500E+01	-0.225
24	-80.78	-18.54	43.68	-0.340E+01	-0.694E+00	0.500E+01	-0.192
25	-95.43	-8.91	45.32	-0.500E+01	-0.136E+01	0.500E+01	-0.355
26	-90.73	-21.46	66.79	-0.101E+01	-0.253E+00	-0.320E+01	0.500
27	-26.59	-43.96	34.72	-0.107E+01	-0.402E+00	0.269E+01	0.063
28	-107.51	-61.96	56.46	0.369E+01	-0.366E+01	-0.500E+01	0.500
29	-57.66	-35.84	29.49	-0.500E+01	0.957E+00	-0.391E+01	0.500
30	-55.14	-21.27	38.97	-0.147E+00	0.643E+00	-0.500E+01	0.479
31	-40.07	-30.40	31.19	0.165E+01	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.156
32	34.97	-1.77	25.75	-0.186E+00	0.399E+01	-0.196E+01	-0.105
33	88.43	-6.05	34.67	0.280E+01	0.500E+01	0.191E+01	-0.500
34	90.27	-5.67	33.30	0.915E+00	0.237E+01	-0.148E+01	-0.274
35	49.85	-22.77	15.10	0.407E+00	0.197E+01	0.845E+01	0.093
36	110.57	14.25	15.70	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500
37	81.27	-33.06	8.49	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500
38	104.83	-46.11	13.21	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500
39	25.06	-11.32	17.63	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500
40	43.81	-25.68	25.51	0.408E+01	0.425E+00	0.147E+01	-0.167
41	120.05	-6.33	34.14	-0.500E+01	0.292E+01	-0.321E+01	0.057
42	12.69	-17.03	20.61	0.376E+01	0.500E+01	0.500E+01	-0.431
43	26.89	-80.42	18.47	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500
44	28.51	-2.56	15.62	-0.200E+01	-0.490E+01	-0.500E+01	-0.500
45	68.26	-33.20	39.29	0.383E+01	-0.126E+01	0.330E+00	-0.321
46	74.47	-36.63	16.50	-0.500E+01	-0.413E+00	-0.500E+01	-0.500
47	121.38	-7.03	37.50	0.482E+01	0.120E+01	-0.475E+01	-0.500
48	78.96	-26.29	14.56	0.284E+00	-0.393E+00	-0.500E+01	0.297
49	48.93	-12.49	13.02	0.370E+00	0.122E+01	0.500E+01	-0.098
50	88.41	45.67	15.50	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500
51	10.28	-11.67	8.15	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500E+01	-0.500
52	44.59	-24.09	36.80	0.500E+01	0.233E+01	-0.280E+01	0.170
53	72.73	-6.84	31.26	0.189E+01	-0.161E+01	-0.500E+01	0.000
54	22.21	-35.94	29.47	0.500E+01	0.467E+01	0.500E+01	-0.172
55	136.84	-3.35	49.75	0.504E+00	0.297E+01	-0.500E+01	-0.389

(a)

Tableau V.3.

	x	y	z	Δx	Δy	Δz	Δt
1	111.47	-14.72	54.89	-2.102	0.875	3.553	0.036
2	-58.28	-18.10	12.39	-0.549	-0.629	10.707	-0.152
3	-48.49	-27.89	29.36	-3.151	-3.474	-1.962	0.093
4	-49.18	-18.33	15.82	0.499	-1.294	1.916	-0.079
5	-45.55	-17.43	16.82	-1.058	-0.406	0.937	0.004
6	-64.31	-28.05	15.91	-0.720	-0.162	3.291	0.016
7	-51.62	-22.04	16.68	0.138	1.622	-0.725	0.007
8	-49.23	-27.95	21.04	0.462	0.136	1.121	0.014
9	-48.07	-24.29	21.71	3.561	-2.455	-2.383	-0.200
10	-45.25	-29.32	28.27	1.631	-0.996	-1.710	-0.006
11	-62.67	-21.78	27.93	0.932	1.033	2.022	0.013
12	-52.50	-26.26	20.59	-1.253	-1.370	3.919	0.024
13	-43.18	-50.48	33.11	-0.486	0.537	1.380	0.027
14	-62.98	-36.14	29.65	-1.858	-2.176	-0.956	-0.013
15	-44.41	-21.85	42.67	3.289	1.124	-1.298	-0.095
16	-38.45	-23.01	43.44	-1.426	0.023	-0.419	-0.001
17	-42.13	-25.22	39.53	-4.356	-1.052	4.106	0.028
18	-60.29	-41.01	40.56	1.924	-1.122	0.717	-0.013
19	-23.48	-40.52	45.96	-0.722	-1.158	0.058	0.027
20	-98.08	-14.27	42.57	-2.971	3.321	3.539	0.020
21	-92.40	-75.55	35.23	1.241	-0.559	1.279	-0.000
22	-50.35	-7.00	60.58	0.477	-4.816	-1.952	-0.078
23	-131.00	-41.03	33.24	-1.168	-1.780	-1.182	0.009
24	-80.78	-18.54	43.68	-1.449	-1.707	0.822	0.003
25	-95.43	-8.91	45.32	-1.861	-2.155	1.159	-0.014
26	-90.73	-21.46	66.79	0.494	-3.079	-0.190	0.012
27	-26.59	-43.96	34.72	-1.200	-0.582	1.216	0.004
28	-107.51	-61.96	56.46	0.766	-1.970	1.410	0.028
29	-57.66	-35.84	29.49	-1.719	-1.625	-0.637	0.070
30	-55.14	-21.27	38.97	1.491	-1.379	-3.239	0.037
31	-40.07	-30.40	31.19	-1.148	-3.496	-2.490	-0.007
32	34.97	-1.77	25.75	-2.633	3.550	-1.038	-0.019
33	88.43	-6.05	34.67	0.044	2.731	0.366	-0.041
34	90.27	-5.67	33.30	0.480	1.744	-0.794	-0.004
35	49.85	-22.77	15.10	-0.042	1.469	0.904	0.032
36	110.57	14.25	15.70	-0.375	-0.115	-0.107	-0.003
37	81.27	-33.06	8.49	-0.044	-0.031	-0.034	0.000
38	104.83	-46.11	13.21	-0.819	-1.206	0.264	0.003
39	25.06	-11.32	17.63	-0.053	0.099	0.199	0.001
40	43.81	-25.68	25.51	2.527	-0.016	-0.464	-0.046
41	120.05	-6.33	34.14	-1.716	0.946	0.373	0.010
42	12.69	-17.03	20.61	0.006	2.248	-0.053	-0.108
43	26.89	-80.42	18.47	0.000	0.000	0.000	0.000
44	28.51	-2.56	15.62	-0.500	-0.305	0.224	0.005
45	68.26	-33.20	39.29	1.074	-0.233	-0.677	0.001
46	74.47	-36.63	16.50	0.721	0.488	-0.227	-0.005
47	121.38	-7.03	37.50	2.045	-1.468	-1.906	0.003
48	78.96	-26.29	14.56	-0.398	-0.712	-0.138	-0.001
49	48.93	-12.49	13.02	-0.368	0.731	4.201	-0.065
50	88.41	45.67	15.50	-0.148	-0.504	-0.170	-0.003
51	10.28	-11.67	8.15	0.000	0.000	0.000	0.000
52	44.59	-24.09	36.80	1.095	0.288	-0.142	0.010
53	72.73	-6.84	31.26	0.417	-1.492	-1.235	0.017
54	22.21	-35.94	29.47	3.032	0.633	2.003	0.012
55	136.84	-3.35	49.75	0.348	-0.947	-0.008	0.002

3 (b)

VECTOR U - OPTIMUM TEST

J=	U(J)=	J=	U(J)=	J=	U(J)=	J=	U(J)=
1	0.222e-06	2	0.251e-06	3	0.235e-07	4	0.774e-07
5	0.149e-06	6	0.221e-07	7	0.152e-06	8	0.183e-01
9	0.373e-08	10	0.242e-07	11	0.312e-07	12	0.447e-01
13	0.279e-06	14	0.169e-06	15	0.192e-06	16	0.213e-08
17	0.888e-08	18	0.888e-08	19	0.888e-08	20	0.888e-08
21	0.888e-08	22	0.888e-08	23	0.888e-08	24	0.888e-08
25	0.888e-08	26	0.888e-08	27	0.888e-08	28	0.888e-08
29	0.159e-06	30	0.146e-06	31	0.688e-07	32	0.888e-07
33	0.969e-07	34	0.457e-08	35	0.274e-07	36	0.157e-07
37	0.522e-07	38	0.269e-07	39	0.285e-07	40	0.852e-07
41	0.119e-06	42	0.745e-08	43	0.191e-07	44	0.189e-01
45	0.240e-06	46	0.771e-07	47	0.118e-06	48	0.118e-01
49	0.245e-06	50	0.291e-07	51	0.223e-07	52	0.970e-07
53	0.323e-06	54	0.185e-06	55	0.354e-06	56	0.116e-06
57	0.383e-06	58	0.556e-08	59	0.543e-07	60	0.113e-06
61	0.888e-08	62	0.692e-08	63	0.297e-07	64	0.323e-07
65	0.189e-06	66	0.416e-08	67	0.980e-07	68	0.257e-08
69	0.745e-08	70	0.683e-07	71	0.149e-07	72	0.128e-08
73	0.187e-06	74	0.281e-01	75	0.240e-06	76	0.122e-06
77	0.385e-06	78	0.298e-06	79	0.232e-06	80	0.468e-02
81	0.344e-01	82	0.281e-07	83	0.163e-06	84	0.674e-02
85	0.182e-02	86	0.214e-07	87	0.368e-08	88	0.135e-08
89	0.329e-07	90	0.818e-02	91	0.956e-08	92	0.557e-02
93	0.123e-06	94	0.522e-07	95	0.969e-07	96	0.144e-08
97	0.111e-06	98	0.183e-06	99	0.143e-06	100	0.139e-08
101	0.357e-01	102	0.196e-06	103	0.559e-07	104	0.225e-07
105	0.238e-06	106	0.488e-06	107	0.555e-06	108	0.428e-06
109	0.684e-01	110	0.431e-07	111	0.133e-06	112	0.413e-01
113	0.562e-01	114	0.194e-08	115	0.450e-07	116	0.450e-07
117	0.596e-07	118	0.373e-07	119	0.281e-06	120	0.422e-08
121	0.156e-06	122	0.223e-07	123	0.148e-08	124	0.671e-01
125	0.184e-06	126	0.286e-07	127	0.177e-06	128	0.119e-07
129	0.148e-08	130	0.133e-06	131	0.222e-08	132	0.135e-06
133	0.373e-07	134	0.134e-06	135	0.189e-06	136	0.566e-07
137	0.124e-07	138	0.152e-07	139	0.174e-07	140	0.153e-07
141	0.888e-08	142	0.888e-08	143	0.888e-08	144	0.888e-08
145	0.888e-08	146	0.888e-08	147	0.888e-08	148	0.888e-08
149	0.888e-08	150	0.888e-08	151	0.888e-08	152	0.888e-08
153	0.888e-08	154	0.888e-08	155	0.888e-08	156	0.888e-08
157	0.658e-06	158	0.767e-06	159	0.483e-06	160	0.285e-06
161	0.553e-06	162	0.188e-08	163	0.458e-07	164	0.268e-06
165	0.782e-07	166	0.326e-06	167	0.292e-08	168	0.266e-08
169	0.888e-08	170	0.888e-08	171	0.888e-08	172	0.888e-08
173	0.552e-08	174	0.397e-08	175	0.295e-08	176	0.458e-08
177	0.641e-07	178	0.384e-07	179	0.555e-07	180	0.425e-08
181	0.888e-08	182	0.888e-08	183	0.888e-08	184	0.888e-08
185	0.712e-01	186	0.557e-07	187	0.189e-06	188	0.280e-07
189	0.888e-08	190	0.888e-08	191	0.888e-08	192	0.888e-08
193	0.123e-06	194	0.162e-06	195	0.162e-06	196	0.493e-06
197	0.888e-08	198	0.888e-08	199	0.888e-08	200	0.888e-08
201	0.888e-08	202	0.888e-08	203	0.888e-08	204	0.888e-08
205	0.888e-08	206	0.223e-06	207	0.938e-07	208	0.112e-06
209	0.857e-07	210	0.189e-06	211	0.171e-06	212	0.127e-08
213	0.157e-06	214	0.388e-01	215	0.383e-07	216	0.216e-02
217	0.685e-08	218	0.145e-06	219	0.292e-06	220	0.184e-01
221	0.688e-01	222	0.261e-01	223	0.589e-07	224	0.191e-08
225	0.125e-02	226	0.310e-08	227	0.258e-01	228	0.521e-01
229	0.992e-02	230	0.173e-08	231	0.162e-06	232	0.185e-07
233	0.469e-06	234	0.155e-08	235	0.189e-08	236	0.293e-07
237	0.462e-01	238	0.965e-02	239	0.463e-01	240	0.148e-06
241	0.381e-07	242	0.181e-08	243	0.481e-08	244	0.115e-09
245	0.112e-06	246	0.478e-08	247	0.275e-08	248	0.428e-07
249	0.181e-02	250	0.759e-01	251	0.381e-01	252	0.182e-01
253	0.334e-08	254	0.261e-06	255	0.977e-07	256	0.282e-01
257	0.117e-01	258	0.411e-07	259	0.117e-08	260	0.349e-06
261	0.188e-01	262	0.651e-08	263	0.188e-01	264	0.625e-07
265	0.622e-01	266	0.227e-08	267	0.184e-08	268	0.386e-08
269	0.118e-08	270	0.383e-08	271	0.699e-08	272	0.712e-07
273	0.567e-03	274	0.187e-07	275	0.369e-01	276	0.326e-01
277	0.858e-07	278	0.188e-06	279	0.128e-06	280	0.349e-01
281	0.251e-01	282	0.159e-01	283	0.195e-07	284	0.236e-01
285	0.236e-01	286	0.343e-07	287	0.311e-07	288	0.142e-08
289	0.236e-01	290	0.158e-01	291	0.381e-07	292	0.388e-08
293	0.999e-01	294	0.161e-08	295	0.361e-01	296	0.343e-06
297	0.352e-07	298	0.255e-08	299	0.493e-06	300	0.157e-08
301	0.628e-01	302	0.488e-08	303	0.498e-08	304	0.342e-08
305	0.791e-07	306	0.379e-01	307	0.264e-06	308	0.325e-08
309	0.793e-08	310	0.339e-07	311	0.689e-01	312	0.498e-01
313	0.267e-06	314	0.770e-06	315	0.671e-07	316	0.722e-08
317	0.150e-06	318	0.133e-07	319	0.143e-01	320	0.175e-02
321	0.555e-01	322	0.177e-06	323	0.580e-07	324	0.355e-08
325	0.179e-08	326	0.418e-06	327	0.475e-07	328	0.296e-08
329	0.142e-06	330	0.112e-06	331	0.373e-07	332	0.354e-08
333	0.194e-01	334	0.437e-08	335	0.165e-08	336	0.528e-08
337	0.327e-07	338	0.374e-08	339	0.665e-08	340	0.888e-08
341	0.328e-06	342	0.293e-01	343	0.288e-01	344	0.617e-07
345	0.688e-01	346	0.722e-08	347	0.181e-07	348	0.157e-06
349	0.149e-08	350	0.589e-06	351	0.286e-06	352	0.242e-07
353	0.293e-07	354	0.137e-08	355	0.136e-08	356	0.388e-07
357	0.685e-01	358	0.179e-08	359	0.254e-06	360	0.184e-06
361	0.173e-08	362	0.453e-06	363	0.369e-06	364	0.671e-07
365	0.139e-08	366	0.279e-07	367	0.237e-08	368	0.798e-01

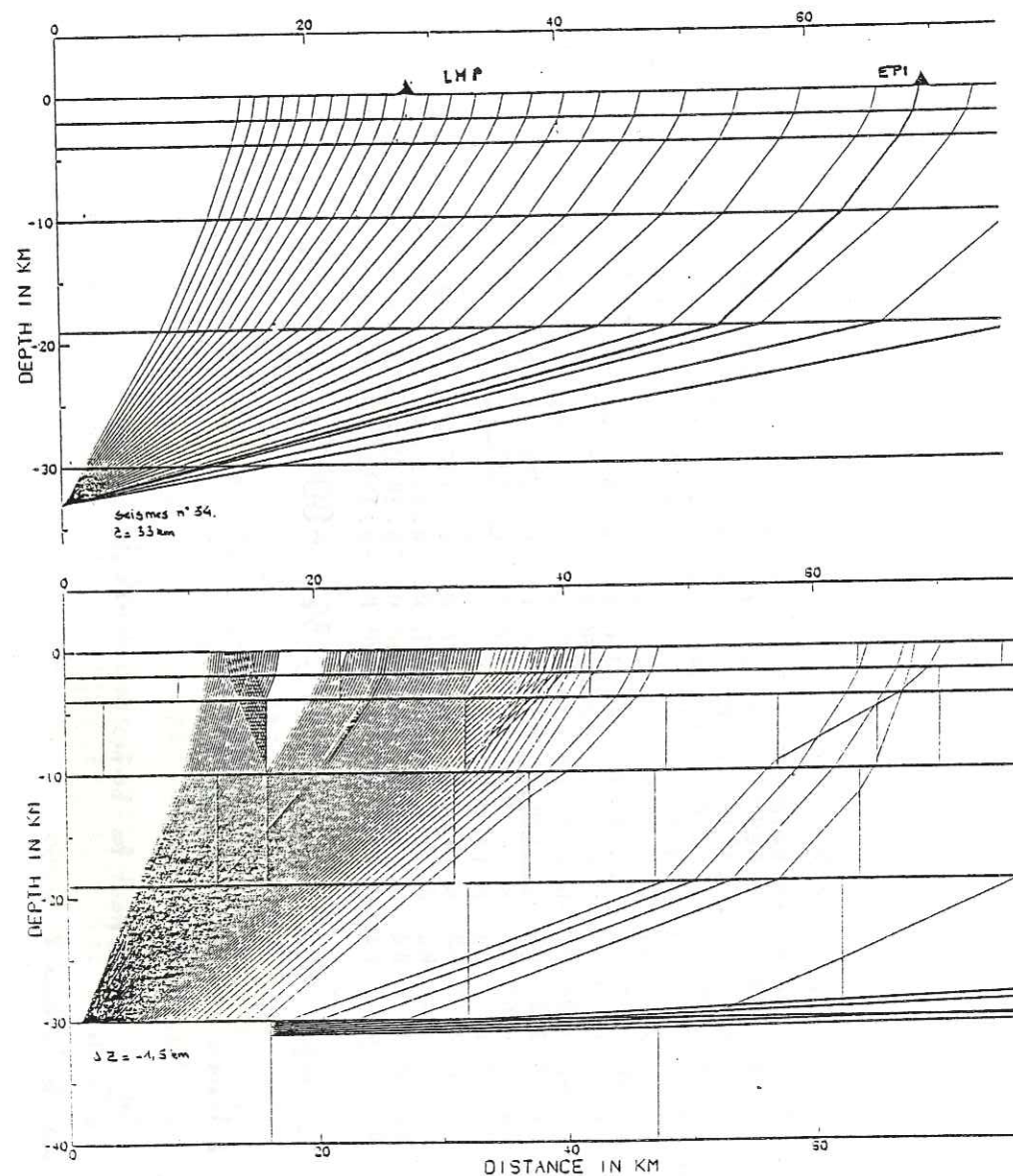
Tableau V.4.

paramètres foyers

blois vitesse

369	-0.165e-01	370	0.184e+00	371	-0.291e-06	372	-0.184e-06
373	0.158e+00	374	0.622e+00	375	0.184e+00	376	0.127e+00
377	-0.117e-06	378	-0.165e+00	379	0.985e-01	380	0.776e-02
381	0.292e-01	382	-0.545e-01	383	-0.281e-07	384	0.292e-01
385	-0.995e-01	386	0.135e-06	387	0.184e+00	388	0.428e-01
389	0.428e-01	390	0.867e-01	391	0.358e-02	392	0.638e-01
395	0.149e-06	396	0.275e+00	397	0.184e+00	398	-0.276e-01
399	-0.276e-01	400	0.127e+00	401	0.431e+00	402	0.357e-02
405	0.261e-06	406	0.574e-08	407	-0.187e-08	408	0.813e-07
409	0.357e-01	410	0.113e+00	411	0.279e+00	412	0.158e+00
413	0.138e-07	414	0.581e-02	415	0.494e+00	416	0.571e+00
417	-0.513e-01	418	0.888e+00	419	0.218e+03	420	0.888e+00
421	-0.115e+00	422	0.888e+00	423	0.888e+00	424	0.888e+00
425	-0.618e+00	426	0.888e+00	427	0.888e+00	428	0.888e+00
429	0.888e+00	430	0.888e+00	431	0.888e+00	432	0.468e+00
433	0.792e-01	434	0.772e-07	435	0.351e-07	436	0.511e-07
437	0.116e-06	438	0.266e+00	439	-0.499e-02	440	0.145e-07
441	0.895e-01	442	-0.426e-08	443	-0.483e-08	444	0.888e+00
445	-0.233e+00	446	0.575e+00	447	0.888e+00	448	-0.133e+00
449	-0.417e+00	450	-0.435e+00	451	-0.438e+00	452	-0.189e+00
453	0.794e+00	454	-0.768e+00	455	0.888e+00	456	-0.421e-01
457	-0.369e-01	458	-0.238e-01	459	0.999e-01	460	0.888e+00
461	-0.498e+00	462	0.248e+00	463	0.516e+00	464	0.634e+00
465	0.888e+00	466	0.793e+00	467	0.888e+00	468	0.473e+00
469	-0.794e-01	470	-0.241e+00	471	-0.412e+00	472	0.788e+00
473	-0.528e+00	474	-0.977e+00	475	-0.788e+00	476	0.135e+00
477	0.888e+00	478	0.888e+00	479	0.888e+00	480	0.888e+00
481	0.888e+00	482	0.888e+00	483	0.888e+00	484	0.888e+00
485	0.888e+00	486	0.888e+00	487	0.588e+00	488	-0.933e-01
489	-0.633e+00	490	0.178e+00	491	0.538e-01	492	-0.762e-02
493	0.588e-01	494	-0.297e+00	495	0.888e+00	496	-0.149e-07
497	-0.456e-01	498	0.285e+00	499	0.617e+00	500	-0.135e+00
501	0.224e+00	502	0.888e+00	503	0.224e-01	504	0.271e+00
505	0.489e+00	506	0.888e+00	507	0.414e+00	508	0.261e+00
509	0.745e+00	510	0.888e+00	511	0.888e+00	512	0.561e+00
513	0.224e-07	514	0.225e+00	515	0.888e+00	516	0.199e+00
517	-0.988e+00	518	-0.745e+00	519	-0.378e-01	520	-0.453e+00
521	0.888e+00	522	0.528e+00	523	-0.161e-01	524	-0.344e-01
525	-0.149e+00	526	-0.232e-07	527	-0.982e+00	528	0.104e+00
529	-0.189e+00	530	-0.347e+00	531	-0.413e+00	532	0.149e-07
533	0.888e+00	534	0.745e+00	535	0.321e+00	536	0.254e+00
537	-0.441e+00	538	0.224e-07	539	0.222e+00	540	0.888e+00
541	-0.359e+00	542	-0.414e+00	543	0.257e+00	544	0.888e+00
545	0.888e+00	546	-0.161e+00	547	0.888e+00	548	0.115e+01
549	-0.224e+00	550	0.184e+00	551	0.599e+00	552	0.599e+00
553	0.888e+00	554	-0.628e+00	555	0.888e+00	556	-0.761e+00
557	0.149e-07	558	-0.275e+00	559	-0.579e+00	560	0.888e+00
561	-0.770e+00	562	0.888e+00	563	-0.845e+00	564	0.167e+01
565	0.289e+00	566	-0.231e-01	567	0.442e+00	568	-0.152e-01
569	-0.643e+00	570	-0.235e+00	571	-0.639e+00	572	-0.745e+00
573	0.292e-01	574	0.184e+00	575	0.428e-01	576	0.538e-01
577	-0.585e-01	578	-0.758e-01	579	0.285e-01	580	-0.754e+00
581	0.262e+00	582	0.888e+00	583	-0.488e+00	584	-0.888e+00
585	0.322e+00	586	-0.321e+00	587	0.888e+00	588	0.888e+00
589	0.342e+00	590	0.275e+00	591	0.599e-01	592	0.888e+00
593	0.384e+00	594	0.522e-07	595	0.141e+00	596	0.127e+00
597	-0.121e+00	598	0.888e+00	599	0.888e+00	600	-0.135e+00
601	-0.438e+00	602	-0.249e-01	603	0.431e+00	604	0.311e+00
605	0.522e-07	606	0.387e+00	607	0.857e-02	608	-0.160e+00
609	0.293e+00	610	-0.192e+00	611	0.888e+00	612	-0.978e-01
613	0.294e+00	614	0.888e+00	615	0.657e+00	616	-0.353e+00
617	-0.384e+00	618	0.888e+00	619	0.888e+00	620	0.363e+00
621	-0.118e+00	622	0.733e+00	623	0.888e+00	624	-0.979e+00
625	-0.152e+00	626	0.888e-01	627	0.574e+00	628	-0.547e+00
629	0.357e-01	630	-0.161e+00	631	-0.745e+00	632	0.888e+00
633	0.888e+00	634	-0.599e+00	635	0.140e+00	636	-0.348e+00
637	0.536e-01	638	-0.395e+00	639	0.534e+00	640	-0.888e+00
641	0.138e-07	642	-0.288e+00	643	0.121e-07	644	0.888e+00
645	0.888e+00	646	0.888e+00	647	0.888e+00	648	0.888e+00
649	0.888e+00	650	0.155e+00	651	-0.134e+00	652	0.994e-02
653	-0.144e+00	654	0.788e-01	655	-0.424e-01	656	0.563e-01
657	-0.542e-01	658	-0.388e+00	659	0.397e+00	660	0.773e+00
661	0.121e+00	662	-0.773e+00	663	-0.163e+00	664	0.283e+00
665	0.121e+00	666	0.145e+00	667	0.888e+00	668	-0.594e-01
669	-0.187e-01	670	0.888e+00	671	0.395e-01	672	-0.387e-01
673	0.181e+00	674	-0.352e+00	675	-0.149e-08	676	-0.483e+00
677	0.938e-07	678	0.584e-07	679	-0.988e-07	680	-0.118e-06
681	0.888e+00	682	0.888e+00	683	0.554e-01	684	0.337e+00
685	-0.751e+00	686	0.427e+00	687	0.888e+00	688	0.888e+00
689	0.888e+00	690	-0.853e+00	691	-0.431e+00	692	0.291e+00
693	0.575e+00	694	0.474e-01	695	0.351e+00	696	0.888e+00
697	-0.789e-01	698	0.385e-01	699	0.419e-01	700	-0.135e+00
701	0.351e-01	702	0.147e+00	703	-0.147e+00	704	0.551e+00
705	-0.384e+00	706	-0.413e-01	707	0.858e+00	708	-0.135e+00
709	-0.384e+00	710	0.171e+00	711	-0.124e+03	712	0.145e+00
713	-0.172e-01	714	-0.418e-01	715	-0.387e-01		

35411 1000



Visualisation du parcours des rais dans le modèle initial (en haut) et dans les blocs obtenus par la méthode statistique (au dessous).

Les rais correspondent au séisme n° 34, situé sous l'île de Malekula, dans l'alignement des stations LMP et EPI. On fait alors l'hypothèse d'un trajet bidimensionnel des rais.

LMP	$t_{obs} - t_{init}^{cal} = -0,37$	$t_{init}^{cal} = 7,02 \text{ s}$	$t_{obs} - t_{blo}^{cal} = -0,06 \text{ s}$
		$t_{blo}^{cal} = 6,71 \text{ s}$	
EPI	$t_{obs} - t_{init}^{cal} = 0,48$	$t_{init}^{cal} = 12,82 \text{ s}$	$t_{obs} - t_{blo}^{cal} = 0,07 \text{ s}$
		$t_{blo}^{cal} = 13,23 \text{ s}$	

Ces valeurs correspondent aux données 182 et 184 du tableau V2 (a). Ces deux données sont bien expliquées par l'inversion et le trajet des rais respectifs. Les hypothèses de petites variations nécessaires pour linéariser notre problème.

CHAPITRE 6

APPLICATIONS A LA STRUCTURE SUPERFICIELLE AU-DESSUS
D'UNE PLAQUE PLONGEANTE :
Partie Centrale de l'Arc des Nouvelles Hébrides

Les techniques décrites dans les chapitres précédents nous fournissent ici une information nouvelle sur la partie centrale de l'Arc des Nouvelles Hébrides. Bien que les outils numériques ne définissent pas, en toute rigueur, la qualité de cette information, les éléments étudiés aux chapitres précédents (changement de discrétisation, indépendance de certains paramètres, cohérence des résultats obtenus par deux techniques) nous permettent de présenter une structure tridimensionnelle utile pour la compréhension de la région étudiée. Les modifications apportées aux positions des foyers ne nous permettent pas, vu le manque de donnée, de comprendre les mécanismes de rupture, liés à cette subduction. Toutefois, l'étude de l'essaim situé au Nord-Ouest de l'Ile d'Efate, montre l'intérêt d'une telle approche.

CADRE GEODYNAMIQUE

L'Arc des Nouvelles Hébrides est une structure complexe, presque linéaire, qui s'étend de 10° de latitude Sud jusqu'aux environs de 22° de latitude Sud. L'activité volcanique, importante, s'aligne sur un axe orienté N 20° W (figure 6.1.). La partie centrale de l'Arc, marquée par l'accident marin de la zone de fracture d'entrecastaux (15° C), pose de nombreuses questions. En effet, ici la fosse disparaît et deux Iles, Santo et Malekula, se positionnent sur la continuation supposée de celle-ci. Malgré l'absence d'accident bathymétrique du type fosse (isobathe des 2600 Fathom - 4755 m), on observe dans cette zone une continuité de la sismicité entre les parties Nord et Sud (figure 6.2., Pascal et al. 1978). Cette continuité caractérise seulement la sismicité superficielle (0 - 60 km de profondeur). La figure (6.2.) révèle aussi une absence de sismicité intermédiaire dans cette région, au cours de la période étudiée par Pascal et al. 1978 (1964-1972). Toutefois le modèle de subduction continue est retenu par les auteurs (figure 6.3.). Ce modèle sera confirmé par les études de micro-séismes qui montrent, à une échelle plus petite la continuité du phénomène. (Isacks, tech. report June 1980).

Les études géologiques (Mitchell et Worden 1971, Mallick 1972) nous apportent d'autres informations. Sur la figure (6.4.), l'alignement d'Iles liées à un volcanisme actif (ou remontant au Pliocène) est bien visible. Entre 15° S et 18° S on

voit apparaître, de part et d'autre de cet alignement, des îles caractérisées par des roches Pré-Miocène ou Miocène : Malekula et Santo à l'Ouest, Maewo et Pentecost à l'Est. L'île d'Efate, géographiquement plus proche de la ligne volcanique actuelle est caractérisée par les mêmes roches.

Pour essayer de comprendre cette structure, on utilise les données fournies par le réseau combiné terre-mer, visible sur la figure (6.4.). L'étude des hétérogénéités de vitesse et la localisation précise de la sismicité peuvent être des éléments qui caractérisent les zones de fracture et les matériaux en présence.

STRUCTURE TRIDIMENSIONNELLE

Les anomalies de vitesses sont présentées en valeurs absolues (km/s) afin de pouvoir "suivre" les mouvements verticaux des différentes hétérogénéités. La zone de contact entre la plaque plongeante et la plaque supérieure est une région où les processus mécaniques liés à la subduction sont mal connus. La complexité des phénomènes apparaît dans l'hétérogénéité des anomalies obtenues. Ces anomalies sont bien différentes des résultats correspondants à des phénomènes globalement plus simples : études tridimensionnelles d'une zone de subduction à des profondeurs supérieures à 70 kms au Japon (Hihara et Mikumo 1979), de points chauds sous Yellowstone, (Iyer et al. 1981) ou sous LASA (Aki et al. 1976 b), d'une anomalie géothermique Corso USA (Feasenberget al. 1980), ou d'anomalies de vitesse au voisinage d'une faille bien marquée (San Andreas USA, Zandt (1978)). Les différentes études nous montrent toutefois le pouvoir de résolution de l'outil utilisé et permettent ainsi un travail dans une région plus complexe.

Les figures (6.5. a, b, c, d, e, f, g) représentent des cartes d'anomalies de vitesse. On présente ici les résultats obtenus en utilisant des contraintes explicites sur notre problème sous déterminé ; cette étude étant la plus objective pour ce type de travail.

Le premier élément visible sur ces cartes est l'importante modification (dans le domaine fini où l'on se place) du modèle initial. Ces perturbations reflètent la différence de structure entre la zone correspondant aux îles volcaniques classiques (au Sud de notre étude, Tana et Erromango) et les îles du type Malekula et Efate. Les différentes unités géologiques mises en évidence en surface sont donc

liées à d'importants phénomènes plus profondément. L'étude de l'approche au donné (figure (V.6)) montre une incohérence dans les données des cinq stations d'Efate. La complexité de la zone d'Efate, en contact avec le volcanisme récent (NGna) peut en être la cause.

0,4 kms (COUCHES 1 et 2)

Les couches superficielles sont très peu corrélées par les deux techniques (figure V.7 a,b chapitre 5). De plus, les estimations de la qualité de l'information contenue dans ces blocs (résolution et coût marginal) rendent difficile leur interprétation (figure 6.6.).

Il faut retenir que ces anomalies doivent être interprétées comme des termes de stations qu'il serait plus correct de présenter en temps plutôt qu'en vitesse (Crosson 1976).

4 - 10 kms (COUCHE 3)

Cette couche de six kilomètres d'épaisseur est très hétérogène. Il est difficile de mettre en évidence des phénomènes à grandes échelles, le trajet des raies ne nous permet pas d'obtenir une structure en continu (figure 6.5.c). Des valeurs variant entre 4,4 km/s et 6 km/s sont en accord avec les résultats de sismique réfraction obtenus plus au Sud à des profondeurs semblables. (fig 6.8)

10 - 19 kms

Une zone à vitesse relativement rapide (7,2 km/s, comparé à 6,3 km/s, valeur moyenne initiale dans cette couche), est mise en évidence dans la portion Nord de notre discrétisation. Elle s'étend vers le Sud à une trentaine de kilomètres de l'île de Malekula. Cette même tendance se retrouve dans la région d'Efate. L'anomalie représente une variation de 10 % à 15 % par rapport à la valeur initiale. De telles valeurs ne sont pas mises en évidence plus au Sud par les campagnes de sismiques réfraction (région de Tana, Erromango). Elle se retrouve, par contre, à l'Ouest de la fosse (figure 6.8.) ou elle peut être considérée comme une croûte inférieure rapide de la plaque plongeante. Des valeurs numériques semblables peuvent

donc caractériser des zones différentes ; on mesure ainsi la difficulté de particulariser la zone de contact entre les deux plaques dans cette région. Les vitesses pouvant être voisines, il serait intéressant de pouvoir utiliser d'autres connaissances géophysiques pour essayer de lever cette ambiguïté (mécanisme au Foyer des séismes, données magnétiques ...). Malheureusement, peu d'études concernent cette région.

19 - 30 kms (COUCHE 5)

Dans la zone Nord, on retrouve une perturbation de vitesse moyenne 7,2 km/s (présente ici sous la forme d'anomalie relative négative (lente)). Moins visible sous Efate, cette couche n'est pas mise en évidence entre îles où les valeurs obtenues semblent indiquer la présence de manteau (vitesse supérieure ou égale à 8 km/s). Les valeurs ($\approx 8,8$ km/s) ne sont ici que qualitatives. Elles reflètent la présence d'un manteau rapide (figure 6.5.c). Les bornes utilisées à ces profondeurs devraient être plus fines afin d'éviter des solutions de ce type (solutions que l'on sait non physiques). Toutefois, le sens des variations de vitesse étant très bien corrélé pour cette couche par les deux techniques (figure 5.7 e), ce résultat est très intéressant. Une couche aussi épaisse avec une telle vitesse étant peu commune. On remarquera que l'accident de vitesse 7,2 km/s environ a une limite qui suit l'abaissement des fonds marins dans cette région. Un autre élément confirme la présence d'une hétérogénéité de structure dans cette zone : il s'agit des rares mécanismes au foyer obtenus entre 16 et 18° de latitude Sud. Pascal et al. (1978) et Johnson et Molnar (1977) présentent le plan de faille possible pour trois séismes. Les épicentres de ces séismes, redéterminés en utilisant la localisation relative par groupe présentée au chapitre I.2, sont connus avec une bonne précision. Par contre, on ne peut pas accorder beaucoup de confiance à la profondeur de ces foyers superficiels (chapitre I.2.). Des profondeurs respectives de 35 km, 24 km, 29 km indiquent seulement que ces séismes, vu leurs mécanismes, se situent dans la plaque supérieure. Le séisme 1 présente donc un mécanisme en accord avec une discontinuité Nord-Sud.

30 - 40 kms (COUCHE 6)

Le phénomène devient plus compliqué. La couche à 7 km/s semble persister au Nord. La zone intra îles, assez perturbée, a une vitesse moyenne qui reste rapide.

Le bloc à vitesse 7,3 km/s, situé au Nord-Ouest d'Efate peut être relié à l'essaim de séismes bien visible sur la figure (6.9.).

40 - 60 kms (COUCHE 7)

Le peu de bloc testé et le nombre de raies utilisées ne permettent pas d'étendre notre étude à ces profondeurs.

L'étude par couche, de résultat tridimensionnel n'est pas toujours très facile. Les trois coupes perpendiculaires à la ligne volcanique (figure 6.10 a, b, c) et une coupe longitudinale permettent de compléter la visualisation du modèle obtenu (figure 6.11.).

REGION MALEKULA

Après une couche de vitesse entre 4,4 et 5,5 km/s (4 - 10 km de profondeur), on voit apparaître sous Malekula une couche de vitesse 7,0 à 7,2 km/s. Cette couche, se prolongeant peut être jusqu'à 40 km de profondeur étonne par son épaisseur. On retrouve ensuite le manteau. Ces résultats sont en accord avec les tendances qu'expriment les solutions des zones Nord et Sud séparées. La sismicité que l'on utilise est très diffuse sous Malekula et les mouvements d'épicentre ne sont pas affectés par un déplacement systématique (figure 6.11). Cette sismicité semble se situer en grande partie, dans la plaque supérieure (figure 6.12.).

On peut noter qu'on ne met pas en évidence un décalage de racine sous cette île. Des profils magnétiques trouvaient un minimum de l'anomalie de Bouguer entre Santo et Aoba plus nord (maximum d'épaisseur de la croûte). (Luvendyck et al. 1974). Une question reste posée : existe-t-il un épaissement de la racine plus au nord comme suggéré par la zone à 6,8 km/s entre 30 et 40 km (figure 6.5.f) ?

REGION EFATE

Cette zone est plus complexe. On retrouve une couche à 7,2 km/s jusqu'aux environs de 30 km de profondeur (figure 6.11). Cette couche est moins visible sur la

coupe perpendiculaire à la tectonique (figure 6.10 c). Les restrictions énoncées précédemment pour l'ère de 8,8 km/s (effet de bornes) sont à considérer ici pour des valeurs de 4 km/s. Une variation de l'ordre de $\pm 7\%$ serait plus réaliste pour les sites à de telles profondeurs. Un décalage vers l'Ouest de la racine sous Efate sur la figure (6.10 c). Le bloc de vitesse 7,1 km/s situé à l'Ouest de l'entre 19 et 30 km de profondeur peut être rattaché à la couche classique la plaque plongeante. On retrouve une trace de cette couche dans la couche 9 (figure 6.5 f) et on explique ainsi la zone relativement lente de la couche subduction serait donc localement non perpendiculaire à la ligne vue. C'est une explication possible. Pour essayer de mieux relier la sismicité et la structure en vitesse, on a reporté sur la figure (6.13.), les séismes proches dans le temps pour l'essai de Nord-Ouest d'Efate. Ces séismes indiquent une zone de fracture en accord avec le mécanisme du séisme d'août 1979 (1979) remarque qu'un séisme assez conséquent pour la région ($m_b = 5.0$) aligne sur cette zone de fracture ainsi que ses répliques. Ici encore, regretter de ne pas pouvoir travailler sur les mécanismes focaux.

INTERPRETATION

Le caractère des deux régions (figure 6.11.) se particularise par une ondulation de la "cr"

Une couche aussi ne se retrouve pas souvent. Un exemple sur la marge continentale de l'Atlantique Nord (R.E. Sheridan, 1979), un autre sous le Japon (Murauchi et Utsui, 1979), peut-être sous l'île Nias près de Sumatra (S.M. Kieckhefer, 1980). Des vitesses sont alors mises en évidence mais à des profondeurs plus faibles. Ce type de croûte se retrouve aussi sous les zones de subduction océan-co, type Altiplano. De toutes ces études, figure (6.14), le modèle de Puerto Rico est le plus en accord avec nos résultats. Toutefois, l'interprétation des numériques obtenues est délicate.

Bien que les études tridimensionnelles réalisées avec cette technique aient souvent fourni des résultats qualitativement cohérents la signification des valeurs des anomalies reste complexe. Il est important de remarquer

par exemple que les études réalisées dans des zones volcaniques actives (Hawaï - Ellsworth et Konayanguai) n'ont jamais mis en évidence de zone à vitesse lente, à faible densité, liée à la présence du magma. Au contraire, une vitesse rapide est souvent obtenue dans ces zones. La présente température élevée peut entraîner un processus de métamorphisme, un réaligement des porosités, qui se concrétise par un accroissement de la vitesse (Ellsworth, Aki personnel communication).

Ces restrictions étant faites, on peut retenir l'explication que donne Kieckhefer. On peut aussi penser que cette couche est associée à des roches ultrabasiques. Il s'agirait, alors d'une couche épaisse rapide formée par une subsidence due à des processus sub-cristaux : une croûte continentale de 30 km d'épaisseur à l'origine, est fracturée, par des mécanismes d'extension (Rift), dans les 20 derniers kilomètres. Si ces fractures sont remplies par du magma ultrabasique venant du manteau, alors la structure en sandwich de roches ultrabasiques ($V_p \approx 8,1$ km/s) et de roches granitiques ($V_p \approx 6,2$ km/s) peut donner une croûte de vitesse et densité intermédiaire ($V_p \approx 7,2$ km/s). Peut-on ainsi relier ces résultats à l'existence d'un arc insulaire ancien, de pendage inverse à la subduction actuelle, dont l'axe frontal aurait été constitué par les îles Pentecost et Maewo ? Santo, Malekula et peut être une partie d'Efate, blocs continentaux ou quasi-continentaux, en auraient été l'arc volcanique.

Une telle hypothèse est envisagée par Goula et Pascal (1979), à la suite de l'étude tridimensionnelle des anomalies liées aux ondes S dans tout l'Arc des Nouvelles Hébrides.

On remarquera que le modèle mécanique proposé par Chung et Kahamaru (1979) ne peut expliquer la présence de l'île d'Efate (figure 6.15).

La sismicité de notre zone d'étude (16° S - 18° S) se voit ainsi liée aux zones de fracture ancienne. Cette sismicité se caractérise par une absence de gros séismes historiques. De plus, on notera que les répliques de la crise sismique de 1965 restent localisées dans la partie Nord de Malekula (fig. 6.16). Isacks et al. (1980) expliquent cette absence de sismicité par un blocage temporel de la subduction. Le réseau que nous utilisons a été implanté pour étudier les forts séismes attendus. Si on propose un modèle de subduction par fluage, la couche épaisse de vitesse 7,2 km/s environ pour les ondes P, peut caractériser ce mécanisme. D'un point de vue expérimental, il serait intéressant de connaître les vitesses des matériaux généralement présentés lors de phénomène de fluage (peu de travaux à ce sujet).

CHAPITRE VI

Figure VI.1. - Vue d'ensemble de l'arc des Nouvelles Hébrides. La topographie des fonds marins est en brasses (1 brasse = 1,83 m).

La ligne volcanique en trait discontinu constitue une référence pratique. Cette ligne reproduit bien l'alignement des volcans actifs de l'arc.

Figure VI.2. - Projection latérale des hypocentres le long de l'arc des Nouvelles Hébrides. Période 1963-1972. Le plan de projection est parallèle à la ligne volcanique de la figure (VI.1.).

Les traits gras horizontaux positionnent les îles, alors que les barres verticales localisent le volcanisme récent.

La région étudiée entre Efate et Malékula est caractérisée par un trou de sismicité entre 70 et 200 km de profondeur et une forte activité volcanique.

Figure VI.3. - La sismicité anormale de la zone située entre 16°S et 18°S ; les positions des coupes EE' et DD' sont notées sur la figure VI.2.).

Figure VI.4. - Réseau utilisé et sismicité.

Figure VI.5. - a, b, c, d, e, f, g, cartes en vitesse de la région étudiée : les informations en % présentées dans le chapitre V d'un point de vue numérique sont ici présentées en km/s. Les blocs entre crochets correspondent aux valeurs non corrélées (signes différents) par les deux techniques.

Les résultats sont ceux obtenus par programmation linéaire. Les blocs testés par un seul rai ne sont pas pris en compte dans ces figures.

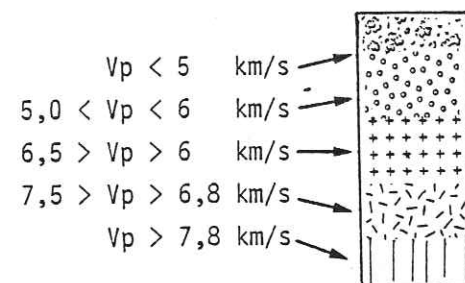
Figure VI.6. - Information contenue dans chaque couche.

La figure V.7. montre la faible cohérence des résultats pour les couches superficielles (0-4 km). La faible qualité des informations contenues dans ces blocs est confirmé par les diagrammes (R, U).

$R < 0,5$; $U < 0,1$ pour de nombreux blocs des couches 1 et 2.

La couche 6 semble fournir elle aussi une information assez pauvre. Toutefois, de nombreuses valeurs de bases (bien corrélées) n'apparaissent pas dans ce diagramme.

Figure VI.7. - L'information contenue dans les figures VI.5. est classée comme suit :



Sur la couche 5 on a reporté les seuls mécanismes aux foyers disponibles pour les séismes superficiels de cette région.

Figure VI.8. - Résultats obtenus plus au sud par des campagnes de sismique réflexion. (D'après Ibrahim Pontoise et al, 1980).

Figure VI.9. - Relocalisation des séismes.

- a/ Mouvement des épicentres.
- b/ Coupe perpendiculaire à la ligne volcanique sous Malékula.
- c/ Idem (b) mais dans la région d'Efaté.

Figure VI.10. - Coupe verticale en vitesse :

- a/ Coupe sous l'île de Malékula (MM').
- b/ Coupe sous l'île d'Efaté (EE').

Même notation que dans la figure VI.7.

Figure VI.11. - Coupe longitudinale parallèle à la ligne volcanique (VV'). Même notation que dans la figure VI.7.

Figure VI.12. - Corrélation entre Z et T.

Z - Variation de la profondeur des séismes.

T - Variation de l'heure origine.

Pour des séismes locaux, des variations du type $+Z_i$, $-T_i$ se compensent et reflètent la non unicité du problème. Sur cette figure, même lorsque la corrélation est forte, les coûts marginaux montrent que les variations en Z influent le plus sur l'ajustement aux données. Ces coupes verticales ont donc une signification.

Figure VI.13. - Etude de l'essaim de séismes au Nord-Ouest d'Efaté.

a/ Coupe perpendiculaire à la ligne volcanique.

b/ Coupe parallèle à l'axe de fracture.

On reporte alors les séismes les plus proches en temps pour visualiser la zone de contact entre les deux plaques.

Pour les vitesses, se reporter aux symboles utilisés dans la figure VI.7.

Figure VI.14. - Modèles obtenus au-dessus de différentes zones de subduction.

Figure VI.15. - Modèle mécanique proposé par Chung et Kanamouri pour expliquer la présence des îles Santo, Malékula, et Pentecost Maewo.

Figure VI.16. - Sismicité historique et emplacements des répliques de la crise de 1965, on peut corrélérer sur la Figure (a) la présence de Fort séisme avec celle d'un Faible volcanisme actif.

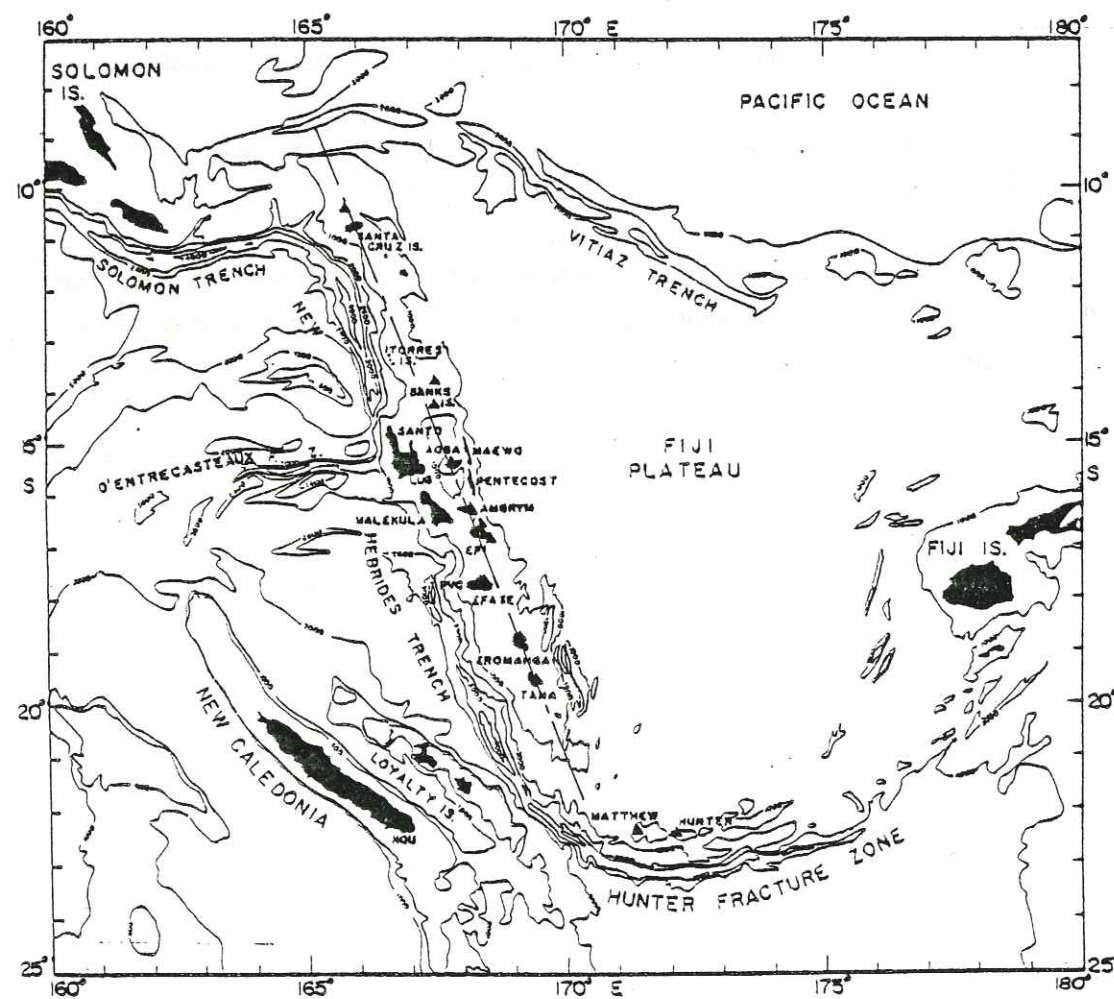
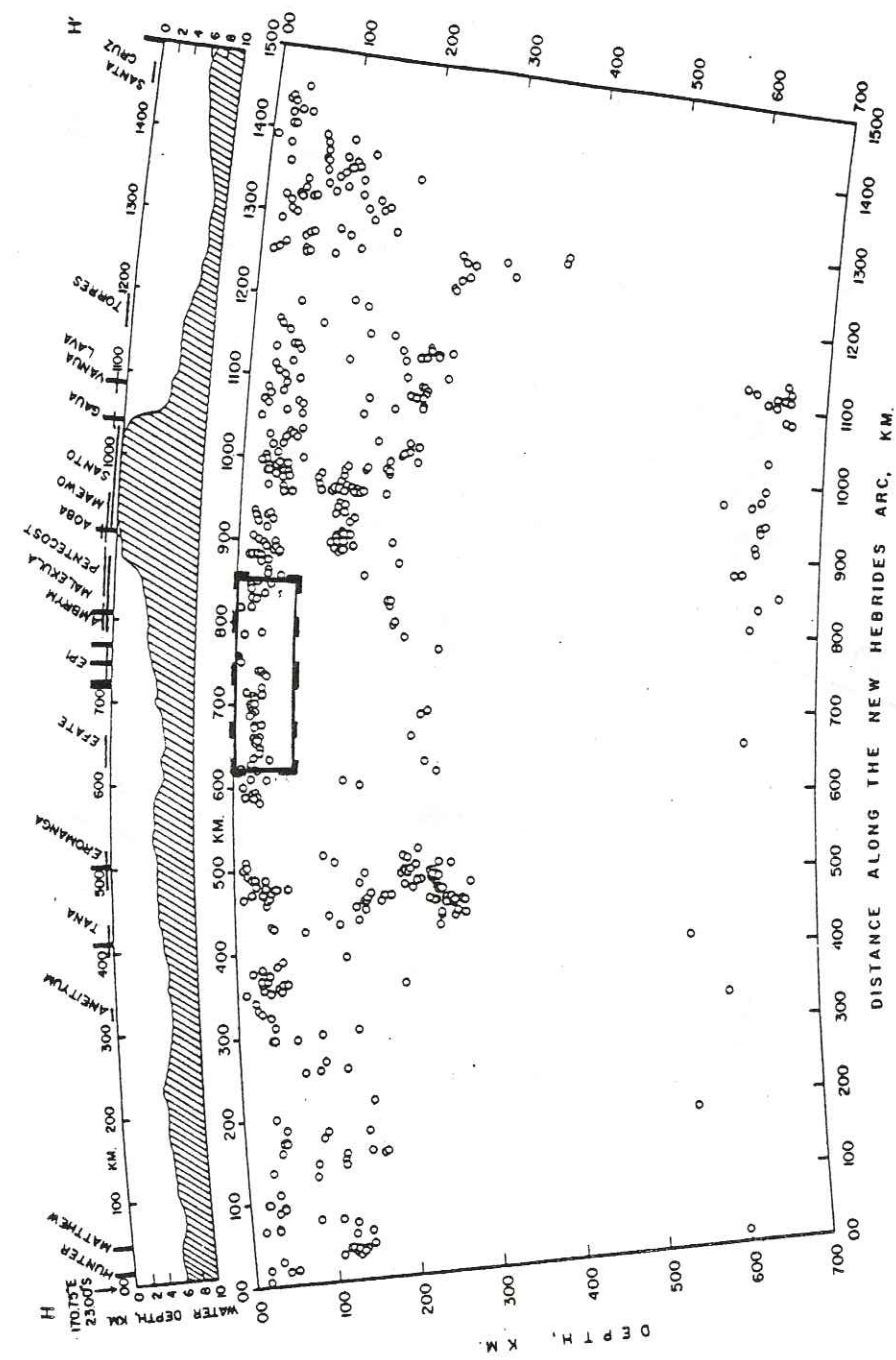
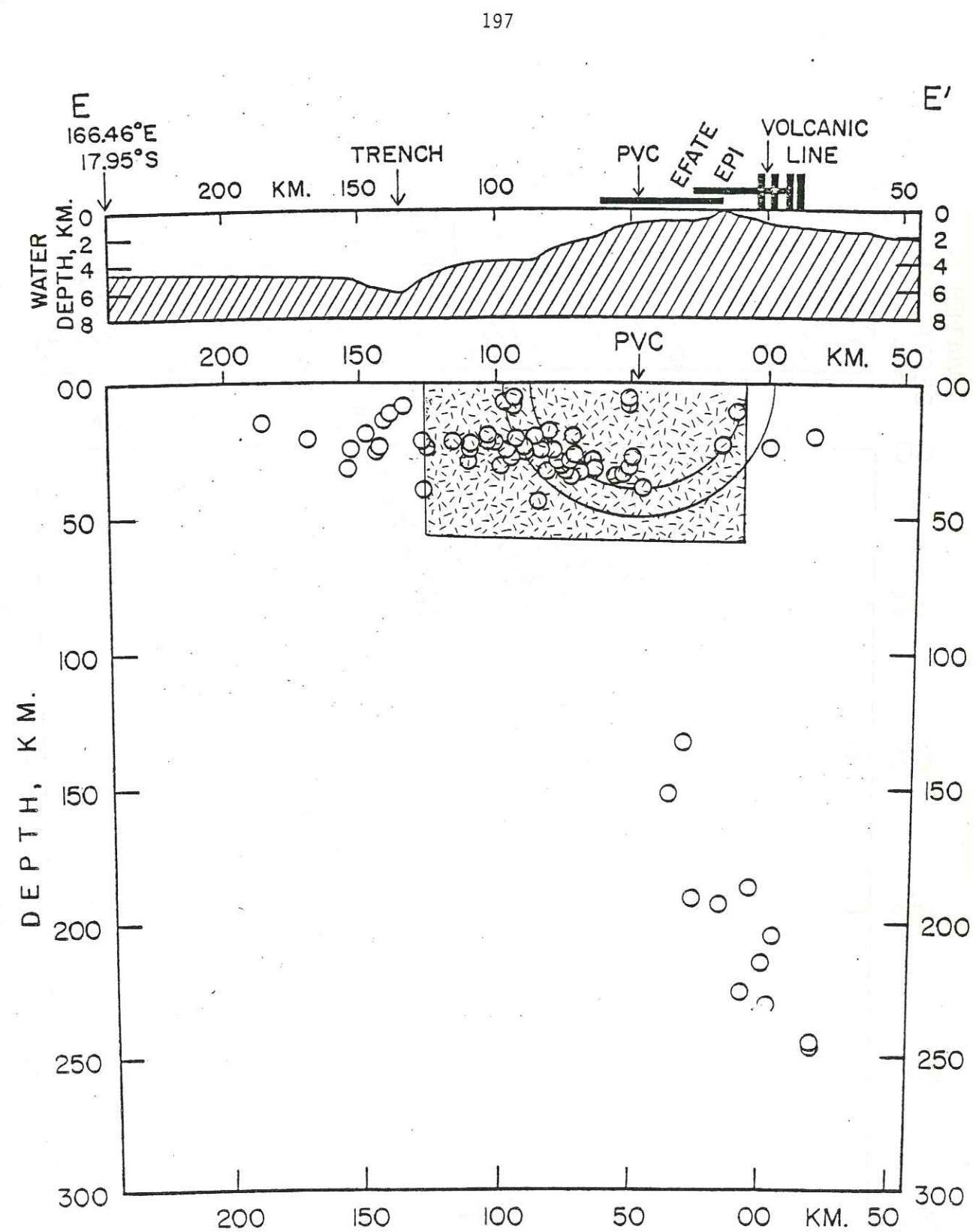
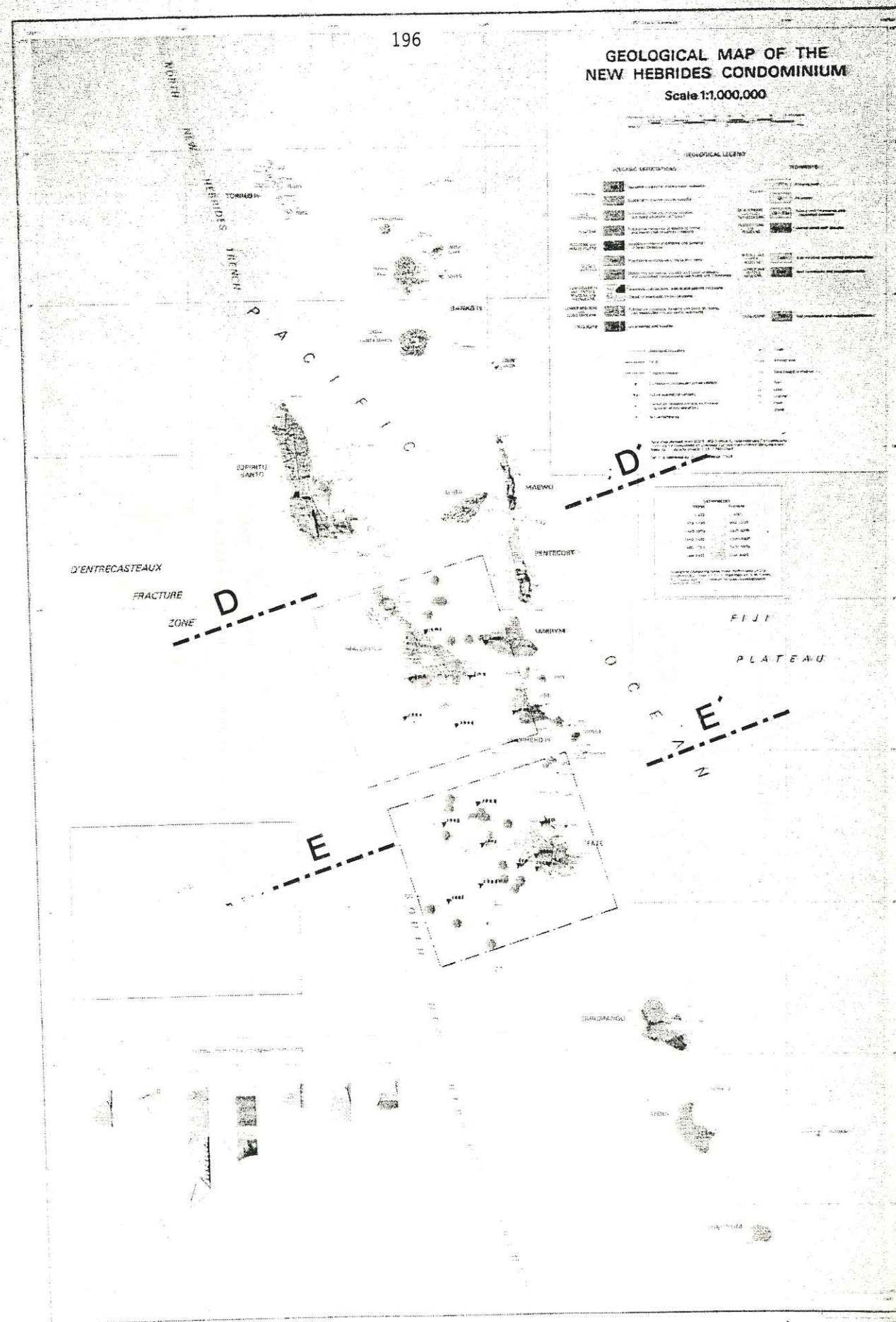


Figure VI.1.



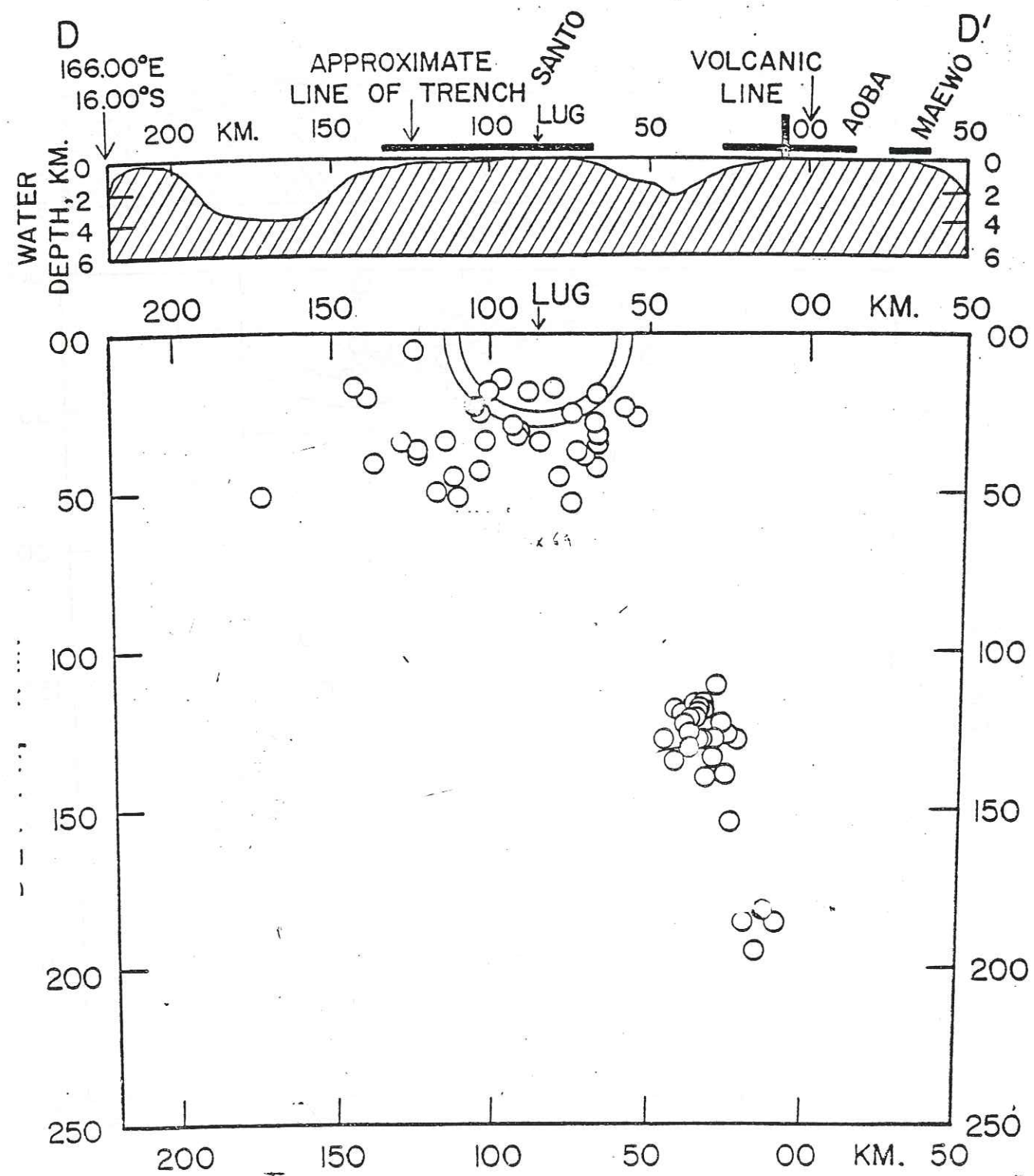
(a)

Figure VI.2.



(a)

Figure VI.3.



3 (b)

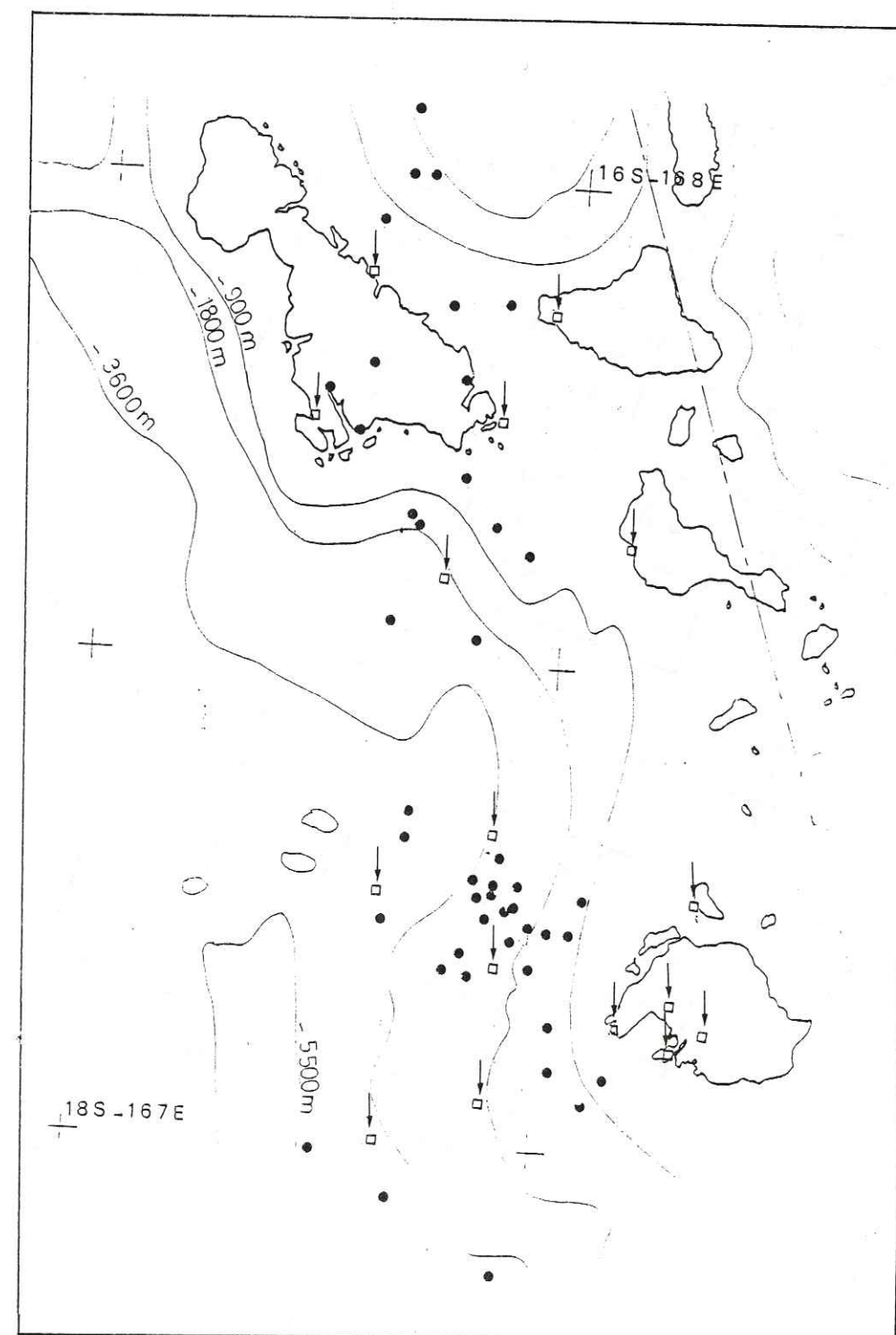
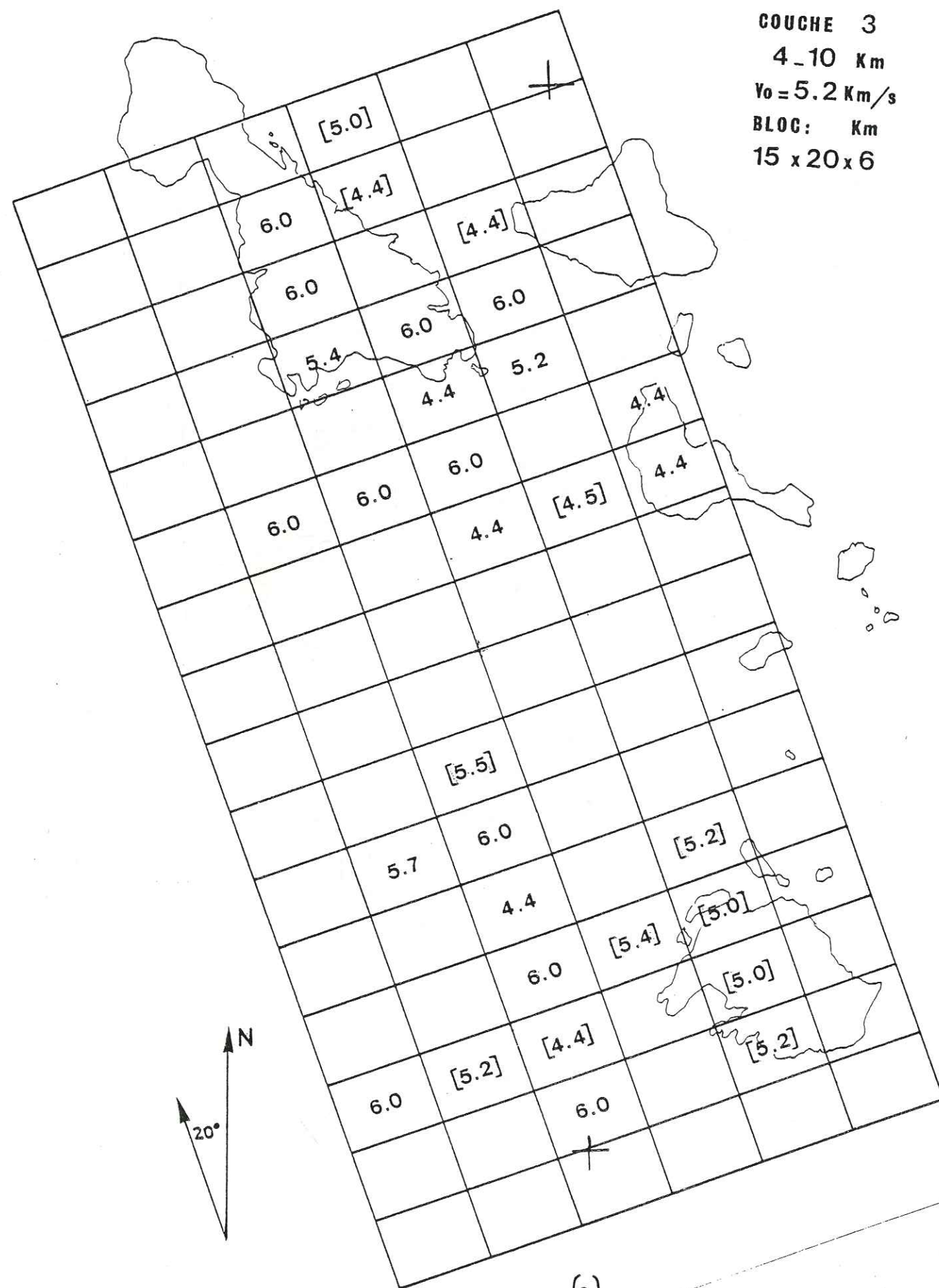
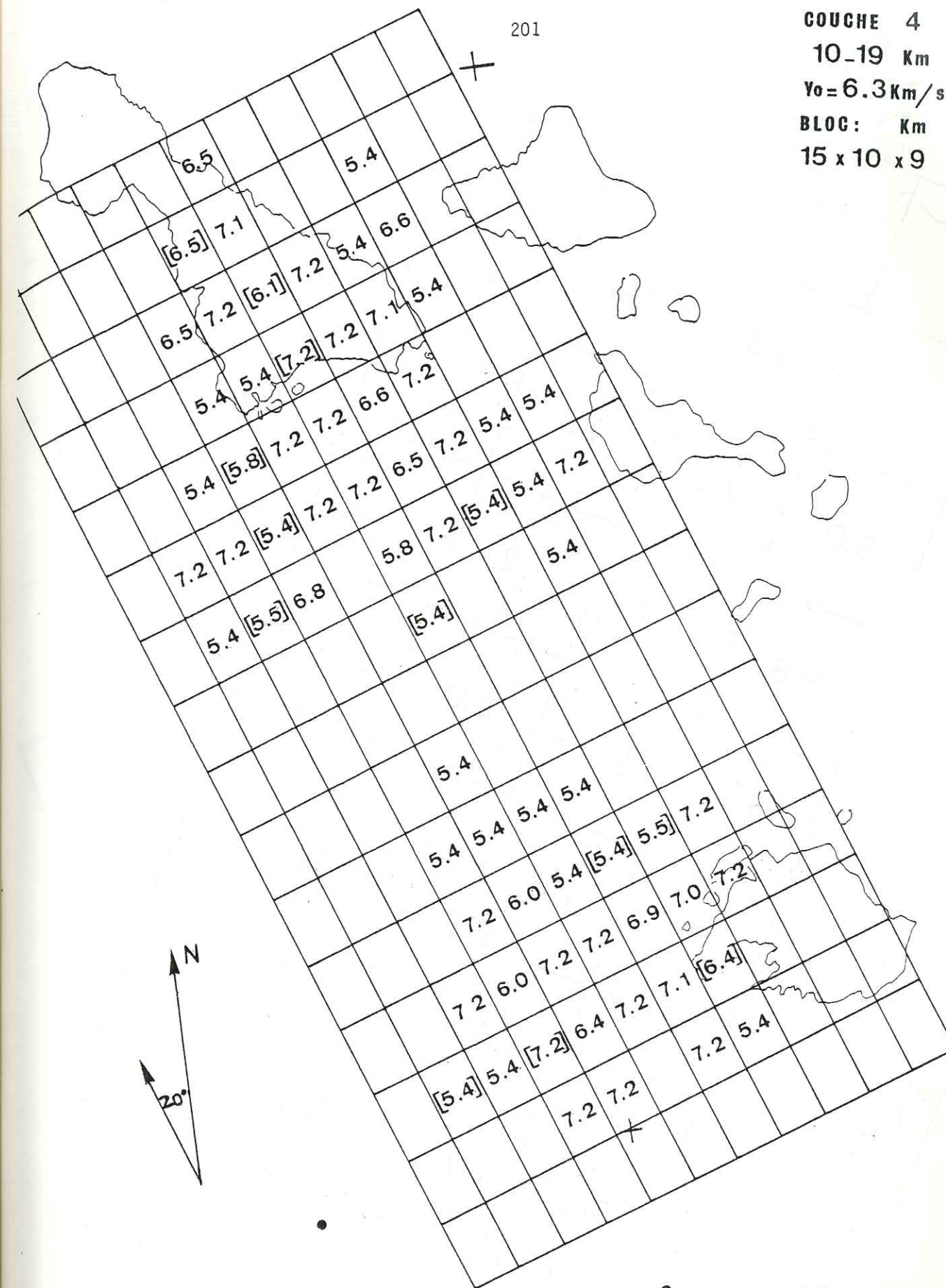


Figure VI.4.



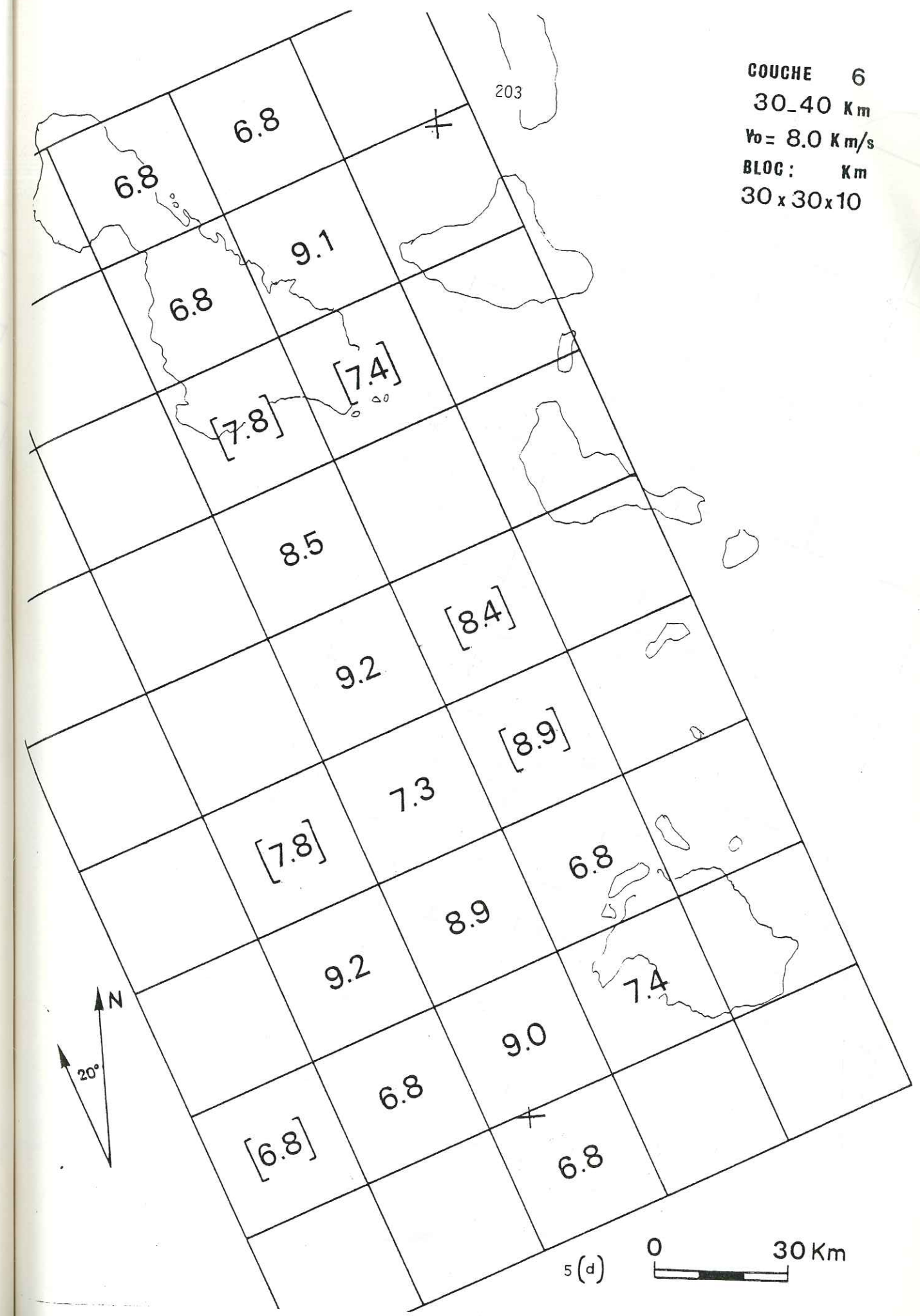
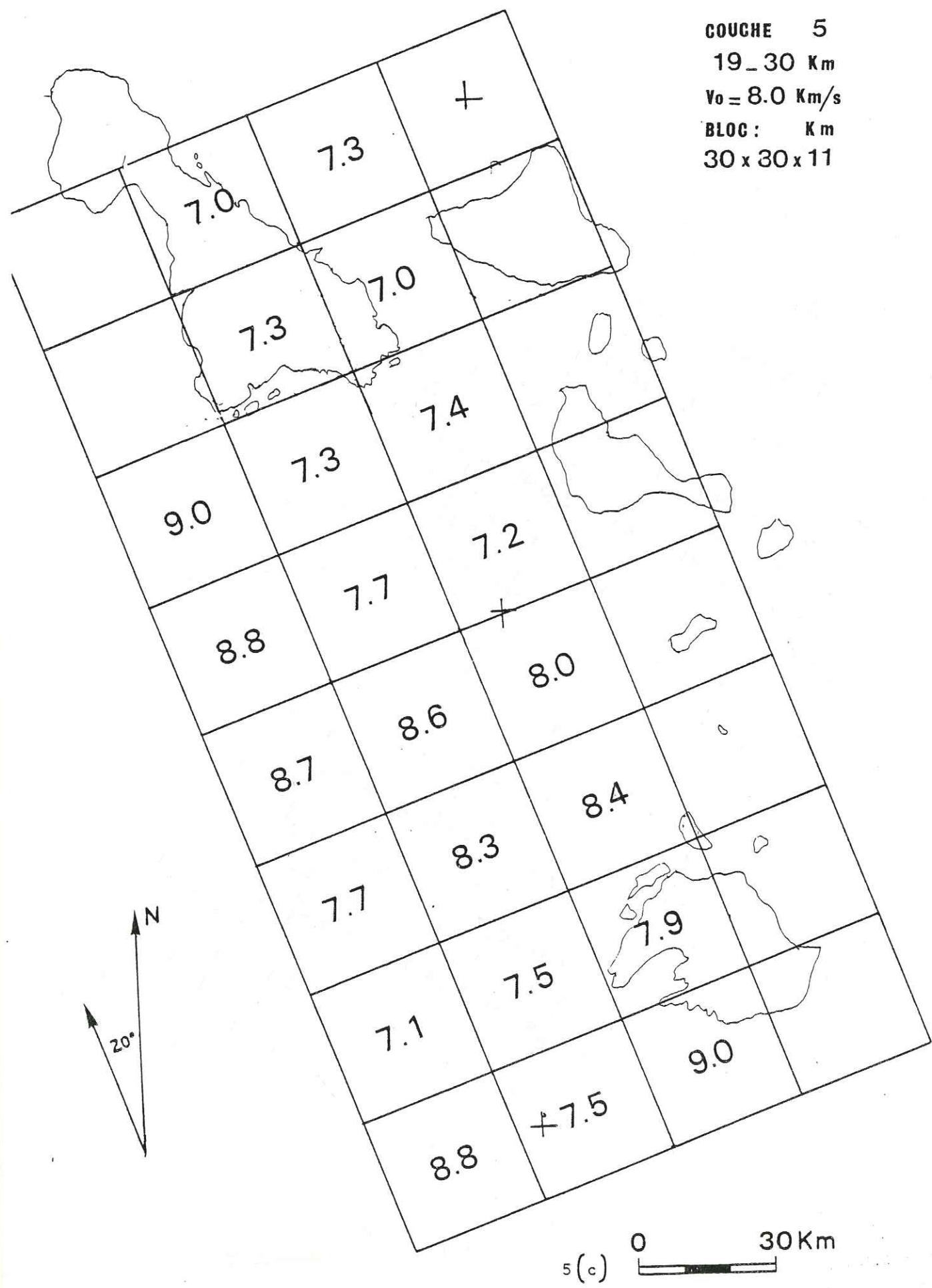
(a)

Figure VI.5.



(b)

0 30 Km



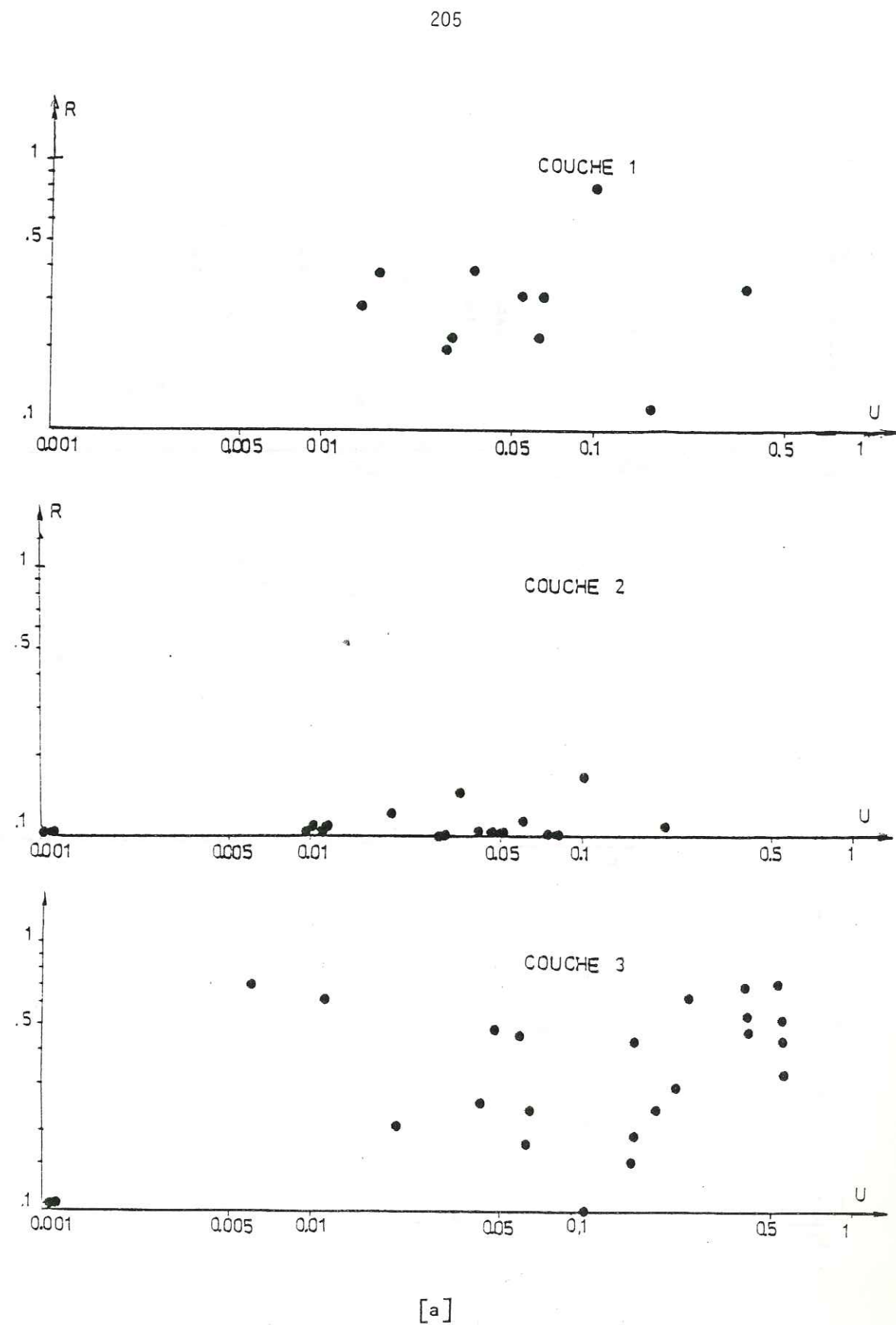
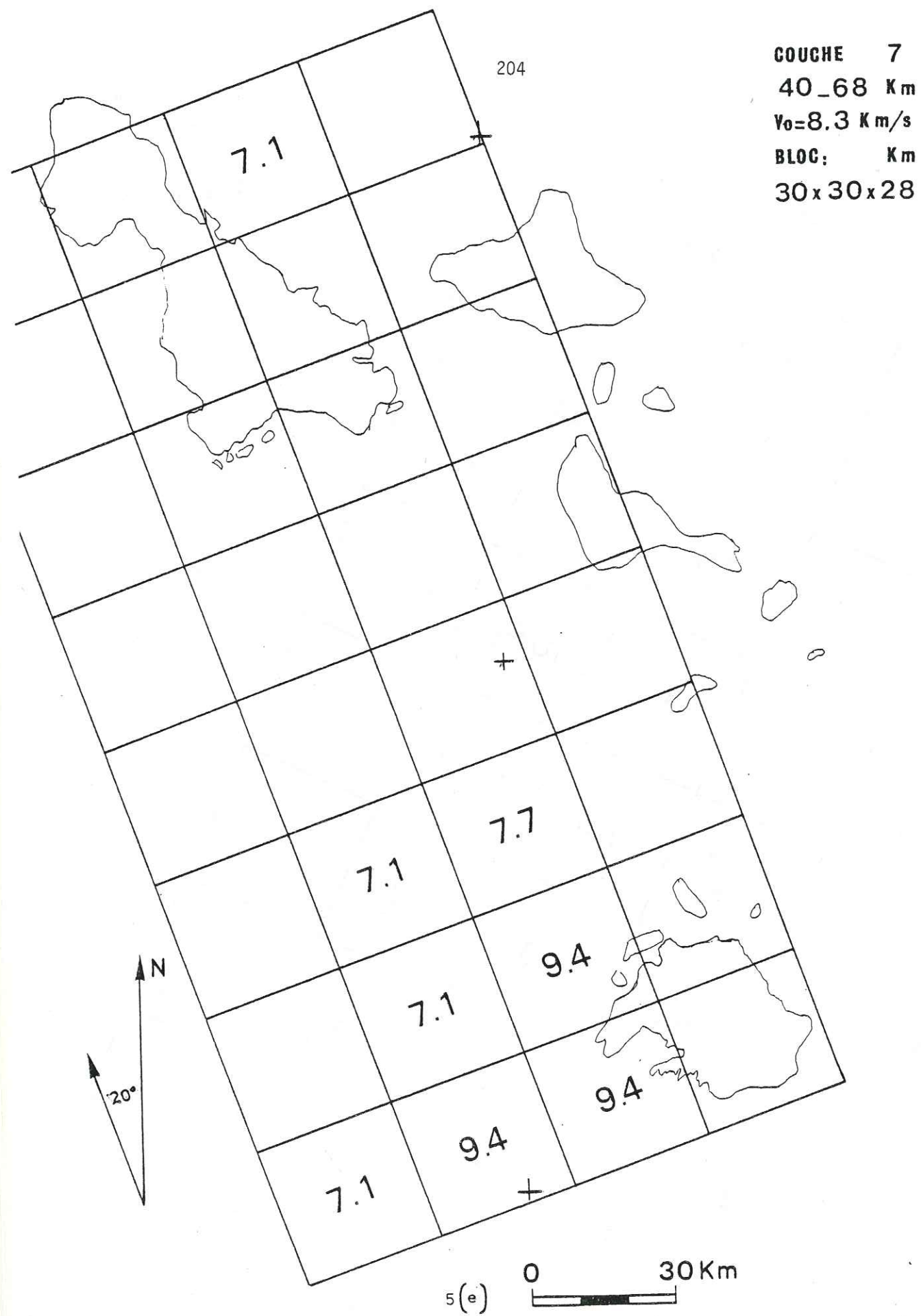
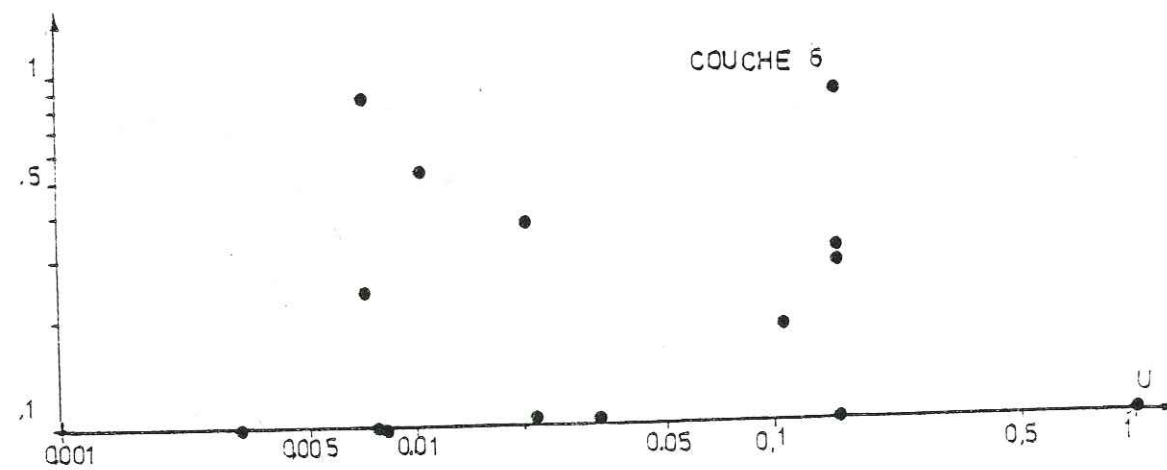
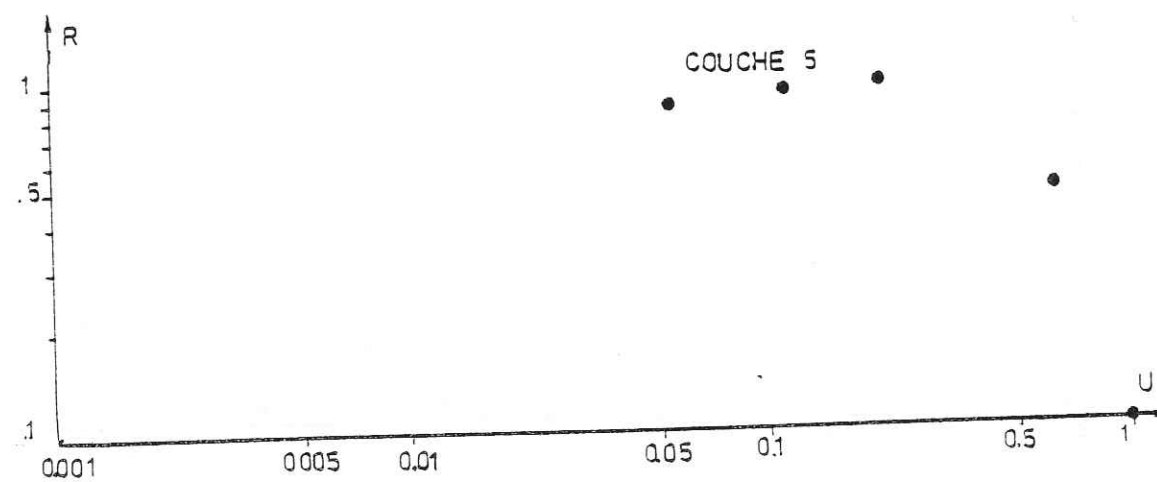
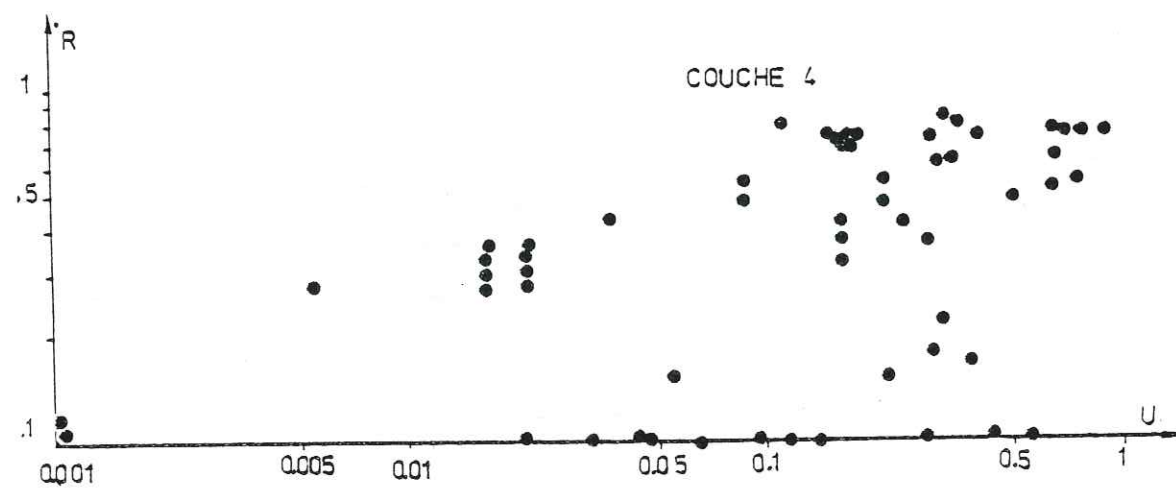
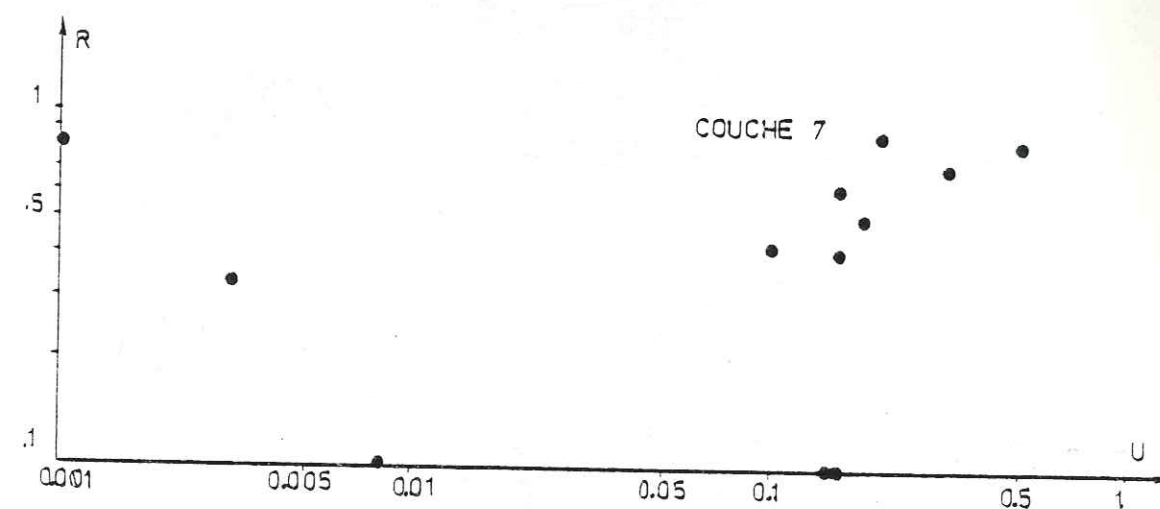
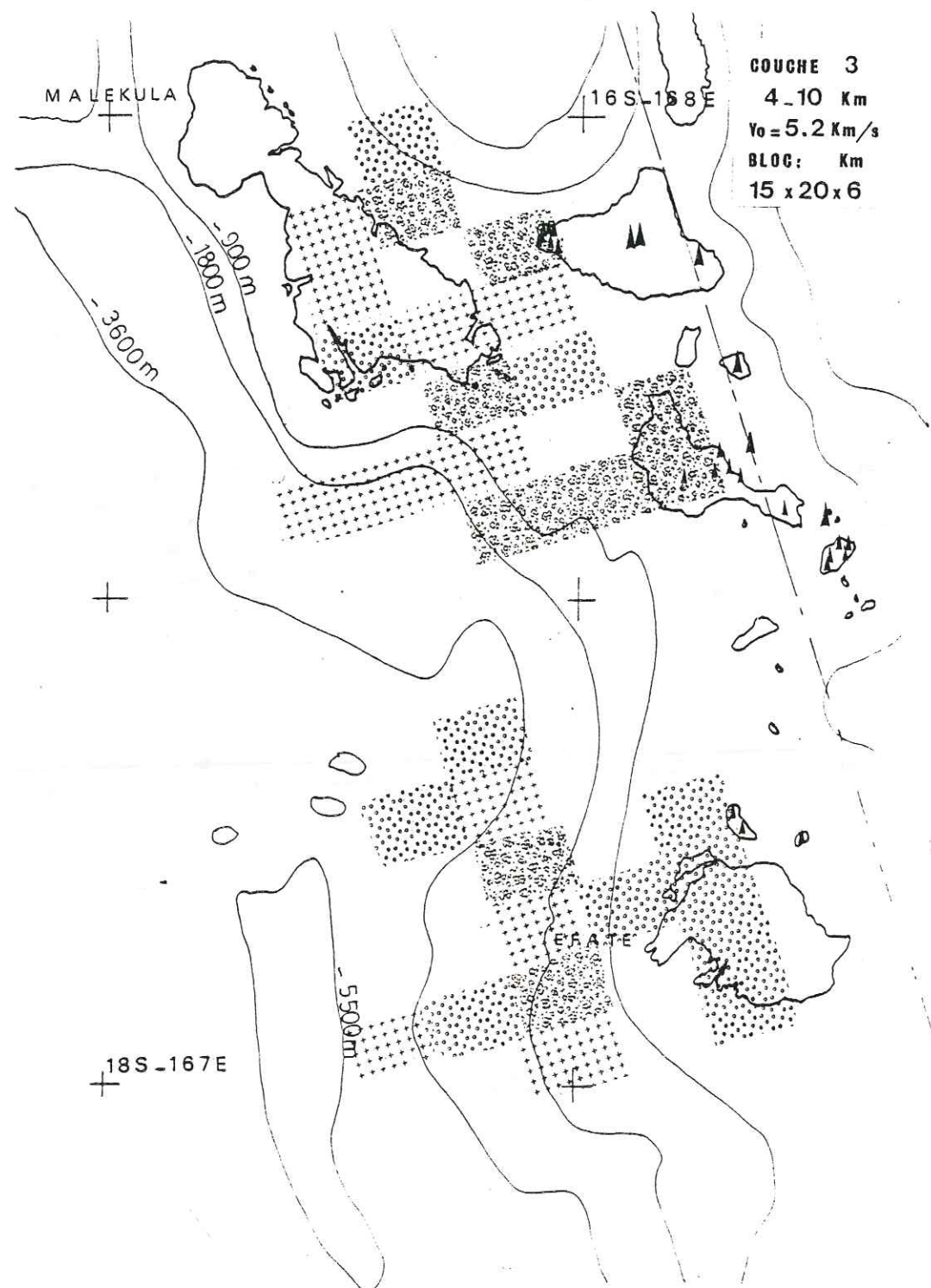


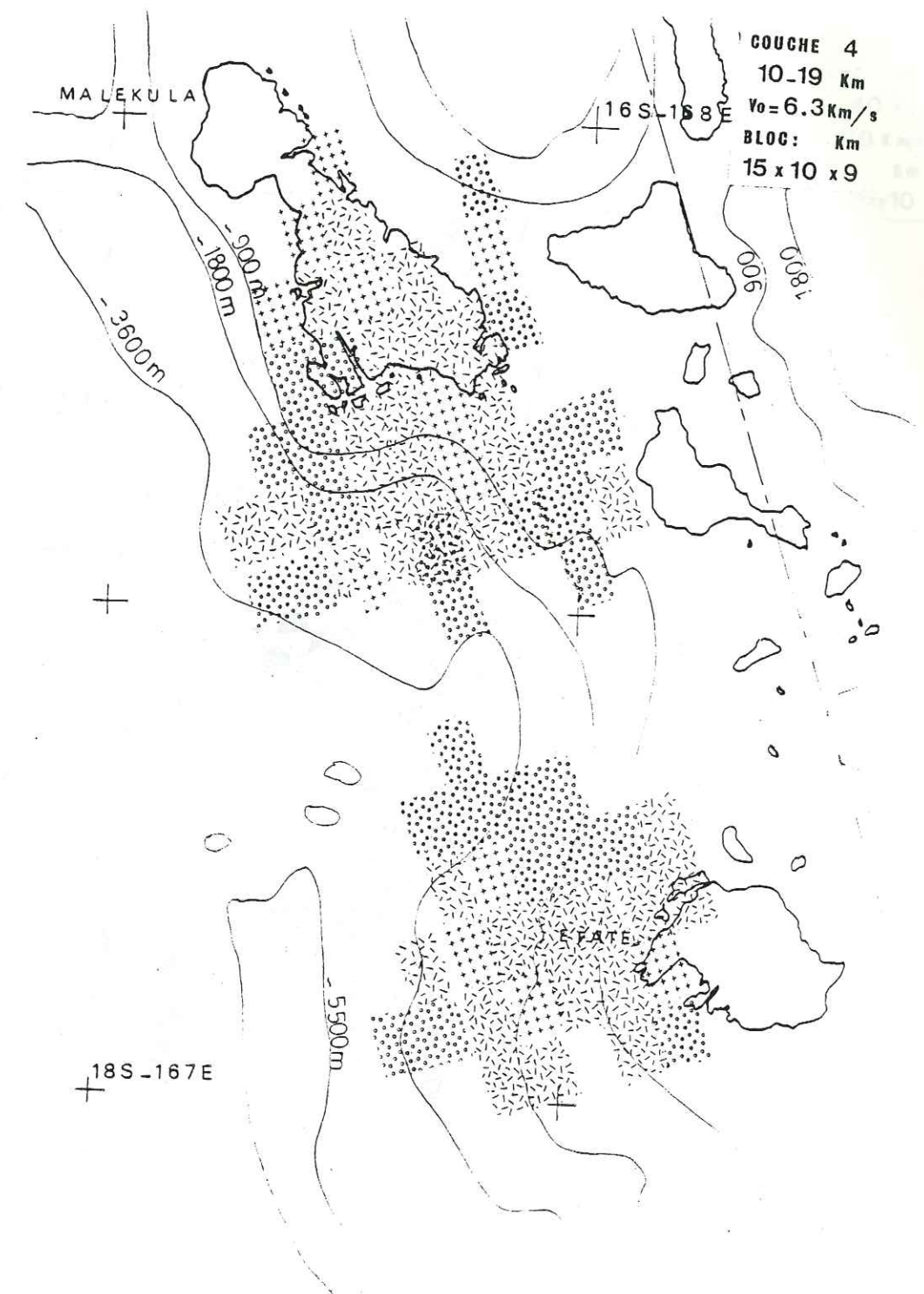
Figure VI.6.


 $\sigma[b]$

 $\sigma[c]$

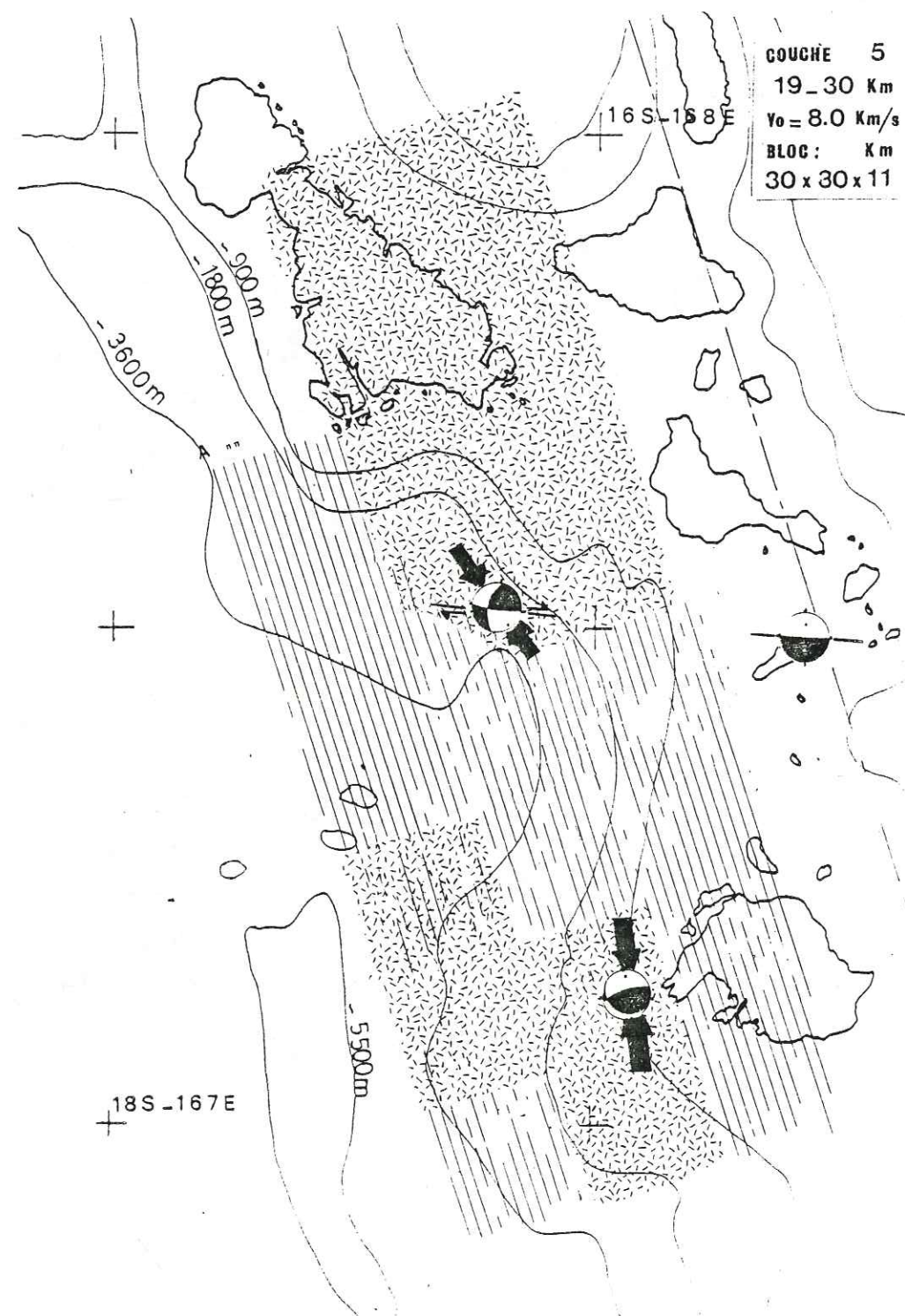


[a]

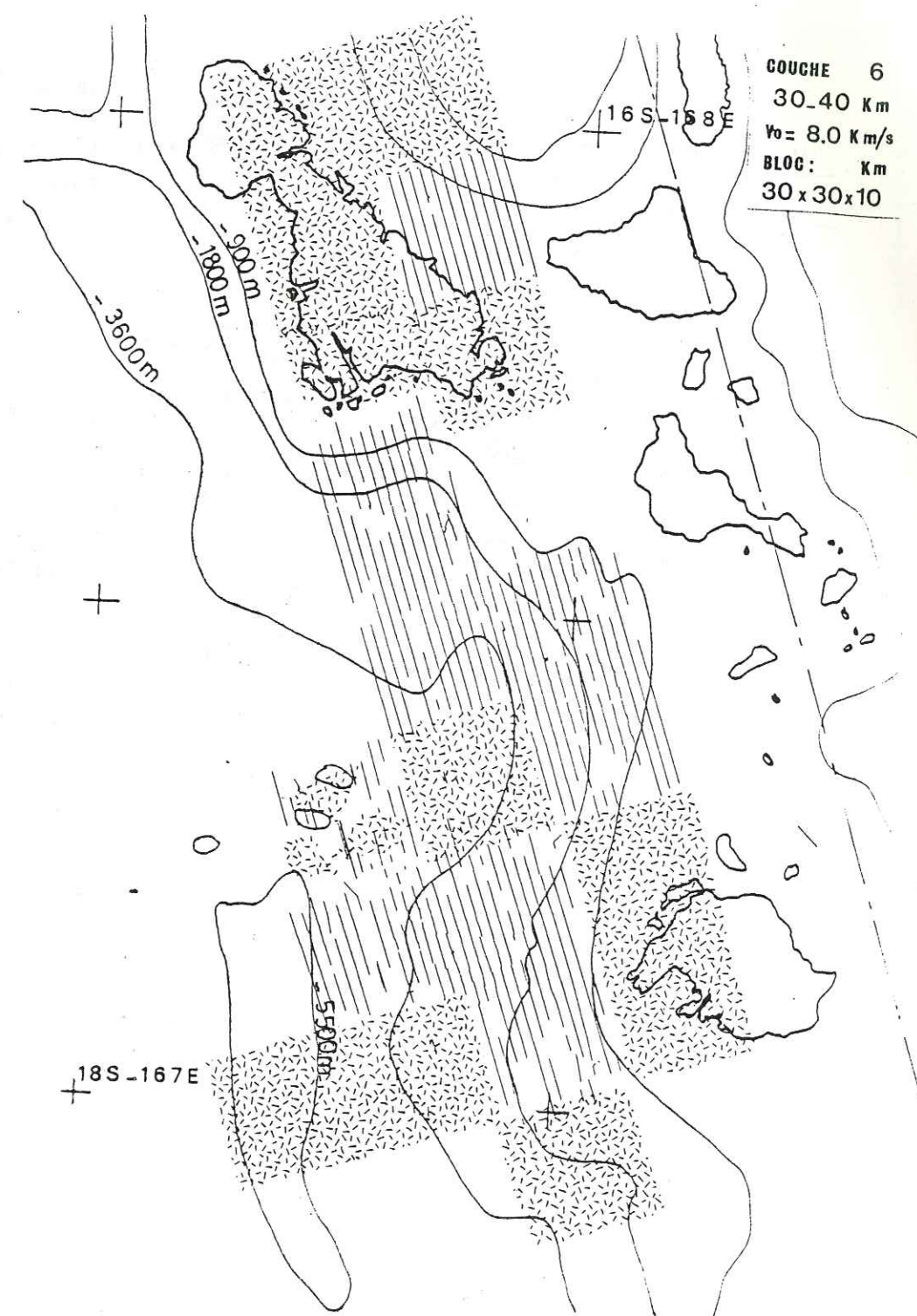
Figure VI.7.



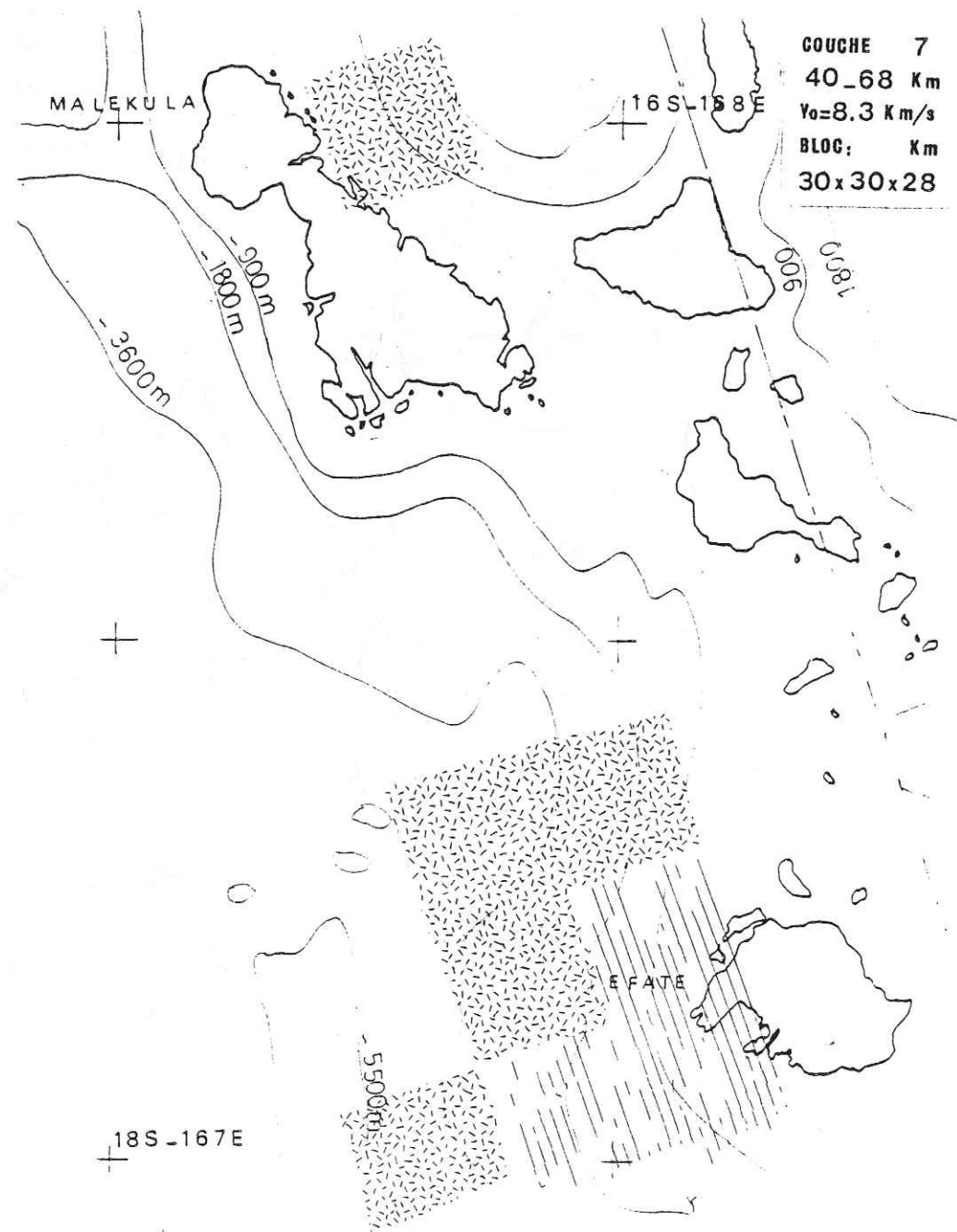
7[b]



7[c]



7[d]



7 [e]

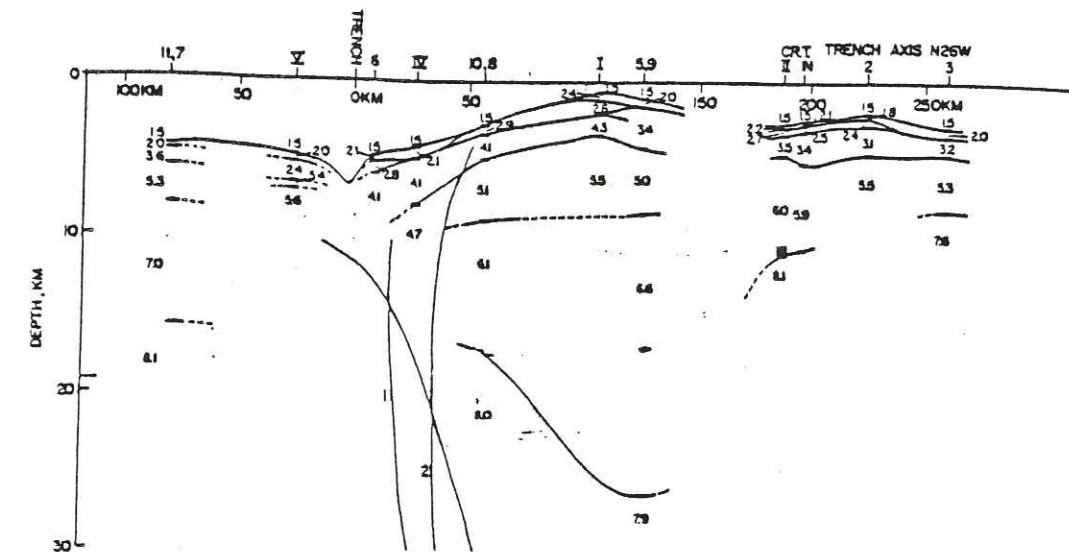


Figure VI.8.

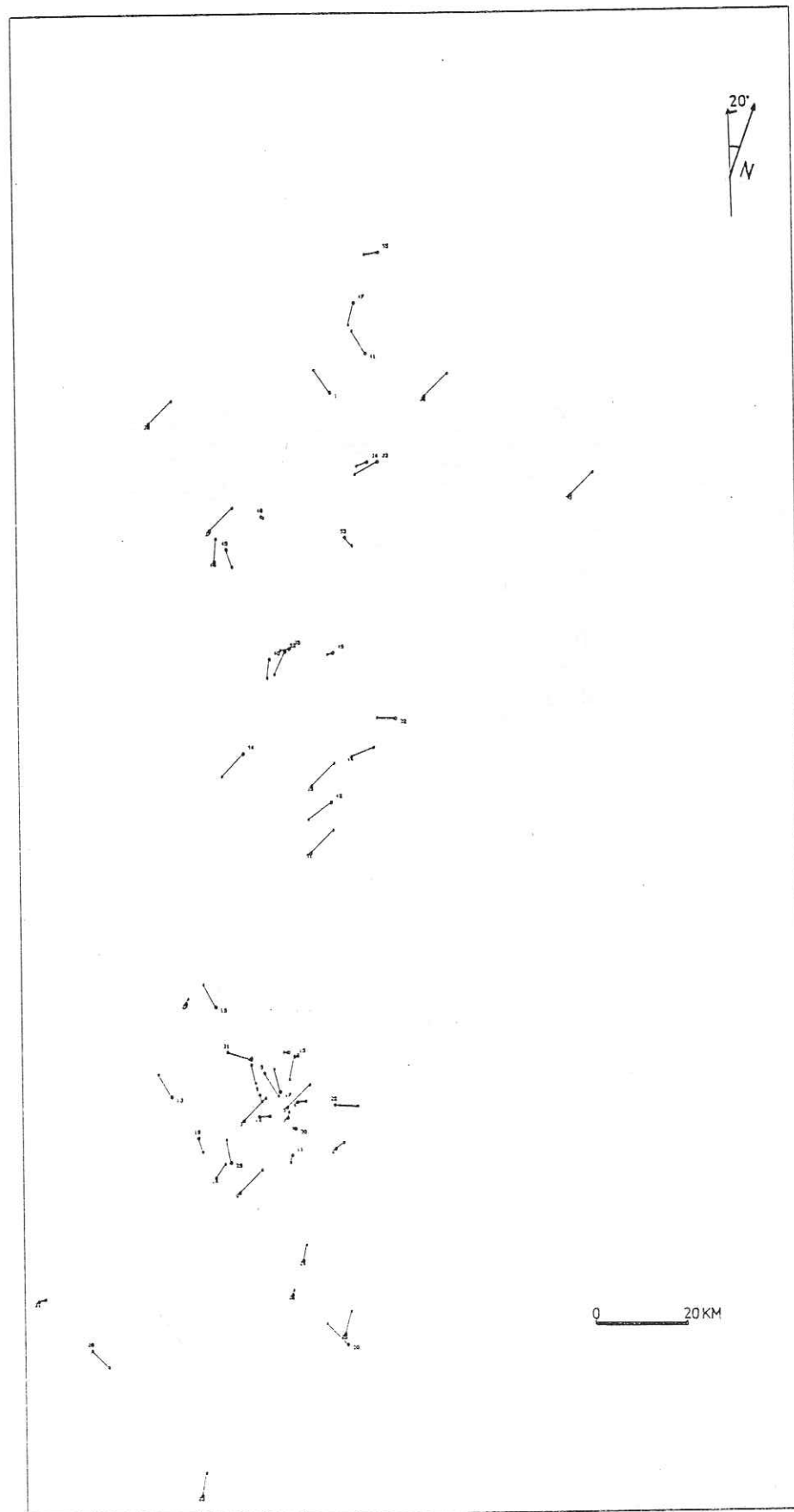
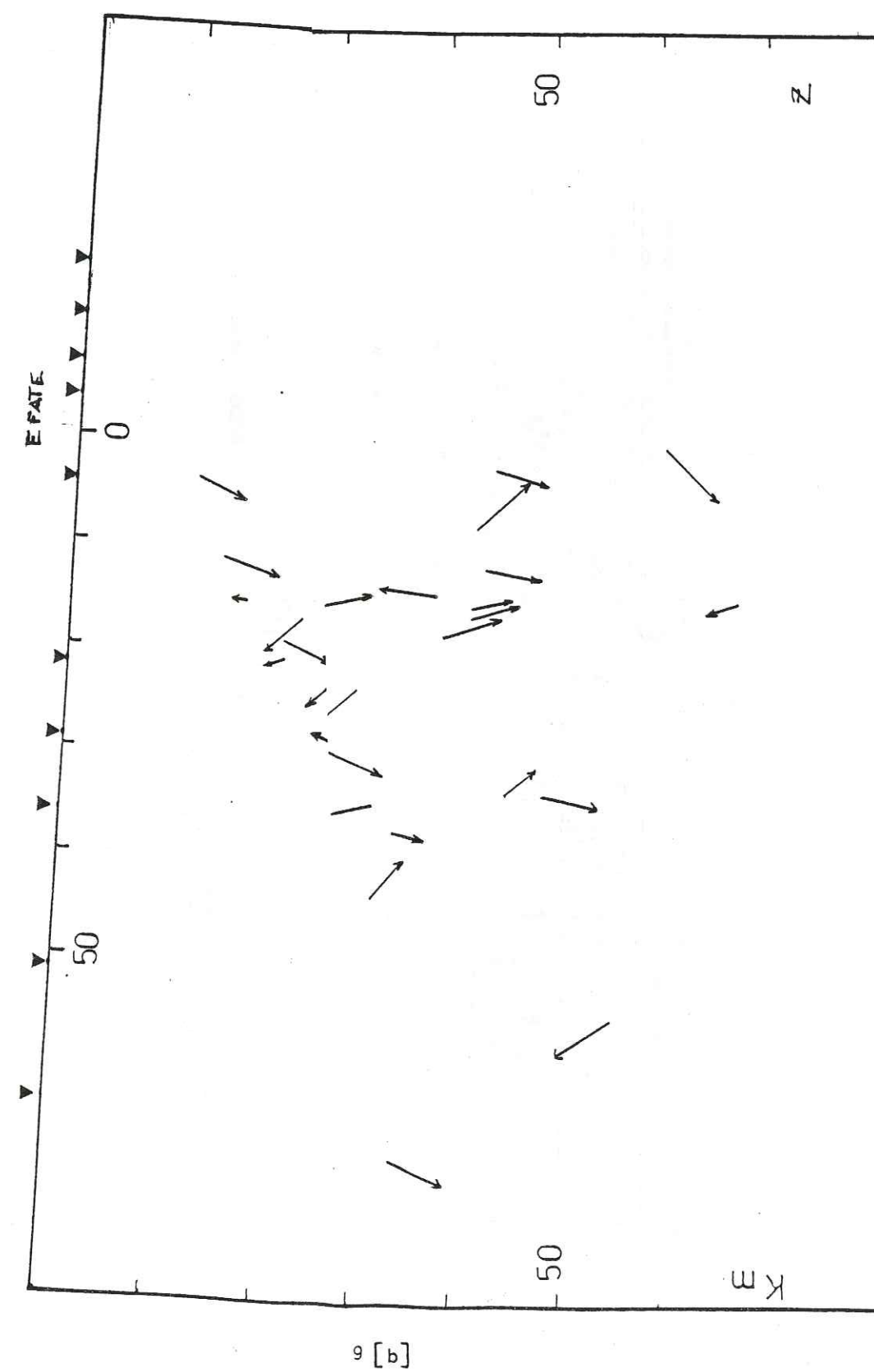


Figure VI.9. [a]



mouvement des foyers

Figure VI.10.

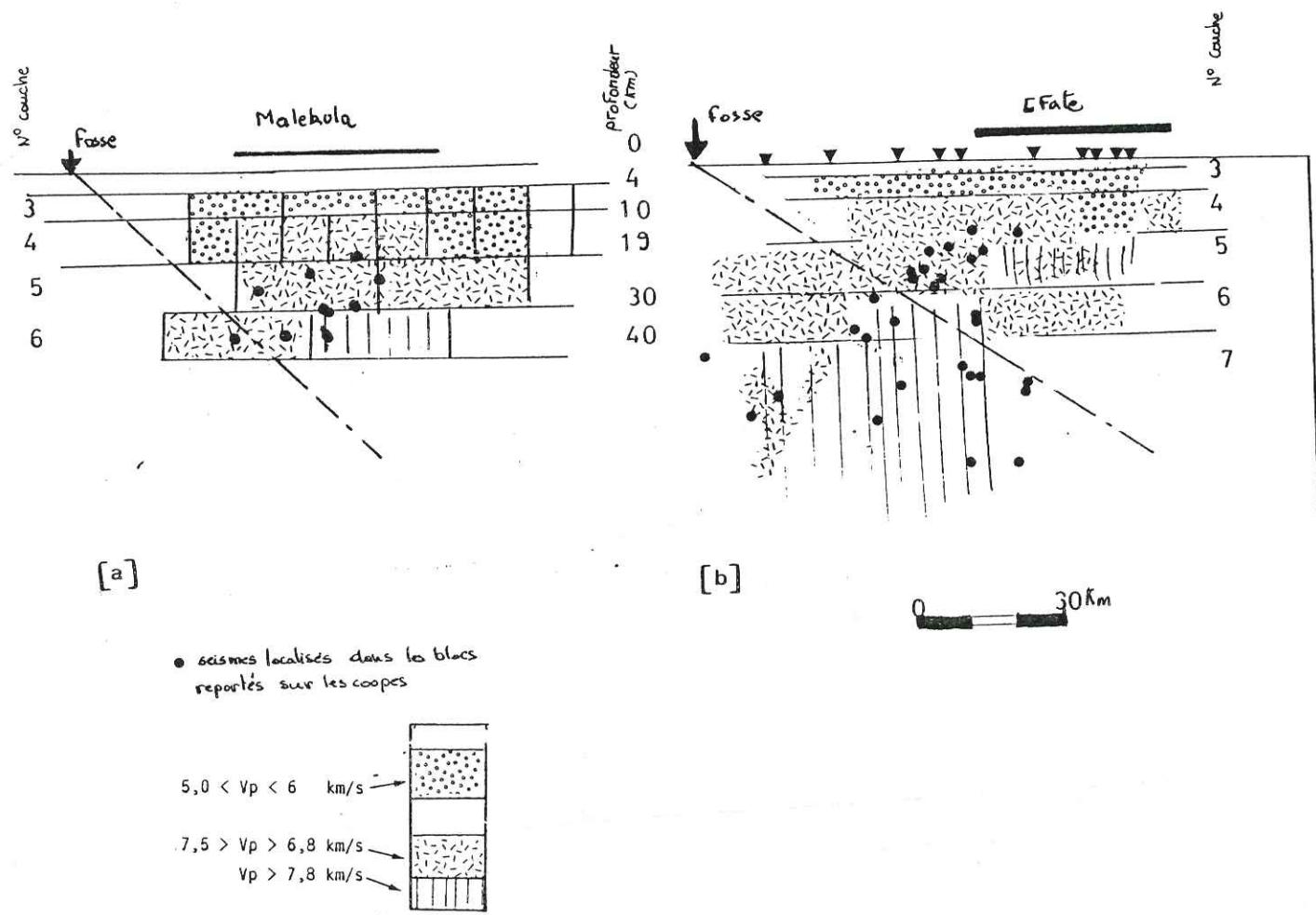
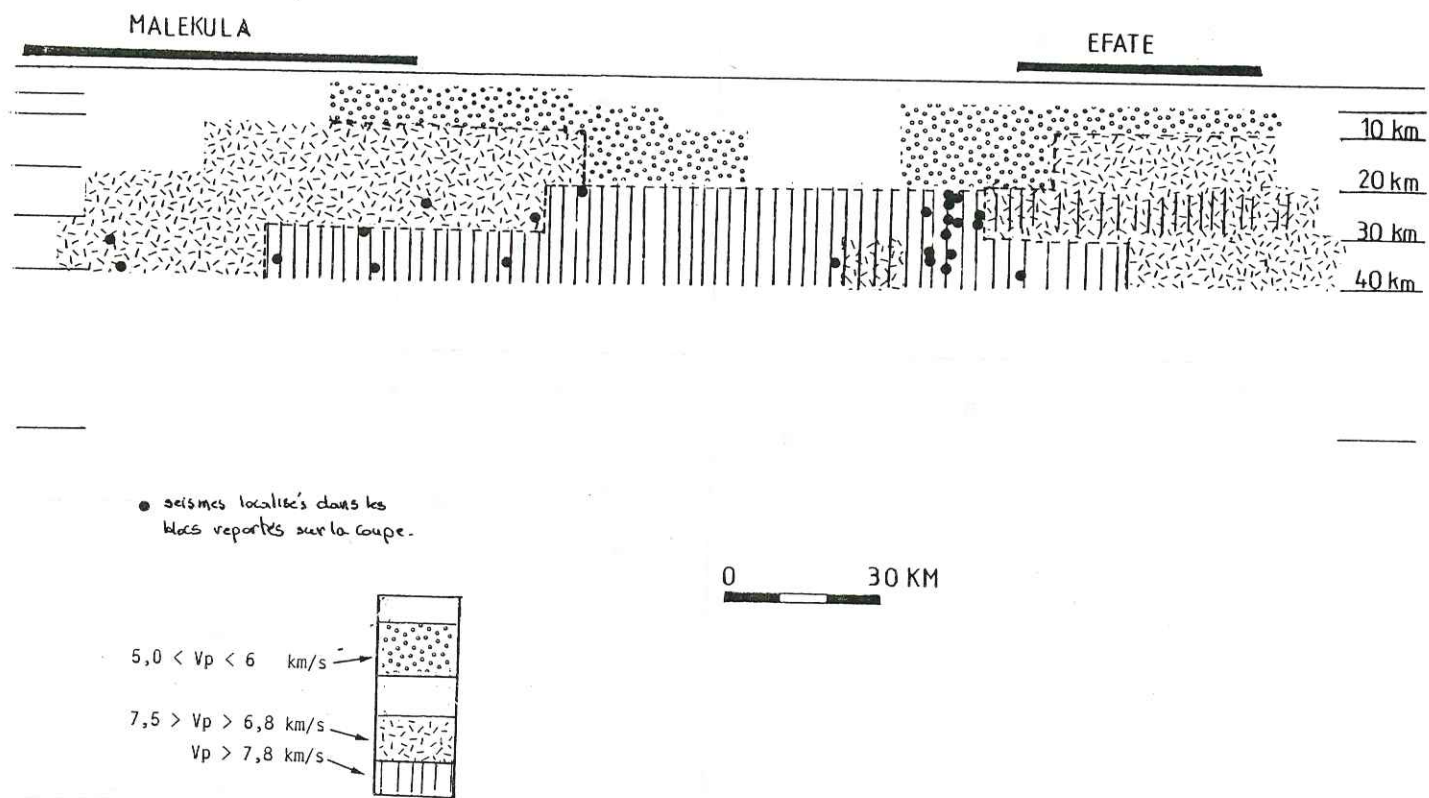


Figure VI.11.



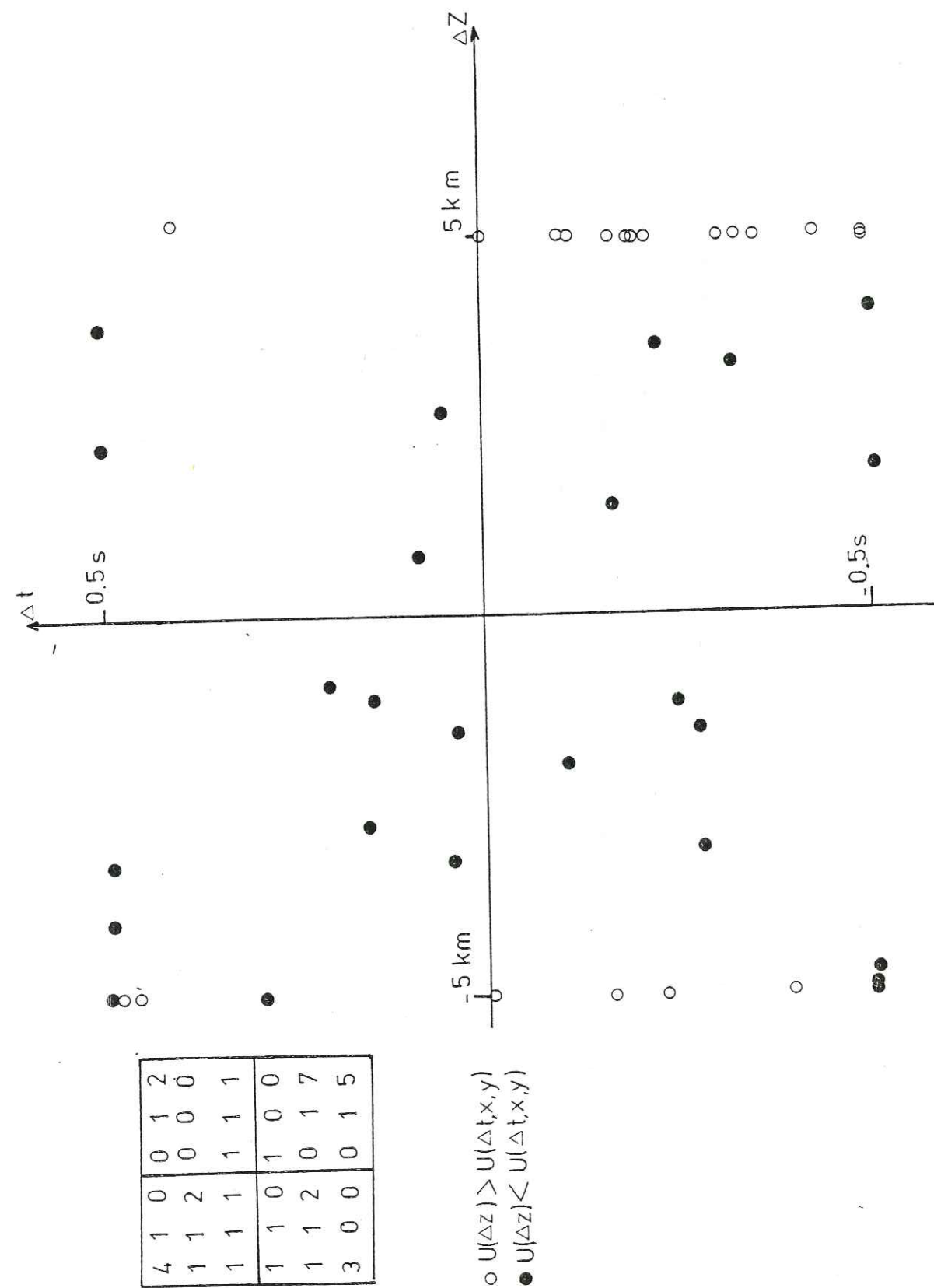


Figure VI.12.

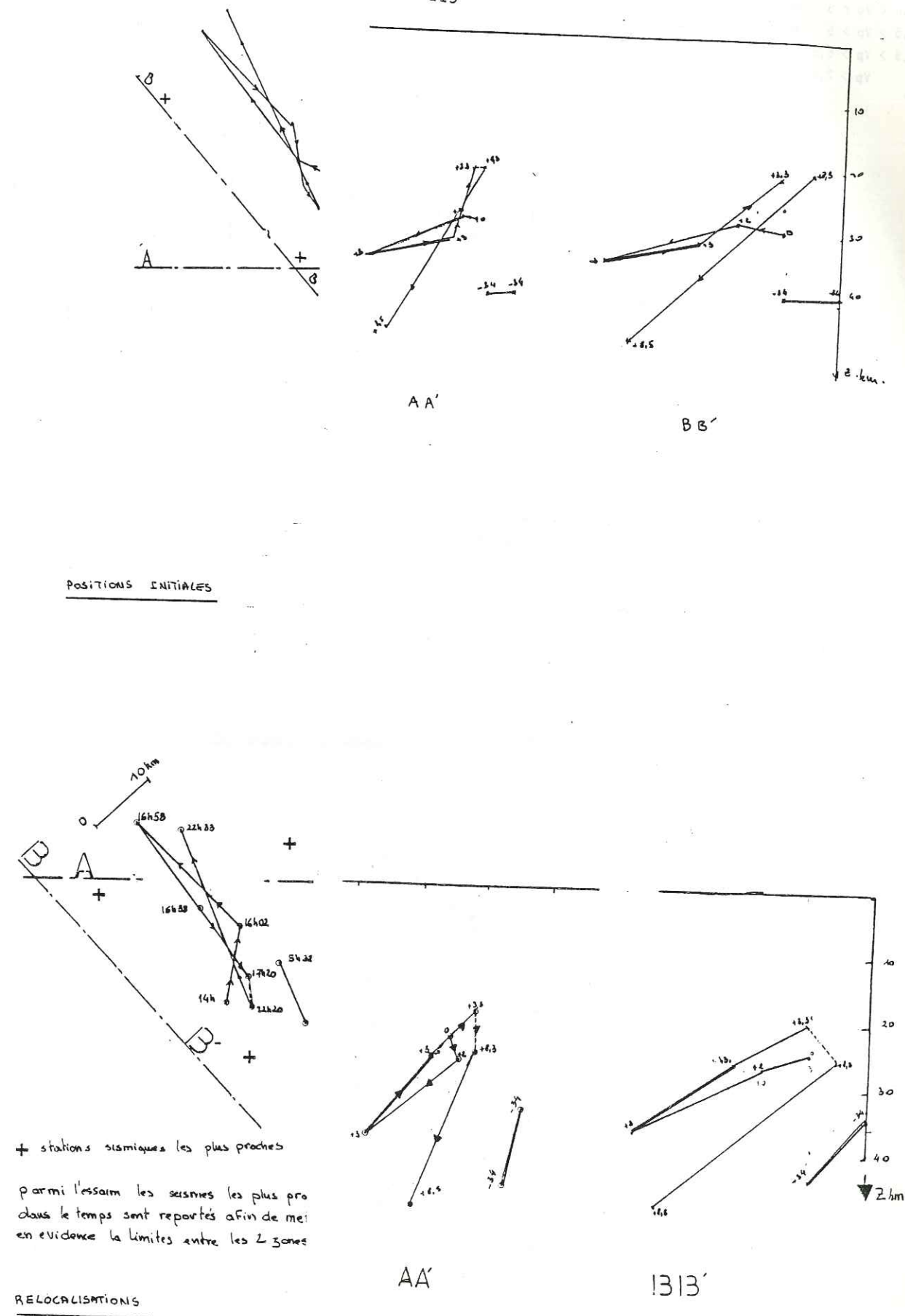
dépendance en $(\Delta z, \Delta t)$ 

Figure VI.13.

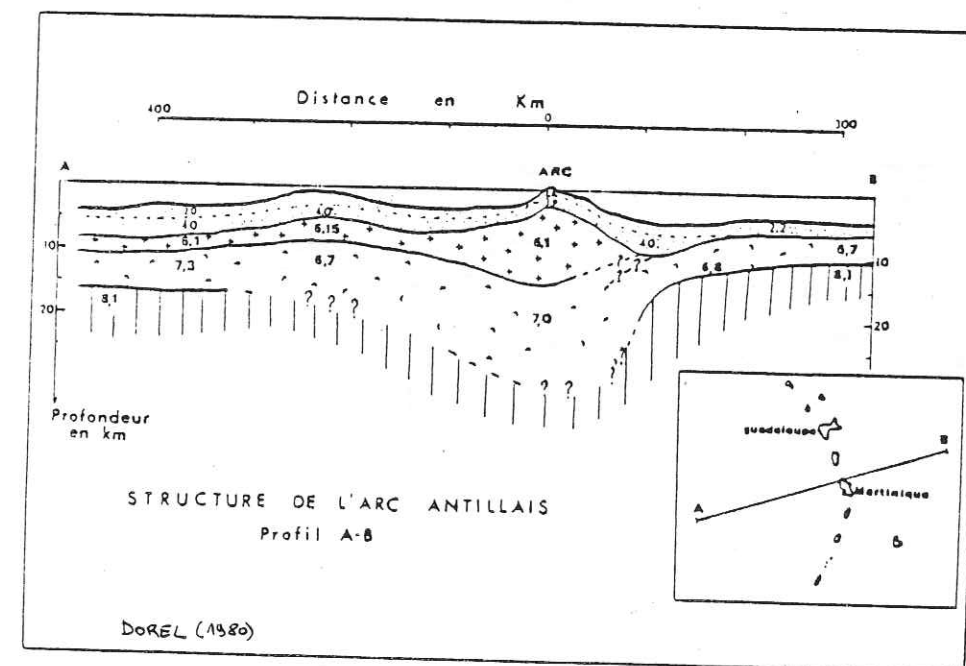
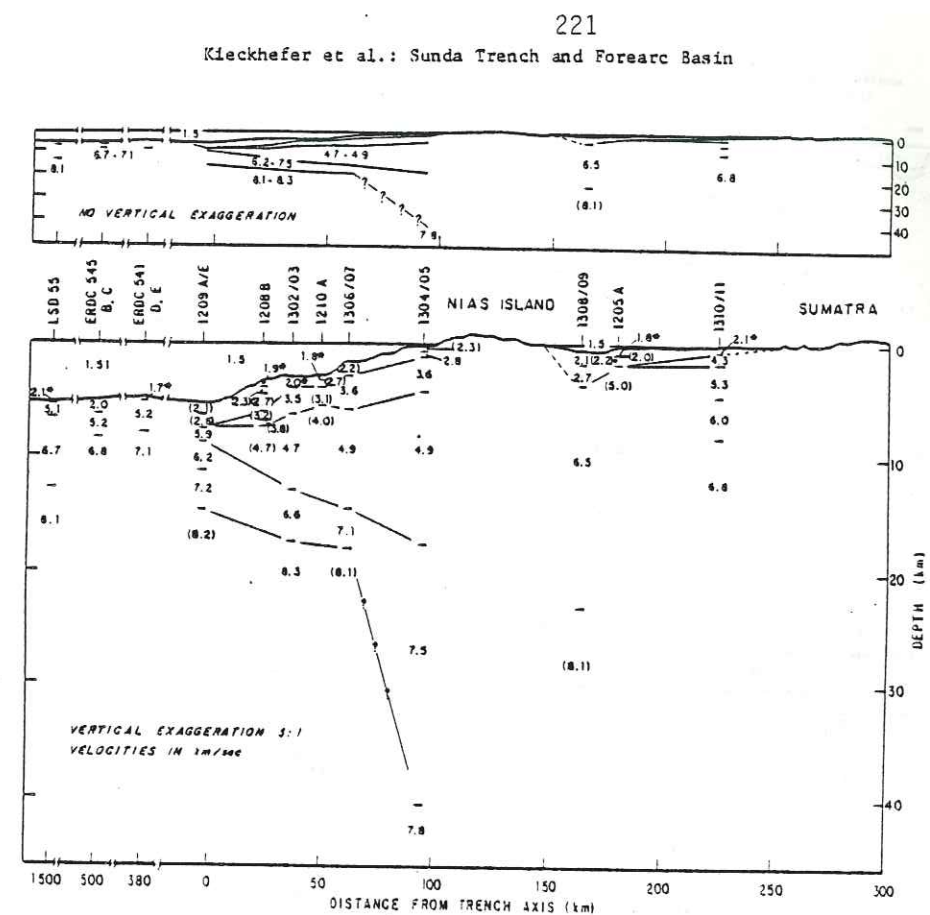
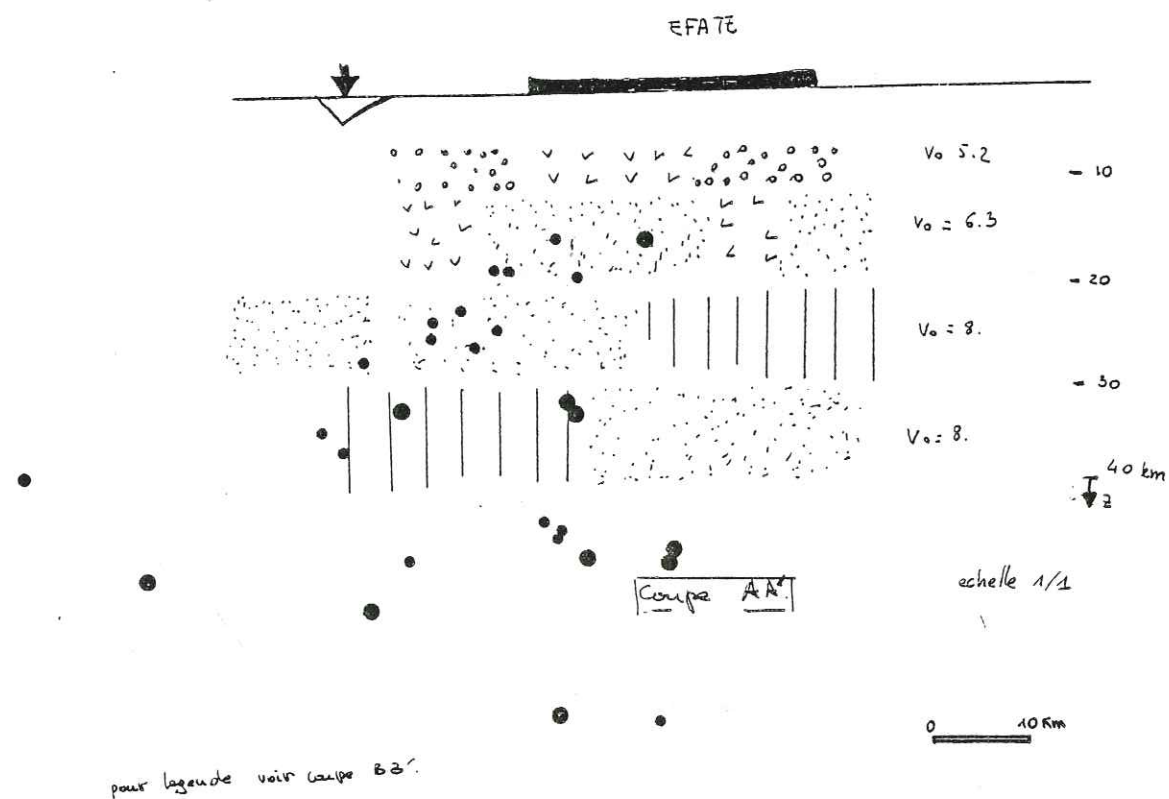
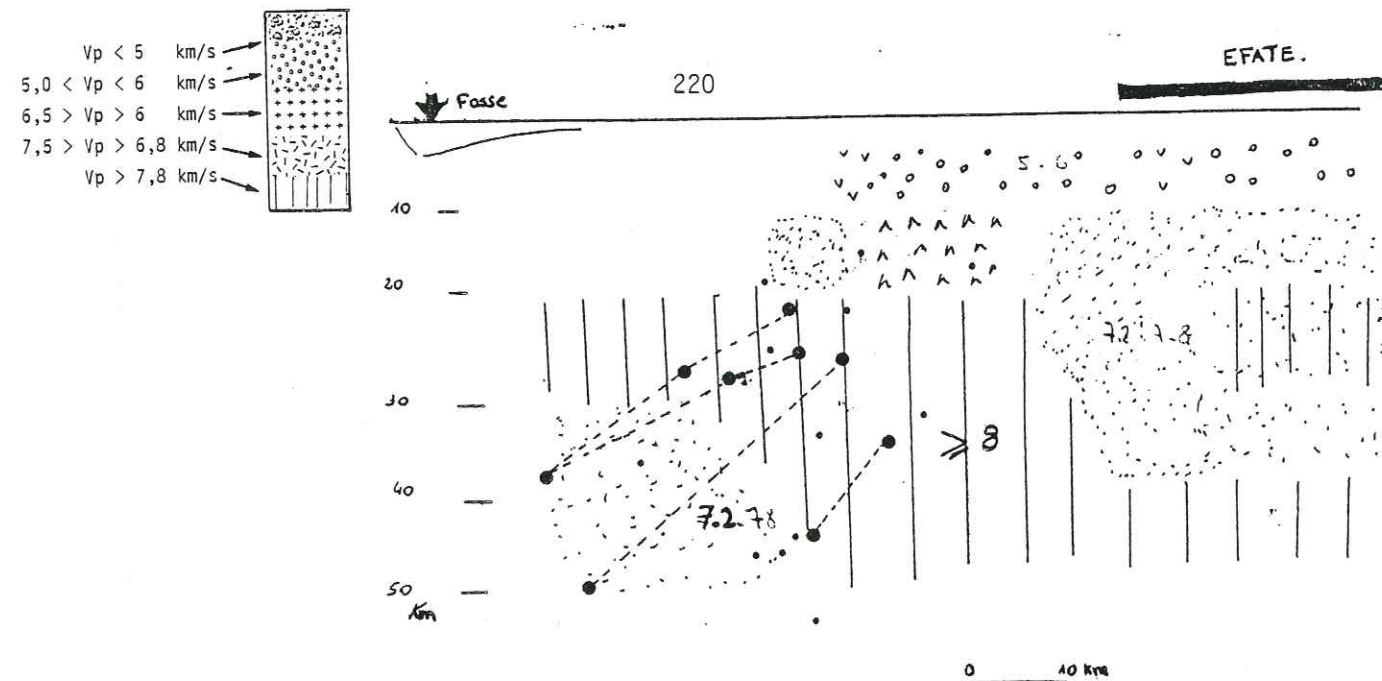
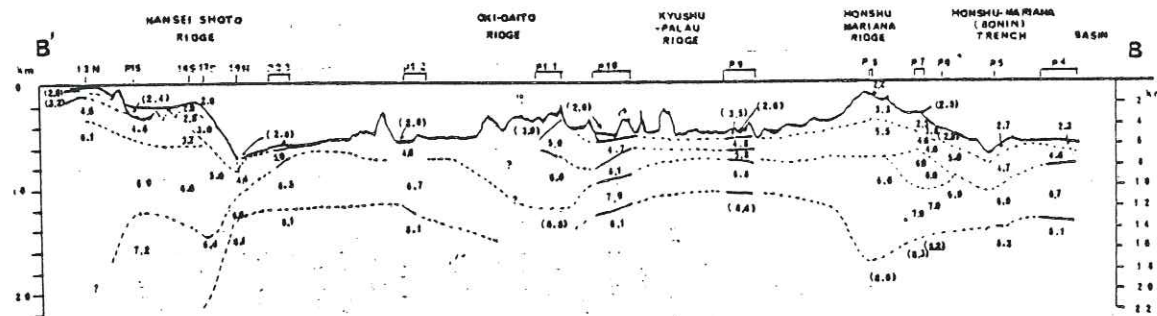
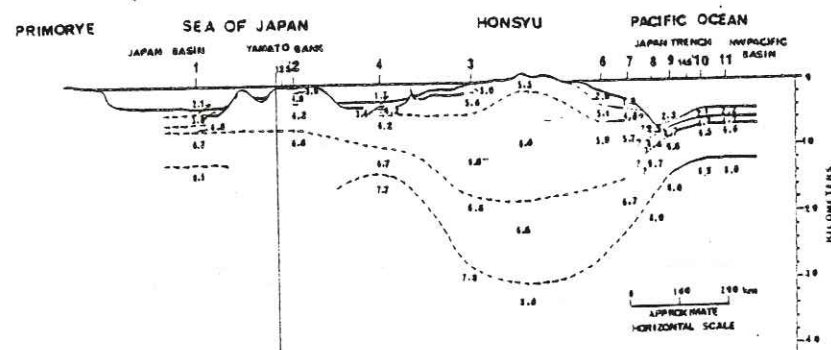


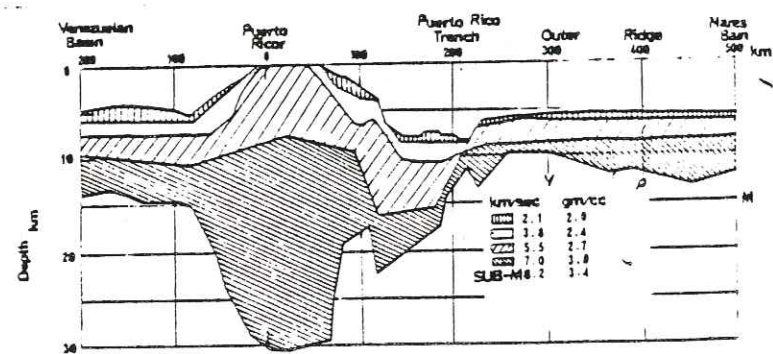
Figure VI.14.



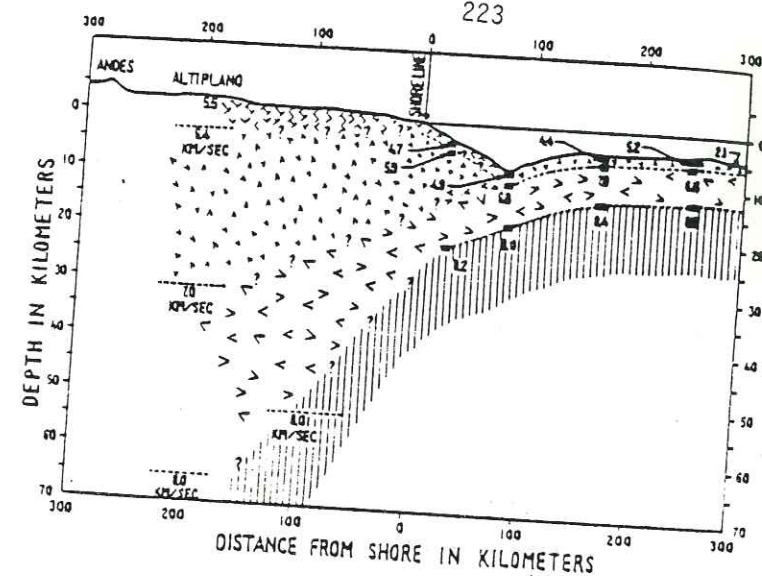
Crustal cross-section of the Philippine (After Murauchi and Yasui 1968.)



Crustal cross-section across the northeastern Japan (Murauchi and Yasui, 1968.)



Crustal cross-section of the Puerto Rican Arc. (After Talwani et al., 1959.) V = velocity of P-wave; ρ = density.



Structure based on explosion seismology across the Peru-Chile Trench. The patterns are adapted to Fig. 54. The sense of right and left in the section is changed also for adapting. (After Fisher and Raitt, 1962.)

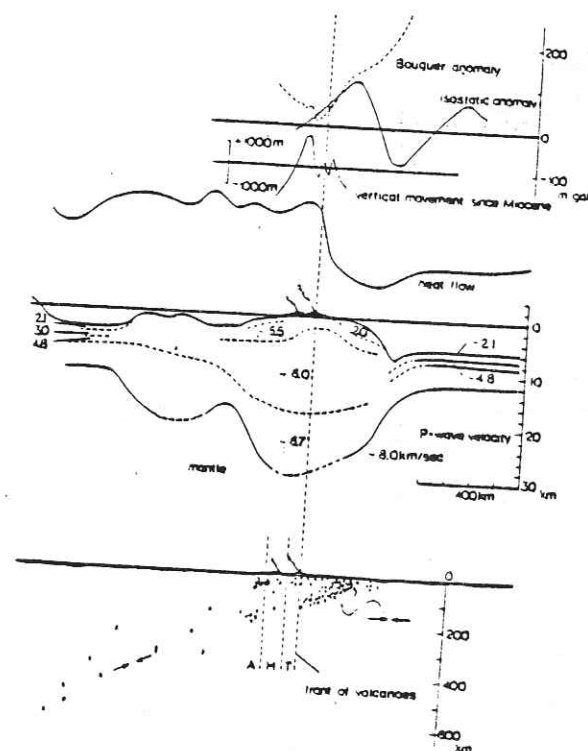
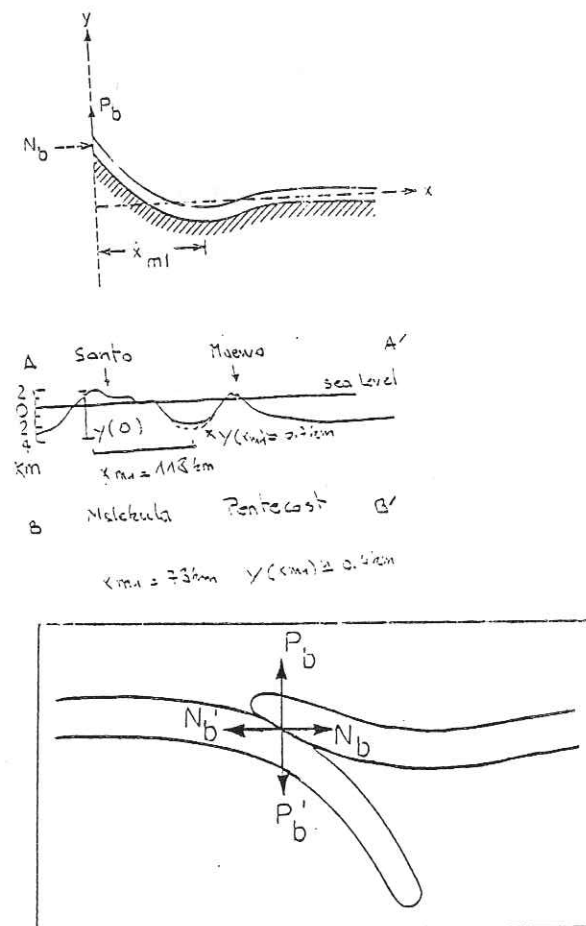


Fig. 97. Typical cross-section of the east Japan arcs, compiled from Fig. 11 (Bouguer anomaly), Fig. 13 (isostatic anomaly), Fig. 80 (vertical movement), Fig. 43 (heat flow), Fig. 9 (topography), Fig. 17 (crustal structure), Fig. 25-27 (earthquake foci), Fig. 40 (types of magma; T = tholeiite, H = high alumina basalt, A = alkali-basalt) and Fig. 128 (seismic stress axis).



A schematic representation of the interaction between a subducting aseismic ridge and the overriding plate. N_b is the horizontal force applied to the overriding plate by the ridge; N_b' is the reaction applying to the ridge by the overriding plate; P_b' is the vertical loading applied to the ridge by the upper plate; P_b is the reaction.

Figure VI.15.

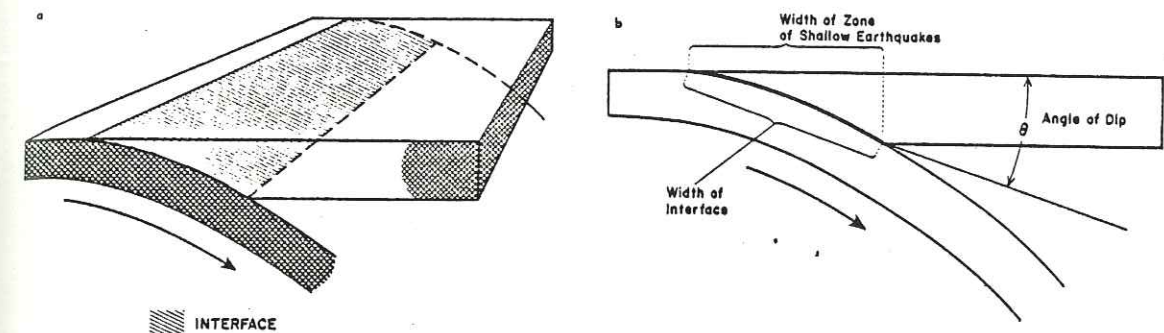


Fig. 1. Interface area between overthrust and underthrust slabs of lithosphere at a subduction zone. (a) Perspective view. (b) Side view showing relationships among width of interface, zone of shallow earthquakes, and angle of dip.

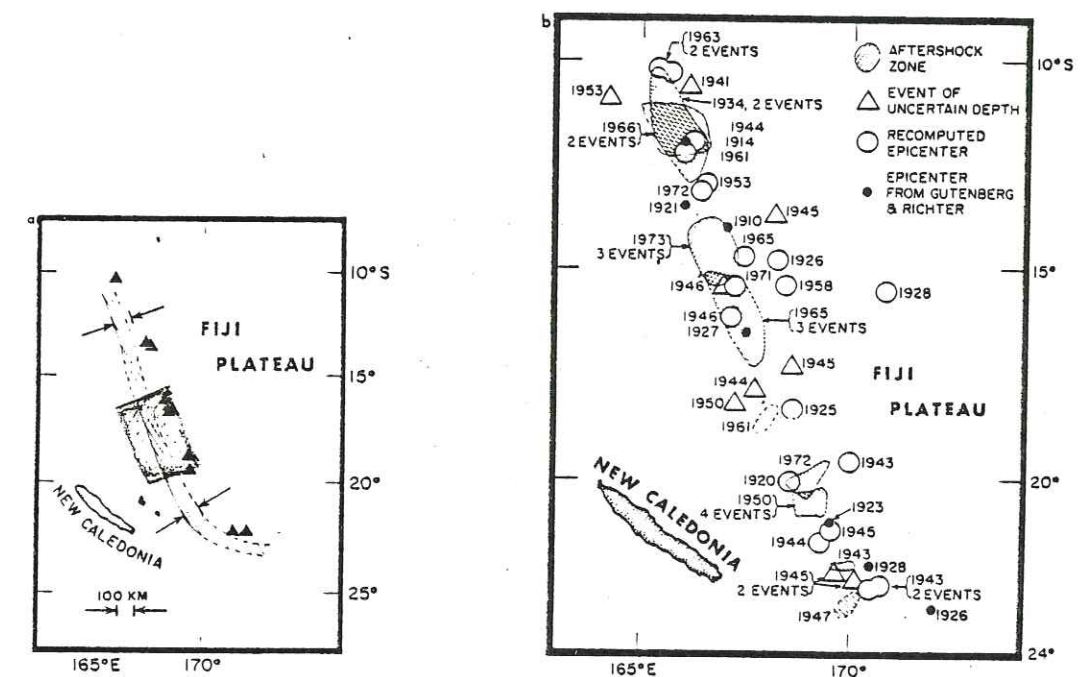


Fig. (a) Estimated interface near the New Hebrides subduction zone. Seaward boundary of shaded region is the axis of the trench. Landward boundary of shaded region is the approximate contour for the start of hypocenters of depth greater than 70 km. Width of shaded region corresponds to the inferred width of interface projected to surface (see Figure 1b). Triangles indicate active volcanoes. The 100-km scale is included so that interface areas can be compared among the various plate margins. Arrows are approximately parallel to the direction of relative plate motion. Notice that the line of active volcanoes maintains approximately the same distance from trench axes.

(b) Estimated rupture zones of large shallow earthquakes of the past 50 years near the New Hebrides seismic zone (W. McCann and J. Kelleher, unpublished data, 1974).

Figure VI.16.

C H A P I T R E 7
AUTRE EXEMPLE :
ETUDE DES REPLIQUES DU SEISME D'ARUDY

Le traitement des données d'Arudy avait pour but de comprendre à très petite échelle (quelques centaines de mètres) le positionnement des foyers sismiques. Cette étude, commencée avec Thierry Modiano, répondait alors à deux objectifs :

i) relocaliser les foyers pour essayer de comprendre les mécanismes aux foyers disparates qui avaient été obtenus pour cet ensemble de répliques.

ii) évaluer l'incertitude sur la profondeur des séismes.

La méthode d'inversion présentée dans les chapitres précédents a alors été utilisée dans un premier temps comme un outil de mesure. Si le deuxième objectif a bien été atteint (les variations en profondeur sont très peu contraintes par le réseau de station et peuvent être compensées par des variations sur l'heure origine des séismes), le manque de mécanismes au foyer pour certains événements ne nous a pas permis de conclure. Par contre, les anomalies de vitesses se sont avérées très cohérentes et un fort contraste de vitesse Nord-Sud est mis en évidence à l'Est de la zone sismique. D'autre part, l'activité sismique semble se concentrer dans un milieu très hétérogène, à petite échelle, et plus globalement, lent .

DONNEES

A la suite du séisme d'Arudy (29 février 1980, 20 h 45 locales) d'une magnitude exceptionnelle pour la région (5.3), un réseau de stations "noir de fumée" complété par des stations télémétrées a été rapidement implanté par le Laboratoire de Géophysique Interne de Grenoble et l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg. Le 3 mars les huit stations sprengneter MEQ 800 du LGIG sont opérationnelles. Le 4, l'IPGS avait fini d'installer son réseau télémétré. Les stations du LGIG maintenues une semaine ont permis d'enregistrer plus de mille répliques.

La qualité du réseau implanté, tant par le nombre de stations que par le choix des sites, fournit des données de très bonne qualité (figure VII.1).

Le dépouillement des sismogrammes a été effectué par T. Modiano, Haessler (1981). Dans cette étude, nous utilisons seulement 61 séismes. Ces séismes correspondent aux premiers dépouillements. Ils constituent les répliques les plus fortes et une partie des chocs plus faibles pour lesquels la lecture des temps de première arrivée pouvait s'effectuer avec une bonne précision. L'erreur de lecture est estimée ici à 0.05 seconde (T. Modiano, 1980).

Les déterminations préliminaires des séismes fournissent des épicentres qui se répartissent sur une zone extrêmement étroite (figure VII.2), orientée E.W., d'environ 7 km de long sur 2 à 3 km de large (T. Modiano, 1980). L'étude de la répartition dans le temps des séismes ne révèle aucune migration des foyers sismiques.

STRUCTURE TRIDIMENSIONNELLE

Le système que l'on traite est ici largement surdéterminé. La discrétisation choisie (figure VII.3) est constituée de 4 couches. Les deux couches superficielles (0-1.5 et 1.5-3 km) permettent d'isoler les anomalies de station (structure locale et/ou erreur instrumentale). La couche 3 qui s'étend de 3 à 8 km de profondeur regroupe la grande majorité des séismes. On remarquera que la géométrie des rais (en faisceau Fig. VII.4) est très orientée et peut être une source "d'indétermination".

STRUCTURE EN VITESSE

La structure en vitesse de la région étudiée est peu connue. Peu d'autres données géophysiques ont été traitées dans cette partie des Pyrénées. Récemment, des profils de réfraction ont été entrepris (Explosion Sismology Group Pyrénées), mais les premiers résultats sont obtenus à une échelle trop importante pour pouvoir être utilisés dans notre étude locale. Ainsi différents modèles de départ ont été utilisés. Les déterminations initiales des épicentres (à l'aide des ondes P seules) sont peu sensibles, pour ce réseau, aux modèles de vitesse utilisés. Ce phénomène est confirmé par les relocalisations hypocentrales qui montrent une importante détermination de la profondeur. Nous reviendrons sur ce phénomène dans le paragraphe suivant. Les résidus générés par ces différents modèles sont alors peu différents (quelques centièmes) et constituent deux ensembles de données d proches du point de vue de l'inversion.

Ces remarques nous incitent à raisonner seulement sur des anomalies de vitesses relatives. Les résultats obtenus pour deux modèles de vitesse différents apparaissent sur les figures (VII.5). Pour chaque modèle, les valeurs des anomalies de vitesse sont obtenues soit en laissant les foyers libres, soit en les fixant. Les caractéristiques des différents modèles sont présentés dans le tableau VII.1. Si on interprète globalement ces résultats qui expliquent environ 70 % des données, on met en évidence une zone relativement lente au Nord, s'opposant à une zone rapide au sud. Cette tendance semble se retrouver jusqu'à 8 km de profondeur. Toutefois, le contrôle de la qualité de la solution (gain en variance - résolution) reste faible, excepté pour quelques blocs. En particulier, entre 3 et 8 km de profondeur, on met en évidence pour les blocs bien "résolus" une vitesse relative faible dans la zone très étroite liée à la sismicité. De plus, à chaque extrémité de cette zone sismique, de forts contrastes de vitesse rapide apparaissent. On peut alors interpréter ces contrastes de vitesse comme des barrières bloquant l'extension Est-Ouest de la sismicité.

IMAGE FINE

Afin d'obtenir une image plus précise de ce milieu (3-8 km), on a utilisé des tailles de blocs plus faibles (modèle tableau VII.3). Les solutions obtenues fournissent alors une image plus hétérogène de la région liée à l'activité sismique (Fig. VII.6). Toutefois la somme des anomalies de vitesse recouvrant la zone sismique (ici 16 blocs correspondant exactement aux deux blocs des modèles précédents, reste fortement négative

($\approx - 8 \%$). On notera ici l'influence du choix de l'échelle des anomalies considérées pour caractériser un phénomène.

A côté de ce milieu fortement hétérogène, apparaît un fort contraste de vitesse nord-sud : zone lente au Nord, rapide au Sud. Ce contraste Nord-Sud est par ailleurs toujours présent dans les couches supérieures dont les dimensions de bloc n'ont pas été modifiées.

Avant de proposer une interprétation basée sur de telles valeurs, il est important de s'affranchir des possibilités d'erreurs liées à nos hypothèses de calculs. Dans un premier temps, on doit évaluer l'effet de l'altitude des stations sur les résultats obtenus. Aucune correction d'altitude n'ayant été incluse dans le programme HYPO 75, dans un premier temps nous n'avons pas rentré l'altitude des stations dans les données de l'inversion. On peut alors craindre que les solutions obtenues soient fortement liées au relief. Les corrélations Résidu moyen - altitude, altitude - variation de vitesse de la couche 1, et résidu moyen - variation de vitesse, pour chaque station ne font apparaître nettement aucun lien. On peut alors en déduire que

i) l'information contenue dans les résidus ne reflète pas le relief de la zone étudiée (les cartes de vitesses peuvent alors se différencier de simples cartes topographiques !) (Fig. VII.7a)

ii) la première couche ne suffit pas pour expliquer les résidus (Fig. VII.7b). Donc il est justifié d'utiliser des méthodes inverses.

Autre point important, l'effet obtenu a tendance à s'opposer à celui escompté pour compenser l'altitude. (Station élevée $\rightarrow$ résidu positif $\rightarrow$ zone à vitesse lente et l'on obtient plutôt sous les stations élevées des vitesses rapides).

Alors la solution rigoureuse qui consiste à utiliser des données synthétiques pour évaluer l'effet de l'altitude sur nos données ne nous paraît donc pas indispensable à la vue des éléments présentés précédemment.

SISMICITE

On a vu précédemment que les déterminations initiales des épicentres (à l'aide des ondes P seules) restent pratiquement insensibles, pour ce réseau, aux modèles de vitesses utilisées. Ce phénomène est confirmé par les relocalisations hypocentrales qui montrent une grande "indétermination" de la profondeur. Les variations Δz obtenues compensent presque systématiquement les variations Δt^h de l'heure origine (tableau VII.4). Un phénomène semblable apparaît sur les résultats obtenus par Aki et Lee (1976) sur la faille de San Andreas. Notre étude présente un second point commun avec celle d'Aki et Lee. En effet, la sismicité, très localisée, se positionne aussi dans une zone relativement lente. Par contre, la faille Nord Pyrénées n'est plus une discontinuité active et les mouvements des séismes sur un tel système de failles (figures VII.8) est difficile à étudier. Aucun travail de terrain n'ayant été effectué dans ce but il est difficile d'interpréter tel regroupement (plus ou moins subjectif) de séismes dans une région donnée.

Ce travail initialement commencé pour comprendre les mécanismes aux foyers très disparates obtenus pour ces séismes (Modiano, 1980) n'a pu aboutir. Seulement 40 mécanismes sont exploitables sur les 60 séismes et lors du regroupement le manque de données ne permet pas de conclure.

CONCLUSION

Bien que seule la technique stochastique ait été utilisée, la structure en vitesse déduite de l'étude de la propagation des ondes P durant la courte période étudiée (7 jours) apporte des informations sur deux aspects.

A "grande" échelle, on met en évidence un fort contraste de vitesse Nord-Sud. Les résultats de la figure (VII.9) présente la très bonne résolution obtenue pour un modèle de 8 blocs entre 3 et 8 km de profondeur. On montre ainsi que l'image fine mal contrôlée par les outils stochastiques est en fait très consistante avec l'image plus grossière, mais bien résolue, fournie par la figure (VII.9). On remarquera le bloc de vitesse moyenne proche du modèle de départ ($\frac{\Delta V}{V} \approx 0 \%$), lié à la zone la plus sismique.

La deuxième information que l'on a essayé d'extraire de ces modèles concerne le lien vitesse sismique - activité sismique. Un tel lien n'est pas facile à appréhender. La relation simpliste qui consiste à assimiler les zones d'activité sismiques aux seules vitesses relatives rapides (milieu cassant) (les zones lentes étant alors considérées comme un milieu ductile) s'est montrée peu réaliste (Aki, 1979).

L'étude de nombreux cas particuliers, à l'aide des techniques d'inversion fournit une intéressante base d'étalonnage pour interpréter les vitesses sismiques sismiques ainsi obtenues d'une part et leur lien avec la sismicité d'autre part.

En effet, l'activité sismique peut aussi bien s'associer à des anomalies de vitesses forte ou faible ; dans une structure "forte", les contraintes s'accumuleront sur des points de faiblesse (ancien accident, par exemple) et la zone d'activité sismique sera alors liée à un milieu à faible vitesse. Dans le cas d'un milieu ductile qui ne peut supporter les contraintes nécessaires au déclenchement des séismes (fluage par exemple), la rupture se produira dans un milieu plus cassant (assimilé à des vitesses plus rapides).

Dans notre application, la zone sismique est la région la plus hétérogène de notre étude (les plus forts contrastes de vitesse sont présents dans le rayon le plus faible). De plus, ici l'activité sismique est liée à un milieu globalement lent. Ces deux informations nous amènent à considérer ce milieu comme très fracturé. La sismicité se place sur la trace en surface d'un accident ancien (Fig. VII.10) (assimilée à la faille Nord-Pyrénéenne (Choukroune, 1973). On peut considérer que les contraintes actuelles se sont libérées plus facilement sur cet accident qu'en un autre point de la région.

CHAPITRE VII

Figure VII.1.-Exemple des enregistrements obtenus sur des stations à enregistrement "noir de fumée" à Arudy (1980).

Figure VII.2.-Sismicité d'Arudy: localisation des répliques du séisme du 29 février 1980 (d'après Modiano (1980)). Les séismes ont été localisés en utilisant un programme de minimisation par moindre carré des résidus ($t_{obs} - t_{cal}$).

Figure VII.3.-Discretization choisie pour l'étude des répliques du séisme d'Arudy. Le même découpage horizontal est reproduit aux les profondeurs suivantes: 0-1.5 km, 1.5-3 km, 3-8 km, 8-15 km.

Figure VII.4.-Qualité de l'échantillonnage de chaque unité de la discrétisation. Le nombre de rai traversant chaque bloc est ici reporté. Le faisceau de rai "en étoile" est bien visible et peut être une source d'indétermination.

Figure VII.5.-a,b,c, cartes en vitesse relative (%) de la zone testée par les rais. Pour chaque blocs les résultats correspondent à deux modèles initiaux différents:

	M 1	M 2
0-3 km	5.5 km/s	5.5 km/s
3-15 km	5.5 km/s	6.0 km/s

pour chaque modèle on reporte deux valeurs:

- l'une correspond à une inversion de la structure en vitesse seule,
- l'autre correspondant à l'inversion simultanée des paramètres des foyers et des vitesses.

Figure VII.6-a,b, cartes des anomalies de vitesse pour une discretisation fine. Le modèle M 1 est utilisé pour les vitesses, seule la discrétisation de la couche 3-8 km est modifiée. On introduit deux sous-couches de même vitesse, et la taille des blocs passe de 3x3x8 km à 1.5x1.5x2.5 km.

Pour chaque blocs deux informations sont reportées: en haut, à droite, le nombre de rais traversant le bloc; au centre, la vitesse relative. Les résultats pour les couches superficielles ne sont pas reportés, étant très voisins de ceux visualisés sur les Figures VII.5a,b.

Figure VII.7.-Corrélation altitude-résidu moyen pour chaque station.

Figure VII.8.-a,b,mouvements des hypocentres.Position initiale,cercle ouvert;position finale,cercle plein.

Figure VII.9.-a,b,cartes des anomalies de vitesses relatives(%),obtenues avec une discretisation plus large.Idem Figures VII.6a,b la taille des blocs devenant $3 \times 4.5 \times 2.5$ km.Les valeurs reportées entre parenthèses indiquent la résolution (gain en variance pour chaque blocs).
Les Figures VII.5c,VII.6a,b,VII.9a,b fournissent 3 images de la zone comprise entre 3 et 8 km.Le contour de la région "sismique" permet une superposition aisée

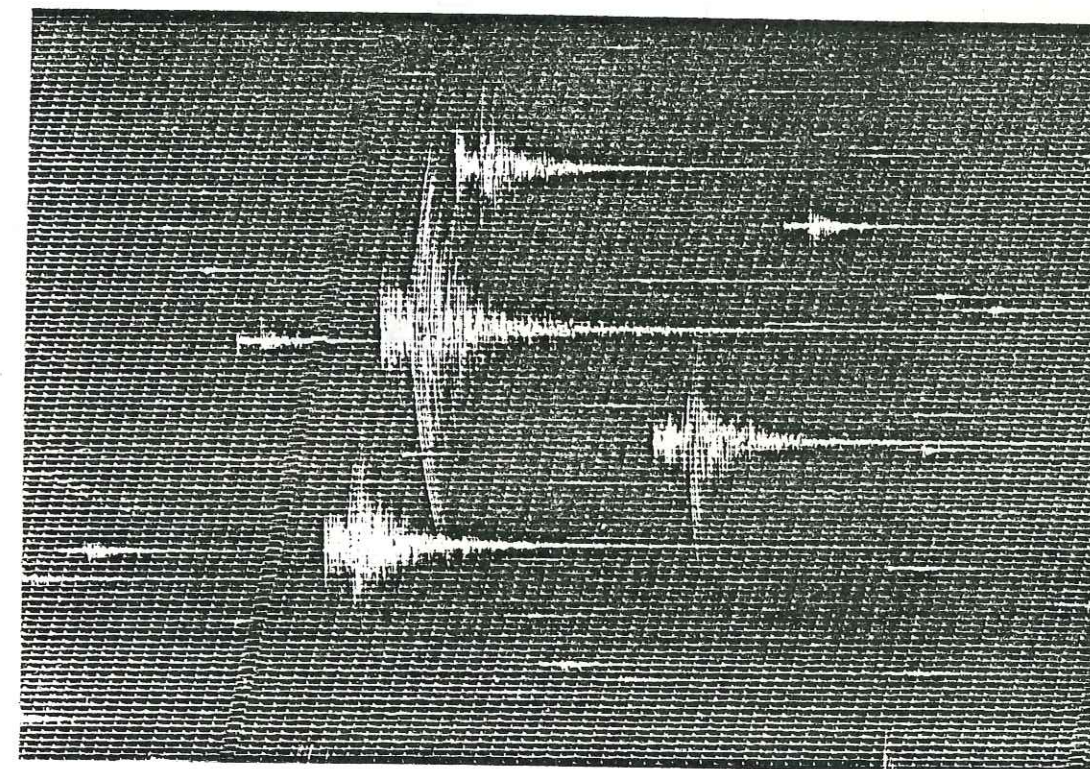
Figure VII.10.-a,b,c,d,e,sismicité-anomalies de vitesse,données géologiques.
Les valeurs utilisées sont celles obtenues avec l'image fine (Figure VII.6.)

Tableau VII.1.-Modèle de vitesse et discretisation correspondant à la Figure VII.5.

Tableau VII.2.-Position initiale des seismes et résidus obtenus après minimisation par moindre carré (modèle de vitesse à 5.5 km/s).Ces deux ensembles de valeurs constituent les données nécessaires pour l'inversion.

Tableau VII.3.-Modèles de vitesses et discretisation correspondants aux résultats des Figures VII.6. et VII.9..

Tableau VII.4.-Variations D_x, D_y, D_z, D_t des paramètres des foyers sismiques.On remarquera que des variations $\pm D_z$,sont souvent compensées par des variations $\mp D_t$.Contrairement à l'application du chapitre VI (Nouvelles Hebrides),les caractéristiques du réseau ne permettent pas,avec une technique d'inversion,de lever l'indétermination existante sur la profondeur des foyers.



L'intervalle entre deux "tops" représente 1 seconde et 2 mm en grandeur réelle.

Figure VII.1.

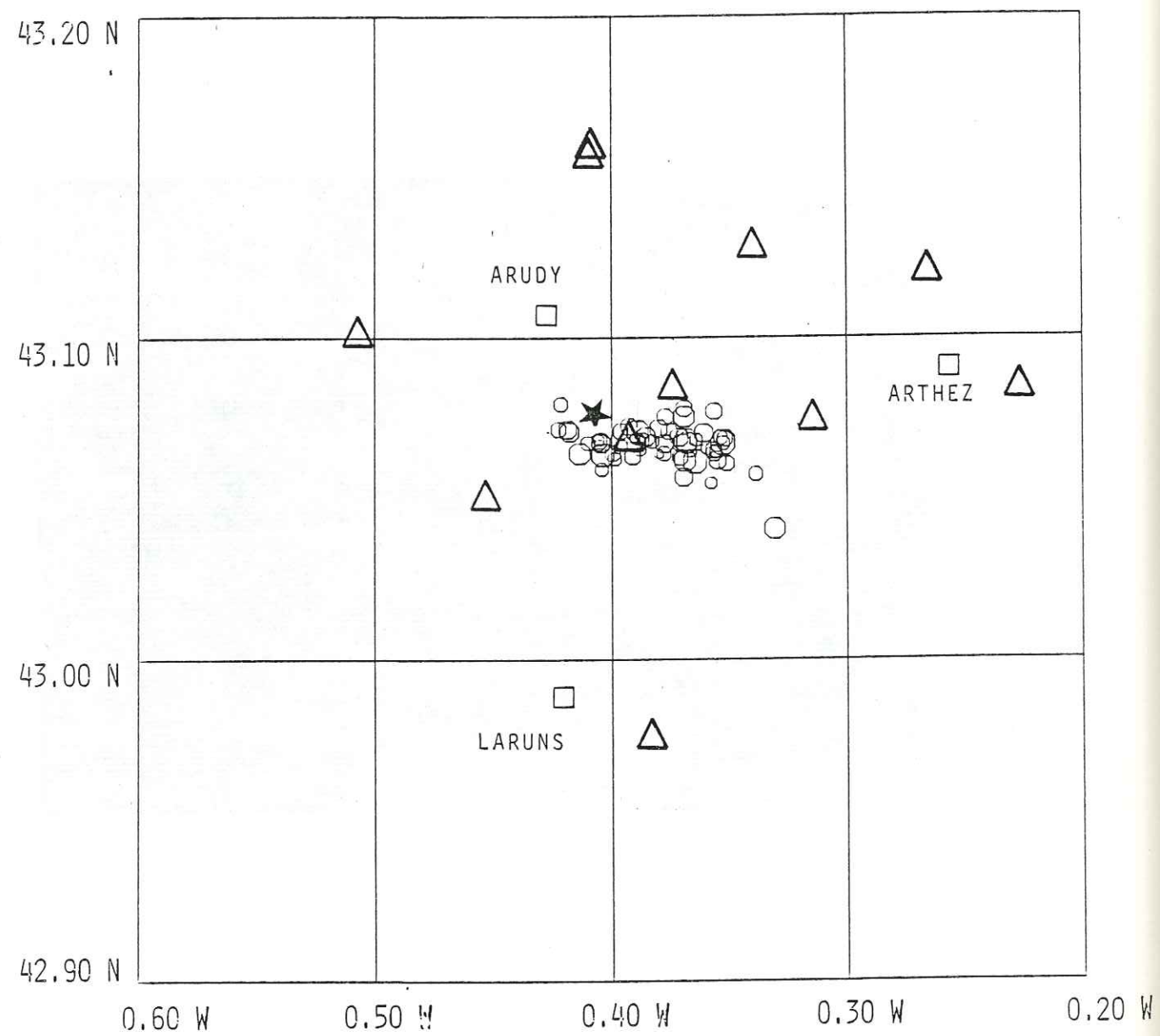


Figure VII.2 60 répliques localisées à partir de l'expérience Arudy 1980. ○ séismes, la taille des symboles est proportionnelle à la magnitude locale. Δ stations du LGIG. ★ choc principal localisé par le réseau permanent d'Arette.

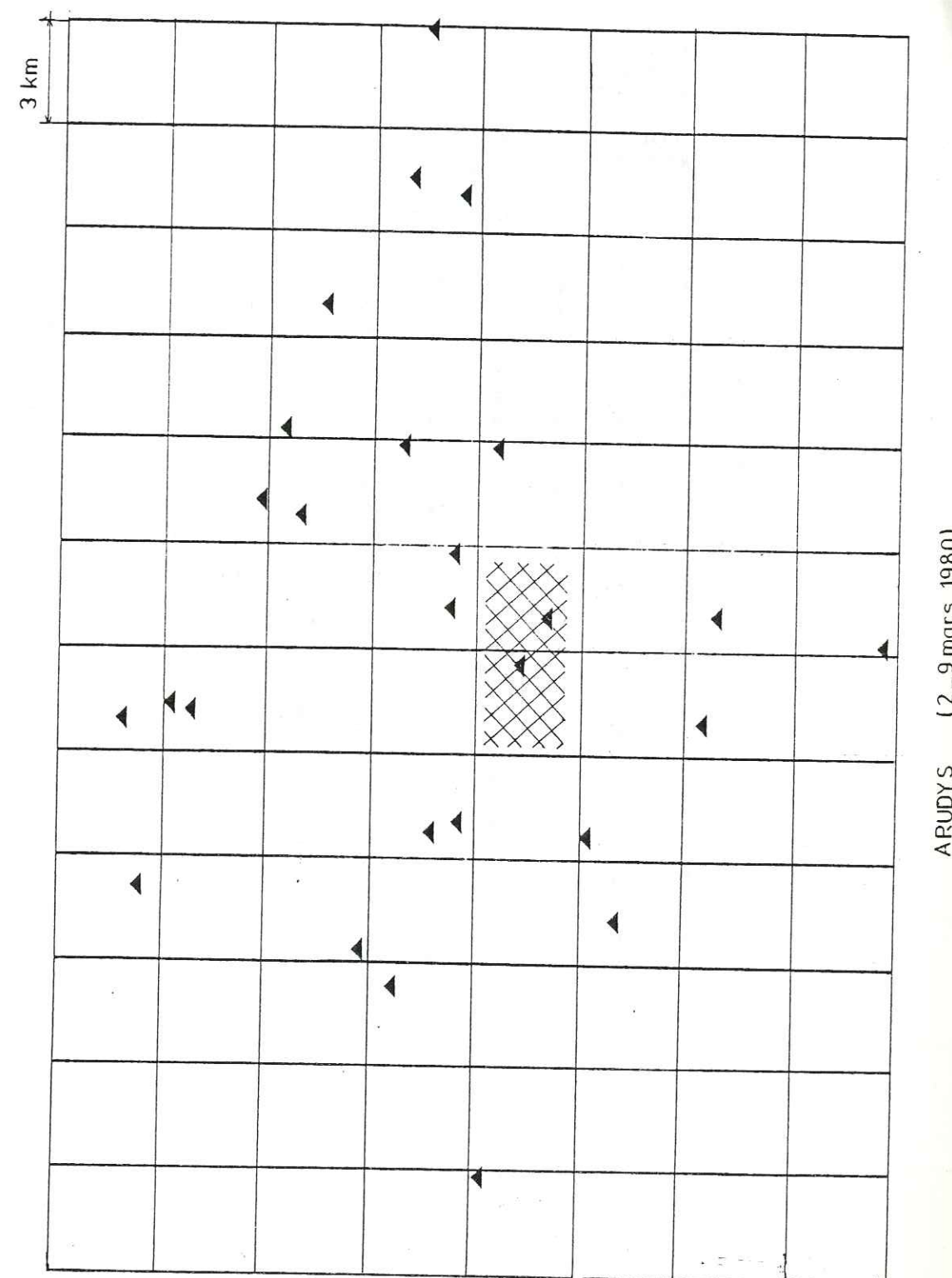


Figure VII.3.

***** LOCAL EVENT ONLY RAYS GETTING UP FYR *****

```
NO OF STATIONS= 29
NO OF EVENTS= 61
NO OF OBSERVATIONS= 805

TOTAL BLOCKS IN MODEL= 312
NO OF BLOCKS OBSERVED= 117
```

OBSERVATION MATRIX

[illegible]

Figure VII.4

	V _A V + Cojers 1 V + Cojers 2 V ₂	- 2.5 - 2.1 - 2.1 - 2.3	→ ← 3 km → →	- 15.1 - 14.0 - 16.7 - 16.9								0 - 1.5 KM
		- 3.8 - 2.6 - 2.6 - 3.8	- 3.2 - 2.7 - 3.4 - 4.0	- 0.5 + 4.0 + 2.4 - 0.4	- 0.3 - 0.1 - 0.1 - 0.2							- 21.7 - 16.5 - 8.5 - 12.8
		- 7.0 - 7.2 - 8.3 - 8.0		+ 0.5 + 1.0 + 3.9 + 2.5	- 1.4 - 1.4 - 1.3 - 3.8	- 3.2 + 1.8 - 3.6 - 3.6	- 3.1 - 1.3 + 0.2 - 0.4	+ 0.3 + 1.2 0.0 - 0.3	0.0 0.0 - 5.5 - 5.5			- 5.2 - 4.6 - 9.1 - 10.0
	+ 0.2 + 0.1 + 0.6 + 0.5	- 1.5 + 1.0 + 0.8 - 1.1	+ 0.3 - 1.0 - 2.4 - 1.0	0.0 0.0 - 0.0 - 0.0	- 7.0 - 6.2 - 6.0 - 6.0	- 9.0 - 5.4 - 5.2 - 8.7	+ 0.1 + 0.4 + 0.5 + 0.4	+ 6.8 + 10.0 + 7.2 + 5.0	+ 2.0 + 6.7 + 7.6 + 3.8			+ 8.2 + 13.0 + 13.0 + 11.0
	+ 2.1 + 1.5 + 2.6 + 2.6	0.0 0.0 + 0.7 + 0.1	+ 4.4 + 5.3 + 4.5 + 4.0	+ 10.5 + 12.3 + 14.2 + 12.6	- 4.5 - 5.6 - 5.0 - 4.0	+ 6.0 + 6.4 + 6.8 + 2.8	0.0 0.0 + 4.4 + 3.9	+ 1.8 + 3.5 + 7.3 + 5.3				
	+ 0.2 - 0.2 0.0 0.0	- 9.6 - 11.3 - 11.6 - 10.5	+ 10.5 + 12.0 + 11.9 + 9.5	+ 1.7 + 0.5 + 0.8 + 1.5	- 24.0 - 25.0 - 24.3 - 24.0							
		- 0.1 - 0.1 0.0 0.0		+ 1.0 + 0.7 + 0.4 + 1.2	- 0.1 - 0.2 - 0.4 0.2							
				+ 0.8 + 2.7 + 2.5 + 0.8	+ 0.2 + 1.0 + 0.7 - 0.4							

Figure VII.5. (a)

244

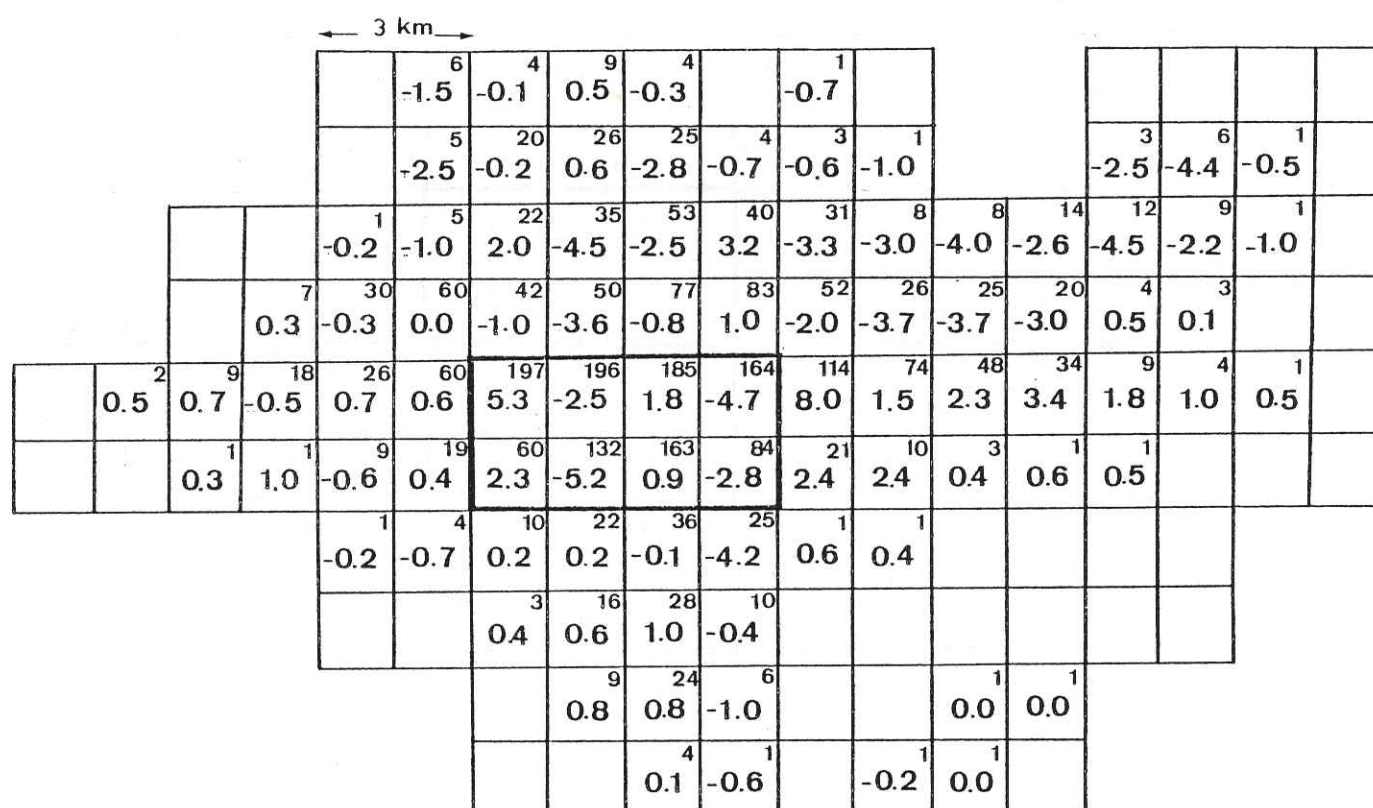
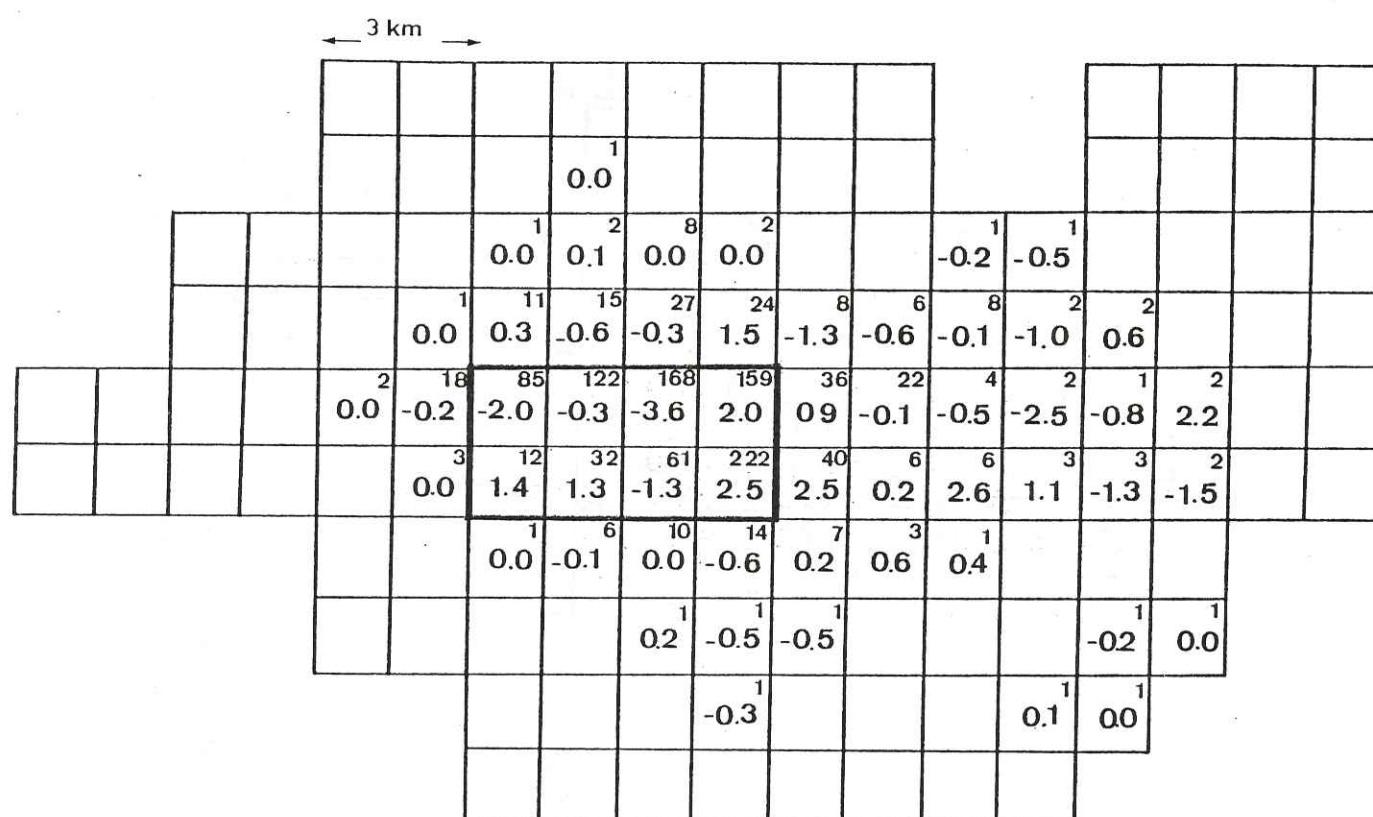


Figure VII.6

(c)

245



(9)

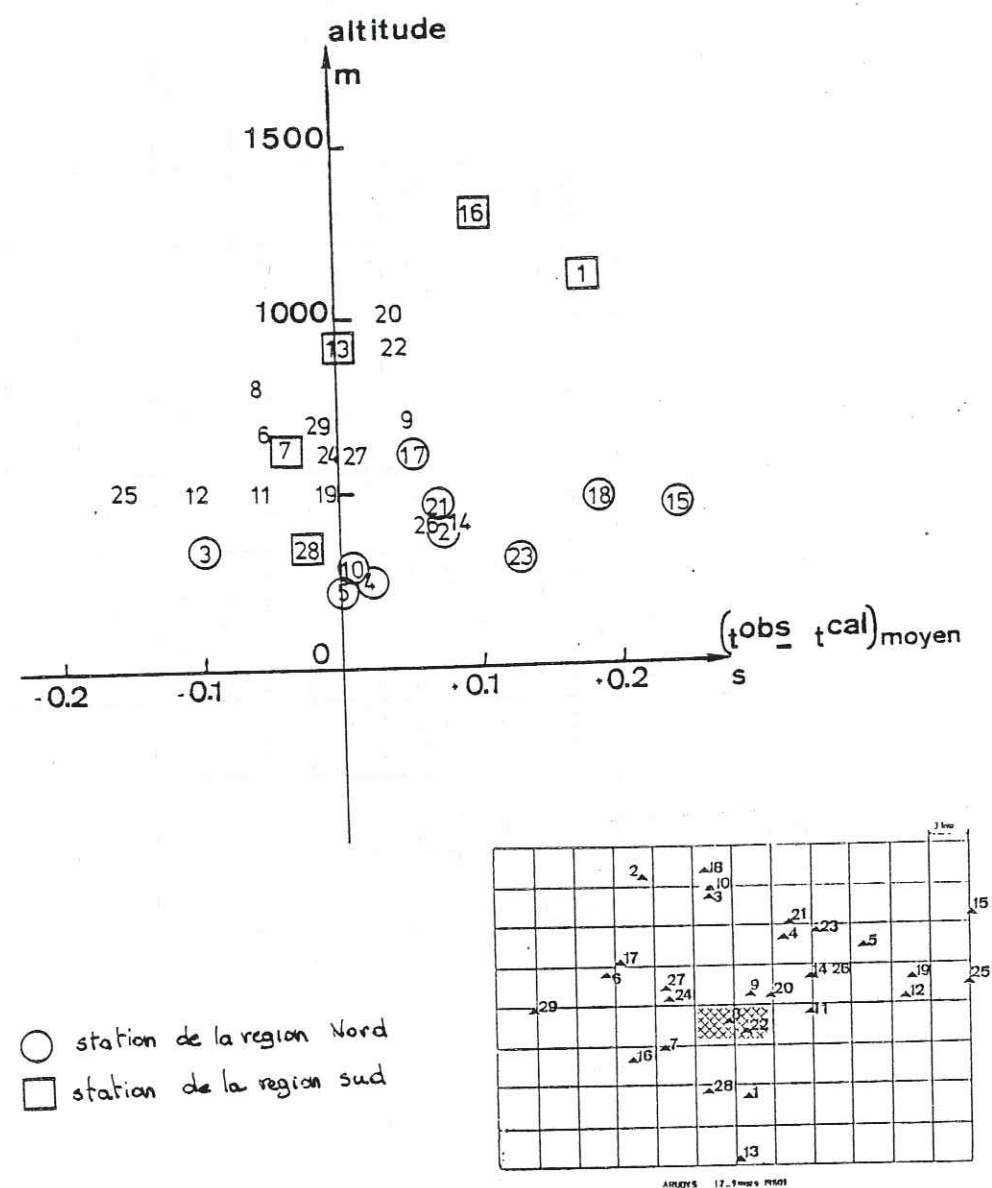
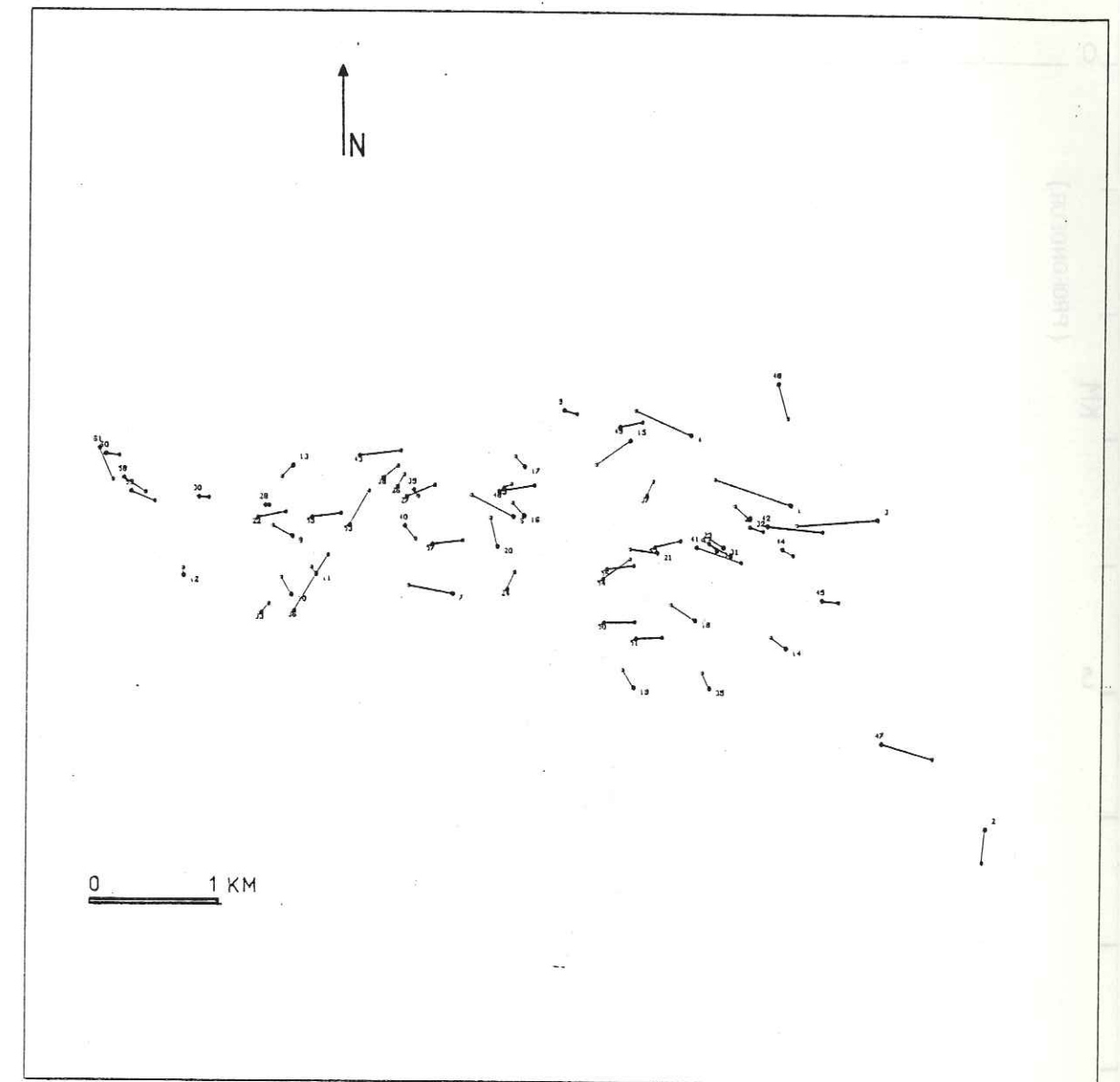
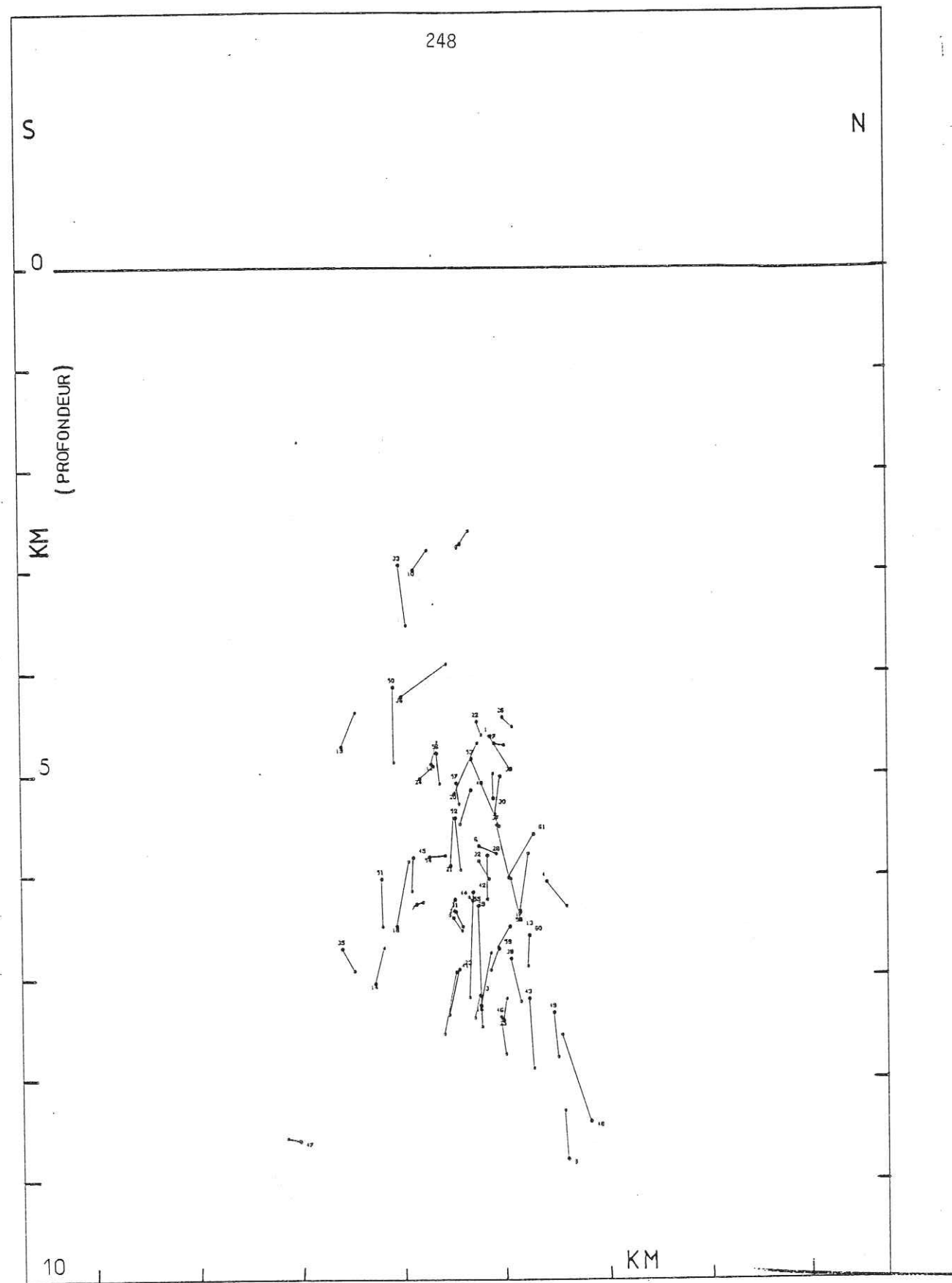


Figure VII.7



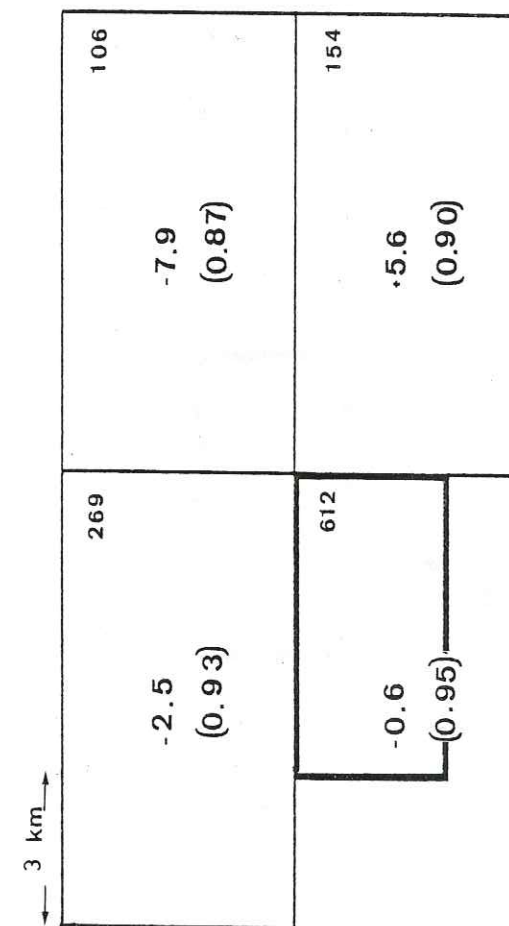
(a)

Figure VII.8



8 (b)

3 - 5.5 KM

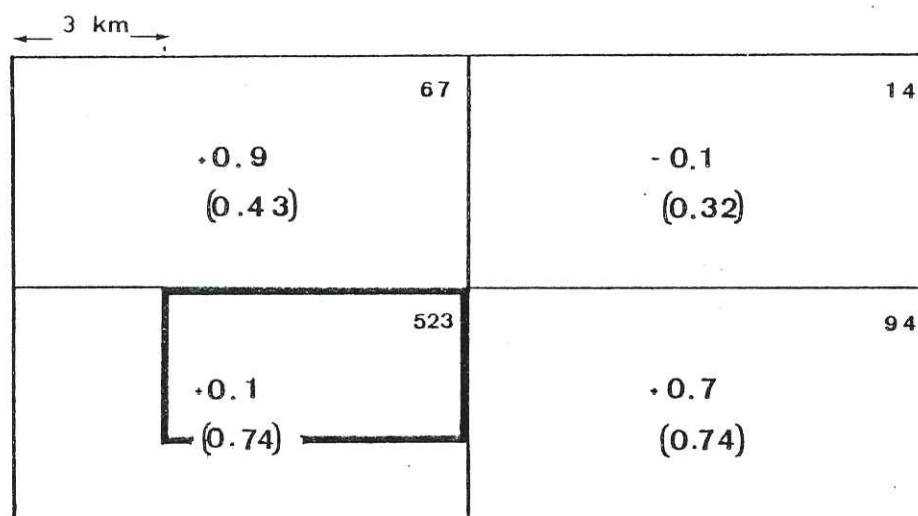


(a)

Figure VII.9.

5.5 - 8. KM

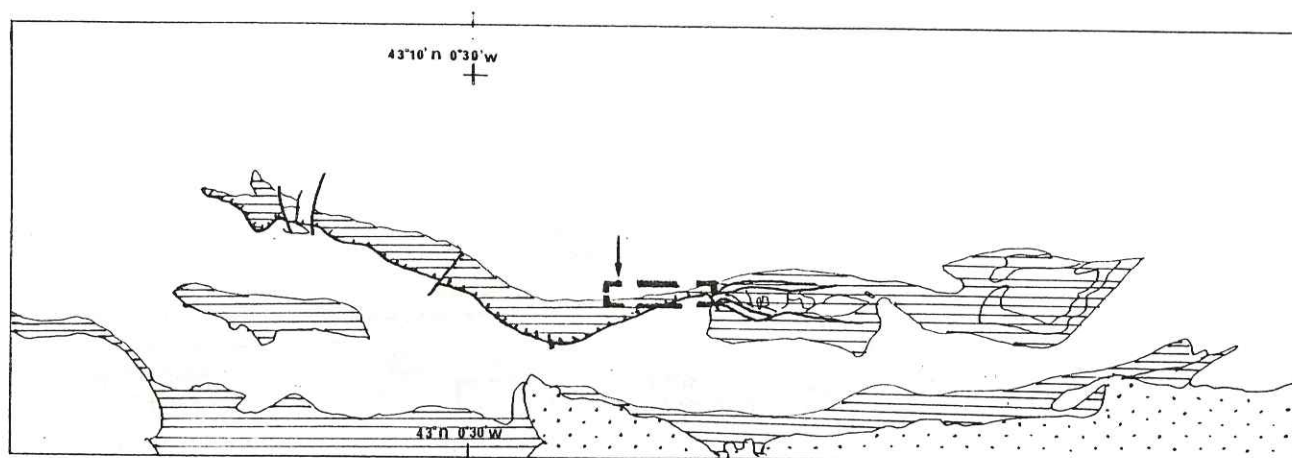
g (b)



250

Figure VII.10.

(a)



fond géologique (d'après carte au 1/25000)
SNEAP. PAU

- crétacé
- jurassique
- antétriasique
- faille (1) - accident géologique (2)

localisation du sisme principal et de ses répliques.

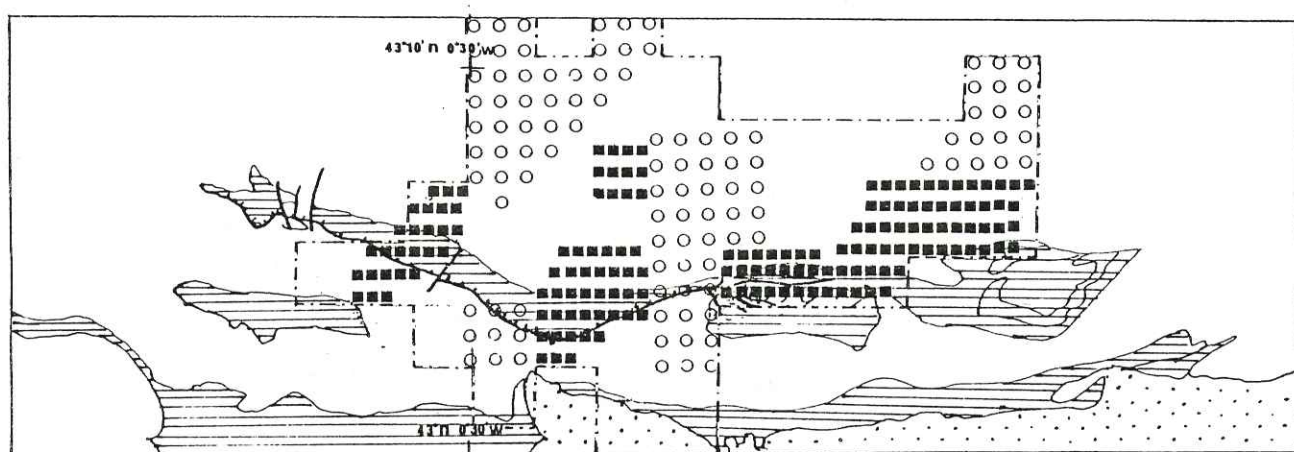
vitesse sismique relative

- zone rapide
- zone lente

251

0-1.5 KM

10 (b)



fond géologique (d'après carte au 1/25000)
SNEAP, PAU

crétacé
jurassique
antétriasique
faille (1) - accident géologique (2)

localisation du séisme principal
et de ses répliques.

vitesse sismique relative

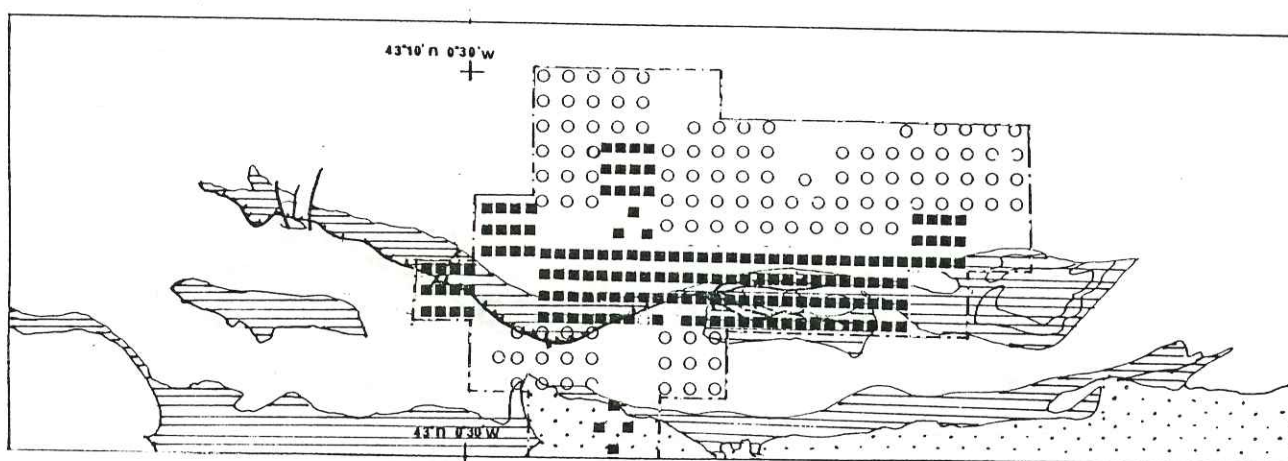
zone rapide
zone lente

0 3 6 9 km

252

1.5 - 3 KM

10 (c)



fond géologique (d'après carte au 1/25000)
SNEAP, PAU

crétacé
jurassique
antétriasique
faille (1) - accident géologique (2)

localisation du séisme principal
et de ses répliques.

vitesse sismique relative

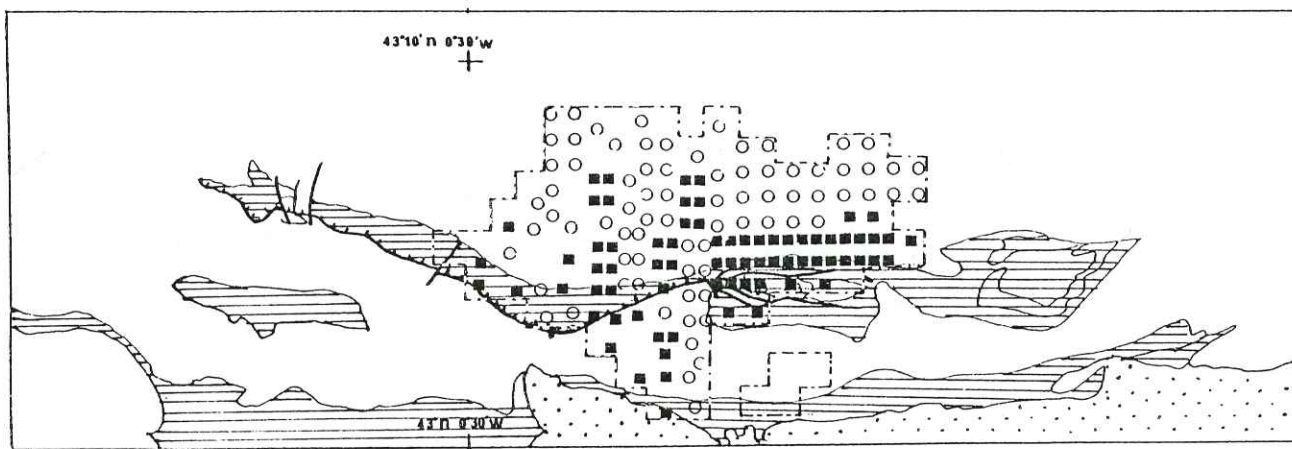
zone rapide
zone lente

0 3 6 9 km

253

3 - 5.5 KM

10 (d)



Fond géologique (d'après carte au 1/25000)
SNEAP. PAU

crétacé
jurassique
antétriasique
faille (1) - accident géologique (2)

localisation du séisme principal
et de ses répliques.

vitesse sismique relative

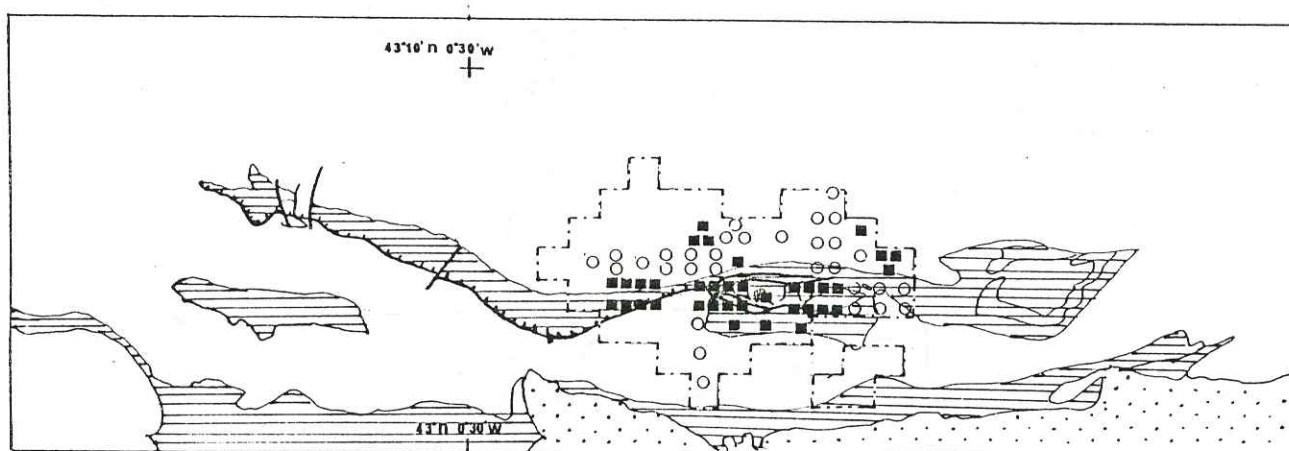
zone rapide
zone lente

0 3 6 9 km

254

5.5 - 8. KM

10 (e)



Fond géologique (d'après carte au 1/25000)
SNEAP. PAU

crétacé
jurassique
antétriasique
faille (1) - accident géologique (2)

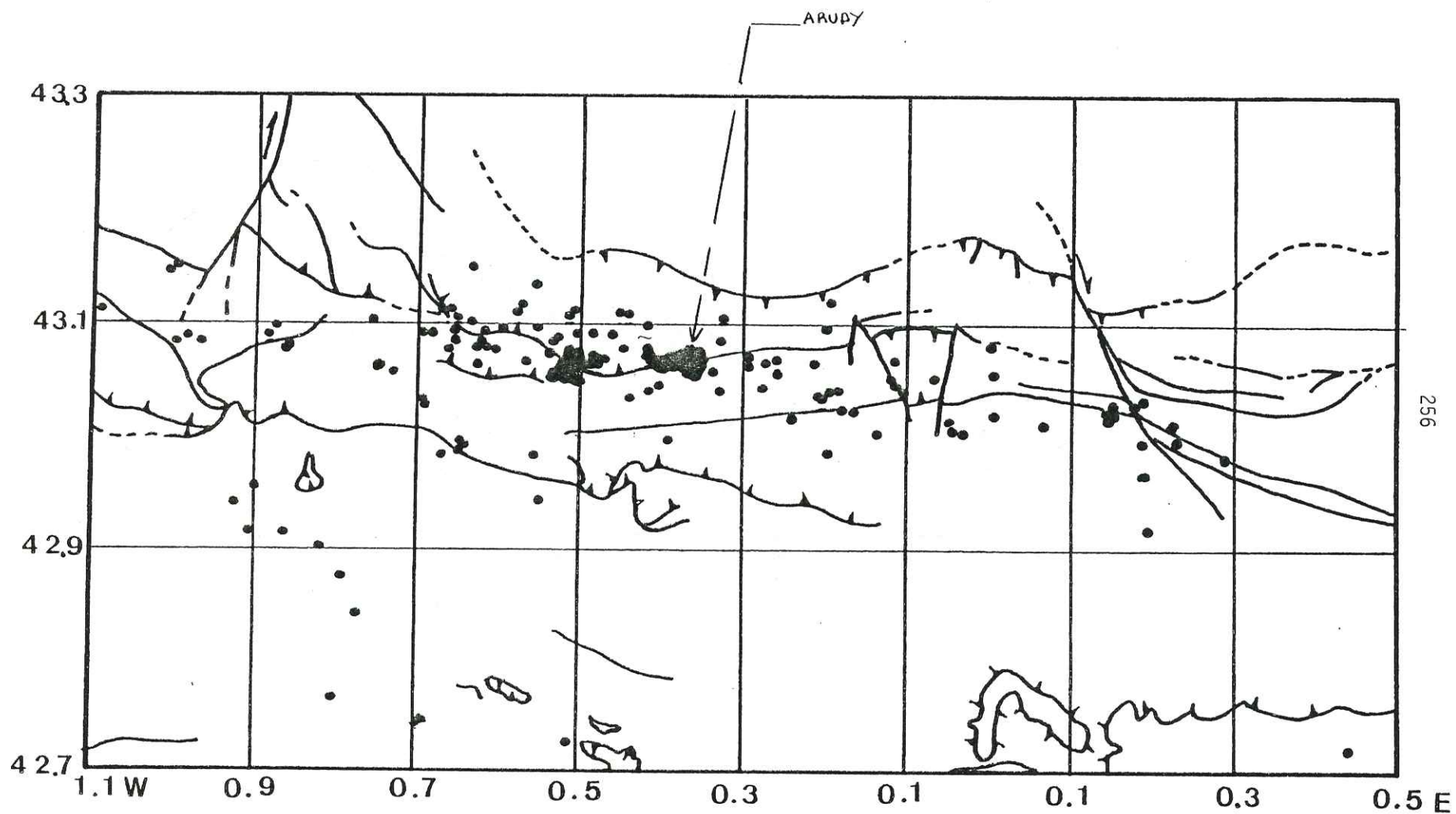
localisation du séisme principal
et de ses répliques.

vitesse sismique relative

zone rapide
zone lente

0 3 6 9 km

255



Relation entre la sismicité et les accidents géologiques de la carte structurale de P. Choukroune et M. Séguret.

***** PROGRAM 3-D *****

17.3.77 NOV78JRG

LOCAL EVENT ONLY RAYS GETTING UP PYR

LATITUDE LONGITUDE THA INCL VO JPWT IRES IPUNCH IPRINT THETA RESLNMN NINT
43N 6.00 OW22.00 0.0 0.0 5.00 2 0 0 1 1. 0.100 1 10

DAMPING PARAMETERS

V 2.00000T 0.10000H 0.00100Z 0.00100

INVERSE EPICENTRE SEUL

INVERSE EPICENTRE +BLOC-VITESSE

VELOCITY	THICKNESS	#-NORTH	LENGTH	#-EAST	LENGTH	COORDINATE	DISPLACEMENT
1 5.50	1.50	8	3.00	12	3.00	-2.000	-1.600
2 5.50	1.50	8	3.00	12	3.00	-2.000	-1.600
3 5.50	5.00	12	1.50	20	1.50	-2.000	-1.600
4 5.50	10.00	4	5.50	6	5.50	-2.000	-1.600

STA LATITUDE LONGITUDE ELEVATION RELATIVE COORDINATES

1 JAU	43N	2.28	OW22.40	0.	-6.80	-0.54
2 OGE	43N	10.11	OW28.40	0.	7.57	-8.63
3 GRG	43N	9.47	OW24.59	3600.	6.37	-3.48
4 LYS	43N	7.76	OW20.43	3600.	3.14	2.05
5 ASL	43N	7.29	OW15.94	3550.	2.38	8.19
6 FLO	43N	6.14	OW30.44	6800.	0.27	-11.41
7 BIE	43N	3.08	OW27.20	6500.	-5.37	-7.01
8 CAS	43N	4.18	OW23.58	8100.	-3.27	-2.08
9 REY	43N	5.14	OW22.47	7500.	-1.28	-0.51
10 REB	43N	9.65	OW24.53	3900.	6.71	-3.40
11 PED	43N	4.54	OW18.89	5100.	-2.65	4.14
12 ART	43N	5.12	OW13.61	5900.	-1.61	11.33
13 AAS	42N	58.62	OW23.03	9100.	-13.62	-1.40
14 CAP	43N	6.05	OW18.91	0.	0.09	4.12
15 STV	43N	8.75	OW 9.38	0.	5.10	17.07
16 BIL	43N	2.68	OW28.88	0.	-6.11	-9.29
17 FLE	43N	6.68	OW29.66	0.	1.26	-10.35
18 REE	43N	10.35	OW24.81	0.	8.02	-3.79
19 ASS	43N	5.86	OW13.20	0.	-0.25	11.90
20 GAR	43N	5.18	OW21.08	0.	-1.35	1.11
21 LYE	43N	8.20	OW20.16	0.	3.99	2.45
22 CAE	43N	3.73	OW22.49	0.	-4.12	-0.65
23 BRE	43N	7.89	OW18.61	0.	3.45	4.54
24 IZE	43N	5.16	OW26.90	0.	-1.53	-6.58
25 SPE	43N	5.55	OW 9.95	0.	-0.81	16.31
26 GRE	43N	6.05	OW18.91	0.	0.09	4.12
27 ARZ	43N	5.55	OW27.16	0.	-0.82	-6.94
28 ASE	43N	1.36	OW24.63	0.	-8.55	-3.56
29 ESC	43N	4.73	OW34.44	0.	-2.32	-16.84

Tableau VII.1.

STN 9DELAY = 0.098
 STN 8DELAY = -0.030
 STN 4DELAY = -0.114
 STN 7DELAY = -0.092
 STN 13DELAY = 0.055
 STN 10DELAY = 0.150
 1 800302 22 6 0.01 -3.20 0.42 4.96
 STN 8DELAY = 0.035
 STN 9DELAY = -0.043
 STN 4DELAY = 0.027
 STN 7DELAY = 0.001
 STN 10DELAY = 0.020
 2 800302 22 5 0.01 -6.23 2.55 10.44
 STN 9DELAY = 0.031
 STN 8DELAY = -0.045
 STN 4DELAY = -0.006
 STN 7DELAY = -0.001
 STN 13DELAY = 0.004
 STN 10DELAY = 0.027
 3 800303 0 6 0.00 -3.56 1.07 7.41
 STN 9DELAY = 0.094
 STN 8DELAY = -0.082
 STN 4DELAY = -0.042
 STN 7DELAY = -0.038
 STN 10DELAY = 0.086
 STN 13DELAY = 0.007
 4 800303 0 6 0.00 -2.66 -0.21 6.31
 STN 4DELAY = -0.064
 STN 9DELAY = 0.128
 STN 8DELAY = 0.001
 STN 13DELAY = 0.027
 STN 7DELAY = -0.062
 STN 10DELAY = 0.080
 5 800303 3 6 0.02 -4.77 12.71 10.11
 STN 8DELAY = -0.008
 STN 9DELAY = 0.018
 STN 7DELAY = -0.050
 STN 4DELAY = -0.007
 STN 13DELAY = 0.003
 STN 10DELAY = 0.063
 6 800303 7 6 0.00 -3.34 -1.50 5.79
 STN 8DELAY = 0.071
 STN 9DELAY = -0.006
 STN 7DELAY = -0.111
 STN 4DELAY = -0.116
 STN 13DELAY = 0.037
 STN 10DELAY = 0.140
 7 800303 10 6 0.00 -4.06 -1.99 6.27
 STN 8DELAY = -0.001
 STN 7DELAY = -0.008
 STN 4DELAY = 0.047
 STN 6DELAY = 0.024
 STN 13DELAY = -0.003
 STN 10DELAY = -0.022
 8 800303 10 6 0.01 -3.59 -3.07 2.61
 STN 8DELAY = 0.010
 STN 11DELAY = -0.000
 STN 4DELAY = -0.015
 STN 10DELAY = 0.064

Tableau VII.2.

258

STN 13DELAY = -0.003
 STN 6DELAY = -0.027
 9 800303 13 6 0.00 -2.69 -0.68 8.33
 STN 11DELAY = 0.022
 STN 4DELAY = 0.019
 STN 6DELAY = 0.001
 STN 13DELAY = -0.006
 STN 10DELAY = 0.025
 10 800303 13 5 0.01 -4.00 -3.00 2.80
 STN 8DELAY = -0.010
 STN 11DELAY = 0.025
 STN 4DELAY = 0.037
 STN 6DELAY = 0.016
 STN 13DELAY = -0.015
 STN 10DELAY = -0.008
 11 800303 15 6 0.01 -3.92 -2.76 4.69
 STN 8DELAY = -0.031
 STN 11DELAY = 0.092
 STN 6DELAY = 0.017
 STN 4DELAY = 0.034
 STN 13DELAY = -0.015
 STN 5DELAY = -0.060
 12 800303 16 6 0.01 -3.93 -3.78 0.11
 STN 8DELAY = -0.001
 STN 11DELAY = 0.006
 STN 4DELAY = 0.071
 STN 6DELAY = -0.026
 STN 10DELAY = 0.049
 STN 13DELAY = 0.048
 STN 5DELAY = -0.015
 13 800303 18 7 0.02 -3.20 -3.00 6.04
 STN 8DELAY = -0.002
 STN 11DELAY = 0.002
 STN 4DELAY = 0.043
 STN 13DELAY = -0.008
 STN 5DELAY = 0.005
 STN 10DELAY = 0.007
 STN 6DELAY = 0.015
 14 800303 20 7 0.01 -4.45 0.87 6.72
 STN 8DELAY = 0.140
 STN 11DELAY = -0.076
 STN 4DELAY = -0.011
 STN 10DELAY = 0.035
 STN 5DELAY = 0.075
 STN 13DELAY = -0.012
 STN 6DELAY = -0.023
 15 800303 20 7 0.02 -3.09 -0.52 10.05
 STN 8DELAY = 0.008
 STN 11DELAY = -0.024
 STN 4DELAY = 0.088
 STN 13DELAY = 0.019
 STN 10DELAY = 0.050
 STN 6DELAY = -0.028
 STN 5DELAY = -0.001
 16 800303 21 7 0.02 -3.40 -1.18 6.77
 STN 8DELAY = -0.017
 STN 11DELAY = 0.021
 STN 4DELAY = 0.054
 STN 10DELAY = 0.050
 STN 13DELAY = 0.004

STN 6DELAY = -0.023
 STN 5DELAY = -0.029
 17 800304 3 7 0.01 -3.03 -1.16 5.79
 STN 11DELAY = 0.012
 STN 4DELAY = 0.043
 STN 13DELAY = -0.046
 STN 5DELAY = 0.061
 STN 10DELAY = -0.100
 STN 6DELAY = 0.108
 18 800304 4 6 0.01 -4.20 0.08 5.87
 STN 8DELAY = -0.043
 STN 11DELAY = 0.063
 STN 4DELAY = 0.117
 STN 13DELAY = -0.007
 STN 5DELAY = -0.055
 STN 10DELAY = -0.039
 STN 6DELAY = 0.055
 19 800304 5 7 0.01 -4.72 -0.30 4.40
 STN 8DELAY = 0.024
 STN 11DELAY = -0.034
 STN 7DELAY = -0.039
 STN 4DELAY = 0.083
 STN 13DELAY = 0.014
 STN 10DELAY = 0.007
 STN 6DELAY = 0.006
 20 800304 12 7 0.01 -3.52 -1.35 4.70
 STN 8DELAY = 0.032
 STN 11DELAY = -0.108
 STN 14DELAY = 0.039
 STN 26DELAY = 0.069
 STN 24DELAY = 0.060
 STN 7DELAY = -0.025
 STN 4DELAY = 0.027
 STN 23DELAY = 0.100
 STN 13DELAY = 0.021
 STN 10DELAY = -0.041
 STN 17DELAY = 0.123
 STN 6DELAY = -0.093
 21 800304 15 12 0.02 -3.76 -0.25 5.44
 STN 8DELAY = 0.013
 STN 7DELAY = -0.097
 STN 11DELAY = 0.020
 STN 4DELAY = 0.140
 STN 6DELAY = -0.036
 STN 13DELAY = 0.120
 STN 10DELAY = 0.085
 STN 12DELAY = -0.134
 22 800304 17 8 0.01 -3.48 -2.97 4.62
 STN 22DELAY = -0.021
 STN 8DELAY = -0.068
 STN 10DELAY = 0.169
 STN 11DELAY = -0.097
 STN 14DELAY = 0.059
 STN 26DELAY = 0.059
 STN 4DELAY = -0.004
 STN 24DELAY = 0.010
 STN 7DELAY = -0.082
 STN 21DELAY = 0.015
 STN 23DELAY = 0.163
 STN 13DELAY = 0.049

259

STN 12DELAY = -0.101
 STN 10DELAY = 0.015
 STN 19DELAY = -0.015
 STN 17DELAY = 0.076
 STN 6DELAY = -0.050
 STN 20DELAY = 0.082
 STN 25DELAY = -0.131
 STN 29DELAY = -0.016
 STN 15DELAY = 0.182
 23 800304 20 21 0.01 -3.81 0.55 7.38
 STN 22DELAY = 0.018
 STN 8DELAY = -0.090
 STN 10DELAY = 0.199
 STN 11DELAY = -0.057
 STN 24DELAY = 0.008
 STN 7DELAY = -0.085
 STN 26DELAY = 0.075
 STN 14DELAY = 0.095
 STN 4DELAY = 0.004
 STN 21DELAY = 0.057
 STN 23DELAY = 0.149
 STN 13DELAY = 0.005
 STN 17DELAY = 0.031
 STN 10DELAY = -0.043
 STN 6DELAY = -0.078
 STN 12DELAY = -0.148
 STN 19DELAY = -0.036
 STN 20DELAY = 0.176
 STN 29DELAY = -0.073
 STN 15DELAY = 0.101
 24 800304 20 20 0.02 -3.95 -1.16 4.93
 STN 8DELAY = -0.053
 STN 22DELAY = 0.044
 STN 10DELAY = 0.213
 STN 11DELAY = -0.066
 STN 24DELAY = -0.027
 STN 7DELAY = -0.111
 STN 26DELAY = 0.250
 STN 14DELAY = 0.070
 STN 4DELAY = -0.030
 STN 21DELAY = -0.104
 STN 23DELAY = 0.067
 STN 17DELAY = 0.037
 STN 13DELAY = -0.028
 STN 10DELAY = -0.052
 STN 6DELAY = -0.094
 STN 12DELAY = -0.177
 STN 20DELAY = 0.224
 STN 19DELAY = -0.083
 STN 29DELAY = -0.027
 STN 15DELAY = 0.228
 25 800304 21 20 0.01 -3.25 -1.19 7.22
 STN 8DELAY = -0.066
 STN 22DELAY = 0.031
 STN 10DELAY = 0.159
 STN 24DELAY = 0.032
 STN 7DELAY = -0.129
 STN 11DELAY = -0.035
 STN 26DELAY = 0.058
 STN 14DELAY = 0.108

STN 40DELAY = 0.033
 STN 21DELAY = 0.045
 STN 17DELAY = 0.077
 STN 60DELAY = -0.035
 STN 10DELAY = -0.033
 STN 130DELAY = -0.016
 STN 120DELAY = -0.171
 STN 19DELAY = -0.055
 STN 29DELAY = -0.041
 STN 15DELAY = 0.226
 26 800304 22 18 0.01 -3.18 -2.03 4.54
 STN 80DELAY = -0.010
 STN 70DELAY = -0.087
 STN 110DELAY = 0.018
 STN 40DELAY = 0.144
 STN 100DELAY = 0.024
 STN 60DELAY = -0.001
 STN 130DELAY = 0.078
 STN 120DELAY = -0.103
 27 800304 23 8 0.01 -3.26 -1.79 4.72
 STN 80DELAY = -0.050
 STN 220DELAY = 0.025
 STN 240DELAY = -0.034
 STN 100DELAY = 0.229
 STN 70DELAY = -0.134
 STN 110DELAY = -0.044
 STN 260DELAY = 0.080
 STN 140DELAY = 0.090
 STN 40DELAY = 0.004
 STN 60DELAY = -0.057
 STN 210DELAY = 0.056
 STN 100DELAY = -0.016
 STN 130DELAY = -0.045
 STN 20DELAY = 0.109
 STN 290DELAY = 0.090
 STN 120DELAY = -0.079
 STN 190DELAY = -0.000
 28 800305 0 17 0.01 -3.43 -3.10 6.24
 STN 80DELAY = 0.032
 STN 110DELAY = -0.045
 STN 40DELAY = 0.095
 STN 70DELAY = -0.064
 STN 130DELAY = 0.099
 STN 120DELAY = -0.053
 STN 100DELAY = 0.080
 STN 60DELAY = -0.059
 29 800305 1 8 0.01 -3.61 0.80 6.22
 STN 80DELAY = -0.070
 STN 220DELAY = 0.038
 STN 240DELAY = -0.021
 STN 70DELAY = -0.082
 STN 100DELAY = 0.236
 STN 110DELAY = -0.048
 STN 170DELAY = 0.034
 STN 260DELAY = 0.056
 STN 140DELAY = 0.096
 STN 60DELAY = -0.036
 STN 40DELAY = 0.019
 STN 210DELAY = 0.045
 STN 100DELAY = -0.016

STN 130DELAY = -0.032
 STN 230DELAY = 0.108
 STN 20DELAY = 0.027
 STN 290DELAY = -0.053
 STN 120DELAY = -0.178
 STN 190DELAY = -0.101
 STN 150DELAY = 0.190
 30 800305 2 20 0.01 -3.37 -3.58 5.00
 STN 220DELAY = 0.009
 STN 80DELAY = -0.078
 STN 10DELAY = 0.166
 STN 110DELAY = -0.109
 STN 140DELAY = 0.072
 STN 260DELAY = 0.032
 STN 40DELAY = 0.008
 STN 240DELAY = -0.016
 STN 70DELAY = -0.078
 STN 210DELAY = 0.033
 STN 230DELAY = 0.140
 STN 130DELAY = 0.033
 STN 100DELAY = -0.011
 STN 120DELAY = -0.176
 STN 170DELAY = 0.047
 STN 190DELAY = -0.104
 STN 60DELAY = -0.032
 STN 150DELAY = 0.193
 31 800305 3 18 0.01 -3.67 0.38 6.51
 STN 220DELAY = 0.012
 STN 80DELAY = -0.050
 STN 10DELAY = 0.175
 STN 110DELAY = -0.082
 STN 260DELAY = 0.025
 STN 140DELAY = 0.065
 STN 40DELAY = 0.007
 STN 240DELAY = 0.014
 STN 70DELAY = -0.049
 STN 210DELAY = 0.040
 STN 230DELAY = 0.129
 STN 130DELAY = 0.013
 STN 120DELAY = -0.118
 STN 100DELAY = -0.011
 STN 190DELAY = -0.062
 STN 170DELAY = 0.056
 STN 60DELAY = -0.030
 STN 20DELAY = 0.161
 STN 290DELAY = -0.018
 STN 150DELAY = 0.171
 32 800305 4 20 0.02 -3.41 0.58 6.04
 STN 80DELAY = -0.091
 STN 220DELAY = 0.027
 STN 10DELAY = 0.176
 STN 70DELAY = -0.112
 STN 240DELAY = 0.005
 STN 110DELAY = -0.042
 STN 260DELAY = 0.072
 STN 140DELAY = 0.132
 STN 170DELAY = 0.088
 STN 40DELAY = 0.045
 STN 60DELAY = 0.017
 STN 130DELAY = -0.006

STN 210DELAY = 0.058
 STN 100DELAY = -0.017
 STN 120DELAY = -0.143
 STN 190DELAY = -0.052
 STN 150DELAY = 0.329
 33 800305 4 17 0.03 -4.21 -3.10 3.54
 STN 220DELAY = 0.033
 STN 80DELAY = -0.052
 STN 100DELAY = 0.161
 STN 110DELAY = -0.120
 STN 140DELAY = 0.032
 STN 260DELAY = 0.012
 STN 40DELAY = 0.020
 STN 240DELAY = 0.005
 STN 70DELAY = -0.046
 STN 210DELAY = 0.036
 STN 130DELAY = -0.019
 STN 100DELAY = 0.037
 STN 120DELAY = -0.088
 STN 170DELAY = 0.042
 STN 190DELAY = -0.056
 STN 60DELAY = -0.027
 STN 290DELAY = -0.032
 STN 150DELAY = 0.182
 34 800305 5 18 0.01 -3.68 0.33 6.55
 STN 220DELAY = 0.019
 STN 100DELAY = 0.133
 STN 80DELAY = -0.054
 STN 110DELAY = -0.080
 STN 260DELAY = 0.023
 STN 140DELAY = 0.063
 STN 70DELAY = -0.082
 STN 240DELAY = 0.034
 STN 40DELAY = 0.024
 STN 130DELAY = -0.015
 STN 120DELAY = -0.173
 STN 100DELAY = -0.017
 STN 170DELAY = 0.068
 STN 190DELAY = 0.004
 STN 60DELAY = -0.033
 STN 150DELAY = 0.199
 35 800305 5 16 0.01 -4.74 0.33 6.95
 STN 80DELAY = -0.057
 STN 220DELAY = 0.060
 STN 100DELAY = 0.197
 STN 240DELAY = -0.014
 STN 70DELAY = -0.086
 STN 110DELAY = -0.069
 STN 260DELAY = 0.043
 STN 140DELAY = 0.083
 STN 40DELAY = 0.007
 STN 170DELAY = 0.014
 STN 210DELAY = 0.602
 STN 60DELAY = -0.080
 STN 130DELAY = -0.063
 STN 100DELAY = -0.078
 STN 120DELAY = -0.226
 STN 190DELAY = -0.083
 STN 150DELAY = 0.273
 36 800305 5 17 0.03 -3.82 -2.63 3.92

STN 22DELAY = 0.008
 STN 8DELAY = -0.054
 STN 10DELAY = 0.174
 STN 11DELAY = -0.119
 STN 14DELAY = 0.066
 STN 24DELAY = 0.009
 STN 4DELAY = 0.011
 STN 7DELAY = -0.066
 STN 21DELAY = 0.021
 STN 23DELAY = 0.174
 STN 13DELAY = -0.001
 STN 10DELAY = 0.001
 STN 17DELAY = 0.055
 STN 12DELAY = -0.112
 STN 6DELAY = -0.019
 STN 19DELAY = -0.024
 STN 15DELAY = 0.316
 37 800305 5 17 0.03 -3.22 -0.07 6.02
 STN 8DELAY = -0.109
 STN 22DELAY = 0.004
 STN 10DELAY = 0.185
 STN 24DELAY = -0.017
 STN 7DELAY = -0.086
 STN 11DELAY = -0.030
 STN 14DELAY = 0.081
 STN 4DELAY = 0.034
 STN 21DELAY = 0.039
 STN 17DELAY = 0.059
 STN 6DELAY = -0.004
 STN 10DELAY = 0.029
 STN 13DELAY = -0.019
 STN 12DELAY = -0.105
 STN 19DELAY = 0.050
 38 800305 5 15 0.01 -3.11 -2.08 7.25
 STN 8DELAY = -0.112
 STN 22DELAY = 0.002
 STN 10DELAY = 0.209
 STN 7DELAY = -0.078
 STN 11DELAY = -0.061
 STN 14DELAY = 0.099
 STN 4DELAY = 0.022
 STN 21DELAY = 0.081
 STN 23DELAY = 0.139
 STN 17DELAY = 0.076
 STN 6DELAY = -0.021
 STN 13DELAY = 0.058
 STN 10DELAY = -0.024
 STN 2DELAY = 0.069
 STN 12DELAY = -0.101
 STN 19DELAY = -0.018
 STN 29DELAY = -0.001
 STN 25DELAY = -0.139
 STN 15DELAY = 0.183
 39 800305 8 19 0.02 -3.35 -1.92 5.40
 STN 8DELAY = -0.093
 STN 22DELAY = -0.000
 STN 10DELAY = 0.243
 STN 7DELAY = -0.064
 STN 11DELAY = -0.043
 STN 14DELAY = 0.081

STN 4DELAY = 0.055
 STN 21DELAY = 0.055
 STN 17DELAY = 0.084
 STN 23DELAY = 0.090
 STN 6DELAY = -0.006
 STN 10DELAY = -0.045
 STN 12DELAY = -0.110
 STN 19DELAY = 0.071
 STN 29DELAY = -0.038
 STN 25DELAY = -0.188
 STN 15DELAY = 0.258
 40 800305 9 17 0.02 -3.69 -1.94 5.50
 STN 22DELAY = -0.027
 STN 8DELAY = -0.106
 STN 10DELAY = 0.158
 STN 11DELAY = -0.093
 STN 14DELAY = 0.063
 STN 4DELAY = -0.003
 STN 21DELAY = 0.049
 STN 23DELAY = 0.138
 STN 16DELAY = 0.145
 STN 12DELAY = -0.078
 STN 10DELAY = 0.014
 STN 19DELAY = 0.035
 STN 17DELAY = 0.083
 STN 6DELAY = -0.101
 STN 20DELAY = 0.062
 STN 25DELAY = -0.134
 STN 29DELAY = -0.084
 STN 15DELAY = 0.266
 41 800305 10 18 0.02 -3.86 0.63 7.57
 STN 11DELAY = -0.142
 STN 8DELAY = -0.117
 STN 10DELAY = 0.110
 STN 14DELAY = 0.048
 STN 4DELAY = -0.022
 STN 21DELAY = 0.072
 STN 23DELAY = 0.149
 STN 12DELAY = -0.049
 STN 13DELAY = 0.005
 STN 16DELAY = 0.099
 STN 19DELAY = 0.036
 STN 10DELAY = -0.012
 STN 17DELAY = 0.068
 STN 6DELAY = -0.115
 STN 25DELAY = -0.094
 STN 15DELAY = 0.296
 STN 29DELAY = -0.002
 42 800305 11 17 0.02 -3.61 1.27 7.21
 STN 8DELAY = -0.169
 STN 10DELAY = 0.150
 STN 11DELAY = -0.059
 STN 14DELAY = 0.099
 STN 4DELAY = 0.002
 STN 16DELAY = 0.061
 STN 21DELAY = 0.083
 STN 23DELAY = 0.130
 STN 6DELAY = -0.083
 STN 10DELAY = -0.018
 STN 13DELAY = -0.023

STN 2DELAY = 0.049
 STN 12DELAY = -0.069
 STN 19DELAY = 0.050
 STN 29DELAY = -0.030
 STN 25DELAY = -0.120
 STN 15DELAY = 0.365
 43 800305 12 17 0.02 -2.99 -2.06 7.91
 STN 22DELAY = -0.005
 STN 20DELAY = -0.006
 STN 8DELAY = -0.059
 STN 11DELAY = -0.120
 STN 10DELAY = 0.384
 STN 14DELAY = 0.068
 STN 4DELAY = -0.018
 STN 24DELAY = -0.076
 STN 21DELAY = 0.018
 STN 23DELAY = 0.120
 STN 13DELAY = 0.032
 STN 12DELAY = -0.079
 STN 16DELAY = 0.090
 STN 19DELAY = -0.000
 STN 10DELAY = -0.039
 STN 17DELAY = -0.008
 STN 18DELAY = 0.373
 STN 6DELAY = -0.111
 STN 25DELAY = -0.208
 STN 29DELAY = -0.034
 STN 15DELAY = 0.258
 44 800305 18 21 0.03 -3.80 1.04 6.40
 STN 22DELAY = 0.009
 STN 20DELAY = -0.003
 STN 11DELAY = -0.057
 STN 10DELAY = 0.193
 STN 8DELAY = -0.097
 STN 14DELAY = 0.019
 STN 4DELAY = -0.073
 STN 23DELAY = 0.089
 STN 21DELAY = -0.030
 STN 24DELAY = -0.083
 STN 13DELAY = 0.036
 STN 12DELAY = -0.076
 STN 16DELAY = 0.059
 STN 19DELAY = -0.036
 STN 10DELAY = 0.115
 STN 17DELAY = 0.034
 STN 18DELAY = 0.184
 STN 6DELAY = -0.156
 STN 25DELAY = -0.136
 STN 2DELAY = 0.057
 STN 15DELAY = 0.204
 STN 29DELAY = -0.075
 45 800305 19 22 0.01 -4.17 1.40 6.16
 STN 22DELAY = -0.033
 STN 8DELAY = -0.106
 STN 20DELAY = 0.025
 STN 10DELAY = 0.175
 STN 11DELAY = -0.048
 STN 14DELAY = 0.081
 STN 4DELAY = -0.013
 STN 21DELAY = 0.088

STN 16DELAY = 0.031
 STN 23DELAY = 0.119
 STN 13DELAY = -0.007
 STN 10DELAY = -0.038
 STN 17DELAY = 0.073
 STN 6DELAY = -0.045
 STN 12DELAY = -0.068
 STN 19DELAY = 0.067
 STN 25DELAY = -0.209
 STN 15DELAY = 0.312
 46 800306 0 18 0.02 -3.26 -1.01 7.77
 STN 10DELAY = 0.152
 STN 11DELAY = -0.112
 STN 20DELAY = -0.010
 STN 8DELAY = -0.066
 STN 14DELAY = 0.030
 STN 4DELAY = 0.015
 STN 13DELAY = 0.063
 STN 23DELAY = 0.123
 STN 21DELAY = 0.011
 STN 12DELAY = -0.119
 STN 19DELAY = 0.027
 STN 16DELAY = 0.084
 STN 10DELAY = -0.065
 STN 17DELAY = -0.033
 STN 6DELAY = -0.076
 STN 18DELAY = 0.136
 STN 25DELAY = -0.145
 STN 20DELAY = 0.086
 STN 15DELAY = 0.231
 STN 29DELAY = -0.101
 47 800306 4 20 0.01 -5.41 2.15 8.60
 STN 22DELAY = 0.526
 STN 11DELAY = -0.123
 STN 8DELAY = -0.121
 STN 14DELAY = 0.045
 STN 10DELAY = 0.130
 STN 4DELAY = -0.082
 STN 21DELAY = 0.081
 STN 12DELAY = -0.069
 STN 10DELAY = -0.068
 STN 16DELAY = 0.096
 STN 13DELAY = -0.038
 STN 19DELAY = 0.062
 STN 18DELAY = 0.238
 STN 17DELAY = 0.077
 STN 6DELAY = -0.127
 STN 20DELAY = -0.038
 STN 29DELAY = -0.055
 48 800306 17 17 0.03 -2.71 0.99 7.58
 STN 20DELAY = 0.021
 STN 8DELAY = -0.074
 STN 10DELAY = 0.141
 STN 11DELAY = -0.109
 STN 14DELAY = 0.052
 STN 4DELAY = -0.082
 STN 27DELAY = 0.017
 STN 21DELAY = 0.096
 STN 23DELAY = 0.127
 STN 16DELAY = 0.032

STN 10DELAY = -0.065
 STN 13DELAY = -0.004
 STN 17DELAY = 0.085
 STN 18DELAY = 0.151
 STN 12DELAY = -0.095
 STN 6DELAY = -0.111
 STN 19DELAY = 0.050
 STN 29DELAY = -0.009
 49 800306 18 18 0.01 -2.75 -0.16 7.80
 STN 8DELAY = -0.121
 STN 10DELAY = 0.123
 STN 20DELAY = -0.010
 STN 11DELAY = -0.030
 STN 28DELAY = -0.052
 STN 14DELAY = 0.095
 STN 27DELAY = 0.037
 STN 4DELAY = 0.023
 STN 21DELAY = 0.078
 STN 13DELAY = 0.030
 STN 10DELAY = -0.072
 STN 17DELAY = 0.024
 STN 12DELAY = -0.063
 STN 6DELAY = -0.123
 STN 19DELAY = -0.041
 STN 18DELAY = 0.126
 STN 20DELAY = 0.033
 STN 29DELAY = 0.047
 50 800307 10 18 0.01 -4.34 -0.21 4.89
 STN 8DELAY = -0.132
 STN 10DELAY = 0.138
 STN 20DELAY = 0.003
 STN 11DELAY = -0.059
 STN 28DELAY = -0.033
 STN 14DELAY = 0.084
 STN 27DELAY = 0.026
 STN 4DELAY = 0.023
 STN 21DELAY = 0.071
 STN 13DELAY = 0.020
 STN 16DELAY = 0.111
 STN 12DELAY = -0.050
 STN 10DELAY = -0.080
 STN 17DELAY = 0.034
 STN 6DELAY = -0.110
 STN 19DELAY = 0.000
 STN 18DELAY = 0.190
 STN 20DELAY = 0.035
 STN 29DELAY = -0.047
 51 800307 15 19 0.01 -4.46 0.01 6.51
 STN 8DELAY = -0.128
 STN 20DELAY = 0.014
 STN 10DELAY = 0.113
 STN 11DELAY = -0.036
 STN 14DELAY = 0.079
 STN 28DELAY = -0.011
 STN 4DELAY = 0.047
 STN 27DELAY = -0.002
 STN 21DELAY = 0.084
 STN 16DELAY = 0.144
 STN 13DELAY = 0.006
 STN 10DELAY = -0.091

STN 12DELAY = -0.054
 STN 17DELAY = 0.089
 STN 6DELAY = -0.140
 STN 19DELAY = 0.005
 STN 18DELAY = 0.167
 STN 20DELAY = 0.047
 STN 29DELAY = -0.052
 52 800307 15 19 0.01 -3.69 0.15 5.95
 STN 8DELAY = -0.145
 STN 10DELAY = 0.180
 STN 20DELAY = 0.027
 STN 27DELAY = -0.017
 STN 28DELAY = -0.033
 STN 11DELAY = -0.038
 STN 14DELAY = 0.130
 STN 16DELAY = 0.033
 STN 4DELAY = 0.025
 STN 21DELAY = 0.084
 STN 17DELAY = 0.042
 STN 6DELAY = -0.082
 STN 30DELAY = -0.079
 STN 13DELAY = -0.024
 STN 18DELAY = 0.363
 STN 20DELAY = 0.079
 STN 12DELAY = -0.083
 STN 29DELAY = -0.023
 STN 19DELAY = -0.007
 53 800307 19 19 0.02 -3.31 -2.31 5.52
 STN 8DELAY = -0.013
 STN 11DELAY = -0.014
 STN 4DELAY = 0.126
 STN 13DELAY = 0.001
 STN 30DELAY = -0.036
 STN 12DELAY = -0.010
 STN 6DELAY = 0.024
 54 800308 8 7 0.01 -3.84 -0.25 5.81
 STN 8DELAY = -0.267
 STN 10DELAY = 0.166
 STN 20DELAY = -0.005
 STN 27DELAY = -0.015
 STN 11DELAY = -0.082
 STN 16DELAY = 0.133
 STN 14DELAY = 0.054
 STN 4DELAY = 0.045
 STN 17DELAY = 0.079
 STN 21DELAY = 0.101
 STN 6DELAY = -0.120
 STN 30DELAY = -0.060
 STN 13DELAY = -0.002
 STN 18DELAY = 0.191
 STN 12DELAY = -0.037
 STN 29DELAY = -0.135
 STN 19DELAY = -0.005
 55 800308 9 17 0.00 -3.49 -2.53 7.50
 STN 8DELAY = -0.083
 STN 20DELAY = 0.076
 STN 11DELAY = -0.082
 STN 14DELAY = 0.092
 STN 27DELAY = 0.016
 STN 4DELAY = 0.024

STN 21DELAY = 0.114
 STN 16DELAY = 0.146
 STN 13DELAY = 0.001
 STN 30DELAY = -0.137
 STN 17DELAY = 0.033
 STN 12DELAY = -0.125
 STN 6DELAY = -0.150
 STN 18DELAY = 0.146
 STN 19DELAY = 0.069
 56 800308 13 15 0.01 -3.89 -0.22 5.10
 STN 8DELAY = -0.101
 STN 20DELAY = 0.078
 STN 11DELAY = -0.010
 STN 27DELAY = 0.011
 STN 14DELAY = 0.147
 STN 4DELAY = 0.031
 STN 16DELAY = 0.151
 STN 21DELAY = 0.060
 STN 13DELAY = -0.025
 STN 17DELAY = 0.038
 STN 30DELAY = -0.080
 STN 6DELAY = -0.136
 STN 18DELAY = 0.123
 STN 12DELAY = -0.074
 STN 19DELAY = 0.023
 57 800308 18 15 0.02 -3.70 -1.57 5.30
 STN 8DELAY = -0.093
 STN 27DELAY = -0.013
 STN 20DELAY = 0.095
 STN 16DELAY = 0.054
 STN 17DELAY = 0.013
 STN 6DELAY = -0.042
 STN 11DELAY = -0.003
 STN 14DELAY = 0.096
 STN 4DELAY = 0.051
 STN 30DELAY = -0.121
 STN 21DELAY = 0.047
 STN 13DELAY = -0.007
 STN 18DELAY = 0.092
 STN 12DELAY = -0.043
 STN 19DELAY = -0.010
 58 800309 6 15 0.01 -3.33 -4.08 6.71
 STN 8DELAY = -0.080
 STN 27DELAY = -0.018
 STN 20DELAY = 0.078
 STN 16DELAY = 0.068
 STN 17DELAY = 0.022
 STN 6DELAY = -0.061
 STN 11DELAY = -0.021
 STN 14DELAY = 0.136
 STN 4DELAY = 0.025
 STN 30DELAY = -0.101
 STN 21DELAY = 0.055
 STN 13DELAY = -0.018
 STN 18DELAY = 0.091
 STN 12DELAY = -0.048
 STN 19DELAY = 0.012
 59 800309 7 15 0.01 -3.40 -4.01 6.94
 STN 8DELAY = -0.098
 STN 27DELAY = -0.023

STN 20DELAY = 0.076
 STN 16DELAY = 0.092
 STN 17DELAY = 0.025
 STN 6DELAY = -0.030
 STN 11DELAY = -0.012
 STN 4DELAY = 0.079
 STN 14DELAY = 0.112
 STN 30DELAY = -0.107
 STN 21DELAY = 0.100
 STN 13DELAY = -0.038
 STN 12DELAY = -0.049
 60 800309 7 13 0.01 -3.04 -4.29 6.90
 STN 8DELAY = -0.051
 STN 27DELAY = -0.002
 STN 16DELAY = 0.058
 STN 20DELAY = 0.093
 STN 17DELAY = 0.010
 STN 6DELAY = -0.035
 STN 11DELAY = -0.025
 STN 14DELAY = 0.096
 STN 4DELAY = 0.045
 STN 30DELAY = -0.098
 STN 21DELAY = 0.050
 STN 18DELAY = 0.117
 STN 12DELAY = -0.050
 STN 19DELAY = 0.034
 61 800309 7 14 0.02 -3.23 -4.34 6.03
 STA 1 JAU RSTA = 0.178NOBS = 30
 STA 2 OGE RSTA = 0.079NOBS = 16
 STA 3 GRG RSTA = -0.091NOBS = 9
 STA 4 LYS RSTA = 0.020NOBS = 61
 STA 5 ASL RSTA = -0.002NOBS = 8
 STA 6 FLO RSTA = -0.048NOBS = 54
 STA 7 BIE RSTA = -0.070NOBS = 29
 STA 8 CAS RSTA = -0.056NOBS = 59
 STA 9 REY RSTA = 0.046NOBS = 7
 STA10 REB RSTA = 0.003NOBS = 51
 STA11 PED RSTA = -0.045NOBS = 53
 STA12 ART RSTA = -0.097NOBS = 40
 STA13 AAS RSTA = 0.006NOBS = 57
 STA14 CAP RSTA = 0.080NOBS = 37
 STA15 STV RSTA = 0.236NOBS = 21
 STA16 BIL RSTA = 0.089NOBS = 19
 STA17 FLE RSTA = 0.050NOBS = 35

modèle de vitesse et discretisation: petits blocs. résultats
sur Figures VII.6

***** PROGRAM 3-0 *****

LOCAL EVENT ONLY RAYS GETTING UP PYR

LATITUDE LONGITUDE THA INCL VO JPWT IRES IPUNCH IPRINT THETA RESLNMN NINT
43N 6.00 0W22.00 0.0 0.0 5.00 2 0 0 1 1. 0.100 1 10

DAMPING PARAMETERS

V 2.000000 0.100000 0.001002 0.00100

INVERSE EPICENTRE *LOC-VITESSE 61

VELOCITY	THICKNESS	#-NORTH	LENGTH	#-EAST	LENGTH	COORDINATE	DISPLACEMENT
1	5.5	1.5	8	3.00	12	3.00	-2.000 -1.600
2	5.5	1.5	8	3.00	12	3.00	-2.000 -1.600
3	5.5	2.5	12	1.50	20	1.50	-2.700 -1.600
4	5.5	2.5	12	1.50	20	1.50	-2.700 -1.600
5	5.5	10.00	4	5.50	6	5.50	-2.000 -1.600

modèle de vitesse et discretisation: grands blocs. résultats
sur Figures VII.9.

***** PROGRAM 3-0 *****

LOCAL EVENT ONLY RAYS GETTING UP PYR

LATITUDE LONGITUDE THA INCL VO JPWT IRES IPUNCH IPRINT THETA RESLNMN NINT
43N 6.00 0W22.00 0.0 0.0 5.00 2 1 0 1 1. 0.100 1 10

DAMPING PARAMETERS

V 2.000000 0.100000 0.001002 0.00100

INVERSE EPICENTRE SEUL

INVERSE EPICENTRE *BLOC-VITESSE 0

VELOCITY	THICKNESS	#-NORTH	LENGTH	#-EAST	LENGTH	COORDINATE	DISPLACEMENT
1	5.50	1.50	8	3.00	12	3.00	-2.000 -1.600
2	5.50	1.50	8	3.00	12	3.00	-2.000 -1.600
3	5.50	2.50	2	4.50	2	9.00	-2.000 1.400
4	5.50	2.50	2	4.50	2	9.00	-2.000 1.400
5	5.50	10.00	2	11.00	3	11.00	-2.000 -1.600

Tableau VII.3.

	x	y	z	Δx	Δy	Δz	Δt
1	-0.28	0.40	4.96	-0.194	0.500	-0.327	0.027
2	-0.23	0.50	10.44	0.267	0.824	0.285	0.084
3	-0.05	1.07	7.41	0.052	0.835	-0.221	0.083
4	-0.06	-0.21	6.71	-0.192	0.435	-0.244	0.033
5	-0.77	10.71	10.11	0.256	0.909	0.103	-0.076
6	-0.04	-1.50	5.79	-0.170	0.327	-0.074	0.024
7	-0.28	-1.99	6.27	-0.065	0.344	0.019	0.014
8	-0.09	-0.07	2.61	-0.004	0.153	0.128	0.034
9	-0.09	-0.00	0.33	0.030	-0.100	0.477	-0.037
10	-0.00	-0.00	0.00	-0.130	0.070	0.196	0.039
11	-0.02	-0.76	4.69	-0.053	0.034	0.219	0.012
12	-0.03	-0.70	0.11	-0.059	0.002	-0.419	0.012
13	-0.00	-0.00	0.04	0.009	0.000	0.406	-0.001
14	-0.05	0.07	0.72	-0.007	0.117	0.353	-0.022
15	-0.09	-0.02	10.05	0.192	0.265	1.422	-0.169
16	-0.00	-1.10	6.77	-0.101	0.090	0.522	-0.029
17	-0.03	-1.16	5.79	-0.002	0.070	0.565	-0.039
18	-0.20	0.00	5.07	-0.102	0.100	0.637	-0.041
19	-0.02	-0.30	4.40	-0.140	0.005	0.337	-0.006
20	-0.02	-1.75	4.70	-0.227	0.052	0.490	-0.024
21	-0.76	-0.05	5.44	-0.029	0.215	0.469	-0.033
22	-0.40	-0.97	4.62	-0.045	-0.220	-0.130	0.067
23	-0.01	0.05	7.30	0.009	-0.175	-0.447	0.079
24	-0.05	-1.16	1.03	-0.134	-0.009	0.120	-0.003
25	-0.05	-1.19	7.22	-0.030	-0.059	0.215	-0.025
26	-0.00	-0.00	4.04	-0.004	-0.055	-0.096	0.020
27	-0.00	-1.79	4.72	-0.006	-0.223	-0.017	0.050
28	-0.03	-0.10	6.24	0.002	-0.035	-0.432	0.072
29	-0.01	0.00	6.22	0.004	-0.100	0.034	0.040
30	-0.07	-0.00	5.00	0.006	-0.000	0.244	-0.016
31	-0.00	0.00	6.01	-0.070	0.111	-0.147	0.019
32	-0.01	0.00	6.04	-0.103	0.114	-0.177	0.032
33	-0.01	-0.10	0.04	-0.072	-0.061	-0.595	0.091
34	-0.00	0.00	6.00	-0.004	0.100	-0.125	0.010
35	-0.74	0.00	6.95	-0.122	0.054	-0.219	0.029
36	-0.02	-0.00	3.92	-0.444	-0.269	0.322	-0.020
37	-0.02	-0.07	6.02	-0.115	-0.052	-0.514	0.001
38	-0.11	-0.00	7.05	-0.095	-0.116	-0.423	0.062
39	-0.05	-1.92	5.40	0.051	-0.037	-0.373	0.066
40	-0.09	-1.94	5.00	0.104	-0.005	-0.337	0.071
41	-0.00	0.00	7.57	0.119	-0.354	-0.611	0.101
42	-0.01	1.27	7.21	0.042	-0.435	-1.041	0.144
43	-0.09	-0.00	7.91	-0.040	-0.325	-0.609	0.080
44	-0.00	1.04	6.40	0.051	-0.006	-0.150	0.045
45	-0.17	1.40	6.16	0.016	-0.132	-0.330	0.040
46	-0.26	-1.01	7.77	-0.047	-0.273	-0.367	0.051
47	-0.41	2.15	0.60	0.120	-0.406	0.026	0.039
48	-0.71	0.99	7.00	0.275	-0.076	0.057	-0.079
49	-0.75	-0.16	7.00	-0.039	-0.177	-0.430	0.055
50	-0.24	-0.21	4.09	-0.004	-0.245	-0.742	0.097
51	-0.00	0.01	6.01	-0.009	-0.229	-0.470	0.069
52	-0.09	0.10	5.95	-0.000	-0.205	-0.513	0.076
53	-0.01	-0.01	5.02	-0.271	-0.152	-0.666	0.005
54	-0.04	-0.25	5.01	-0.157	-0.213	0.012	0.044
55	-0.19	-0.03	7.00	-0.030	-0.229	-1.194	0.142
56	-0.09	-0.22	5.10	-0.030	-0.215	-0.299	0.050
57	-0.70	-1.57	5.30	-0.031	-0.239	-0.206	0.047
58	-0.33	-0.00	6.71	0.115	-0.172	-0.201	0.070
59	-0.00	-0.01	6.94	0.070	-0.107	-0.213	0.040
60	-0.04	-0.29	6.90	0.015	-0.136	-0.303	0.054
61	-0.23	-0.34	6.03	0.201	-0.107	-0.432	0.090

M1 $v_s = 5.5 \text{ km/s}$ $0 \rightarrow 3 \text{ km}$
 $v_0 = 5.5 \text{ km/s}$ $3 \rightarrow 15 \text{ km}$

Tableau VII.4.

(a)

	x	y	z	Δx	Δy	Δz	Δt
1	-3.14	2.41	4.56	-0.250	0.403	-0.525	0.061
2	-3.55	2.90	9.61	-0.019	0.069	0.068	0.019
3	-3.55	1.28	5.69	-0.364	0.561	-0.328	0.023
4	-2.58	-0.23	5.77	-0.293	0.365	-0.294	0.042
5	-4.01	12.76	7.56	0.130	0.956	-0.113	-0.067
6	-3.32	-1.51	5.31	-0.289	0.249	-0.153	0.038
7	-4.01	-1.98	5.93	-0.170	0.285	-0.314	0.062
8	-3.59	-3.07	2.62	-0.036	0.117	0.054	0.044
9	-2.59	-0.60	7.60	-0.063	-0.130	0.498	-0.024
10	-4.02	-3.00	2.75	-0.089	0.012	0.445	0.051
11	-3.90	-2.70	4.33	-0.180	-0.104	0.023	0.048
12	-3.94	-3.77	0.04	-0.055	-0.014	-0.467	0.011
13	-3.19	-3.02	5.46	0.020	0.037	0.285	0.023
14	-4.40	0.92	5.97	-0.138	0.046	0.229	0.003
15	-3.10	-0.40	9.19	0.160	0.216	1.465	-0.142
16	-3.41	-1.16	6.12	-0.154	0.035	0.422	-0.001
17	-3.04	-1.13	5.25	-0.131	0.014	0.429	0.001
18	-4.20	0.13	5.27	-0.213	0.127	0.543	-0.007
19	-4.74	-0.25	3.09	-0.231	-0.112	-0.115	0.349
20	-3.53	-1.33	4.31	-0.211	-0.014	0.211	0.036
21	-3.77	-0.22	4.06	-0.095	0.170	0.292	0.001
22	-3.52	-3.07	4.11	-0.078	-0.213	-0.196	0.076
23	-3.72	0.60	5.14	-0.105	-0.092	-0.135	0.030
24	-3.96	-1.22	4.28	-0.142	-0.039	0.049	0.011
25	-3.15	-1.14	6.17	-0.226	-0.086	0.339	-0.032
26	-3.13	-2.08	4.09	-0.215	-0.011	-0.076	0.021
27	-3.32	-1.04	4.20	-0.101	-0.213	-0.072	0.074
28	-3.45	-3.16	5.45	-0.024	-0.034	-0.422	0.070
29	-3.61	0.01	5.52	-0.037	-0.126	-0.146	0.074
30	-3.32	-3.53	4.16	-0.096	-0.208	0.423	-0.014
31	-3.62	0.36	5.69	-0.146	0.086	-0.189	0.020
32	-3.37	0.62	5.03	-0.154	0.035	-0.052	0.011
33	-4.22	-3.16	3.10	-0.085	-0.015	-0.310	0.069
34	-3.62	0.32	5.69	-0.150	0.091	-0.175	0.023
35	-4.73	0.31	6.13	-0.189	0.059	-0.306	0.040
36	-3.17	-0.25	5.51	-0.194	0.097	-0.736	0.099
37	-3.10	-2.14	5.45	-0.141	-0.010	-0.419	0.072
38	-3.27	-1.94	4.59	-0.067	-0.099	-0.353	0.056
39	-3.50	-2.01	4.09	0.009	-0.088	-0.532	0.070
40	-3.78	0.74	6.47	-0.104	-0.335	-0.410	0.050
41	-3.63	1.30	5.91	-0.092	-0.336	-0.772	0.093
42	-2.94	-2.04	6.75	-0.107	-0.364	-0.734	0.079
43	-3.73	1.06	5.61	-0.032	-0.109	-0.270	0.058
44	-4.15	1.44	5.37	-0.046	-0.244	-0.391	0.054
45	-3.13	-0.92	7.20	-0.202	-0.342	-0.740	0.094
46	-5.30	2.34	7.93	-0.117	-0.460	-0.180	0.066
47	-2.69	1.02	6.56	0.129	0.258	1.133	-0.003
48	-2.60	-0.13	6.90	-0.166	-0.115	-0.317	0.030
49	-4.34	-0.19	4.21	-0.050	-0.309	-0.700	0.082
50	-4.46	0.04	5.67	-0.039	-0.230	-0.404	0.058
51	-3.69	0.16	5.18	-0.087	-0.240	-0.407	0.057
52	-3.24	-2.31	4.74	-0.339	-0.210	-0.736	0.304
53	-3.04	-0.22	5.10	-0.254	-0.240	-0.130	0.060
54	-3.49	-2.57	6.33	-0.110	-0.180	-0.779	0.009
55	-3.90	-0.21	4.40	-0.077	-0.276	-0.300	0.066
56	-3.70	-1.59	4.65	-0.000	-0.262	-0.236	0.045
57	-3.30	-4.12	5.02	0.044	-0.160	-0.207	0.043
58	-3.30	-4.05	6.04	0.061	-0.203	-0.234	0.042
59	-3.02	-4.33	6.07	-0.051	-0.107	-0.320	0.059
60	-3.15	-4.30	5.13	0.170	-0.125	-0.371	0.077

Mz $v_0 = 5.5 \text{ km/s } 0 \rightarrow 3 \text{ km}$
 $v_0 = 6.0 \text{ km/s } 3 \rightarrow 15 \text{ km}$

le séisme n° 36 du tableau
précédent est absent ici.

4 (b)

REMARQUES GENERALES

Connaitre l'intérieur de la Terre à partir des seules observations faites en surface demeure en sismologie le problème inverse majeur (et fondamentalement non unique). Pourtant les résultats obtenus en diverses régions types (point chaud, plaque plongeante par exemple) sont cohérents avec d'autres données géologiques et géophysiques. Face à ces résultats encourageants plusieurs études se sont développées en cherchant toujours à construire un système surdéterminé. Alors la dimension du vecteur "inconnues", qui devrait refléter le type d'information que le sismologue cherche (par exemple, l'échelle des hétérogénéités de vitesse), peut être, en pratique, limité par la construction d'un système artificiellement surdéterminé.

Afin de s'affranchir de cette barrière artificielle entre système sous-sur déterminé, on préfère reconnaître que d'autres contraintes physiques sont nécessaires pour interpréter les données.

On présente alors deux formulations possibles. Les résultats obtenus par les deux techniques sont tout d'abord comparés d'un point de vue numérique. Les hypothèses nécessaires à la mise en oeuvre de la méthode statistique sont difficiles à contrôler et permettent d'obtenir une solution qui explique les données. Qu'elle en est sa signification parmi l'ensemble des solutions possibles? Par contre, les techniques de programmation linéaire formulent de manière explicite les connaissances "a priori" (bornes sur chacun des paramètres), et permettent d'explorer le domaine des solutions possibles, lorsqu'elles existent (calcul de différentes solutions particularisées par l'utilisateur (et le coût calcul)).

Les données traitées dans nos deux applications permettent d'obtenir une information intéressante sur deux régions complexes. Seul point un peu décevant, les relocalisations de séismes n'ont pas apportées les informations escomptées sur les éventuelles géométries de la rupture dans la partie peu sismique de l'arc des Nouvelles Hébrides.

Enfin l'utilisation de différentes normes pour expliquer les données, L_1 , L_2 , L_∞ montre concrètement l'intérêt de la norme L_1 , qui, dans notre application, rejettent 43/252 données, toutes groupées sur les 5 stations de l'île Efate.

Le résultat principal de l'étude des Nouvelles Hébrides reste, pour le sismologue, la mise en évidence d'une couche de vitesse moyenne 7.2 km/s. Cette vitesse, qui apparaît entre 10 et 19 km de profondeur, est nettement concrétisée entre 19 et 30 km de profondeur, principalement sous l'île de Malekula. Ce résultat est lié à des mesures physiques, chaque mesure n'étant pas exactement connue et leur répartition, jamais aussi dense que ce que l'on souhaite.

Pour conserver une approche objective il est nécessaire de connaître la qualité de cette information. Pour cela, les techniques de programmation linéaire nous permettent de calculer les valeurs minimum et maximum que peuvent prendre les blocs de cette zone, tout en expliquant toujours aussi bien les données. On obtient les valeurs extrêmes de 7.4 et 7.2 km/s. Pour les blocs de vitesse relativement rapide, présents aux mêmes profondeurs mais dans le domaine intra-îles, les valeurs extrêmes sont elles aussi très serrées, 8.5 et 8.2 km/s, caractérisant ainsi la qualité de l'information obtenue.

Une telle structure, de vitesse intermédiaire (7.2 km/s), peut être la trace d'une ancienne subduction (opposée à la subduction actuelle) et/ou caractériser un modèle de fluage pour la subduction actuelle (absence de fort séisme dans cette région).

Dans l'exemple d'Arudy on montre que la sismicité se regroupe dans un milieu globalement lent, probablement très fracturé. Cela constitue un élément supplémentaire à apporter à la relation complexe liant vitesses relatives et sismicité. D'autre part un important contraste de vitesse Nord-Sud est mis en évidence dans cette région.

Les deux applications présentées ici, montrent concrètement le type d'information que l'on peut obtenir avec un tel outil, à des échelles très diverses. Cette information peut aussi bien caractériser la qualité de la mesure d'un paramètre (un résultat important peut être, par exemple, l'incapacité d'un réseau à localiser les profondeurs des foyers avec une erreur inférieure à X mètres), que fournir une image tridimensionnelle fine intéressante pour les pétroliers.

BIBLIOGRAPHIE

- Anderson, K. R., 1978. Automatic processing of local earthquake data. Ph. D. Thesis, Mass. Inst. Tech.
- Acton, F., 1970. Numerical Methods That Work, Harper and Row, New York, 541 pp.
- Aki, K., 1973. Scattering of P waves under the Montana LASA, Jour. Geophys. Res., 78, 1334-1346.
- Aki, K., 1979. Three Dimensional seismic velocity anomalies and their relation to local seismicity. Tectonophysics, 56, 85-88
- Aki, K. and W.H.K. Lee, 1976. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes. I. A homogeneous initial model, Jour. Géophys. Res., 81, 4381-4399.
- Aki, K., A. Cristoffersson and E.S. Husebye, 1977a. Determination of the three-dimensional structure of the lithosphere, Jour. Geophys. Res., 82, 277-296.
- Aki, K. and Richards, P., 1980. "Methods of quantitative seismology". Freeman, San Francisco 932 p.
- Backus, G. and J.F. Gilbert, 1967. Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems, Géophys. Jour. Roy. Astron. Soc., 13, 247-276.
- Backus, G.E. and J.F. Gilbert, 1968. The resolving power of gross earth data, Géophys. Jour. Roy. Astron. Soc., 16, 169-205.
- Backus, G.E. and J.F. Gilbert, 1969. Constructing P-velocity models to fit restricted sets of travel-time data, Bull. Seis. Soc. Am., 59, 1407-1414.
- Banks, R.J., Parker, R.L. and Huestis, S.P. 1977. Isostatic compensation on a continental scale : local versus regional mechanisms, Géophys. J. R. astron. Soc., 51, 431-452.
- Bartels, R. H., 1971. A stabilisation of the simplex method, Num Math 46, 414-434.
- Bayer, R., Lesquer, A., 1978. Les anomalies gravimétriques de la bordure orientale du craton ouest africain : géométrie d'une suture panafricaine, Bull. Soc. Géol. France, (7), XX, n° 6, 863-876.
- Beaton, A. E. and J.W. Tukey, 1974. The fitting of power series, meaning, polynomials, illustrated on band spectroscopic data, Technometrics 16, 147.
- Bessonova, E. N., Fishman, V. M., Ryaboyi, V. Z. and Sitnikova, G. A., 1974. The tau method for the inversion of travel times, I Deep seismic sounding data, Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 36, 377-398.
- Bessonova, N. E., V. M. Fishman, M. G. Shnirman, G. A. Sitnikova and L. R. Johnson, 1976. The tau method for inversion of travel times. II. Earthquake data, Géophys. Jour. Roy. Astron. Soc., 46, 87-108.
- Bois, P., La Porte, M., Lavergne, M., et Thomas, G., 1971. Essai de détermination automatique des vitesses sismiques par mesures entre puits. Geophys. Prospec. XIX, n°1.
- Bolt, B. A. 1960. The revision of earthquake epicentres, focal depths and origin times using a high-speed computer, Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 3, 433-440.
- Buland, R., 1976. The mechanics of locating earthquakes, Bull. Seis. Soc. Am., 66, 173-187.
- Bulirsch, R. and J. Stoer, 1966. Numerical treatment of ordinary differential equations by extrapolation methods, Num Math, 8, 1-13.
- Chernov, L. A., 1960. Wave Propagation in a Random Medium. McGraw-Hill, New York, 168 pp.
- Chou, C. W., and Booker, J. R., 1979. A Backus - Gilbert approach to inversion of travel time data for three dimensional velocity structure. Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 59, 325-344.
- Chung, W.Y., and H., Kanamori, 1979. Subduction process of a fracture zone and aseismic ridge, Geophys. Jour. Roy. Astr. Soc. 54, 221.
- Crosson, R. S., 1976a. Crustal structure modeling of earthquake data. 1. Simultaneous least squares estimation of hypocenter and velocity parameters, Jour. Geophys. Res., 81, 3036-3046.
- Crosson, R. S., and Koyanagi, R. Y., 1979. Seismic velocity structure below the island of Hawaii from earthquake data, Jour. Geophys. Res., 84, 2331-2342.
- Guer, M., et Bayer, R., 1980. Fortran routines for linear inverse problems, Geophys. (sous presse).

- Dantzig, G. B., 1963. Linear programming and extensions, Princeton University Press.
- Der, A., R. Massé, and M., Landisman, 1970. Resolution of surface waves at intermediate distances, *Jour., Geophys. Res.*, 75, 3399-3409.
- Dewey, J. W., 1972. Seismicity and tectonics of Western Venezuela. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 62, 1711-1751.
- Douglas, A., 1967. Joint epicentre determination, *Nature*, 215, 47-48.
- Eaton, J. P., 1969. HYPOLAYR, a computer program for determining hypocenters of local earthquakes in an earth consisting of uniform flat layers over a half space, USGS Open-file Rept., 155 pp.
- Ellsworth, W. L., and Koyanagi, R. Y., 1977. Three-dimensional crust and mantle structure of Kilauea Volcano, Hawaii. *Jour. Geophys. Res.*, 82, 5379-5394.
- Engdahl, E. R., 1973. Relocation of intermediate depth earthquakes in the central Aleutians by seismic ray tracing, *Nature*, 245, 32-25.
- Engdahl, E. R., and Lee, W. H. K., 1976. Relocation of local earthquakes by seismic ray tracing, *Jour. Geophys. Res.*, 81, 4400-4406.
- Everden, J.F., 1969. Precision of epicenters obtained by small numbers of world wide stations *Bull., Seis., Soc. Am.*, 59, 1365-1398.
- Fitch, T. J., 1975. Compressional velocity in source regions of deep earthquakes : an application of the master event technique, *Earth planet. Sci. Lett.*, 26, 156-166.
- Fitch, T. J. and Muirhead, K. J., 1974. Depths to larger earthquakes associated with crustal loading, *Geophys. J. R. astron. Soc.* 37, 285-296.
- Franklin, J. N., 1970. Well-posed stochastic extensions of ill-posed linear Problems, *Jour. Math. Anal. Appl.*, 31, 682-716.
- Freedman, H.W., 1967. A statistical discussion of P residuals from explosion, part II, *Bull., Seis., Soc. Am.*, 57, 545-561.
- Garmany, J., Orcutt, J. A. and Parker, R. L., 1979. Travel time inversion : A geometrical approach, *J. G. R.* 84 B7, 3615-3622.
- Geiger, L., 1910. Herdbestimmung bie erdbeben aus den ankunftszeiten, *K. Gessel.* Wiss. Goett, 4, 331-349.
- Gilbert, J.F., 1971. Ranking and winnowing gross Earth data for inversion and resolution, *Geophys., Jour., Roy., Ast., Soc.*, 23, 125-128.
- Golstein, E., Youdine, D., 1973. Problèmes particuliers de la programmation linéaire. *Mir. Moscou.*
- Goula, X., 1978. Structure du manteau superieur dans la partie convexe de l'arc des Nouvelle Hebrides. Thèse 3^e cycle, Université de Grenoble.
- Goula, X., and Pascal, G., 1979. Structure of the upper mantle in the convex side of the New Hebrides island arc, *Geophys., J. R., Astro., Soc.*, 58, 145-167.
- Hasegawa, A., N. Umino, and A. Takagi, 1978. Double-planed deep seismic zone and upper mantle structure in the northeastern Japan arc, *Geophys. J.* 54, 281-296.
- Haessler, H., and T. Modiano, 1981. Unpublished data.
- Herrin, E., Chairman, 1969. Seismological tables for P phases, *Bull., Seis., Soc., Am.*, 58 1193-1294.
- Hirahara, K., 1977. A large scale three-dimensional seismic structure under the Japan Islands and the Sea of Japan. *J. Phys. Earth*, 25, 393-417.
- Hirahara, K., and Mikumo, T., 1980. Three-dimensional seismic structure of subducting lithospheric plates under the Japan Islands. *Phys. Earth Planet. Interiors*, 21, 109-119.
- Householder, A. S., 1964. The theory of matrices in numerical analysis, p 123. Blaisdell Publishing Company. New York.
- Huestis, S. P. and Parker, R. L., 1977. Bounding the thickness of the oceanic magnetized layer, *J. G. R.* 82, n° 33, 5293-5303.
- Huestis, S. P., 1979. Extremal temperature bounds from surface gradient measurements, *Geophys. J. R. astron. Soc.* 58, 249-260.
- Parker, R. L., 1975. The theory of ideal bodies for gravity interpretation *Geophys. J. R. astron. Soc.* 42, 315-334.
- Parker, R. L., 1977. Understanding inverse theory. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 5, 35-64.
- Pascal G., Isacks, B. L., Barazangi, M. and Dubois, J., 1977. Precise relocations of earthquakes and seismotectonics of the New Hebrides Island Arc, soumis au *Géophys. J. R. Astron. Soc.*
- Pavlis, G.L., and Booker, J.R., 1980. The mixed discrete-continuous inverse problem: application to the simultaneous determination of earthquake parameter and velocity structure, *Jour., Geophys. Res.*, 85, 4801-4810.
- Pereyra, V., Lee, W. H. K., and Keller, H. B., 1980. Solving two-point seismic ray-tracing problems in a heterogeneous medium : Part I. A general adaptive finite difference method. *Bull. Seism. Soc. Am.* 70, 79-99.
- Rao, C. R., 1965. Linear Statistical Inference and Its Applications, Wiley, New York, 522 pp.
- Reasenberg, P., Ellsworth, W., Walter, A., 1980. Teleseismic evidence for a low-velocity body under the Coso geothermal area, *Jour., Geophys. Res.*, 85, 2471-2483.
- Reid, J. K., 1975. Sparse in core linear programming in lecture note in mathematics Vol 506 p 176-186, Springer-Verlag.
- Sabatier, P. C., 1977a. Postivity constraints in linear inverse problems, I General theory. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 48, 415-422. II Applications. *Geophys. J. R. astr. Soc.* 48, 443-469.
- Safon, C., Vasseur, G., et Cuet, M., 1977. Some applications of linear programming to the inverse gravity problem, *Geophys.*, 42, p 1215-1229.
- Sengupta, M. and M. N. Toksöz, 1976. Three-dimensional model of seismic velocity variations in the Earth's mantle, *Geophys. Res. Lett.*, 3, 84-86.
- Sheridan, R.E., J.R., Grow, J.C., Behrendt, and K.C. Bayer, 1979. Seismic refraction study of the continental edge off the eastern United States, *Tectonophysics*, 59, 1-26.
- Spencer, C. and D. Gubbins, 1980. Travel-time inversion for simultaneous earthquake location and velocity structure. Determination in laterally varying media. *Géophys. J. R. Soc.*
- Thurber, C.H., and Ellsworth, W.L., 1980. Rapid solution of ray tracing problem in heterogeneous media, *Bull., Seis., Soc., Am.*, 70, 1137.
- Wesson, R. L., 1971. Travel-time inversion for laterally inhomogeneous crustal velocity models. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 61, 729-746.
- Wiggins, R. W., 1972. The general linear inverse problem : implications of surface waves and free oscillations for earth structure, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 10, 251-285.
- Zandt, G., 1978. Study of three-dimensional heterogeneity beneath seismic arrays in central California and Yellowstone, Wyoming. Ph. D. Thesis, Mass. Inst. Tech.

- Husebye, E. S., A. Christofferson, K. Aki, and C. Powell, 1976. Preliminary results on the 3-dimensional seismic structure of the lithosphere under the USGS Central California seismic Array. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 46, 319-340.
- Isacks, B.L., 1979. Tilt measurements in the New Hebrides island arc: search for aseismic deformation related to earthquake generation in a major zone of lithosphere subduction, Semi-annual techn. reports, n°4, n°5, Cornell University, Ithaca, N.Y.
- Iyer, H. M., Evans, J. R., Zandt, G., Stewart, R. M., Coakley, J. M., and Roloff, J. N., 1981. A deep magma body under the Yellowstone Caldera. *Wyming: Delineation interpretation*, Submitted to *Geol. Soc. Am. Bull.*
- Jackson, D. D., 1972. Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data, *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 28, 97-109.
- Jackson, D. D., 1978. Linear inverse theory with a priori data, in press.
- Jackson, J., and T. J. Fitch., 1979. Seismotectonics implications of relocated aftershock sequences in Iran and Turkey. *Geophys. J., R., Astro. Soc.*, 57, 209-229.
- Jacob, K. H., 1970. Three-dimensional seismic ray tracing in a laterally heterogeneous spherical earth, *J. Geophys. Res.*, 75, 6675-6689.
- James, D.E., I.S., Sacks, E., Lazo, and P., Aparicio, 1969. On locating earthquakes using small network, *Bull., Seis., Soc., Am.*, 59, 1201-1212.
- Jeffreys, H., 1939. *Theory of Probability*, Oxford: Clarendon Press, p 160.
- Jeffreys, H. and K. E. Bullen, 1958, *Seismological Tables*. Brit. Assn. Gray-Milne Trust, 50 pp.
- Jeffreys, H., 1967. "Theory of probability", Clarendon Press, Oxford.
- Johnson, T., and P. Molnar, 1978. Focal mechanism and plate tectonics of the south west Pacific, *Jour., Geophys., Res.*, 77, 5000-5032.
- Julian, B. R., 1970. Ray tracing in arbitrarily heterogeneous media. *Tech. Note 1970-45*, Lincoln Lab., Mass. Inst. Tech., 15 pp.
- Julian, B. R. and Gubbins, D., 1977. Three-dimensional seismic ray tracing. *J. Geophys.*, 43, 95-113.
- Keller, and al., 1974. Why and where great thrust earthquakes occur along island arcs, *Jour., Geophys., Res.*, 79, 4889-4900.
- Kuhn H. W., Quandt, R. E., 1963. An experimental study of the simplex method in : *Proceeding of Symposia in Applied mathematics*, Vol XV. Amer. Math. Soc. Providence p. 107-124.
- Lanczos, C., 1961. *Linear Differential Operators*, Chapter 3, Van Nostrand, London, 564 pp.
- Lawson, C. L. and R. J. Hanson, 1974. *Solving Least Squares Problems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 340 pp.
- Lee, W. H. K., and J. C. Lahr, 1972. HYP0 71 : A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, U.S. Geological Survey, Open File Report.
- Lee, W. H. K., and Lahr, J. C., 1975. HYP0 71 (revised) : A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. USGS Open file rept. 75-311. 166 pp.
- Lentini, M., and Pereyra, V., 1977. An adaptive finite difference solver for nonlinear two-point boundary problems with mild boundary layers. *SIAM J. Numer. Anal.*, 14, 91-111.
- Levenberg K., 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least-squares. *Quart. Appl. Math.*, 2, 164-168.
- Luvendyk, B.P., Bryan, W.B. and Jezek P.A., 1974. Shallow structure of the New Hebrides island arc. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 85, 1287-1300.
- Marquardt, D. W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, 11, 431-441.
- Menke, W. H., 1977. Lateral inhomogeneities in P velocity under the Tarbela array of the Lesser Himalayas of Pakistan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 67, 725-734.
- Modiano, T., 1980. Sismotectonique des pyrennees occidentales. Etude détaillée du contenu spectral des ondes de volume dans la région focale, Thèse 3^e cycle, Université de Grenoble.

POUR UNE MEILLEURE APPROCHE DE CET OUVRAGE

Cette thèse de Jean-Robert Grasso, thèse élaborée s'il en fut, recrée les conditions phénoménologiques d'un univers purement utopique où se mêlent, dans ses emprunts aux recherches les plus récentes utilisant le boulier chinois, la table traçante et l'or-phéon périgourdin, à la fois la plénitude de la programmation linéaire et la légèreté de l'inversion stochastique akienne. Cette synthèse, qui s'inspire donc d'une démarche volontairement hermétique, dépasse cette tendance sur sa gauche, et légèrement de biais dans le cas d'hypothèses statistiques, pour s'hypertrophier en une densité apocalyptique où l'on devine les obsessions de l'unicité de la Solution, de l'imagerie tridimensionnelle et des malabars.

Cette thèse d'accès difficile très (trop, peut être) en avance sur son temps, semblera rébarbative au lecteur qui y sera confronté pour la première fois, mais, à la 258^{ème} lecture un charme étrange vous saisit; il vous empoignera brutalement vers la 572^{ème} lecture pour ne plus vous lâcher, résistant même à l'eau bouillante et aux dissolvants gras.

Sébastien Japrisot

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le 5 janvier 1981

Le Président de la thèse

Gr.

Vu, et permis d'imprimer,

Grenoble, le 13 janvier 1981

Le Président de l'Université
Scientifique et Médicale

